Федеральное агентство научных организаций

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Уральское отделение Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук

# Этюды о механике

**Пермь, 2017**

**УДК [539.3+532.5](063)**

Ответственный редактор
академик РАН В.П. Матвеенко

Рецензенты
д.ф.-м.н. проф. Фрейдин А.Б.
д.ф.-м.н. проф. Трусов П.В.

**Этюды о механике –** Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2017. – 193с.

ISBN

В сборнике представлены статьи по результатам выполненных в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук исследований, в которых в доступной форме рассматриваются вопросы современной механики сплошных среди ее приложения в других областях знаний.

В сборнике представлены статьи, связанные с решением широкого класса междисциплинарных проблем от задач клеточной биологии до тектонофизики и описания течений галактического масштаба. Читатель может познакомиться с квалифицированным прогнозом развития науки и техники в области создания умных материалов, нанокомпозитов и высокопроизводительных вычислительных систем.

Сборник является продолжением направления «Механика сплошных сред» в рамках Третьего научно-просветительского форума «Ни дня без науки», посвященного памяти Сергея Петровича Капицы, проходившего в Перми 17–18 ноября 2016 г.

Материалы, представленные в сборнике, могут быть полезны научным работникам, а также студентам и аспирантам, специализирующимся в области механики сплошных сред.

ISBN

© ИМСС УрО РАН, 2017 г.
© Авторы, 2017 г.

# Содержание

*Предисловие* ..... 5

*Соколов Д.Д., Степанов Р.А., Фрик П.Г.*
Космический магнетизм приходит в лабораторию ..... 7

*Любимова Т.П., Шевцова В.М., Рыжков И.И.*
Разделение бинарных и тройных смесей посредством термодиффузии в условиях невесомости ..... 17

*Зуев А.Л., Костарев К.Г.*
Экспериментальное исследование особенностей концентрационно-капиллярной конвекции ..... 23

*Пшеничников А.Ф.*
Физические свойства и наноструктура магнитных жидкостей ..... 35

*Райхер Ю.Л., Столбов О.В.*
Мягкие магнитные эластомеры: гиганты магнитострикции ..... 41

*Юрлова Н.А.*
Умные материалы и конструкции: фантастика или реальность? ..... 55

*Севодина Н.В., Федоров А.Ю.*
Совершенствование методов определения прочности клеевых соединений на основе численного моделирования ..... 71

*Корепанов В.В.*
Численный анализ экспериментальных схем по обнаружению моментных эффектов при статических и динамических внешних воздействиях ..... 79

*Гаришин О. К.*
Атомно-силовая микроскопия как эффективный инструмент исследования структуры и механических свойств полимерных материалов на микро- и наноуровне ..... 89

*Пантелеев И.А., Наймарк О.Б.*
Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений ..... 99

*Цветков Р.В.*
Роль мониторинга сооружений и конструкций в нашей жизни ..... 117

*Гусев Г.Н., Матвеенко В.П., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П*.
Натурное испытание строительных сооружений – шаг к повышению деформационной безопасности ..... 125

*Гилева О.С., Фрейнд Г.Г., Орлов О.А., Либик Т.В., Герасимова Е.И., Плехов О.А., Баяндин Ю.В., Пантелеев И.А*.
Междисциплинарные подходы к ранней диагностике и скринингу опухолевых и предопухолевых заболеваний (на примере рака молочной железы) ..... 133

*Подтаев С.Ю., Мизева И.А., Смирнова Е.Н*.
Диагностика функционального состояния системы микроциркуляции на основе термометрии высокого разрешения ..... 139

*Зуев А.Л., Мишланов В.Ю., Судаков А.И., Шакиров Н.В*.
Изучение ионных, молекулярных и клеточных механизмов формирования электрического импеданса в биологических жидкостях и тканях ..... 149

*Морозов И.А., Свистков А.Л., Скачков А.П., Гилёва О.С., Ерофеева Е.С*.
Изучение влияния профессионального отбеливания на микроструктуру эмали человеческих зубов ..... 159

*Масич Г.Ф., Масич А.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н., Бобров А.В., Чугунов Д.П., Тирон Г.Г., Файзрахманов Р.А., Щапов В.А*.
Исследование и разработка процесса формирования региональной киберинфраструктуры на основе λ-grid-технологий ..... 165

# Предисловие

17–18 ноября 2016 года в Перми прошел третий научно-просветительский форум «Ни дня без науки», посвященный памяти Сергея Петровича Капицы – выдающегося российского ученого и просветителя.

Организатором форума по традиции стал Пермский научный центр УрО РАН совместно с Пермской научно-производственной приборостроительной компанией при поддержке Международного партнерства распространения научных знаний, Министерства образования и науки Пермского края, Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермского филиала Высшей школы экономики.

Цели прошедшего форума, как и предшествующих, – популяризация научной деятельности и научных знаний среди молодежи, приобщение учащихся к широкому информационному обмену в среде научной общественности, содействие развитию и рациональному использованию научного, инновационного и образовательного потенциала России.

С докладами на форуме выступили ведущие российские ученые, среди которых демидовский лауреат 2015 года академик М.Я. Маров, академики В.А. Черешнев и В.Л. Кожевников, члены-корреспонденты С.А. Тихоцкий и А.М. Кривцов, лауреат премии Президента Российской Федерации 2010 года в области науки и инноваций для молодых учёных «За высокие результаты в создании инновационных образовательных технологий, популяризации и распространении научных знаний» кандидат физико-математических наук Н.Н. Андреев, а вел заседания известный писатель и научный журналист В.С. Губарев.

Всего в работе форума приняло участие около 1 700 человек, в том числе более 500 студентов и аспирантов, 750 учащихся старших классов школ Пермского края, 400 студентов средних учебных заведений.

Тематика форума, посвященного в 2016 году будущему науки, была разнообразной и интересной как для представителей точных наук, так и для гуманитариев: исследования космоса, материаловедение и энергетика в XXI веке, геомеханика и новые технологии прогноза погоды, криптоэкономика, экологические проблемы и здоровье человека, парадоксы взаимного восприятия Запада и Востока, будущее речи, искусствоведческие вопросы.

В рамках форума проходил ряд мероприятий, среди которых – научный семинар «Механика сплошных сред», организованный Институтом механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН).

В настоящем издании собраны статьи по результатам выполненных в ИМСС УрО РАН исследований, в которых в доступной форме рассматриваются вопросы современной механики сплошных среди ее приложения в других областях знаний. Представленный материал будет интересен для широкого круга читателей и послужит делу популяризации механики, в первую очередь среди молодежи.

Издатели благодарят редакцию журнала «Вестник Пермского научного центра» за помощь в подготовке настоящего сборника.

*Академик РАН,*
*В.П. Матвеенко*

# Космический магнетизм приходит в лабораторию

Соколов Д.Д., Степанов Р.А., Фрик П.Г.

Мы привыкли к тому, что магнитные явления – прежде всего процессы в важных, но маленьких деталях всяких технических устройств. Они связаны с тонкими квантово-механическими процессами, а рассказы о магнитных явлениях пестрят таинственным и малопонятным словом *спин*. Оказывается, что магнетизм в космосе выглядит совсем по-другому. Астрономы установили, что очень многие небесные тела, например, Солнце или наша галактика (Млечный Путь) являются гигантскими магнитами. Характерные размеры магнитного поля сравнимы с размерами самого небесного тела, например, Солнца. Вещество, из которого состоит Солнце, солнечная плазма, очень горячее, а межзвездный газ в Млечном Пути очень разреженный. В таких условиях не приходится обсуждать возможность того, что магнитное поле связано с упорядочиванием спинов, как это происходит в ферромагнетиках. Очевидно, что космический магнетизм связан с какими-то процессами, принадлежащими к области классической физики, которую, надеемся, еще проходят в средней школе.

У космических магнитных полей есть еще одно важное отличие от привычных нам магнитных полей – они сравнительно очень сильные. Конечно, не стоит сравнивать непосредственно напряженности магнитного поля в домашнем приборе или на Солнце. Для тел очень разного масштаба приходится выбирать соразмерные им мерки магнитного поля. Лучше рассмотреть простой пример. Допустим, что нерадивый школьник прогулял занятия и, оправдываясь перед разгневанными родителями, говорит, что не смог дойти до школы потому, что магнитное поле около школы было слишком велико. Нетрудно предвидеть реакцию родителей: “Ты бы хоть потрудился придумать правдоподобную причину!” Напротив, для объяснения движений космических сред подобное объяснение выглядит вполне естественно – именно магнитное поле Земли мешает выброшенному Солнцем облаку плазмы (которое совсем не безопасно для жителей нашей планеты) достичь поверхности Земли.

Магнитное поле Земли – это, пожалуй, единственный пример космического магнетизма, который можно наблюдать невооружённым глазом. Для этого придется поехать в заполярье и посмотреть на полярное сияние. Во время него магнитное поле Земли визуализируется заряженными частицами, подобно солнечным лучам в пыльной комнате. Мы привыкли думать о том, почему магнитная стрелка показывает на север. Конечно, сама стрелка – маленький ферромагнетик. Его свойства определяются этими самыми спинами. Но почему магнитом является сама Земля и почему ее магнитный полюс примерно совпадает с географическим? Без этого магнитная стрелка была бы бесполезной. Конечно, на Земле есть месторождения железных руд, намагниченность которых кое-что вносит в геомагнитное поле. Таким образом, создаются некоторые магнитные аномалии, например, Курская магнитная аномалия (КМА). Образование таких аномалий – не только интересное, но и важное для народного хозяйства явление, однако, как показывает само название, магнитные аномалии лишь вносят небольшие искажения в общее (как говорят, главное) геомагнитное поле. Это поле формируется где-то в глубине Земли, а температура там достаточно высока для того, чтобы о ферромагнетиках не заходила и речь.

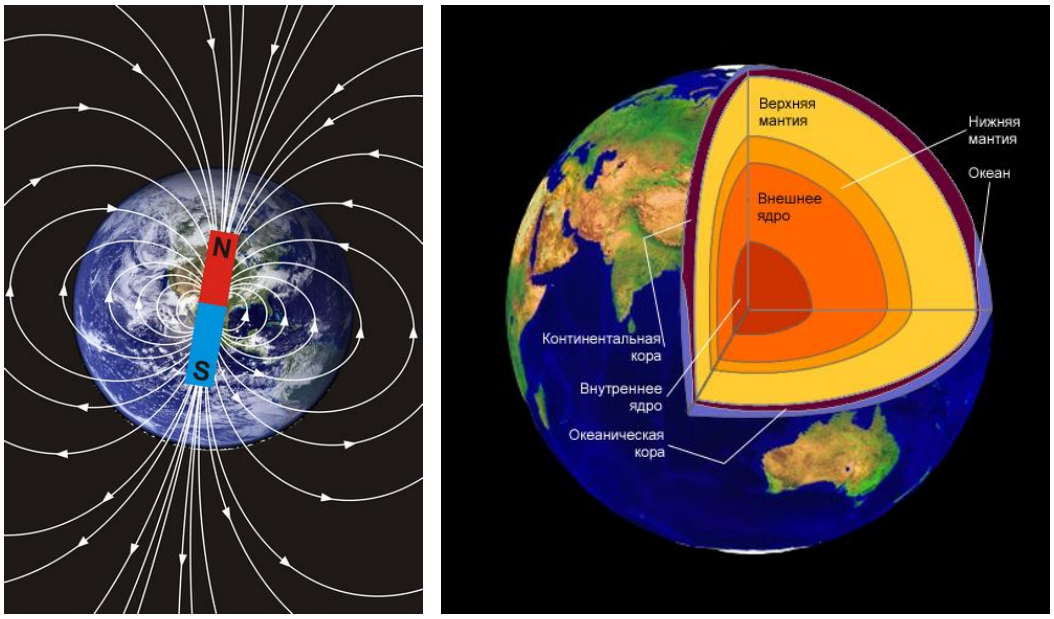



*Рис. 1. Магнитное поле Земли имеет такую же структуру, как поле плоского магнита, однако внутреннее строение Земли исключает наличие там постоянного магнита*

Какие же таинственные процессы приводят к образованию магнитных полей небесных тел? На самом деле выбор очень невелик. Мы находимся в области классической физики, а она знает только один процесс, который в принципе может приводить к росту магнитного поля. Это – явление электромагнитной индукции. В школе рассказывают (а раньше и показывали), что при движении проводящей рамки в магнитном поле в рамке начинает течь ток. Для нас важно сделать следующий шаг – этот наведенный (или, говоря по-научному, индуцированный) ток сам по себе создает магнитное поле. Можно надеяться, что это наведенное поле сложится с исходным так, чтобы общее магнитное поле шаг за шагом нарастало. В 1919 г. Дж. Лармор осознал, что это – единственный шанс объяснить магнитное поле Солнца не прибегая к фантастическим гипотезам о каких-то новых взаимодействиях (за такими гипотезами, конечно, дело не стало, но все они не выдержали сопоставление с реальностью).

Короткая заметка Лармора (в ней всего одна страница) оказалась первым шагом в изучении процесса самовозбуждения магнитного поля в движущихся проводящих средах (читай – на Солнце). Начало XX века – время развития автомобилизма. Автомобиль казался загадочным и притягивающим. Появились футбольные клубы «Динамо» и «Торпедо», станция метро «Динамо». Кстати, динамо – это какая-то штука в автомобиле, где вырабатывается электрический ток, а заодно и магнитное поле. По имени этого таинственного прибора назвали и новый раздел физики – теорию динамо.

Именно так и принято было говорить долгие годы *теория* динамо. Физика – да и химия тоже – наука экспериментальная. Можно долго и очень убедительно обсуждать упрощенные модели физических процессов, которыми оперирует теоретическая физика, но очень скоро говорят, что неплохо было бы подтвердить все эти домыслы экспериментально. При изучении динамо такого подтверждения пришлось ждать почти столетие.

Трудность в экспериментальной проверке идеи динамо состоит вот в чем. Представим себе небольшой и убедительный физический эксперимент – перережем провод, по которому идет электрический ток, освещающий комнату (при выполнении этого эксперимента следует подумать о том, чтобы тебя не ударило током). Исход эксперимента предсказуем – свет погаснет почти мгновенно, а заодно исчезнет и магнитное поле, порожденное током. Энергия магнитного поля перейдет в тепло

из-за, как говорят, омических потерь. Для того, чтобы работало динамо, индукционный эффект должен перебороть омические потери. Для того чтобы оценить относительную величину индукционных эффектов и омические потери, вводят т.н. безразмерное магнитное число Рейнольдса $Rm = vL/\nu_m$.

Числитель этой дроби содержит величины, с которыми связаны индукционные эффекты, т.е. скорость движения рамки v и ее размер $L$, а знаменатель – т.н. коэффициент магнитной диффузии $\nu_m$ , который обратно пропорционален удельной электрической проводимости среды. Для того, чтобы индукция победила диссипацию, нужно, чтобы магнитное число Рейнольдса было достаточно велико (расчеты показывают, что нужно как минимум $Rm = 17$).

Поиск возможной схемы динамо-эксперимента – прежде всего борьба за высокое магнитное число Рейнольдса. Возможности лабораторной физики здесь очень ограничены. Дело в том, что движущихся хорошо проводящих сред не так много. В астрономическом контексте речь не идет о твердых проводниках – в космосе твердые тела редкость, а те, что есть – твердые оболочки Земли, например, заведомо не создают интересных индукционных эффектов.

Среди жидкостей тоже выбор невелик. Электролиты – очень неважные проводники. Остаются жидкие металлы. Их немного. Ртуть очень дорогая и опасная, а главное очень тяжелая и не очень хороший проводник. Для того, чтобы разогнать большое количество ртути до необходимых скоростей нужна огромная энергия. Галлий (постпереходный металл, стоящий в таблице Менделеева под номером 31) вдвое легче ртути и становится жидким при почти комнатных температурах, тоже дорогой и не так хорошо, как хотелось бы, проводит электрический ток – ведь каждая единица, деленная на Ом и на метр (размерность удельной электропроводности в системе СИ) на счету! Следующий кандидат – натрий. Химику не нужно объяснять, что натрий – взрывоопасное вещество. К тому же он еще твердый при комнатных температурах, так что для получения жидкого натрия его придется нагревать до сотни градусов. Зато натрий сравнительно дешевый. Но главное – он проводит электрический ток лучше галлия и он очень легкий (кусок натрия, брошенный в воду, плавает по поверхности). Дальше идут уже металлы, становящиеся жидкими при высоких температурах. Это – уже последняя, отчаянная возможность, до использования которой люди пока не доходят.

*Рис. 2. Полярные сияния – отражения процессов в магнитосфере Земли*

Проводящие газы – это плазма. Из нее в огромном большинстве состоят небесные тела. Здесь гораздо больше возможностей. Не исключено, что в будущем нас ждут и лабораторные динамо-эксперименты с плазмой, но сейчас эти возможности еще в стадии обсуждения. Что касается солнечной плазмы и плазмы других небесных тел, то ее проводимость тоже не такая уж большая.

Итак, мы определились с возможным веществом для динамо-экспериментов: это натрий и, как вспомогательное вещество – галлий. Этот выбор был ясен уже в самом начале пути, полвека назад.

Что касается скорости движений, то возможности лабораторной физики явно проигрывают возможностям космической среды. Однако главное преимущество космосу дают огромные размеры. Лабораторная установка размером в 10 метров, движущаяся со скоростью 10 м/с - зрелище циклопическое, а в космосе это очень скромные цифры.

В итоге для Солнца магнитное число Рейнольдса достигает миллионов, а для современной лаборатории сотня – предел мечтаний. Причем достижение этих рубежей – результат многолетнего упорного труда. Тем не менее, это уже больше заветных 17, так что шансы есть.

Прежде чем говорить об истории конкретных экспериментов, обсудим, что, собственно, хочется в них узнать. В самом деле, пусть мы не можем проводить эксперименты с Солнцем и другими небесными телами, но наблюдать-то мы их можем. Зачем же тогда бороться за эксперимент?

Здесь вспоминается, как в уже, к сожалению, далекие студенческие годы нас мучили философскими проблемами физики. Из таких занятий выносишь твердое убеждение, что никаких философских проблем физики (а также химии и других наук) в природе не существует. Видимо, есть все же и исключения. На тех же занятиях нам рассказывали, чем отличается эксперимент от наблюдения – наблюдаешь то, что видно, а в эксперименте можно варьировать условия и выяснять те вопросы, которые интересны тебе, а не те, на которые отвечает сама природа. Конечно, все это верно с большими ограничениями – и в экспериментальной установке можно померить не все, а кое-что, и наблюдатели научились по-своему выспрашивать природу, но, тем не менее, наблюдение – не эксперимент. Посмотрим, как эта общая мысль преломляется в контексте задачи динамо.

Не все так просто с самим механизмом динамо. Во-первых, в Солнце, да и в Земле, нет, конечно, никаких металлических рамок с током – их работу должны воспроизводить потоки среды. Организовать нужное движение потоком жидкости значительно сложнее, чем двигать нужным образом провод. Однако это – далеко не главная проблема. Гораздо хуже то, что простые течения заведомо не могут работать как ди-

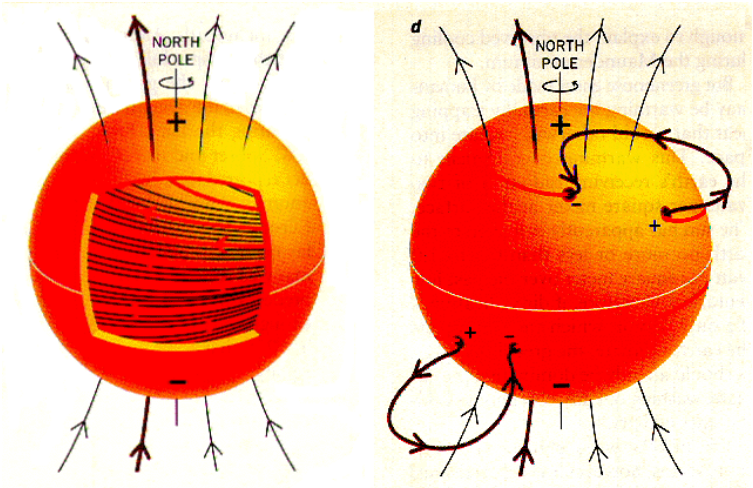



*Рис. 3. Так схематично можно представить себе магнитное поле Солнца и механизм образования солнечных пятен*

намо. Про это тоже рассказывают в школе под именем правила Ленца. По этому правилу магнитное поле, возникшее в проводящей рамке за счет явления электромагнитной индукции, направлено противоположно исходному магнитному полю и не усиливает его, а ослабляет. Поэтому движение одной рамки не может привести к самовозбуждению в ней магнитного поля.

На первый взгляд правило Ленца ставит крест на идее динамо. Однако хитроумные физики нашли лазейку в правиле Ленца. Рассмотрим две рамки, движущиеся в магнитном поле. Индукционный эффект в первой рамке ослабляет магнитное поле в этой же самой рамке, но может усиливать его во второй (конечно, если эта вторая рамка подходящим образом расположена). Это не противоречит правилу Ленца. Теперь можно добиться того, чтобы индукционный эффект во второй рамке усиливал магнитное поле в первой, но, конечно, ослаблял его во второй рамке. Можно надеяться, что совместная работа двух рамок приведет к тому, что в каждой из них индукция станет больше потерь и магнитное поле начнет лавинообразно нарастать.

Конечно, в принципе можно надеяться на все, что прямо не запрещено законами природы, но от надежды до уверенности расстояние заметное. На поле теоретической физики это расстояние удалось преодолеть в 60-ые годы прошлого века. Решающей здесь стала работа отечественного физика Юрия Пономаренко, который сумел предложить конкретное течение проводящей жидкости, которое достаточно сложно для того, чтобы в нем генерировалось магнитное поле, но достаточно просто для того, чтобы уравнение индукции, которое описывает поведение магнитного поля, можно было решить точно. Судьба первопроходцев в науке часто бывает трудной. Работа Пономаренко – одна из наиболее известных среди работ, посвященных динамо. Этого совсем нельзя сказать о самом Пономаренко. Его классическая работа осталась изолированным достижением в его научном творчестве, а его биография совершенно исчезла из памяти научного сообщества. Честно говоря, мы могли бы лучше помнить своих героев.

На самом деле течение, предложенное Пономаренко, не такое уж сложное – это бесконечная вращающаяся струя проводящей жидкости, окруженная проводящей средой. Замечательно, что в этом течении самое низкое из известных критическое магнитное число Рейнольдса. Течение Пономаренко достаточно удобно воспроизводить в лаборатории, так что идея Пономаренко стала одной из основных в динамоэкспериментах.

Сейчас уже экспериментально подтверждено, что течение Пономаренко (лучше сказать, течение, близкое к течению Пономаренко) действительно генерирует магнитное поле – мы подробнее расскажем об этом ниже. Однако на самом деле оно генерирует магнитное поле плохо, так что это поле растет очень медленно. В то же время прямые астрономические наблюдения показывают, что, скажем, на Солнце магнитные поля изменяются быстро. Каждый цикл солнечной активности, т.е. каждые 11 лет, солнечный магнитный диполь меняет знак на противоположный. Конечно, 11 лет – значительное время по меркам человеческой жизни, но для звезд это очень быстрые изменения. Ничего подобного динамо Пономаренко обеспечить не может. Причина этого в том, что в работе динамо Пономаренко магнитная диффузия играет не только разрушительную роль (вызывает омические потери), но и обеспечивает работу одного из контуров, в которых происходит индукция магнитного поля. Это – еще один тонкий эффект в нашей науке: векторная величина, т.е. магнитное поле, диффундирует не так, как скалярная величина, т.е. температура.

Для того чтобы магнитное поле изменялось быстро, так, как это бывает в солнечном цикле, необходим гораздо более сложный механизм, чем динамо Пономаренко. Такой механизм был предложен в 1955 году замечательным американским астрономом Юджином Паркером. Представим себе поле магнитного диполя, направленного

вдоль оси вращения Солнца. Поскольку солнечная плазма – хороший проводник, то магнитные линии двигаются вместе с солнечной плазмой, а Солнце вращается не как твердое тело (оно же не твердое!), а так, что разные его слои вращаются с различной угловой скоростью. Это называется дифференциальным вращением. В результате одни частицы солнечного вещества обгоняют другие, магнитные линии вытягиваются в азимутальном направлении, а из дипольного поля получается магнитное поле, которое наматывается на некоторый тор внутри Солнца – его так и называют тороидальным. Это – индукционный эффект в первом контуре. Он достаточно прост и в нем сомнений нет.

Для того, чтобы динамо заработало, нужно как-то превратить тороидальное магнитное поле в поле магнитного диполя (его называют полоидальным). Этого нельзя сделать простыми течениями. Паркер догадался, что для этого течения должны быть зеркально-асимметричными. В северном полушарии течения должны содержать больше вихрей, вращающихся в правую (по ходу общего движения вихря) сторону, а в южном полушарии – в левую. Оказывается, что именно так обстоит дело во вращающемся теле, в котором есть конвективные потоки и переменная плотность. В этом случае действительно в одном полушарии вихри вращаются в основном вправо, а в другом – влево. И действительно оказывается, что если эта среда проводящая, то возникает магнитное поле, направленное по электрическому току (а не перпендикулярно к нему, как учат в школе), а это, в свою очередь, приводит к искомому превращению тороидального поля в полоидальное.

Паркер аргументировал свои мысли с помощью аналогии с циклонами на Земле. Эта аргументация выглядела не очень убедительно, хотя сейчас мы знаем, что он совершенно правильно угадал нужные уравнения и характер их решения. Подвести под эти соображения базу в виде продуманных уравнений, вытекающих обозримым образом из уравнений Максвелла, а не из шатких аналогий, удалось на десятилетие позже, в замечательной работе физиков из ГДР Макса Штеенбека, Фрица Краузе и Карл-Хайнца Рэдлера.

Макс Штеенбек был колоритным человеком. В молодости – ведущий инженер фирмы Сименс – он изобрел массу занятных вещей, как например магнитную торпеду. Она взрывается не при первом контакте с корпусом корабля, как другие торпеды, а тогда, когда проникнет внутрь корпуса. Разрушения при этом возрастают многократно. Изобретение произвело глубокое, но какое-то не очень благоприятное впечатление на противников Германии по II Мировой войне, так что десятилетие после конца войны пришлось провести в специальном закрытом институте («шарашке») в Сухуми. Потом его отпустили в ГДР и сделали президентом Академии наук этой страны. Сделали заслуженно: обсуждаемая работа – наиболее яркое достижение физики ГДР. Гораздо более молодые соавторы Штеенбека вспоминают, что он – заядлый курильщик – говорил им, куря сигару “Вы живете как свиньи, те тоже не курят!” Работа была написана тяжелым языком, конечно, по-немецки и формулы были набраны готическим шрифтом (очень помогает при ссылках!) и опубликована в малоизвестном журнале. Тем не менее, она скоро была переведена на английский язык и стала очень популярной среди специалистов. В частности, из ее тяжелых обозначений в науку пришло название альфа-эффект для преобразования тороидального магнитного поля в полоидальное: в статье все возникающие величины были последовательно перенумерованы буквами греческого алфавита. Нельзя сказать, чтобы это было удачное обозначение, но у истории своя логика!

Конечно, роль альфа-эффекта подтверждается математическими выкладками, но одними выкладками очень трудно убедить физиков. Ясную физическую картину того, как можно без участия магнитной диффузии генерировать магнитное поле, дал замечательный отечественный физик, трижды Герой социалистического труда, один из

руководителей советской атомной программы Я.Б. Зельдович. Как видим, его основная область деятельности тоже была не совсем мирная, так что из страны Якова Борисовича выпускали только в самом крайнем случае, так что каждая поездка за границу была для него большим событием. Поэтому на симпозиуме в Кракове уже в 70-ых он был в состоянии легкой эйфории, так что, отвечая на вопрос о том, как же может работать динамо – ведь для этого нужно на месте, где была одна магнитная линия, получить две, а эти линии приклеены к жидкости – он проделал следующий трюк. Он попросил у одного из слушателей его доклада, сидевшего в первом ряду, дать ему брючный ремень и показал на этом ремне, как течение сначала вытягивает магнитную петлю (это делает дифференциальное вращение), а потом сворачивает ее в восьмерку и складывает вдвое (здесь уже нужен альфа-эффект – ведь надо сделать зеркально-асимметричную операцию). История умалчивает о том, что стало с брючным ремнем и его хозяином, но эту иллюстрацию усвоили все специалисты, а ее автор не нашел нужным описать ее в какой-нибудь специальной работе. Видимо, казалось, что беглого устного замечания на заграничной конференции вполне достаточно.

Забавно, что все эти три эпизода были совершенно независимы, немецкие физики не читали Паркера и т.д. Наука может развиваться совершенно алогично, люди придумывают решения еще ненаписанных уравнений, делают все для того, чтобы их идеи не стали достоянием публики, но из всего этого со временем вырастает последовательная наука.

У альфа-эффекта есть и еще одна важная черта. В окружающем нас мире почти нет явлений, связанных с зеркально-асимметричными средами, пожалуй, только закон Бэра в географии (о том, какой берег подмывает река в данном полушарии), да то, что органические молекулы в живом веществе имеют только одну ориентацию, напоминают нам о роли зеркальной асимметрии. Только в самое последнее время физики стали делать зеркально-асимметричные заполнения волноводов и пробовать извлечь из этого интересные эффекты. Совершенно по-другому обстоит дело в микромире. Оказывается, есть реакции между элементарными частицами, которые по-другому идут после отражения в зеркале. В это трудно поверить, но несколько нобелевских премий за эксперименты в этой области, проведенные в 60-ых годах, убеждают нас в том, что это действительно так (тех, кто способен читать статьи по физике высоких энергий, убеждают сами эксперименты). Оказывается, что и в физике космических сред, как и в микрофизике, зеркальная асимметрия тоже играет решающую роль! В современной физике любят говорить о том, что космология смыкается с микрофизикой. При изучении динамо такое смыкание тоже, как мы видим, происходит, но каким-то неожиданным образом.

Видимо, сказанного достаточно для того, чтобы читатель почувствовал – изучение динамо полно совершенно нестандартными идеями, которые диковато выглядят для человека, не соприкасающегося близко с этой областью физики. При этом список нестандартных идей из теории динамо легко продолжить – только гуманное отношение к читателю удерживает нас от этого.

Конечно, нет никакой надежды, что люди поверят до конца в этот букет нестандартных идей, если его не поддержать хоть какими-то экспериментами.

Это было понятно уже в 60-ых годах, когда Макс Штеенбек, наверное, используя свое служебное положение, договорился с советскими физиками о постановке первого динамо-эксперимента. Надо сказать, что магнитная гидродинамика, к которой по своему смыслу должен был принадлежать этот эксперимент, была одной из тех областей, в которых советская физика была особенно сильна. Эта область науки пользовалась внимание правительства, которое нашло время принять специальное решение о том, что центром исследований в области магнитной гидродинамики должна была стать Латвийская ССР, а именно, Институт физики Латвийской ССР в

Саласпилсе под Ригой. Сейчас уже трудно понять, что двигало людьми, принимавшими это решение. Насколько мы знаем, в Латвии нет крупных месторождений цветных металлов, цветной металлургии и других областей промышленности, где могли бы найти применение открытия физиков этого института. С тех пор прошло много лет, теперь Рига – далекое зарубежье. Неожиданный подарок Советского правительства обогатил Латвийскую республику выдающимся институтом, с которым не совсем понятно, что делать, а у России, в которой полно потенциальных потребителей этих исследований, отобрал соответствующую научную инфраструктуру.

В каждой из двух стран физики по-своему отреагировали на возникшую проблему. Латвийские физики подружились с немецкими физиками и за несколько дней до конца прошлого тысячелетия впервые получили самовозбуждение магнитного поля в потоке жидкого натрия. Это был действительно циклопический эксперимент. Тонны натрия прокачивались мощными насосами через систему труб и емкостей, занимавших трехэтажное здание. Много лет ушло на решение самых разнообразных технических проблем, хотя бы на устранение пробок при течении натрия. Тем не менее, успех был достигнут и работа нашла мировое признание.

Интересно, что буквально через несколько дней самовозбуждение магнитного поля было получено в другом динамо-эксперименте, на этот раз чисто немецком, который проводили в Карлсруэ. Эта работа тоже приобрела мировую известность.

Российским физикам пришлось начинать с нуля – в стране была разруха. Впрочем, и в Латвии, наверное, было нелегко. Некоторый задел был у физиков Института механики сплошных сред в Перми. Тем не менее, на исходе 90-ых было принято решение начать в институте экспериментальные работы по магнитной гидродинамике жидких металлов при больших магнитных числах Рейнольдса, ориентированных на изучение процесса динамо. Конечно, эта фундаментальная научная проблема – совсем не единственное, чем занимается лаборатория. Она делает много прикладных работ, которые дают результаты, прямо сейчас использующиеся на промышленных предприятиях, в том числе и на тех, которые находятся в Пермском крае, а некоторые представляют интерес и для зарубежных партнеров.

Важно было то, что работа лаборатории не замыкается на этих прикладных работах. Наоборот, прикладные работы гармонично сочетаются с изучением такого фундаментального явления, как динамо.

При планировании динамо-эксперимента в Перми было ясно, что в обозримом будущем не удастся соревноваться с немецкими, а потом и с французскими, и с американскими физиками в размерах установки, т.е. в том L, которое входит в магнитное число Рейнольдса – просто не хватит денег. К счастью, удалось найти свежий подход к задаче. Прежние установки создавали течение, которое в принципе можно поддерживать неопределенно долгое время. Для этого насосы разгоняют жидкий натрий. Это требует больших затрат энергии – вязкость натрия маленькая, так что разными турбинами разогнать его нелегко.

Идея пермской установки в другом – ее действие импульсное, а быстрое течение возникает лишь на короткое время. Берется тороидальная емкость и долго разгоняется сравнительно маломощным мотором, а потом быстро тормозится мощными тормозами. При этом жидкость внутри емкости продолжает свое движение – вязкость-то маленькая – а стоящие в канале диверторы формируют нужный профиль потока. Конечно, такой поток довольно быстро теряет скорость, но за это время многое удается померить.

Лаборатория начинала работу тогда, когда самовозбуждение магнитного поля еще не было достигнуто нигде в мире, но после успехов в Риге и в Карлсруэ стало ясно, что нужно искать новые ориентиры. Это же пришлось делать и другим группам, работающим с динамо-экспериментами, в частности, нашим французским коллегам из Лиона.

При решении этой стратегической проблемы было важно увидеть, что динамо-эксперименты в чем-то родственны разнообразным работам по электротехнике и электронике. Во всех этих случаях речь идет о построении сложного прибора, который обеспечивает желаемое поведение электромагнитного поля. При этом возникает два типа задач. Одни задачи – как сделать из известных материалов то, что хочется и как оно будет себя вести, а другие – каковы свойства различных материалов и почему они такие. В физике это два очень разных класса задач. Никому не приходит в голову одновременно разрабатывать телевизор и выяснять, почему медь – хороший проводник и какова ее электропроводность. В астрофизике по многим причинам эти две области деятельности практически не разделены, так что во многих теоретических работах по динамо одновременно вычислялся, скажем, альфа-эффект и выяснялось, какие конфигурации магнитного поля генерируются в солнечной плазме с таким альфа-эффектом. Возникающие при этом трудности легко вообразить, представив себе команду разработчиков нового телевизора, которые заодно ставят разные материаловедческие эксперименты со своим детищем.

Командам, работающим в области динамо-экспериментов, наконец удалось достичь разумного разделения труда в этой области. Лионские физики научились воспроизводить на своей установке разнообразные режимы работы динамо, которые воспроизводят поведение магнитного поля на Солнце и на Земле. В этих небесных телах временное поведение магнитных полей очень различно. Оба типа поведения удалось воспроизвести в Лионе, но пусть об этом напишут их авторы.

В Перми же пошли по другому пути – стали измерять разнообразные коэффициенты переноса магнитного поля в турбулентном потоке. В частности, впервые в мире удалось измерить сам альфа-эффект, т.е. основную величину, с которой связана генерация магнитного поля. Этот результат тоже общепризнан в кругу специалистов.

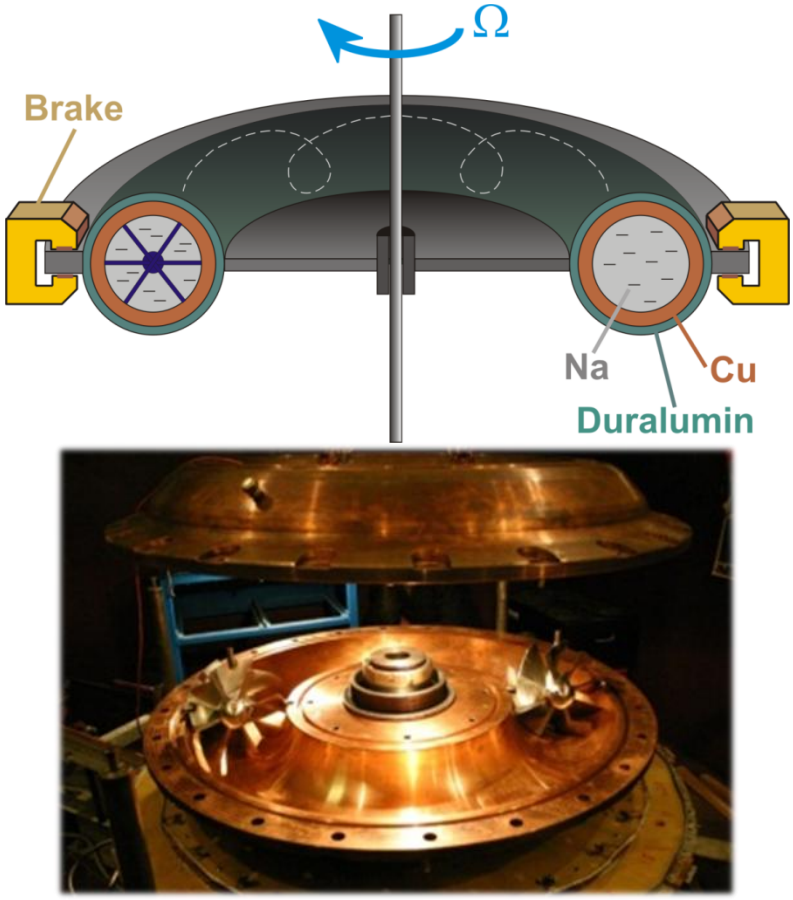



*Рис. 4. Схема пермского динамо-эксперимента и сам тороидальный канал*

Отметим, что специалисты разных стран, работающие в области динамо-эксперимента, тесно сотрудничают друг с другом. Совсем не только пермские физики ездят в Лион, но и французские физики бывают в Перми, вместе с пермскими коллегами проводят измерения на пермских установках, публикуют совместные работы…

Наша область еще находится в начале своего развития. Пройдены лишь первые рубежи, достигнуты первые результаты, пережиты первые разочарования. Хочется думать, что впереди много новых побед, а их не бывает без поражений.

# Разделение бинарных и тройных смесей посредством термодиффузии в условиях невесомости

Любимова Т.П., Шевцова В.М., Рыжков И.И.

Современные технологии производства и обработки материалов, добычи полезных ископаемых, прогнозирования природных явлений требуют адекватного описания процессов переноса тепла и массы в жидкостях и газах. Последние зачастую представляют собой смеси различных веществ с большим числом компонент. Если концентрация компонент в разных частях смеси различна, то в ней возникает процесс диффузии, направленный на устранение неоднородностей путем перемешивания за счет теплового движения молекул. При этом происходит перенос вещества из области больших концентраций в область меньших. Скорость перемешивания определяется значением *коэффициента диффузии.* При наличии неоднородностей температуры в смеси возникает явление термодиффузии (или эффекта Соре) – переноса вещества на молекулярном уровне под действием разности температур (рис. 1). Различные компоненты смеси могут перемещаться как в направлении понижения, так и повышения температуры. Интенсивность и направление перемещения компоненты определяются величиной и знаком *коэффициента Соре.*

Эффект термодиффузии играет важную роль во многих природных явлениях и технологических процессах. Он может оказывать влияние на распределение углеводородов в природных месторождениях благодаря наличию геотермального градиента температуры [1]. Эффект термодиффузии также используется для разделения изотопов в жидких и газовых смесях [2], для идентификации и разделения компонент нефти, оценке эффективности лекарственных средств, нанесения покрытий на металлические изделия. Для описания и прогнозирования процессов тепломассообмена в смесях необходимо знание коэффициентов диффузии и Соре, которые измеряют экспериментально. Измерение указанных коэффициентов в жидких смесях из двух и трех компонент является основной целью космического эксперимента ДСМИКС, проводимого в условиях микрогравитации на Международной Космической Станции (МКС).

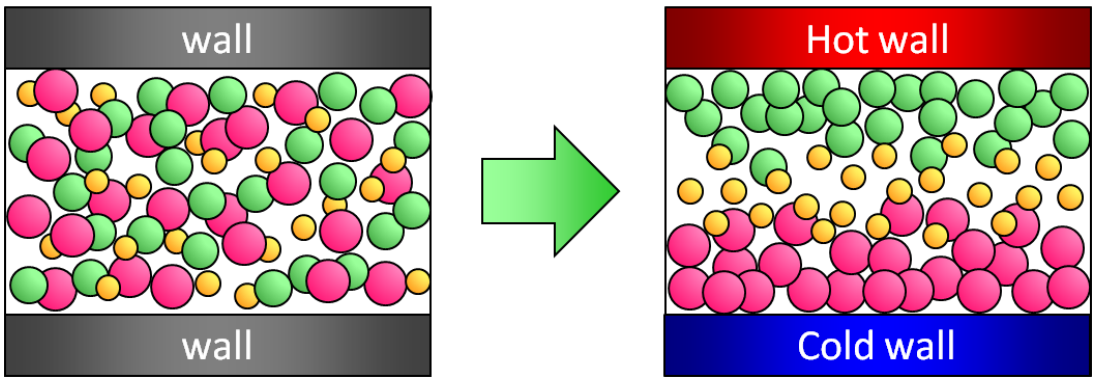



*Рис. 1. Перераспределение молекул тройной смеси под действием термодиффузии (схематическое изображение). Красным и синим цветами показаны горячая и холодная границы соответственно [1]*

## Идея и описание эксперимента

Для измерения коэффициентов диффузии и Соре в эксперименте ДСМИКС используют прямоугольную полость (ячейку), горизонтальные границы которой поддерживаются при различных постоянных температурах. Неоднородность температуры в смеси приводит к возникновению неоднородности концентрации под действием термодиффузии. Это, в свою очередь, вызывает обычную диффузию. После установления равновесия между процессами диффузии (перемешивания) и термодиффузии (разделения) в смеси между границами полости устанавливается постоянная разность концентраций компонентов $\Delta C_i$, которая пропорциональна приложенной разности температур $\Delta T$ [3]:

$$\Delta C_i = -S_{Ti}\Delta T\,.$$

Здесь $S_{Ti}$ – коэффициент Соре компонента *i*. Коэффициент диффузии может быть определен путем наблюдения того, как разность концентраций изменяется со временем, в то время как коэффициент Соре определяется по данным стационарного разделения согласно формуле

$$S_{Ti} = -\frac{\Delta C_i}{\Delta T}\,. \qquad (1)$$

В земных условиях нагрев осуществляется сверху для того, чтобы избежать возникновения конвекции (всплытия нагретой, более легкой жидкости и опускания холодной, более тяжелой жидкости под действием силы тяжести). Конвекция нарушает молекулярный перенос компонент и приводит к невозможности точного измерения коэффициентов диффузии и Соре. Она может возникнуть и при нагреве сверху, если более тяжелая компонента под действием термодиффузии накапливается вблизи верхней границы. Паразитное влияние конвекции может быть устранено путем проведения экспериментов в условиях невесомости, где обеспечивается чисто молекулярный перенос тепла и массы. Влияние конвекции особенно существенно для смесей с большим числом компонент, часть которых под действием термодиффузии концентрируется в более холодной области, а другая часть – в более горячей области.

Каждый сеанс эксперимента ДСМКС состоит из четырех основных этапов.

Этап 1. На верхней и нижней границах ячейки устанавливается постоянная температура и поддерживается до установления теплового равновесия.

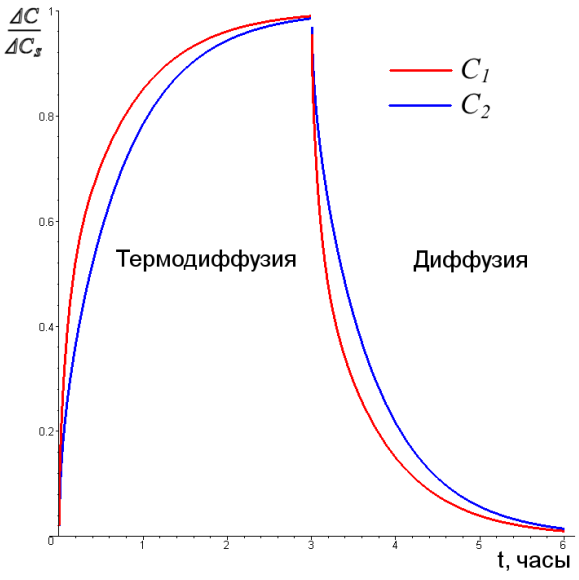



*Рис. 2. Схема этапов 3 и 4 (зависимость разности концентраций между верхней и нижней границей ячейки от времени)*

Этап 2. На верхней и нижней границах ячейки устанавливаются различные температуры. Через некоторое время в ячейке формируется линейное распределение температуры. Поскольку характерное время диффузии значительно больше характерного времени теплопроводности, концентрация смеси на этом этапе остается однородной (практически не изменяется).

Этап 3. После установления градиента температуры начинается процесс термодиффузионного разделения смеси, который продолжается до достижения системой стационарного состояния (рис. 2).

Этап 4. После достижения стационарного состояния разность температур снимается.

На обеих медных пластинах устанавливается средняя температура. Вследствие диффузионного перемешивания распределение концентраций со временем становится однородным (рис. 2).

Эксперимент ДСМИКС проводится с помощью аппаратуры SODI (инструмент оптической диагностики), размещенной в Герметичном контейнере с перчатками. Последний установлен в европейском модуле Коламбус на Международной космической станции. Все ячейки заполняются жидкими смесями на Земле и доставляются на МКС. Астронавт осуществляет монтаж аппаратуры (рис. 3), после чего эксперимент проводится в автоматическом режиме.

*Рис. 3. Астронавт Майк Хопкинс монтирует блок ячеек DCMIX в модуль SODI*

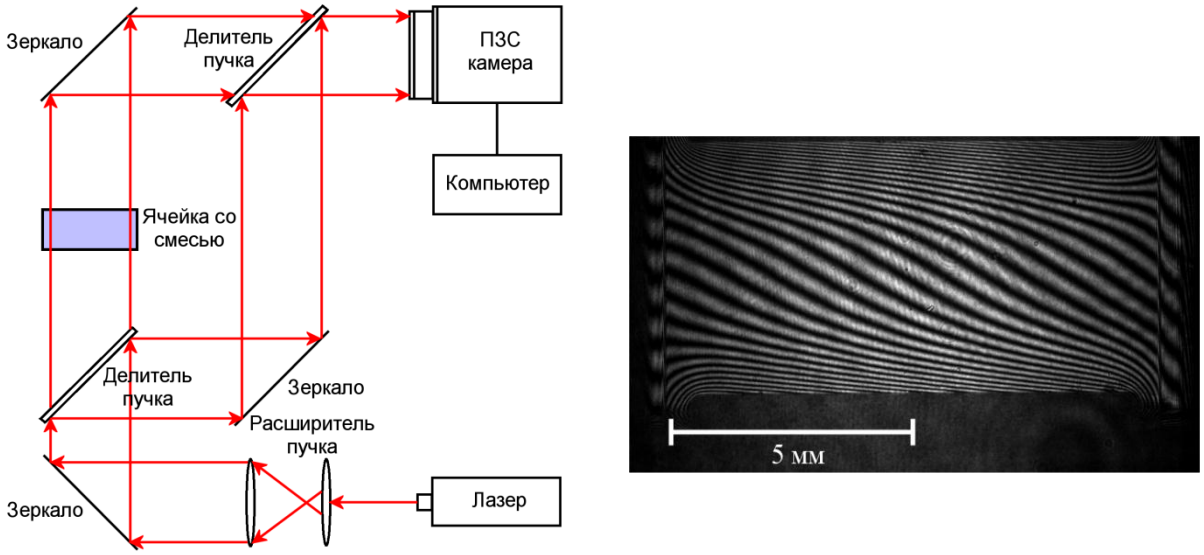
Для получения полей температур и концентраций используется оптическая интерферометрия (рис. 4а). Пучок лазерных лучей проходит через полость со смесью перпендикулярно градиенту температуры. Неоднородности температуры и концентрации в полости приводят к изменению показателя преломления лучей. Цифровая оптическая интерферометрия обеспечивает регистрацию изменения показателя преломления в пространстве и во времени. Регистрация интерференционных картин, получающихся при взаимодействии возмущенного пучка, проходящего через полость, с невозмущенным пучком, проходящим мимо полости (рис. 4б) в разные моменты времени, и последующая их обработка позволяют восстановить изменение полей температуры и концентрации во времени. Сопоставление этих данных с точным решением уравнений переноса тепла и массы позволяет определить коэффициенты диффузии и термодиффузии. Заметим, что поле температуры в полости устанавливается значительно быстрее, чем поле концентрации, так перенос тепла происходит гораздо быстрее, чем диффузия компонентов. Это позволяет разделить процессы переноса тепла и массы во времени.

Для определения концентраций компонент в бинарных смесях достаточно одного лазерного луча, но в случае тройных смесей необходимо использование двух лазерных лучей с различными длинами волн. Пусть $\Delta n_1$ и $\Delta n_2$ – изменения показателей преломления лучей с длинами волн $\lambda_1$ и $\lambda_2$ за счет изменения концентраций компонент $\Delta C_1$ и $\Delta C_2$. Для определения концентраций компонент тройной смеси нужно решить систему уравнений

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial n_1}{\partial C_1}\right)_{T_0,C_{20}} \Delta C_1 + \left(\frac{\partial n_1}{\partial C_2}\right)_{T_0,C_{10}} \Delta C_2 &= \Delta n_1 \\ \left(\frac{\partial n_2}{\partial C_1}\right)_{T_0,C_{20}} \Delta C_1 + \left(\frac{\partial n_2}{\partial C_2}\right)_{T_0,C_{10}} \Delta C_2 &= \Delta n_2 \end{aligned} \qquad (2)$$

Коэффициенты контрастности $\partial n_i/\partial n_j$, $i, j = 1, 2$, измеряются в отдельном эксперименте.

Для нахождения разностей концентраций $\Delta C_i$ в стационарном состоянии нужно решить систему уравнений (2), после чего коэффициенты Соре определяются по формулам (1). Однако, матрица, состоящая из коэффициентов контрастности, может быть плохо обусловленной (малые ошибки в измерении правых частей (1) приводят к большим ошибкам в решении). Доступные лазерные диоды внутри SODI (670 нм и 935 нм) подходят не для любых жидкостей и концентраций, поэтому предварительно проводятся измерения показателя преломления во всем пространстве концентраций для




*а* *б*

*Рис. 4. Схема экспериментальной установки для измерения коэффициентов диффузии и термодиффузии (а) и типичная интерференционная картина (б)*

двух указанных длин волн и определяется число обусловленности матрицы для различных составов смесей.

Коэффициенты Соре также могут быть определены по данным нестационарных измерений. В этом случае разности показателей преломления между верхней и нижней границами ячейки и соответствующие разности концентраций в (2) зависят от времени. Минимизация разности между экспериментальными кривыми и теоретическими зависимостями, полученными на основе точного решения уравнений переноса массы, позволяет определить коэффициенты диффузии и Соре. Для этого в работе использовалась комбинация метода наименьших квадратов и симплекс-метода Нелдера-Мида [4].

## Результаты эксперимента ДСМИКС–1

В рамках проекта ДСМИКС проводится измерение коэффициентов диффузии и Соре в жидких смесях из трех компонент. В серии экспериментов ДСМИКС–1, проведенном в 2011–2012 годах исследовались трехкомпонентные смеси углеводородов тетралин–изобутилбензол–додекан с различными массовыми долями компонент (5 ячеек) и бинарная смесь тетралин–додекан (1 ячейка) [4, 5]. Выбор указанных компонент обусловлен тем, что они являются представителями основных групп химических соединений, входящих в состав нефти (нафтеновые, ароматические, парафиновые). Общее время проведения каждого сеанса эксперимента составляло около 15 часов. Профили концентраций в смеси тетралин (80 %) – изобутилбензол (80 %) – додекан (10 %) в стационарном состоянии (в конце этапа Соре) показаны на рис. 5. Как видно, под действием термодиффузии концентрация тетралина возрастает у холодной границы, в то время как концентрация изобутилбензола и додекана повышается вблизи нагретой границы. Разность температур между стенками в этом сеансе составляла 10 градусов, средняя температура – 25 градусов Цельсия. По результатам измерений были получены следующие значения коэффициентов Соре: $S_T$ = (1,41±0,03)·10$^{-3}$ К$^{-1}$ (тетралин), $S_T$ = = (–0,59±0,07)·10$^{-3}$ К$^{-1}$ (изобутилбензол), $S_T$ =(–0,82±0,04)·10$^{-3}$ К$^{-1}$ (додекан) [4, 5].

## Результаты эксперимента ДСМИКС–2

В эксперименте ДСМИКС–2, проведенном в 2013–2014 гг., изучались диффузия и термодиффузия в трехкомпонентной смеси циклогексан–метанол–толуэн с различными массовыми долями компонент (5 ячеек) и бинарной смесью цик-

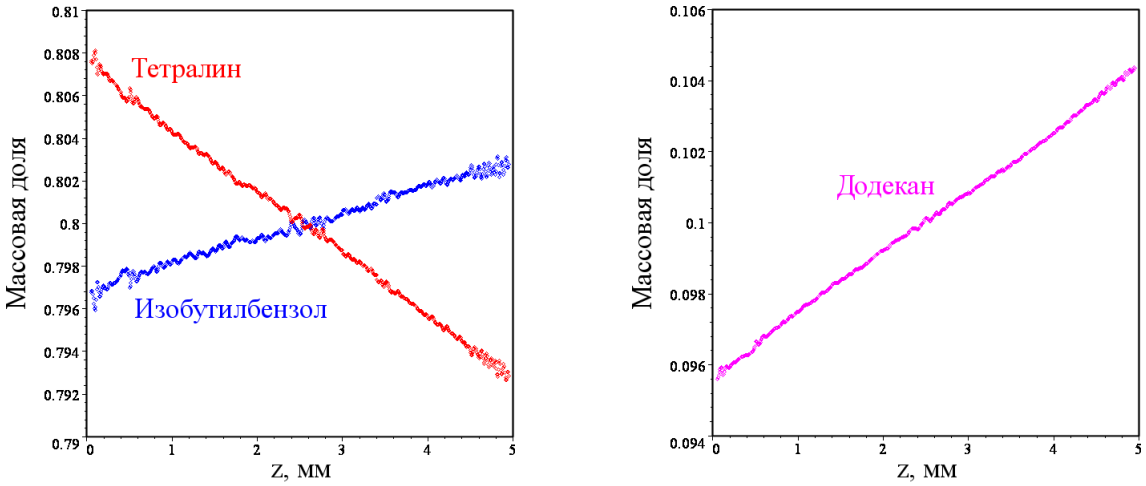



*Рис. 5. Профили концентраций в тройной смеси тетралин (80 %) – изобутилбензол (80 %) – додекан (10 %) в стационарном состоянии*

логексан – метанол. Предварительные наземные эксперименты показали, что термодиффузионное разделение указанной тройной смеси в широкой области начальных концентраций приводит к возникновению гравитационной неустойчивости в жидкости [6]. Более тяжелые компоненты концентрируются у нагретой (верхней) границы, что вызывает конвективное перемешивание, препятствующее измерению коэффициентов молекулярного переноса (диффузии и Соре). Это обусловливает необходимость проведения измерений в условиях микрогравитации, где вклад конвекции в тепломассоперенос пренебрежимо мал.

Рис. 6 показывает изменение величины числа обусловленности на плоскости концентраций компонент. Наилучшая область, выбранная для исследования лазерами из установки SODI, показана синим, наихудшая область – темно-красным. Пять экспериментальных точек для тройной смеси и одна для бинарной смеси выбраны как компромисс между хорошим числом обусловленности и лучшей совместимостью уплотняющих колец, используемых в ячейке, с рабочими смесями.

На рис. 7 представлены результаты обработки данных для ячейки с бинарной смесью толуэн-циклогексан. Показана зависимость коэффициентов Соре от концентрации и от температуры.

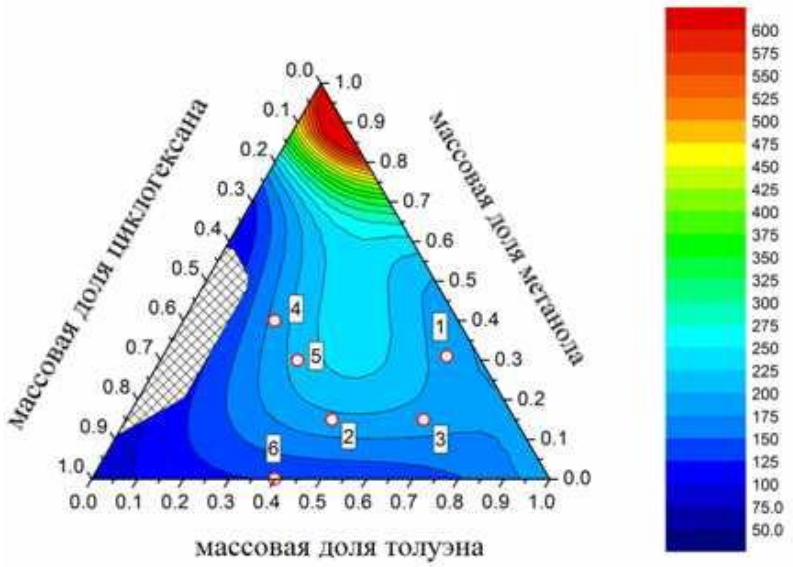



*Рис. 6. Изменение числа обусловленности на плоскости концентраций компонент для смеси в эксперименте ДСМИКС–2 и экспериментальные точки. Штриховкой обозначена область несмешивания*

## Заключение

Результаты измерений коэффициентов диффузии и Соре в космических экспериментах существенно пополняют известные данные о теплофизических свойствах смесей. Они будут использованы в качестве эталонных значений для наземных экспериментов (если соответствующий эксперимент может быть проведен на Земле). С фундаментальной точки зрения, эти результаты также могут использоваться для проверки, усовершенствования и дальнейшей разработки существующих теорий переноса тепла и массы на молекулярном уровне, в том числе теоретических моделей для коэффициентов диффузии и термодиффузии. С практической точки зрения, полученные данные могут использоваться для описания и предсказания процессов тепломассообмена в таких областях, как добыча нефти, производство топлива, лекарств, средств промышленной и бытовой химии.

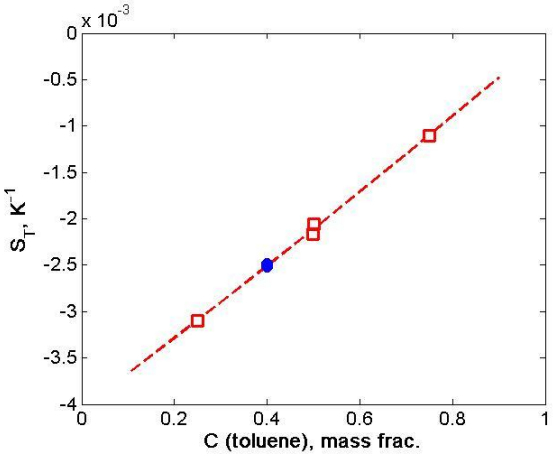



*Рис. 7а. Зависимости коэффициента Соре бинарной смеси толуэн-циклогексан от концентрации при 25 °C. Красные символы – данные наземных экспериментов [9], синий – результат обработки экспериментов на МКС [8]*

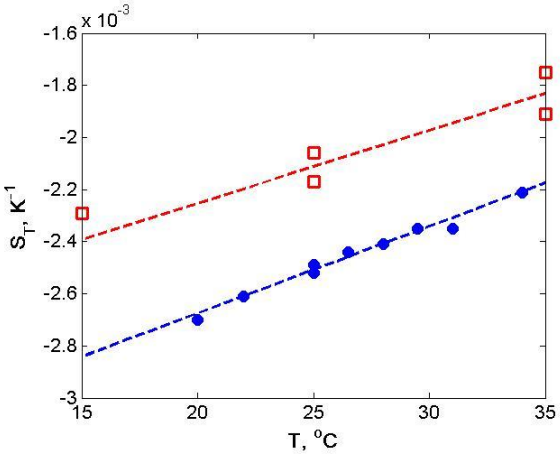



*Рис. 7б. Зависимости коэффициента Соре бинарной смеси толуэн-циклогексан от температуры. Синие символы – результаты обработки экспериментов на МКС для C = 0,40 [8], красные – данные наземных экспериментов [9] для C = 0,50*

## Библиографический список


1. *Firoozabadi A.* Thermodynamics of hydrocarbon reservoirs – McGraw–Hill Professional, 1999.
2. *Рабинович Г.Д.* Разделение изотопов и других смесей термодиффузией. – М.: Атомиздат, 1981.
3. *Рыжков И.И.* Термодиффузия в смесях: уравнения, симметрии, решения и их устойчивость. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2013.
4. *Khlybov O.A., Ryzhkov I.I., Lyubimova T.P.* Contribution to the benchmark for ternary mixtures: Measurement of diffusion and Soret coefficients in 1,2,3,4-tetrahydronaphthalene, isobutylbenzene, and dodecane onboard the ISS // The European Physical Journal E. – 2015. – Vol. 38, Is. 4. – P. 115.
5. *Bou-Ali M.M., et. al.* Benchmark values for the Soret, thermodiffusion and molecular diffusion coefficients of the ternary mixture tetralin+isobutylbenzene+n-dodecane with 0.8-0.1-0.1 mass fraction // The European Physical Journal E. – 2015. – Vol. 38, Is. 4. – P. 113.
6. *Shevtsova V., Santos C., Sechenyh V., Legros J.C., Mialdun A.* Diffusion and Soret in Ternary Mixtures. Preparation of the DCMIX2 Experiment on the ISS // Microgravity Sci. Technol. – 2014. – Vol. 25. – P. 275–283.
7. *Lyubimova T., Zubova N.* Onset and nonlinear regimes of ternary mixture convection in a square cavity // The European Physical Journal E. – 2015. – Vol. 38, Is. 3. – Art. N. 19.
8. *Mialdun A., Shevtsova V.* Temperature dependence of Soret and diffusion coefficients for toluene–cyclohexane mixture measured in convection-free environment // The Journal of Chemical Physics. – 2015. – Vol. 143. – P. 224902.
9. *Wittko G., Kohler W.* // The European Physical Journal E. – 2006. – Vol. 21. – P. 283.

# Экспериментальное исследование особенностей концентрационно-капиллярной конвекции

Зуев А.Л., Костарев К.Г.

Представлены результаты экспериментального изучения нескольких новых гидродинамических эффектов, обусловленных концентрационной неоднородностью растворов поверхностно-активных веществ вблизи поверхности пузырьков и капель. Показано, что наблюдаемые явления существенно отличаются от своих термокапиллярных аналогов. Причины расхождения кроются в наличии адсорбции молекул примеси на межфазной поверхности и в значительной разнице характерных времен диффузии вещества и температуропроводности. Установлен ряд закономерностей описанных явлений, предложено их объяснение.

Хорошо известно, что жидкость может приходить в движение под действием как объемных, так и поверхностных сил. Из объемных наиболее распространенной является сила Архимеда, возникающая при локальном изменении плотности в жидкости, находящейся в гравитационном поле. Под влиянием архимедовой силы объемы жидкости с меньшей – по сравнению с окружающей средой – плотностью всплывают, вытесняя вниз объемы с бóльшей плотностью. Несмотря на простоту механизма движения, структура таких течений и их эволюция сильно зависят от формы полости, занимаемой жидкостью, а также от конфигурации и расположения устройств, действие которых приводит к изменению плотности (в качестве подобных устройств выступают различного рода нагреватели, источники примеси и т.д.). Соответственно, описанию объемных течений посвящены десятки монографий и тысячи журнальных публикаций. О движении жидкости под воздействием поверхностных (капиллярных) сил известно существенно меньше (такое движение называют также течением Марангони – по имени итальянского ученого, впервые изучавшего его в конце XIX века). Дело в том, что появление этих сил обусловлено локальным изменением поверхностного натяжения, что связано, в основном, с возникновением неоднородного распределения температуры или концентрации вдоль поверхности жидкости. А поскольку формирование градиентов температуры и концентрации на поверхности является, как правило, следствием их изменения в объеме жидкости, то течение Марангони обычно маскируется более интенсивным гравитационным.

В то же время при определенных условиях поверхностные силы могут преобладать над силами Архимеда. Такие условия возникают в тонких горизонтальных слоях и пленках жидкости, вблизи поверхности капель и пузырьков газа в жидкости и, конечно, в невесомости. Не случайно, интерес к изучению поверхностных сил резко возрос после первых космических экспериментов в связи с необходимостью выяснения причин формирования течений и отличия скорости массопереноса от диффузионной [1]. В частности, было сделано предположение, что именно капиллярные силы могут стать основным источником движения жидкости при снижении уровня гравитации. Последовавшие многочисленные технологические и специально подготовленные эксперименты в условиях орбитального полета быстро подтвердили эту гипотезу в отношении термо-

капиллярных эффектов, вызванных изменением температуры жидкости [2].

Менее изученной оказалась роль концентрационно-капиллярного механизма в развитии массопереноса в жидкости. С одной стороны, существует формальная схожесть источников термо- и концентрационно-капиллярного движения – в обоих случаях это пространственная неоднородность поверхностного натяжения. С другой стороны, создавать на поверхности жидкости градиенты концентрации, поддерживать их и измерять намного сложнее, чем градиенты температуры. В результате к настоящему времени экспериментально исследованы в основном «тепловые» версии капиллярных течений.

Однако одного подобия источников движения часто недостаточно для адекватного описания поведения жидкой смеси, имеющей межфазную границу (поверхность контакта «жидкость-жидкость», «жидкость-газ»). Причин для этого две. В качестве первой выступает тот факт, что характерные времена диффузии примеси превышают времена диффузии тепла в сотни и даже тысячи раз. В итоге, концентрационные неоднородности в жидкостях существуют значительно дольше тепловых, а продолжительность и интенсивность действия капиллярных сил на границе раздела фаз многократно возрастает. Второй причиной служит адсорбция (сосредоточение) примеси на поверхности жидкости – эффект, отсутствующий в тепловом случае. Влияние обоих указанных факторов приводит к значительному отклонению в развитии ряда гидродинамических явлений, предсказать которое на основе аналогии с «тепловой» версией нельзя. Описанию двух таких явлений и посвящена настоящая статья.

## Концентрационно-капиллярный дрейф пузырьков воздуха

Действие сил Марангони на свободной поверхности жидкости вызывает ее движение в направлении возрастания поверхностного натяжения. Поверхность увлекает за собой прилежащие к ней слои жидкости. В результате если свободная поверхность принадлежит пузырьку, то он начинает вытесняться в направлении, противоположном течению жидкости. Такая способность пузырьков газа самопроизвольно перемещаться в жидкости в направлении уменьшения величины поверхностного натяжения получила название капиллярного дрейфа [3].

Хотя явление капиллярного дрейфа теоретически было предсказано уже довольно давно [4], процесс его экспериментального подтверждения затянулся на долгие годы даже для случая неоднородно нагретой жидкости. Причиной этого стали трудности отделения капиллярной составляющей движения пузырька от гравитационной, связанной как с его архимедовым всплытием, так и с конвективным течением окружающей жидкости. Точки над «i» в конечном итоге поставили опыты в условиях максимального подавления влияния гравитации, в том числе в невесомости. Было показано, что в однородном градиенте температуры скорость термокапиллярного дрейфа пузырька, за исключением начального участка движения, остается постоянной и определяется его диаметром, величиной градиента температуры и физико-химическими свойствами окружающей жидкости [5–6]. В то же время результаты аналогичного эксперимента с пузырьками в неоднородном поле концентрации оказались другими [7–9].

Для изучения концентрационно-капиллярного дрейфа пузырька в наземных условиях необходимо в первую очередь подавить его всплытие под действием архимедовой силы, что можно сделать, поместив пузырек в горизонтальный слой жидкости, ограниченный сверху твердой стенкой. Соприкасаясь с ней, пузырек оказывается способным перемещаться только вдоль слоя. Однако в этом случае для движения пузырька в жидкой смеси необходимо создать достаточно долго существующий горизонтальный градиент концентрации, что с физической точки зрения довольно сложно, поскольку изменение соотношения компонентов смеси, как правило, влечет за собой изменение ее плотности. Возникновение горизонтальных градиентов плот-

ности приводит жидкость в адвективное движение до тех пор, пока в ней не установится устойчиво стратифицированный вертикальный перепад плотности или же жидкость полностью не перемешается до однородного состояния. Кроме того, чтобы локальное изменение состава бинарной смеси привело к появлению концентрационных сил Марангони, один из ее компонентов должен быть поверхностно-активным веществом (ПАВ) по отношению к другому, т.е. его молекулы должны преимущественно накапливаться на свободной поверхности данной жидкой смеси.

С учетом этих требований в качестве ПАВ в наших опытах был выбран метиловый спирт, обладающий низкой вязкостью и малым значением поверхностного натяжения (физико-химические свойства используемых жидкостей приведены в таблице). Его плотность близка к плотности воды, игравшей роль второго компонента бинарного раствора.

**Физико-химические свойства используемых жидкостей [10–11]**

| Вещество, 20 °C | Плотность, $10^3$ кг/м$^3$ | Вязкость | Поверхностное натяжение, $10^{-3}$ Н/м | Показатель преломления |
|---|---|---|---|---|
| Вода | 0,9982 | 1,00 | 72,58 | 1,3330 |
| Метиловый спирт | 0,7917 | 0,60 | 22,51 | 1,3286 |
| Изопропиловый спирт | 0,7856 | 2,37 | 21,22 | 1,3616 |
| Кислота уксусная | 1,0498 | 1,22 | 26,36 | 1,3719 |
| Хлорбензол | 1,1062 | 0,80 | 33,50 | 1,5241 |

Экспериментальная кювета представляла собой прямоугольную ячейку Хеле-Шоу в форме тонкого (толщиной ~ 1 мм) слоя между двумя плоско-параллельными стеклами. Для создания продольного градиента концентрации в ней использовалась следующая методика. Вначале кювета устанавливалась вертикально и до половины объема заполнялась раствором, после чего сверху доливался более легкий чистый спирт. Через 10–20 с в кювете благодаря силе тяжести устанавливалось распределение концентрации в виде двух расположенных друг под другом областей исходных жидкостей с узкой зоной диффузионного перехода между ними. Затем кювета переводилась в горизонтальное положение. При этом возникал сравнительно большой продольный перепад плотности, вновь приводивший систему жидкостей в движение. Интенсивность этого течения быстро уменьшалась со временем в силу малой толщины слоя и активного перемешивания спирта и его раствора во встречных потоках. В результате через несколько минут в центре кюветы формировалась протяженная область небольшого, но однородного продольного градиента концентрации, который существовал в течение долгого времени (рис. 1). Отметим, что при увеличении толщины слоя в два раза возникновения продольного градиента концентрации уже не наблюдалось, а происходило очень быстрое восстановление двухслойной стратификации системы жидкостей по плотности.

Для измерения величины градиента концентрации ПАВ в опытах использовался интерферометр Физо, рабочей ячейкой которого служила сама экспериментальная кювета. В изотермическом случае интерферометр позволял визуализировать неоднородности концентрации в растворе в виде системы изолиний, представлявших собой полосы равного оптического пути. Если состав смеси изменялся только поперек зондирующего светового потока, как в нашем случае при наблюдении сверху, то каждую интерференционную полосу можно было отождествить с определенной величиной концентрации ПАВ, используя концентрационную зависимость показателя преломления. Так, для слоя толщиной 1,2 мм переход от одной интерференционной полосы к другой соответствовал в среднем изменению концентрации спирта в воде на 0,3 %.

В слой раствора с созданным горизонтальным градиентом концентрации с помощью медицинского шприца вносился пузырек воздуха, принимавший форму плоского диска с диаметром $D$, равным 5–15 мм. Как только пузырек отделялся от иголки,

он сразу начинал перемещаться в сторону большей концентрации спирта. Одновременная видеорегистрация концентрационного поля и положения в нем пузырька позволила определить градиент концентрации, диаметр пузырька и скорость его движения в различные моменты времени. Типичная интерференционная картина приведена на рис. 2. Опыты показали, что, как и в случае термокапиллярного дрейфа [5], максимальная скорость концентрационного движения прямо пропорциональна градиенту поверхностного натяжения и диаметру пузырька. Результаты опытов с пузырьками разных размеров при различных значениях градиента концентрации $\nabla C$ приведены на сводном графике (рис. 3), где по оси ординат отложена максимальная скорость $u$ дрейфа, отнесенная к диаметру пузырька.

Вместе с тем эксперимент выявил и существенное различие между концентрационно-капиллярным и термокапиллярным механизмами движения. Так, если в однородном градиенте температуры пузырек дрейфовал с постоянной, не зависящей от времени скоростью, то при движении в концентрационном поле скорость пузырька монотонно уменьшалась до нуля в течение 40–60 с. Это происходило несмотря даже на то, что в растворе, окружавшем пузырек, все еще сохранялся значительный градиент концентрации. При этом новый пузырек, внесенный рядом с уже остановившимся, сразу начинал перемещаться. Типичная зависимость скорости движения от времени приведена на рис. 4. При вариации размера пузырька ситуация качественно не изменялась, хотя время дрейфа и длина пройденного пути возрастали с увеличением диаметра.

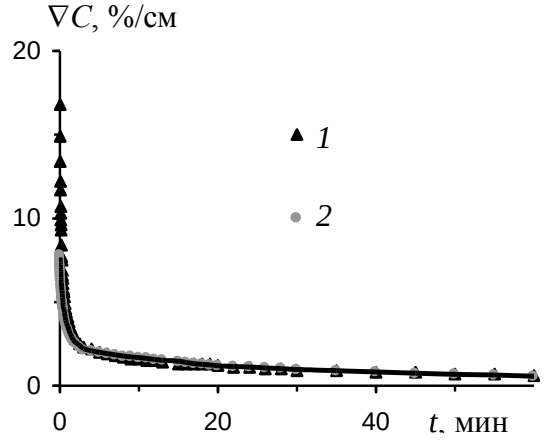



*Рис. 1. Зависимость продольного градиента концентрации метилового спирта в центре кюветы от времени. Начальная концентрация спирта в растворе* ($C_0$, %) *90 (1), 80 (2)*

*Рис. 2. Интерферограмма поля концентрации спирта вокруг пузырька во время его движения. Вид сверху. Прямоугольник ниже пузырька – маркер длиной 3,0 см*

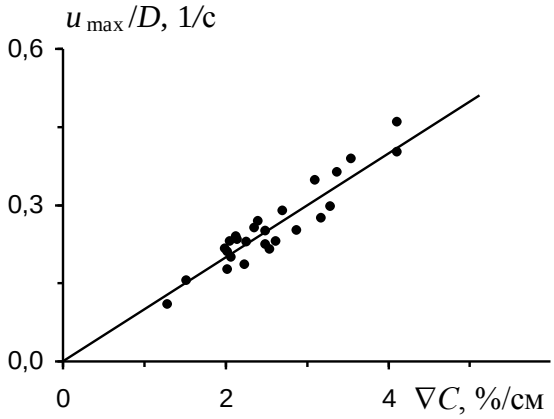



*Рис. 3. Зависимость скорости капиллярного дрейфа, отнесенной к диаметру пузырька, от градиента концентрации метанола*

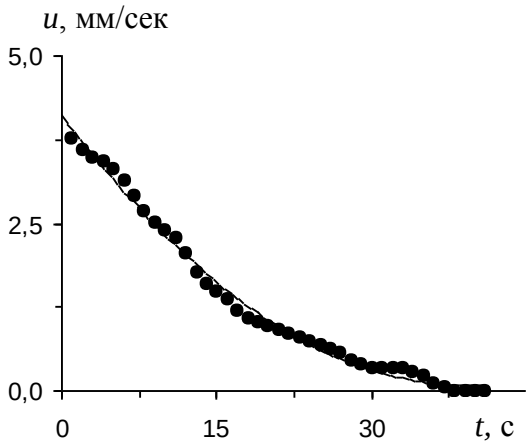



*Рис. 4. Зависимость скорости движения пузырька от времени;* $\nabla C$ = 2,5 %/см, $D$ = 7 мм

Для объяснения уменьшения скорости можно предположить, что в процессе движения пузырька происходит насыщение его поверхности спиртом за счет адсорбции из раствора. Объемная диффузия ПАВ оказывается неспособной полностью противодействовать адсорбции в создании однородного распределения концентрации на свободной поверхности. Как результат, поверхностное натяжение на всей границе пузырька достаточно быстро становится одинаковым независимо от величины градиента концентрации во внешней жидкости и, таким образом, причина движения пузырька исчезает. Отсюда следует, что и в других случаях при наличии растворенного в жидкости ПАВ действие концентрационно-капиллярных эффектов может наблюдаться только в течение ограниченного времени, определяемого скоростью адсорбционного процесса.

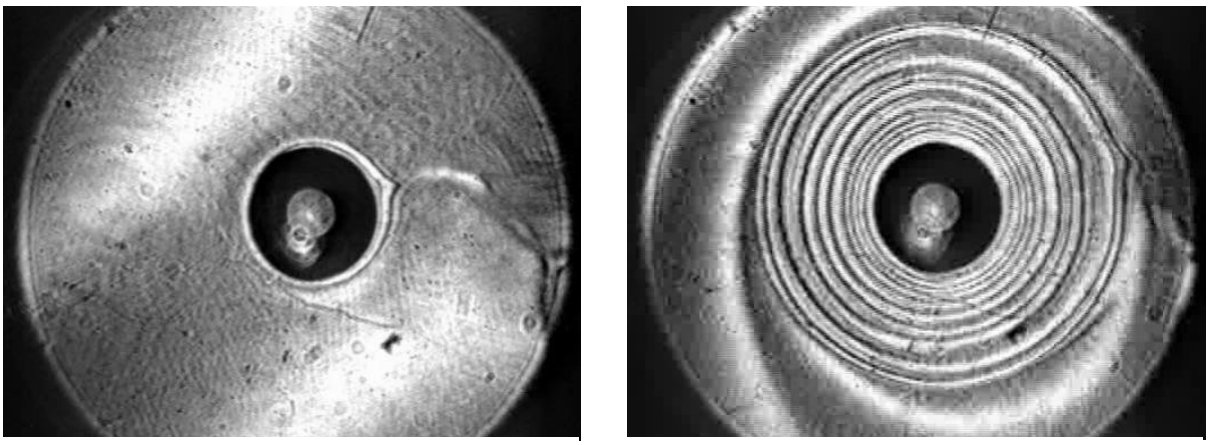
Обнаруженное нами действие адсорбции позволяет объяснить известный факт, что в жидкостях, содержащих примеси ПАВ, в частности в высококонцентрированных водных растворах органических жидкостей, термокапиллярная конвекция обычно не наблюдается [12]. Так, например, в экспериментах [9] по изучению термокапиллярного дрейфа в растворах метанола уже незначительная добавка воды (~ 10 %) к чистому спирту приводила к прекращению движения пузырьков при наличии градиента температуры. Причина, скорее всего, кроется в компенсации тепловой неоднородности поверхностного натяжения перераспределением ПАВ на поверхности пузырька. А поскольку характерные диффузионные времена значительно превышают времена тепловые, то, как и в чисто концентрационном случае, основание для движения жидкости – неоднородность поверхностного натяжения – исчезает.

## Колебательные режимы концентрационной конвекции

Исследование структуры концентрационного поля вблизи неподвижного пузырька, помещенного в неоднородный раствор ПАВ, привело к обнаружению еще одного интересного явления – установления длительных колебательных режимов массообмена в жидких смесях, устойчиво стратифицированных по концентрации [13–20].

Как показали эксперименты, причиной возникновения осциллирующего движения в исследуемой ситуации явилось взаимодействие трех механизмов массопереноса – гравитационного, капиллярного и диффузионного, обладающих существенно разными характерными временами (которые определяются как времена диссипации возмущений, порождающих перенос примеси, и являются обратно пропорциональными, соответственно, коэффициентам кинематической вязкости $\nu$ и диффузии $D_c$, при этом $\nu/D_c \sim 1000$). Отметим, что в «тепловом» варианте задачи о движении вблизи неподвижных пузырьков и капель развивается только стационарное течение [15, 21] (соотношение коэффициентов вязкости и температуропроводности, как правило, не превышает одного порядка).

Впервые установление колебательных режимов концентрационной конвекции было экспериментально обнаружено вокруг неподвижных пузырьков воздуха, заключенных в тонкий жидкий горизонтальный слой с вертикальным градиентом поверхностного натяжения [13–14]. В качестве слоя в опытах использовалась прямоугольная полость высотой около 2,6 мм, заполненная двухслойной системой смешивающихся жидкостей, одна из которых являлась поверхностно-активной по отношению к другой (метанол – вода, уксусная кислота – вода). Верхней и нижней стенками полости служили плоскопараллельные стекла, что позволяло с помощью интерферометра визуализировать распределение концентрации ПАВ в жидкости в горизонтальной плоскости (как и в случае концентрационного дрейфа). Были выявлены периодические кратковременные интенсивные возмущения поля концентрации вокруг пузырька (рис. 5). Период этих колебаний составлял от нескольких секунд до



*а* *б*

*Рис. 5. Интерферограммы поля концентрации вокруг пузырька воздуха в горизонтальном слое водного раствора изопропилового спирта. Толщина слоя 2,6 мм, перепад концентрации ΔC = 20 %, диаметр пузырька D = 5,0 мм, время с начала очередного цикла автоколебательного режима t, с: 0 (а), 2 (б)*

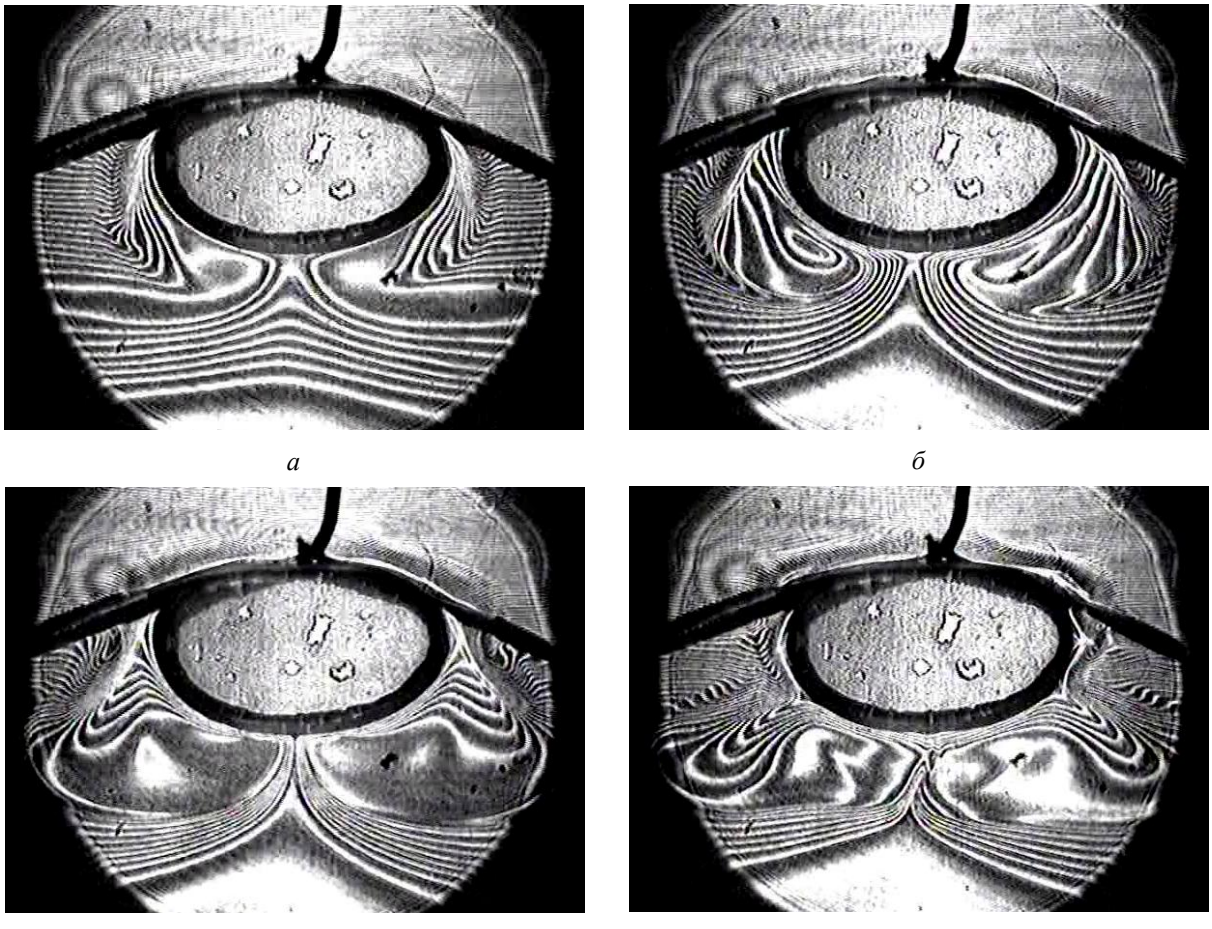
десятков минут и зависел от времени, начального перепада концентрации ПАВ, свойств жидкостей, толщины слоя и диаметра пузырька. По мере уменьшения вертикального градиента концентрации колебания происходили все реже, а затем внезапно прекращались. Было высказано предположение, что причина наблюдаемой интенсификации массопереноса заключается в регулярных выбросах в окружающий раствор излишков ПАВ, накапливаемых вблизи одного из полюсов пузырька вследствие концентрационно-капиллярного течения по его поверхности. Однако саму структуру возмущений в такой задаче с трехмерной геометрией экспериментально изучить не представлялось возможным.

С целью выяснения причин возникновения колебаний исследование динамики поля концентрации ПАВ и структуры конвективного движения вокруг пузырька было продолжено в тонком вертикально ориентированном слое стратифицированной жидкости [15, 17–19]. Для этого экспериментальная кювета устанавливалась вертикально на своей узкой грани, а наблюдение осуществлялось сбоку со стороны широких граней. Кювета заполнялась водными растворами уксусной кислоты или изопропилового спирта с устойчивой вертикальной стратификацией концентрации ПАВ (уксусная кислота тяжелее воды, изопропиловый спирт, напротив, легче). В жидкость помещался пузырек воздуха объемом 20–30 мкл, который принимал форму короткого горизонтального цилиндра диаметром 4–6 мм со свободной боковой поверхностью. От всплытия под действием силы Архимеда пузырек удерживала специальная проволочная рамка, не препятствовавшая развитию конвекции Марангони. Благодаря малой толщине слоя возникавшие в жидкости течения и распределения концентрации (усредненные поперек слоя) оказывались двухмерными, что и позволило исследовать их структуру и эволюцию интерференционным методом.

На рис. 6 приведена типичная серия интерферограмм, описывающая изменение поля концентрации уксусной кислоты в течение цикла интенсификации массообмена вблизи пузырька. В приведенном случае поверхностные силы направлены к верхнему полюсу пузырька. Под их действием раствор, насыщенный ПАВ, из нижней приполярной области устремлялся вверх, окружая тонким слоем весь пузырек (рис. 6, *а*). Возникновение этого слоя оказалось характерной чертой концентрационно-капиллярной конвекции, отличающей ее от термокапиллярного течения. Из-за больших характерных времен диффузии избыток ПАВ, переносимый по поверхности пузырька, не успевал раствориться в окружающей жидкости. В результате раствор с высоким содержанием ПАВ накапливался вблизи верхнего полюса в виде своеобразной «шапки», а сформировавшийся вокруг пузырька слой с однородной концентрацией

устранял перепад концентрации ПАВ между полюсами, являвшийся источником движения Марангони. Как только восходящее капиллярное движение по поверхности пузырька прекращалось, динамическое равновесие концентрационной «шапки», более тяжелой, чем окружающая ее жидкость, нарушалось, и струи концентрированного раствора уксусной кислоты под действием архимедовой силы начинали опускаться вниз справа и слева от пузырька (рис. 6, *б*).

Это движение, в свою очередь, вызывало появление под пузырьком струи, направленной вверх и приносившей на его поверхность раствор с высокой концентрацией ПАВ. Восстановление перепада концентрации ПАВ между полюсами пузырька вновь приводило в действие капиллярные силы, которые резко ускоряли восходящее течение. В результате у боковой поверхности цилиндрического пузырька возникало интенсивное конвективное движение в виде двух симметричных вихрей. Развиваясь, вихревые ячейки захватывали все бóльший объем жидкости с высокой концентрацией ПАВ (рис. 6, *в*). Благодаря этому средняя плотность раствора в ячейках повышалась и они смещались вниз, отсекая в итоге от нижнего полюса пузырька струю ПАВ, подпитывающую движение (рис. 6, *г*). Как только это происходило, конвекция прекращалась так же быстро, как и возникала. Весь процесс развития и затухания интенсивного концентрационно-капиллярного движения вокруг пузырька занимал не более 30 с. Затем, под действием силы тяжести, вертикальная стратификация раствора постепенно восстанавливалась, приближаясь к первоначальному виду, приведенному на рис. 6, *а*. Через некоторое время весь процесс повторялся. Период наблюдаемых автоколебаний в системе составлял



*а* *б* *в* *г*

*Рис. 6. Интерферограммы поля концентрации вблизи пузырька воздуха в вертикальном слое водного раствора уксусной кислоты. Перепад концентрации кислоты между полюсами пузырька $\Delta C$ = 22 %; вертикальный диаметр пузырька D = 3,0 мм, время с начала цикла колебаний t, с: 0 (а), 2,25 (б), 4,5 (в), 8,25 (г)*

около 1–2 мин, время же, в течение которого наблюдались колебания, достигало нескольких часов, ограничиваясь только временем существования градиента концентрации ПАВ в кювете (рис. 7).

В ходе эксперимента были изучены временные зависимости периода осцилляций для различных значений средней концентрации раствора, градиента концентрации ПАВ и диффузионных чисел Марангони и Грасгофа. Показано, что отношение безразмерной частоты колебаний к числу Марангони не зависит от времени и хорошо совпадает в опытах, проведенных с растворами разных жидкостей и даже противоположными направлениями градиента концентрации (рис. 8).

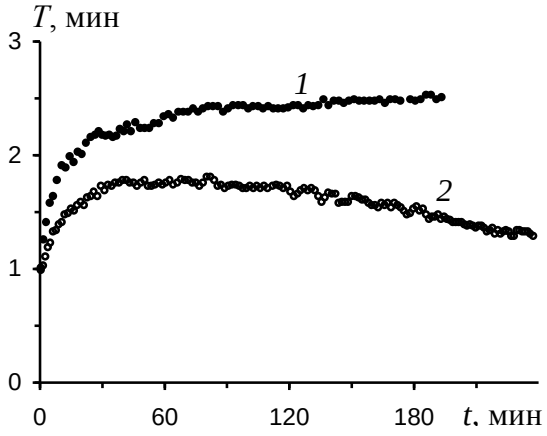



*Рис. 7. Зависимость периода колебаний концентрационного поля вокруг пузырька от времени: 1 – изопропиловый спирт, 2 – уксусная кислота*

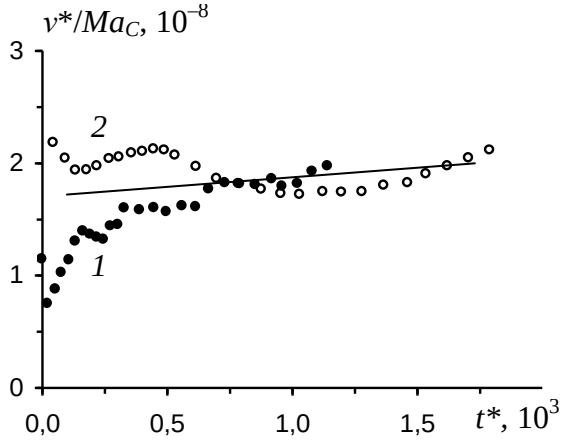


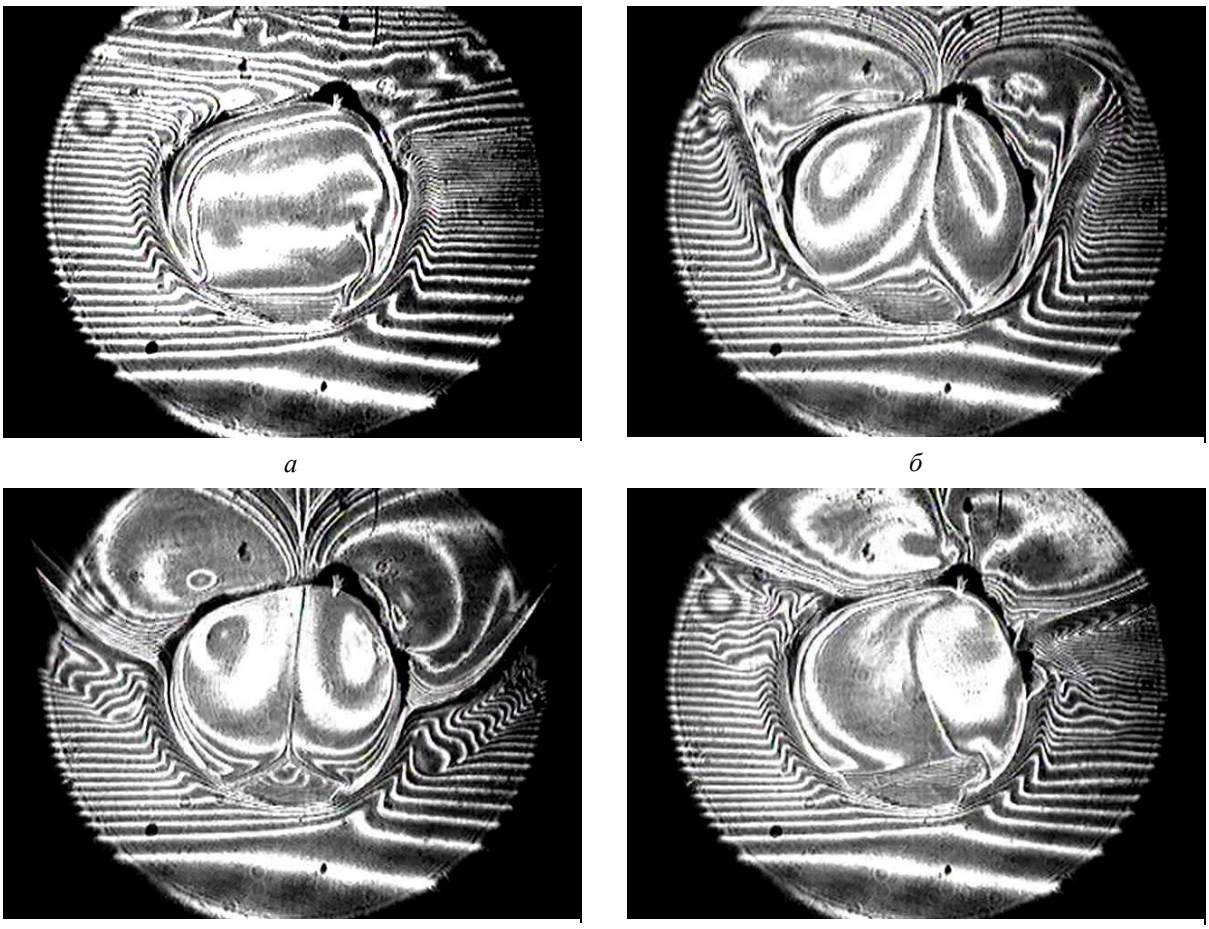

*Рис. 8. Зависимость частоты колебаний, отнесенной к концентрационному числу Марангони, от времени. 1 – изопропиловый спирт, 2 – уксусная кислота. Прямая линия построена методом наименьших квадратов*

## Концентрационная конвекция вблизи межфазной границы

Описанные осцилляции концентрационного течения экспериментально наблюдались не только вблизи свободной поверхности бинарных растворов, но и для межфазной границы, созданной двумя взаимно нерастворимыми жидкостями, при диффузии сквозь нее ПАВ.

На рис. 9 представлена серия интерферограмм, описывающая эволюцию распределения компонентов жидкой смеси в течение одного из циклов колебательного режима вблизи капли хлорбензола. Капля находится в вертикальном слое, заполненном стратифицированным раствором изопропилового спирта в воде [16, 20]. Вода и хлорбензол практически не растворимы друг в друге, в то время как спирт полностью растворим в обеих жидкостях, являясь для них поверхностно-активным веществом [10]. Отсутствие взаимной растворимости базовых жидкостей позволяет легко расшифровывать полученные интерферограммы. Так, переход от одной интерференционной полосы к другой соответствовал изменению концентрации спирта на 0,27 % в воде и на 0,1 % в хлорбензоле.

Проницаемость межфазной границы для ПАВ создает определенное своеобразие для развития движения в системе жидкостей. В частности, бóльшая часть поверхности капли находится в постоянном движении – вследствие поглощения спирта каплей на межфазной границе все время поддерживается градиент концентрации ПАВ, обеспечивающий действие капиллярных сил (рис. 9, *а*). В то же время часть поверхности капли вблизи ее нижнего полюса остается неподвижной. Внутри капли к этой части примыкает застойная зона, образованная хлорбензолом с низким содержанием спирта и находящаяся в химическом равновесии (равенстве химических потенциалов) со слоями раствора, которые окружают нижний полюс.



*а* *б*

*в* *г*

*Рис. 9. Интерферограммы поля концентрации внутри и вблизи капли хлорбензола, поглощающей изопропиловый спирт из его водного раствора. Перепад концентрации спирта между полюсами капли $\Delta C$ = 8 %, диаметр капли D = 6,0 мм; время с начала первого цикла колебаний t, с: 0 (а), 3 (б), 18 (в), 40 (г)*

На рис. 9, *б* представлено начало цикла. Хорошо видно, что источником движения поверхности является поток раствора с высоким содержанием спирта из области, лежащей над каплей. Его приход на межфазную границу порождает значительные перепады концентрации, усиливая капиллярное движение. При этом основная масса спирта, увлекаемого капиллярной конвекцией, не поглощается каплей, а возвращается в объем окружающего раствора, где всплывает, будучи легче прилежащих слоев.

Отрыв потока спирта от поверхности капли происходит в области, где действие капиллярных сил начинает уравновешиваться действием силы Архимеда, возрастающей по мере продвижения ПАВ вниз. Внутри капли к этой области примыкает динамическая граница застойной зоны.

Спирт, проникающий в каплю, также сначала увлекается вниз движением межфазной границы, затем поворачивает вдоль верхнего края застойной зоны и всплывает вверх, формируя интенсивное двухъячеистое течение с выраженным конвективным факелом вдоль вертикального диаметра капли. Двухъячеистое движение формируется и снаружи капли. Как и в случае с пузырьком, возникшие ячейки, захватывая раствор с высокой концентрацией ПАВ, становятся легче и всплывают (рис. 9, *в*), отсекая от капли питающий поток спирта (рис. 9, *г*). В результате течение вдоль поверхности замедляется почти до полной остановки. Одновременно внутри капли начинается всплытие вверх раствора хлорбензола с достаточно высоким содержанием спирта, который до этих пор удерживался крупномасштабным течением «в карманах» вблизи застойной зоны (см. рис. 9, *в*). Если к этому моменту капля уже достигла насыщения поверхностно-активным веществом (т.е. с начала опыта про-

шло несколько циклов), то всплывающий спирт оказывается излишним и капля сбрасывает его в окружающий раствор для достижения с ним химического равновесия. Далее гравитация восстанавливает вертикальное распределение ПАВ вблизи границы капли, и цикл повторяется.

На рис. 10 приведено изменение периода цикла интенсификации течения вблизи капли, поглощающей ПАВ, в зависимости от времени с момента установления колебательного режима массообмена. Увеличение периода со временем, как показывают измерения, связано с уменьшением градиента концентрации ПАВ в окружающем растворе за счет диффузии и конвективного перемешивания, вызванного капиллярным течением по поверхности капли (размер жидкой области, приведенной в движение этим течением, в несколько раз превышает диаметр капли). Изменение градиента концентрации ПАВ во внешней жидкости снижает не только интенсивность действия капиллярных сил, но и количество ПАВ, проникающего в каплю. На рис. 11 приведена зависимость отношения максимальных перепадов концентрации спирта внутри и вне капли от времени. Как видно из рисунка, это отношение остается практически постоянным на протяжении всего периода наблюдения (~ 3 часов), несмотря на очень сложный вид течений.

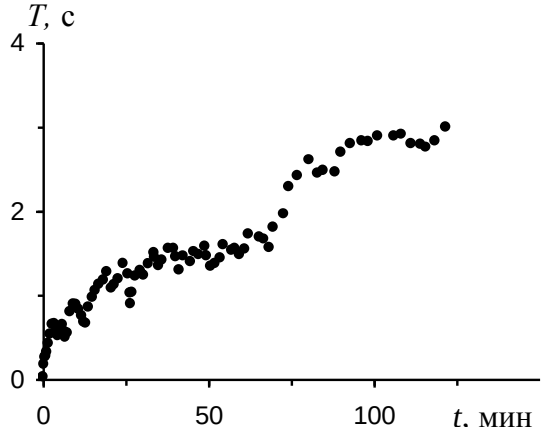



*Рис. 10. Зависимость периода интенсификации течения вблизи капли в стратифицированном растворе ПАВ от времени*

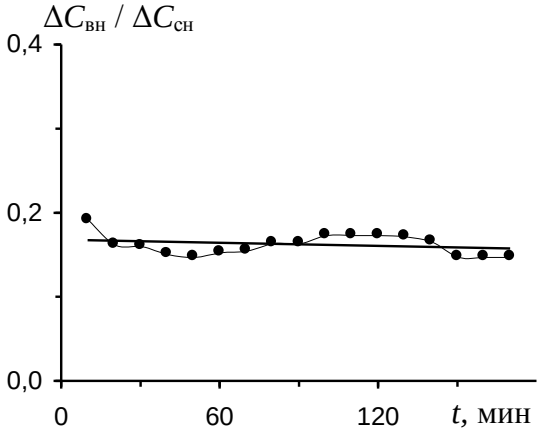



*Рис. 11. Изменение отношения перепадов концентрации ПАВ внутри и снаружи капли с течением времени*

## Заключение

Экспериментальное подтверждение возможности концентрационного дрейфа пузырьков газа, обнаружение и описание развития колебательных режимов течения вблизи неподвижных газовых и жидких включений в неоднородных растворах ПАВ позволяет объяснить особенности массообмена и формирования структуры материалов в ряде технологических экспериментов в условиях микрогравитации, предсказать поведение сложных систем жидкостей и многофазных сред в тонких каналах и слоях, а также в полостях со сложной геометрией. Полученные данные могут быть использованы для разработки как пассивных систем гомогенизации жидкостей, так и установок для разделения жидких смесей; для оптимизации режимов их работы, при создании мини-систем охлаждения и теплообмена, при подготовке технологических экспериментов в области материаловедения на борту орбитальных станций и других космических аппаратов.

Помимо перечисленных направлений приложения достигнутых результатов, можно привести еще одно, достаточно неожиданное. Связано оно с гипотезой происхождения жизни на нашей планете. Опубликованная А.И. Опариным впервые в начале 30-х годов прошлого столетия, эта гипотеза включает несколько основных мо-

ментов, одним из которых является предположение, что низкомолекулярные органические вещества и аминокислоты могли образовывать «питательный бульон» в воде, на основе которого в дальнейшем возникали белковые соединения [22].

Узким местом гипотезы является необходимость достижения высокой концентрации органических веществ для преобладания реакции синтеза над реакцией рекомбинации. В частности, расчеты показывают, что средняя концентрация «питательного бульона» должна значительно превышать существующую в настоящее время в мировом океане. Противоречие можно снять, если «включить» механизм повышения локальной концентрации, на роль которого могут претендовать капли органических жидкостей в неоднородных растворах ПАВ. Большое количество этих жидкостей имеют ограниченную растворимость в воде и поэтому могут образовать отдельную фазу при частичном испарении их водных растворов в мелких водоемах. Одновременно испарение может создать в таких водоемах градиент концентрации вещества, представляющего собой ПАВ. Возникающее вокруг капель течение приносит к ним растворенные вещества, которые они поглощают, причем концентрация веществ в капле может превосходить их концентрацию в окружающей жидкости (пропорционально соотношению коэффициентов распределения растворимого компонента в системе двух жидкостей). Дальнейшее увеличение температуры приводит к полному испарению жидкости и формированию концентрированного осадка из аминокислот и других веществ на месте капель с частичной деструкцией органических молекул, что создает условия для последующего синтеза веществ с более высоким молекулярным весом, включая белковоподобные.

Таким образом, использование знаний о развитии интенсивной концентрационной конвекции Марангони вблизи капель позволяет «перекинуть мостик» между экспериментальным подтверждением возможности образования аминокислот в неживой природе и результатами опытов по синтезу высокомолекулярных аминокислот.

## Библиографический список


1. Гидромеханика невесомости / под ред. *А.Д. Мышкиса*. М.: Наука, 1976. – 504 с.
2. Physics of fluids in microgravity / ed. *R.Monti, Taylor & Francis*. – London – New York, 2001.
3. *Братухин Ю.К.* Термокапиллярный дрейф капельки вязкой жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1975. – № 5. – С. 156–161.
4. *Young N.O., Goldstein J.S., Block M.J.* The motion of bubbles in a vertical temperature gradient // J. Fluid Mech. – 1959. – № 6. – P. 350–356.
5. *Братухин Ю.К., Зуев А.Л.* Термокапиллярный дрейф пузырька воздуха в горизонтальной ячейке Хеле-Шоу // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1984. – № 3. – С. 62–67.
6. *Subramanian R.S., Balasubramaniam R.* The motion of bubbles and drops in reduced gravity. – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – 358 p.
7. *Зуев А.Л., Костарев К.Г., Шмыров А.В.* Концентрационно-капиллярный дрейф пузырьков воздуха в неоднородных растворах жидкостей // Термо- и концентрационно-капиллярные эффекты в сложных системах. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – С. 77–89.
8. *Зуев А.Л., Костарев К.Г.* Экспериментальное обнаружение концентрационно-капиллярного дрейфа пузырьков воздуха в неоднородных растворах жидкостей // Доклады РАН. – 2004. – Т. 399. – №4. – С. 490–493.
9. *Bratukhin Yu.K., Kostarev K.G., Zuev A.L., Viviani A.* Experimental study of Marangoni bubble migration in normal gravity // Int. J. Experiments in Fluids, 2005. – Vol. 38. – № 5. – P. 594–605.
10. Справочник химика / под ред. *Б.П. Никольского*. – Т. 3. – Л.: Химия, 1962. – 1008 с.

11. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
12. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматлит, 1959. – 699 с.
13. *Зуев А.Л., Костарев К.Г.* Концентрационно-капиллярная конвекция вблизи поверхности пузырька в горизонтальном слое неоднородного раствора жидкостей // Конвективные течения. – Вып.1. – Пермь: ПГПУ, 2003. – С. 123–139.
14. *Kostarev K.G., Zuev A.L., Viviani A.* Oscillatory Marangoni convection around the air bubble in a vertical surfactant stratification // J. Comptes Rendus Mecanique. – 2004. – Vol. 332. – № 1. – P.1–7.
15. *Зуев А.Л., Костарев К.Г.* Тепловая и концентрационная конвекция Марангони вокруг пузырька воздуха в жидкости // Гидродинамика. – Вып. 14. – Пермь: ПГУ, 2004. – С. 88–99.
16. *Костарев К.Г., Писаревская Н.Н.* Экспериментальное изучение массообмена между каплей и раствором ПАВ // Конвективные течения. – Вып.2. – Пермь: ПГПУ, 2005. – С. 216–232.
17. *Kostarev K.G., Zuev A.L., Viviani A.* Thermal and concentrational Marangoni convection at liquid/air bubble interface // ASME J. Applied Mech. – 2006. – Vol. 73. – № 1. – P. 66–71.
18. *Бирих Р.В., Зуев А.Л., Костарев К.Г., Рудаков Р.Н*. Конвективные автоколебания вблизи поверхности пузырька воздуха в горизонтальном прямоугольном канале // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2006. – №4. – С. 30–38.
19. *Зуев А.Л., Костарев К.Г.* Осцилляция конвективного течения вокруг пузырька воздуха в вертикально стратифицированном растворе поверхностно-активного вещества // Журнал экспериментальной и технической физики. – 2006. – Т. 130. – № 2. – С. 363–370.
20. *Kostarev K.G.*, *Pisarevskaya N.N.*, *Viviani A.*, *Zuev A.L.* Oscillatory Marangoni convection around bubbles and drops in heterogeneous solutions of surfactants // Int. J. Microgravity Science and Technology. – 2007. – Vol. 19. – № 2. – P. 12–17.
21. *Raake D., Siekmann J., Chun C.-H.* Temperature and velocity fields due to surface tension driven flow // Experiments in Fluids. – 1989. – Vol. 7. – P. 164–172.
22. От молекулы до человека /под ред. *Н.П. Наумова*. М.: Просвещение, 1973. – 480 с.

# Физические свойства и наноструктура магнитных жидкостей

Пшеничников А.Ф.

Описана роль различных факторов в формировании физических свойств магнитных жидкостей – коллоидных растворов ферромагнетиков в обычных жидкостях. Каждая коллоидная частица в таком растворе состоит из однодоменного спонтанно намагниченного ядра диаметром 6–12 нм, немагнитного слоя на поверхности толщиной 0,5–0,8 нм и защитной оболочки толщиной около 2 нм из молекул стабилизатора. Основное внимание уделено межчастичным взаимодействиям (магнитодипольным и вандерваальсовым) и образованию в магнитных жидкостях наноскопических кластеров (агрегатов), содержащих в среднем несколько десятков частиц, нарущающих однородность раствора на мезоскопическом уровне и существенно влияющих на свойства магнитных жидкостей. Приводится краткий обзор экспериментальных работ по исследованию микроструктуры магнитных жидкостей на основе коллоидного магнетита и жидких углеводородов, проведенных в ИМСС УрО РАН и Пермском госуниверситете за последние годы.

## Введение, или немного о магнитных жидкостях

Магнитные жидкости (коллоидные растворы ферромагнетиков или ферритов в обычных жидкостях) интенсивно исследуются в большинстве развитых стран начиная с 70-х годов. Отличительной особенностью магнитных жидкостей (МЖ) является сочетание текучести с большой магнитной восприимчивостью. Никакой другой магнитный материал не способен к сдвиговому течению и никакая другая жидкость не обладает такой высокой чувствительностью к магнитному полю. Секрет такой высокой чувствительности заключается в том, что в обычную жидкость, например в жидкий углеводород, внедряется огромное количество мелких сферических частиц (средний размер их – 6–10 нанометров), которые представляют собой миниатюрные постоянные магниты. Каждая такая частица покрыта тонким слоем стабилизатора (защитной оболочкой), что предотвращает слипание частиц, а тепловое движение разбрасывает их по всему объему жидкости. Поэтому в отличие от обычных суспензий частицы в магнитных жидкостях не оседают на дно и растворы сохраняют свои рабочие характеристики в течение многих лет. Каждый микроскопический постоянный магнитик хаотически вращается и перемещается в жидкой среде под действием теплового движения. Внешнее магнитное поле ориентирует магнитные моменты частиц, что приводит к изменению магнитных, оптических и реологических свойств раствора. Высокая чувствительность свойств раствора к внешнему полю позволяет управлять поведением магнитных жидкостей и использовать их в прикладных задачах. В зависимости от типа дисперсионной среды, стабилизатора и концентрации магнитных частиц вязкость МЖ варьируется в пределах от 0,01 до 10 Пз, намагниченность насыщения доходит до 90 кА/м, а магнитная проницаемость – до сотни единиц СИ.

Магнитные жидкости не относятся к материалам массового спроса. Их удел – высокотехнологичное оборудование и приборы. Практический интерес к МЖ продиктован возможностями их применения в машино- и приборостроении, в биотехнологии и медицине. Как правило, магнитные жидкости производятся небольшими партиями под конкретные устройства. К настоящему времени МЖ успешно используются в аудиотехнике, в устройствах для герметизации вводов вращающихся валов, в антифрикционных узлах, в многокоординатных акселерометрах, в демпферах различного вида, в ультразвуковой дефектоскопии для создания акустического контакта, для новых способов струйной печати. Магнитожидкостные сепараторы позволяют разделять мелкие частицы немагнитных минералов или цветных металлов (включая драгоценные) по плотности. МЖ могут служить рабочим телом в термомагнитных насосах, датчиках наклона, микроманометрах, модуляторах лазерного излучения. Изучаются возможности применения МЖ в медицине для обтюрации свищей полых органов, направленного транспорта лекарств, локальной гипертермии новообразований и в качестве рентгеноконтрастного вещества. Интерес к магнитным жидкостям в научном плане обусловлен разнообразием возникающих в них структурных и ориентационных фазовых переходов, сложной гидродинамикой и теплофизикой этих сред, сильными изменениями физических свойств МЖ в ответ на приложение магнитного поля. К настоящему времени библиография по магнитным жидкостям насчитывает около семи тысяч статей в журналах и периодических изданиях и около трех тысяч патентов на различные устройства.

## О межчастичных взаимодействиях

Тепловое броуновское движение частиц, внешнее магнитное поле и межчастичные взаимодействия – три главных фактора, определяющих физические свойства и поведение магнитных жидкостей. Последний фактор представляет наибольший интерес, так как в отличие от первых двух факторов его влияние зависит от концентрации магнитных частиц в растворе. Магнитные частицы взаимодействуют между собой через жидкость-носитель (гидродинамические взаимодействия), через микроскопические магнитные поля (магнитодипольные взаимодействия), через защитные оболочки (стерические взаимодействия) и за счет вандерваальсовых сил. С уменьшением концентрации частиц увеличивается среднее расстояние между ними и межчастичные взаимодействия ослабевают. В разбавленных растворах они становятся несущественными, и вклад частицы в то или иное свойство системы уже не зависит от присутствия соседних частиц. В этом случае информацию о системе можно получить, учитывая только тепловое движение отдельной частицы и ее реакцию на внешнее поле. Именно такой (ланжевеновский) подход к описанию магнитных жидкостей преобладал в науке вплоть до начала восьмидесятых годов. В рамках этого подхода удалось качественно описать кривую намагниченности, магнитное двойное лучепреломление, магнитореологический эффект (увеличение вязкости МЖ под действием постоянного поля) и  динамику магнитной жидкости в переменном поле. Однако со временем один за другим экспериментально были обнаружены эффекты, которые не укладывались в рамки одночастичного ланжевеновского приближения. В первую очередь, речь идет о расслоении магнитной жидкости на слабо- и сильно концентрированные фазы. Это явление представляет собой фазовый переход первого рода и аналогично образованию тумана во влажном воздухе. Под действием магнитного поля или низкой температуры в магнитной жидкости образовывались «капли тумана», отличающиеся от окружающей среды только более крупными частицами и их более высокой концентрацией. Эти капли имели характерные размеры в десятки микрометров и были хорошо видны в оптический микроскоп. В дальнейшем были обнаружены аномально широкий (семь порядков!) спектр времен релаксации

магнитного момента, температурный пик начальной восприимчивости и ее нелинейный рост с концентрацией частиц. Наконец, измеренная в эксперименте начальная восприимчивость концентрированных растворов многократно превышала значение, вычисленное в рамках ланжевеновской теории. Все эти новые экспериментальные данные продемонстрировали важную роль межчастичных взаимодействий и их способность вызывать качественно новые явления в магнитных жидкостях.

Известно, что существование обычных коллоидных растворов возможно благодаря балансу между силами притяжения Ван-дер-Ваальса и силами отталкивания защитных оболочек, специально создаваемых на поверхности частиц с использованием различных стабилизаторов. Устойчивость коллоида определяется качеством оболочек и потенциалом сил притяжения. Повышение этого потенциала может привести к образованию различных пространственных структур. Появление в коллоидах многочастичных кластеров, цепочек, сеток и расслоение коллоида – типичные примеры таких структурных превращений. Аналогичные процессы возможны и в магнитных жидкостях, однако характер процессов и образовавшиеся наноструктуры зависят от уровня магнитодипольных взаимодействий и внешнего магнитного поля. Образование в магнитной жидкости агрегатов наноскопических размеров, не видимых в оптический микроскоп, вызывает в настоящее время наибольший интерес исследователей. Главная проблема состоит в том, чтобы выяснить, какого рода межчастичные взаимодействия ответственны за образование агрегатов, какова структура и размеры агрегатов и как их присутствие в растворе влияет на то или иное свойство магнитной жидкости. Несмотря на то, что исследования микроструктуры магнитных жидкостей проводятся с середины шестидесятых годов [1–2], полной ясности в этой проблеме нет до сих пор. Результаты экспериментальных и теоретических работ часто не согласуются между собой и с результатами численного моделирования. Прямое наблюдение таких агрегатов невозможно. Поэтому разработка новых приемов и новых методов исследования играет ключевую роль в решении проблемы.

В данной работе проводится обзор экспериментальных работ по исследованию структуры магнитных жидкостей на основе коллоидного магнетита и жидких углеводородов, проведенных за последние годы в Институте механики сплошных сред УрО РАН. Комплексное исследование наноструктуры магнитных жидкостей включает разработку и проведение реологических, диффузионных, магнитодинамических экспериментов и измерений в скрещенных магнитных полях.

## Концентрационная зависимость вязкости

Нами исследована вязкость растворов и ее корреляция с намагниченностью на примере слабо- и высоко концентрированных магнетитовых коллоидов с олеиновой кислотой в качестве стабилизатора. Имеющиеся экспериментальные данные относятся к разбавленным и умеренно концентрированным растворам (например, [3–6]). Однако и эти данные, как правило, допускают неоднозначную интерпретацию вследствие того, что в опытах не контролировались объемная доля коллоидных частиц (с учетом защитных оболочек) и содержание свободной олеиновой кислоты. В наших работах [7, 8] использовалась магнитная жидкость, очищенная от свободной олеиновой кислоты, а объемная доля коллоидных частиц $\varphi$ вычислялась по известным массам и плотностям коллоидного магнетита и керосина и контролировалась по плотности полученного раствора. Исследованы пять образцов с объемной долей частиц от 0,01 до 0,07. Все растворы оказались ньютоновскими жидкостями. Вязкость измерялась на стандартном капиллярном вискозиметре с погрешностью не выше 0,2 % в диапазоне температур от 298 до 333 К. Результаты измерений приведены на рис. 1 в виде зависимости инвертированной вязкости (отнесенной к вязкости керосина) от концентрации коллоидных частиц. Как видно из рис. 1, все эксперимен-

тальные данные очень хорошо укладываются на универсальную прямую

$$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 - \alpha\varphi$$

где $\eta_0$ и $\eta$ – динамические вязкости керосина и магнитной жидкости соответственно. Линейная зависимость инвертированной вязкости с концентрацией частиц в суспензии и эйнштейновское значение коэффициента $\alpha = 2{,}5$ были предсказаны Фордом [9]. На рис. 1 формуле Форда соответствует пунктирная линия, идущая много выше экспериментальных точек. Это обстоятельство означает, что значительная часть коллоидных частиц агрегирована. Независимость приведенной вязкости от температуры означает, что суммарный объем агрегатов не меняется с температурой, а температурная зависимость вязкости суспензии повторяет таковую для керосина. Другими словами, энергия межчастичных взаимодействий, приведших к агрегации, многократно превышает тепловую энергию. Магнитодипольные взаимодействия не удовлетворяют этому требованию и должны быть признаны второстепенными в процессах агрегирования, по крайней мере, в случае разбавленных и умеренно концентрированных растворов.

## Диффузионные измерения

Обнаружение и оценка размеров агрегатов по диффузионным измерениям – один из немногих методов, не возмущающих механически исследуемый объект. Недостатком диффузионных методов является их малая разрешающая способность, которая, однако, вполне достаточна, чтобы отделить одиночные частицы от агрегатов. В нашей работе мы использовали метод, подробно описанный в [8, 10]. Он основан на гармоническом анализе пространственного распределения концентрации в ячейке и обеспечивает хорошую точность измерения коэффициентов диффузии: погрешность не превышает 4–6 %. Рис. 2 иллюстрирует затухание со временем первой пространственной гармоники в опытах с магнитной жидкостью. Штриховая линия на рис. 2 соответствует раствору, содержащему частицы (или агрегаты) одинаковых размеров. Как хорошо видно из графика, реальная кривая сильно отличается от такой идеализированной ситуации. Однако она может быть хорошо описана в рамках двухфракционной модели. Первая фракция представлена одиночными частицами, а вторая – многочастичными агрегатами. Средний диаметр и концентрация агрегатов рассматривались нами как подгоночные параметры и были определены из сопоставле-

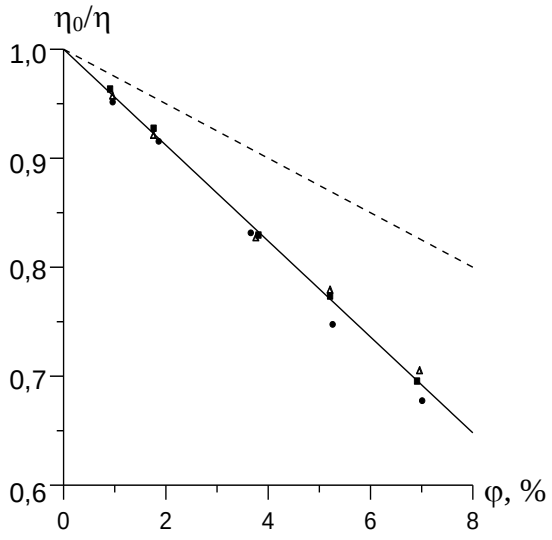



*Рис. 1. Концентрационная зависимость вязкости при разных температурах [7]*

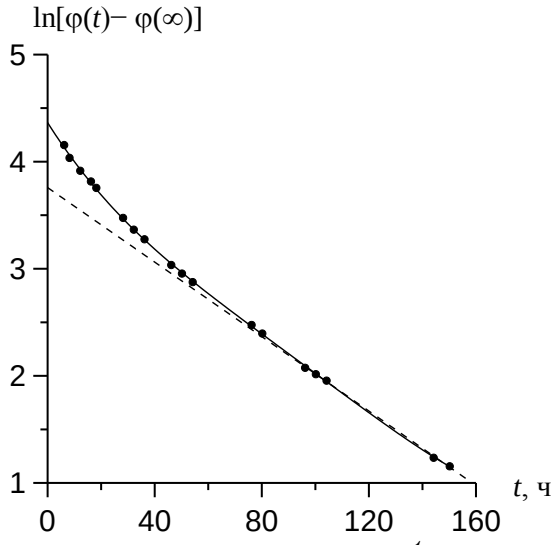



*Рис. 2. Релаксация основной пространственной гармоники в диффузионных опытах [7]*

ния расчетной кривой с экспериментальными данными [7]. Диффузионные опыты однозначно показывают, что в магнитной жидкости присутствует большое количество квазисферических агрегатов, содержащих в среднем несколько десятков частиц.

## Опыты в скрещенных магнитных полях

Метод скрещенных полей, предложенный в [11, 12], был усовершенствован нами путем учета межчастичных взаимодействий, размагничивающего фактора образца и полидисперсности частиц [13]. Было показано, что этот метод обладает высокой избирательной чувствительностью к цепочечным агрегатам – излюбленному объекту теоретических исследований и численного моделирования. Исследованы коллоидные растворы магнетита в декане в широком диапазоне подмагничивающих полей и концентраций магнитной фазы. В концентрированных растворах признаков существования цепочек не обнаружено, но их присутствие в разбавленных растворах не вызывает сомнений (рис. 3). Обнаружено три важных расхождения между экспериментальными данными и предсказаниями теоретических моделей:

1) цепочечные модели пренебрегают взаимодействием цепочек с окружающей средой, поэтому общая концентрация магнитных частиц в растворе выглядит несущественным параметром. Наши опыты показывают, что это не так. С ростом концентрации роль цепочек быстро ослабевает, и в концентрированных растворах их влияние на намагниченность системы становится пренебрежимо малым;

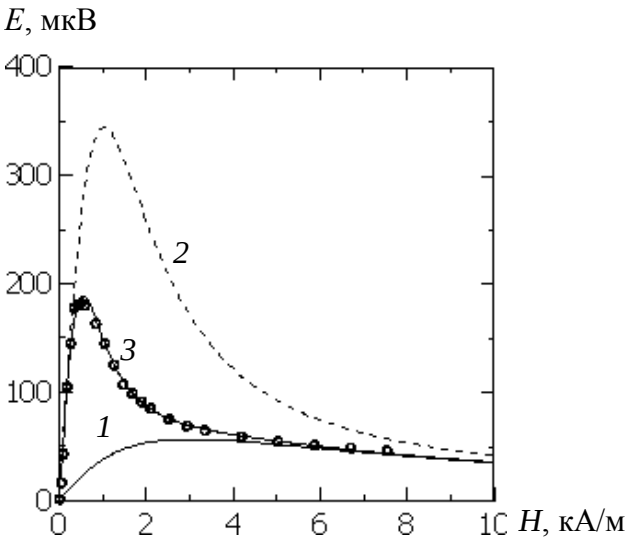



*Рис. 3. ЭДС в измерительной катушке в зависимости от подмагничивающего поля: 1 – расчет без учета цепочек; 2 – расчет с учетом цепочек по данным [13]; 3 – эксперимент*

2) цепочечные модели не учитывают наличия в магнитных жидкостях кластеров со сложной пространственной структурой, и в частности квазисферических кластеров. Результатом такого подхода является завышение числа цепочек в разбавленных растворах примерно на порядок;

3) в отличие от предсказаний аналитических моделей и результатов численного моделирования обнаруженные в эксперименте цепочки имеют минимальную размерность: в среднем в цепочке содержится по две-три частицы. Для таких образований сам термин «цепочка» вряд ли можно считать подходящим. Полимерные цепочки содержат, как известно, сотни и тысячи частиц.

## Низкочастотные измерения динамической восприимчивости

Разработан метод анализа микроструктуры магнитной жидкости, основанный на известной зависимости броуновского времени релаксации магнитного момента коллоидной частицы от ее размера и разложении низкочастотного спектра динамической восприимчивости в ряд по функциям Дебая [14]. Магнитная восприимчивость измерена на частотах от 10 Гц до 100 кГц в диапазоне температур от 225 до 360 К для коллоидных растворов с объемной долей магнетита от 0,08 до 0,17. Опыты подтвердили присутствие в магнитной жидкости большого числа агрегатов с характерным размером в 50–70 нм, который примерно в три-четыре раза превышает средний диаметр отдельных частиц. Вклад агрегатов в магнитную восприимчивость ферроколлоидов экспоненциально растет с понижением температуры и стано-

вится преобладающим при температурах ниже 300–320 К. Очень слабая зависимость размера агрегата от температуры противоречит выводам цепочечных моделей и может рассматриваться как подтверждение нашей гипотезы о том, что основной причиной образования агрегатов в ферроколлоидах на жидких углеводородах являются дефекты защитных оболочек, а квазисферическая форма агрегатов является наиболее вероятной. Образование цепочек выглядит скорее исключением, чем правилом. Этот вывод хорошо согласуется с данными, полученными из диффузионных опытов, и данными, полученными в опытах со скрещенными магнитными полями. Что касается количества агрегированных частиц, то оно, по-видимому, сильно зависит от технологии получения магнитной жидкости и может варьироваться в широких пределах. В этом смысле результаты, приведенные здесь, не универсальны – необходима некоторая осторожность при перенесении их на другие типы магнитных жидкостей. Не вызывает, однако, сомнения тот факт, что учет агрегирования совершенно необходим для описания динамики дипольных систем с интенсивными межчастичными взаимодействиями.

## Библиографический список


1. *Hess P.H.*, *Parker P.H.* Polymers for stabilization of colloidal cobalt particles // J. Appl. Polymer Sci. – 1966. – Vol. 10. – № 12. – P. 1915.
2. *Чеканов В.В.* Магнетизм малых частиц и их взаимодействие в коллоидных ферромагнетиках / Дис. … д-ра физ.-мат. наук. – Ставрополь, 1985.
3. *Диканский Ю.И.*, *Майоров М.М.* Реологические свойства концентрированной магнитной жидкости // Магнитная гидродинамика. – 1982. – № 4. – С. 117–130.
4. *Бибик Е.Е.* Влияние взаимодействия частиц на свойства феррожидкостей // Физические свойства магнитных жидкостей. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – С. 3–21.
5. *Богатырев Г.П.*, *Гилев В.Г.* Исследование концентрационной зависимости вязкости магнитной жидкости во внешнем поле // Магнитная гидродинамика. – 1984. – № 3. – С. 33–37.
6. *Варламов Ю.Д.*, *Каплун А.Б.* Измерение вязкости слабоагрегирующих магнитных жидкостей // Магнитная гидродинамика. – 1986. – № 3. – С. 43–49.
7. *Buzmakov V.M.*, *Pshenichnikov A.F.* On the Structure of Microaggregates in Magnetite Colloids // J. Colloid Interface Sci. – 1996. – Vol. 182. – P. 63–70.
8. *Пшеничников А.Ф.*, *Гилев В.Г.* Реология и намагниченность концентрированных магнетитовых коллоидов // Коллоидный журнал. – 1997. – Т. 59. – № 3. – С. 382–389.
9. *Ford T.F.* Viscosity-concentration and fluidity-concentration relationships for suspensions of spherical particles in newtonian liquids // J. Phys. Chem. – 1960. – Vol. 64. – P. 1168–1174.
10. *Бузмаков В.М.*, *Пинягин А.Ю.*, *Пшеничников А.Ф.* Методика одновременного измерения коэффициентов Соре и диффузии жидких растворов // Инж.-физ. журнал. – 1983. – Т. 44. – № 5. – С. 779–783.
11. *Luca E.*, *Cotae C.*, *Calugaru G.H.* Some aspects of the Procopiu effect in ferrofluids // Rev. Roum. Phys. – 1978. – Vol. 23. – P. 1173–1178.
12. *Пирожков Б.И.* Исследование явления агрегирования в магнитной жидкости методом скрещенных магнитных полей // Известия АН СССР, сер. Физическая. – 1987. – Т. 51. – С. 1088–1093.
13. *Pshenichnikov A.F.*, *Fedorenko A.A.* Chain-like aggregates in magnetic fluids // J. Magn. Mater. – 2005. – Vol. 292. – С. – P. 332–344.
14. *Лахтина Е.В.*, *Пшеничников А.Ф.* Дисперсия магнитной восприимчивости и микроструктура магнитной жидкости // Коллоидный журнал. – 2006. – Т. 68. – № 3. – С. 327–337.

# Мягкие магнитные эластомеры: гиганты магнитострикции

Райхер Ю.Л., Столбов О.В.

Обсуждается природа магнитострикции мягкого магнитного эластомера – удлинение/сжатие образца при намагничивании однородным магнитным полем в отсутствие механической нагрузки. Качественный анализ говорит о том, что внешнее поле оказывает на среду двоякое действие, причем один из механизмов стрикции проявляется на макроскопическом масштабе, а другой – на мезоскопическом. При этом последний, структурный, механизм стрикции определяется «архитектурой» ближнего порядка расположения магнитных частиц в эластомерной матрице. Этот вывод проиллюстрирован результатами численного моделирования деформации, которую вызывает приложение магнитного поля к двумерному упругому массиву, содержащему линейно намагничивающиеся частицы. Показано, что именно наличие/отсутствие кластеров приводит к разнице и в знаке, и в величине магнитострикции у материалов в остальном одинаковых по составу.

## Природа магнитострикции магнитных эластомеров

Функциональные материалы, получаемые при наполнении полимеров высокодисперсными ферромагнетиками, хорошо известны [1]. Выбирая в качестве матрицы резину (модуль упругости $G \sim 10$–$100$ МПа), этим способом, в зависимости от типа ферромагнетика (магнитомягкий / высококоэрцитивный), получают как сердечники индукционных катушек или экраны, поглощающие электромагнитное излучение, так и постоянные магниты, способные, не разрушаясь, деформироваться гораздо сильнее металлов или керамик. Системы, где высокодисперсный магнитный наполнитель помещен в очень мягкий ($G \sim 10$–$100$ кПа) полимер, появились сравнительно недавно [2, 3] и сразу вызвали большой интерес. Эти композиты образовали новое семейство смарт-материалов и приобрели известность под названием *магнитореологических* или *мягких магнитных* эластомеров (ММЭ). Подходящими матрицами для ММЭ являются полимерные гели и слабо сшитые каучуки, а наполнителями – микро- и нанопорошки железа и ферритов (например, магнетит и маггемит) [2–7].

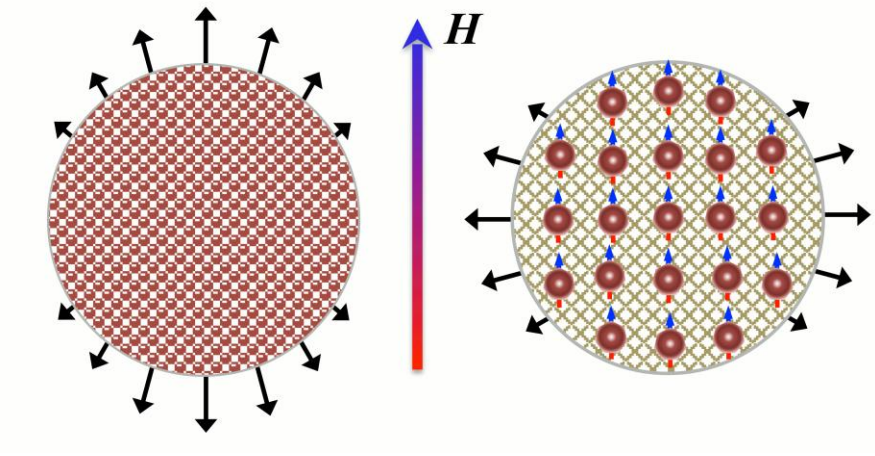
Главное, что отличает ММЭ от их жестких аналогов – это масштаб деформационного отклика на приложенное магнитное поле, в чем легко убедиться, сделав несколько простых оценок. Пусть в нашем распоряжении имеется однородное магнитное поле $\boldsymbol{H}$ напряженностью $H \sim 10^5$ А/м, или – в неоднородном случае – перепад поля $\Delta H \sim H$ на длине $l$ см; указанные значения легко достижимы в лабораторных условиях. Примем, что намагниченность ММЭ в таком поле составляет $M \sim 10^4$ А/м (в реальности, она может быть в два-три раза выше). Вызываемая однородным полем $\boldsymbol{H}$ деформация $\Delta l/l$ – ее принято называть *магнитострикционным эффектом* [8] – определяется балансом магнитного и упругого вкладов в плотность энергии образца: $\mu_0 M^2 \sim G(\Delta l/l)^2$. Полагая модуль сдвиговой упругости материала $G \sim 10$ кПа, находим $\Delta l/l \sim 10\%$, что на несколько порядков величины (то есть, в тысячу и более раз) превосходит возможную магнитострикционную деформацию любой магнитной резины и, тем более, твердого ферромагнетика.

В неоднородном поле ММЭ деформируется под действием объемных магнитных сил. Приравнивая их работу по смещению элемента на расстояние $\Delta l$ приращению плотности упругой энергии, находим $\Delta l/l \sim \mu_0 M \Delta H/G$; подстановка туда числовых значений снова дает $\Delta l/l \sim 10\%$. Отсюда видно, что даже умеренное поле приводит к существенному формоизменению ММЭ. Именно эта особенность и позволяет выделить эти материалы в отдельный класс отличный от традиционных магнитных эластомеров (резин).

Приведенные выше оценки исходят из представления о ММЭ как о сплошной изотропной упругой среде (континууме), любой элемент которой обладает одной и той же способностью изотропно намагничиваться. Вероятно, самый известный пример использования этой простой модели – расчет деформации сферы из ММЭ при намагничивании однородным полем [3, 9–11]. Такая континуальная теория позволяет легко ответить на вопрос о знаке деформации, см. рис. 1*а*. Поскольку магнитное поле внутри сферы однородно, то однородна и направлена вдоль поля и намагниченность ММЭ. В этом случае единственным следствием намагничивания является поверхностное давление пропорциональное $M_n^2$ – квадрату проекции намагниченности на локальную нормаль. Очевидно, что эта величина максимальна на «полюсах», то есть в точках, где вектор ***H***, проведенный через центр сферы, пересекает ее поверхность. Отсюда следует однозначный вывод о том, что при намагничивании сфера из ММЭ должна *вытягивается* в направлении приложенного поля.

Рассмотрим ту же задачу, уделив внимание внутренней структуре материала. К этому есть все основания, поскольку любой реальный ММЭ является гетерогенным материалом. Рис. 1*б* схематически показывает внутреннее строение сферы, которая изображена на рис. 1*а*. Она представляет собой «арбуз с семечками»: внутри весьма мягкой матрицы находится большое количество распределенных в ней мелких твердых частиц либо из металла (например, железо), либо из керамики или природного минерала (например, магнетит $Fe_3O_4$). В обоих случаях частицы имеют микронные размеры, то есть с точки зрения магнитного материаловедения относятся к «магнитомягким».

Важно подчеркнуть, что магнитная «мягкость» никак не связана с аналогичным механическим свойством: модуль Юнга материала частиц всегда на много порядков превышает модуль упругости полимера. Магнитная мягкость частиц означает наличие у них способность намагничиваться под действием приложенного поля и терять намагниченность при выключении последнего (безгистерезисное намагничивание).




*а* *б*

*Рис. 1. К выяснению природы магнитострикционного эффекта в ММЭ:*
*а – континуальное представление (черные стрелки показывают распределение давления);*
*б – мезоскопическое представление (цветными стрелками обозначены магнитные моменты частиц)*

Таким образом, магнитное поле, приложенное к образцу ММЭ, никак не влияя на матрицу, намагничивает частицы, то есть сообщает им магнитные моменты в направлении $\boldsymbol{H}$ (для простоты мы пренебрегаем поправками на внутреннее поле). В результате, каждая частица становится источником собственного магнитного поля и вступает в силовое электромагнитное взаимодействие со всеми остальными. Полагая намагниченность частиц однородной, можно считать, что межчастичный потенциал сводится к диполь-дипольному, анизотропия которого хорошо известна. В результате, оказывается, что каждая частица на рисунок 1*б* притягивается к своим ближайшим соседям по прямой вдоль $\boldsymbol{H}$ (конфигурация «голова–хвост») и отталкивается от соседей расположенных вдоль линии перпендикулярной $\boldsymbol{H}$ (конфигурация «бок-о-бок»). Легко видеть, что при достаточно прочной адгезии эти внутренние силы передаются матрице и, помогая друг другу, *сжимают* сферу в направлении поля.

Обнаруженный антагонизм между сделанными предсказаниями не означает, что какая-то одна из трактовок – континуальная либо дискретная – полностью неверна. Однако выявленное противоречие определенно указывает на чрезмерность упрощений, использованных при рассмотрении модельных задач. Как показано ниже, корректный подход должен учитывать, что намагничивание ММЭ оказывает на его деформацию двоякое действие, в то время как рисунки 1*а* и 1*б* отражают, каждый, только один из аспектов проблемы. Этот вывод справедлив для любого внешнего поля, в том числе однородного, когда объемные силы отсутствуют.

Первый механизм деформирования обусловлен возникновением в образце ММЭ макроскопической намагниченности $\boldsymbol{M}$. Она создает внутри и вокруг тела поле $\boldsymbol{H}_d$, внутри тела $\boldsymbol{H}_d$ называется полем размагничивания. Взаимодействие между $\boldsymbol{M}$ и $\boldsymbol{H}_d$ определяет ту часть магнитостатической энергии, которая зависит от формы тела. Стремление этого вклада к минимуму реализуется через удлинение тела в направлении поля. Для малых деформаций задача имеет точное решение [9], случаи конечных деформаций сферы и эллипсоида изучены численно [10].

Как следует из приведенных рассуждений, тенденция к удлинению при намагничивании присуща только ограниченным телам, так как только в них $\boldsymbol{H}_d \neq 0$. С учетом этого обстоятельства рассмотренный механизм деформации ММЭ можно назвать *магнитострикцией формы*. Поскольку поле $\boldsymbol{H}_d$ имеет макроскопический масштаб и слабо зависит от деталей пространственного распределения частиц в матрице, то для описания магнитострикции формы вполне подходит континуальная модель. Отметим, что для однофазных (твердых) ферромагнетиков и ферритов деформация, связанная с магнитострикцией формы, ничтожно мала. Таким образом, значительная величина указанного эффекта – специфическое свойство мягких магнитных материалов.

Другой механизм магнитоиндуцированной деформации – назовем его *структурной магнитострикцией* – как было отмечено, определяется взаимодействием частиц на мезоскопическом масштабе $l \leq (N/V)^{-1/3}$, где $N$ – число частиц в образце ММЭ, а $V$ – его объем. По этой причине соответствующий вклад в магнитостатическую энергию практически не зависит от формы тела и не обращается в нуль в бесконечном массиве материала. С другой стороны, из-за анизотропии магнитодипольного взаимодействия эта энергия существенно зависит от того, каков ближний пространственный порядок в магнитной подсистеме, имеются ли в ней флуктуации плотности числа частиц и каковы они. Отсюда следует, что в отличие от всегда положительной магнитострикции формы структурная магнитострикция может иметь любой знак. В этом контексте рисунок 1*б* (правильная решетка частиц), где магнитострикция в пренебрежении эффектом формы получается отрицательной, следует рассматривать лишь как иллюстрирующий пример.

Важная роль ближних межчастичных взаимодействий в ММЭ отмечена в ряде работ [12–16], но в целом в современной литературе по магнитомеханике феррогелей

и ММЭ четкое разделение вкладов формы образца и его внутренней структуры в магнитострикцию отсутствует. Так, даже в основополагающих экспериментальных [2, 8, 17] и теоретических [18, 19] работах магнитострикцией называется любое формоизменение тела при намагничивании однородным полем. К этому есть и практические основания: в эксперимент разделение вкладов в магнитострикцию затруднено. В самом деле, легко измерить макроскопические намагниченность и деформацию реального ММЭ, но чрезвычайно сложно «запрограммировать» перед полимеризацией матрицы пространственную структуру ансамбля микрочастиц или провести достоверный морфологический анализ уже изготовленного материала.

Рассмотрим проблему магнитострикции с помощью математической модели, представляющей ММЭ как дисперсию частиц магнитомягкого ферромагнетика в изотропно упругой матрице. Числовая концентрация частиц – они предполагаются идентичными по размеру сферами – близка к той, что имеется в реальных высоконаполненных материалах, планируемых для практического использования. Из-за ограниченности вычислительных ресурсов общее количество частиц нельзя взять очень большим, поэтому в модельном образце ММЭ (квадрат) они размещены в один слой. По этой причине полученные результаты не могут претендовать на количественную точность. Однако качественные выводы о поведении ММЭ, получаемые на этой модели, вполне согласуются с данными имеющихся наблюдений.

Главные вопросы, на которые должна отвечать теория магнитодеформационного отклика ММЭ, заключаются в следующем: 1) будет ли заданный образец изменять свою геометрию при намагничивании и в какой степени это будет происходить, 2) как ориентированы главные оси возникающего удлинения/сжатия относительно направления приложенного однородного магнитного поля? Анализ показал, что ключевую роль здесь играют особенности внутренней структуры – характер ближнего порядка в расположении частиц. Иными словами, два образца ММЭ идентичной формы и размера с одним и тем же содержанием магнитной фазы могут совершенно по-разному реагировать на приложенное поле.

Фундаментальной причиной такого отличия является анизотропия магнитостатического взаимодействия. Напомним, что намагниченные частицы взаимно притягиваются вдоль направления поля и взаимно отталкиваются в перпендикулярной плоскости. Поскольку межчастичные магнитные силы достаточно быстро спадают с расстоянием, то для любой данной частицы самым важным фактором является структура ее ближнего окружения. Именно от взаимного расположения соседних частиц зависит, будут ли они собираться в цепочечные агрегаты или же удалятся друг от друга. Каждая частица при своем перемещении сдвигает и прилегающую к ней область полимера. В ММЭ с высокой степенью наполнения одновременное число таких мелкомасштабных (мезоскопических) движений очень велико. Очевидно, что, если в композите имеется или создан преобладающий тип ближнего порядка частиц, то мезоскопические процессы должны заметным образом влиять на макроскопическое поведение образца.

Как следует из сказанного выше, магнитодеформационный отклик, фиксируемый в эксперименте, является совокупностью двух главных вкладов. Первый из них – эффект формы, его природа сугубо макроскопическая. Второй вклад обусловлен структурным эффектом ближнего порядка, и имеет мезоскопическое происхождение. Задание формы образца и содержания в нем ферромагнитной фазы практически однозначно определяет первый из вкладов. Проследить за вторым сложнее – для этого нужно, не изменяя объемной концентрации ММЭ, уметь варьировать ближний порядок в нем.

Вероятно, самый прямой путь к получению нужных образцов – с одинаковым содержанием ферромагнетика, но разными типами ближнего порядка – это высокоточный 3D принтинг металл-полимерных композитов. К сожалению, такой подход относится пока к области гипотез, поскольку еще не существует принтеров, позво-

ляющих в едином процессе изготавливать полимер с вкраплениями ферромагнитного металла или феррита. Однако случай ММЭ – это пример ситуации, когда отсутствие реального эксперимента не является фатальным препятствием для продвижения вперед. Благодаря удачному соотношению параметров, численный эксперимент здесь имеет высокую степень достоверности.

Поясним, на чем основан этот вывод. Интервал пространственных масштабов, который является мезоскопическим применительно к ММЭ (1–10 мкм), является в то же время сугубо макроскопическим (классическим) по отношению к атомно-молекулярным размерам (1–10 нм). Указанная разница в три порядка означает, что, во-первых, частицы ферромагнитного наполнителя ММЭ можно с высокой точностью трактовать как тела, выполненные из твердого монолитного ферромагнетика, и применять к ним хорошо разработанную для таких веществ феноменологию. Во-вторых, матрицу ММЭ заведомо допустимо рассматривать как сплошную высокоэластическую среду и, таким образом, использовать для ее описания теоретическую механику эластомеров. Таким образом, для изучения структурных процессов в ММЭ на микронных масштабах можно использовать хорошо апробированные методы.

В рамках этого подхода ММЭ рассматривается как двухфазный (частицы в окружении матрицы) материал в условиях полной адгезии. Модули упругости фаз отличаются на несколько порядков; в присутствие магнитного поля твердая фаза ведет себя как типичный многодоменный ферромагнетик. Тем самым, основные задачи мезоскопической механики ММЭ переводятся в удобный для компьютерного моделирования формализм связанных задач магнитоупругости. Понятно, что обратный переход – от мезоскопических масштабов к макроскопическим – потребует усреднения полученных решений по большим ансамблям частиц, составляющих ММЭ.

## Решение двумерной многочастичной задачи

Модельным образцом ММЭ служит плоский квадрат из изотропно упругого материала, содержащий 160 идентичных магнитомягких частиц; между матрицей и частицами имеется полная адгезия. На двух смежных сторонах квадрат нормальные к границам смещения запрещены; радиус частицы $a$ составляет 1/50 стороны образца, см. рис. 2. Однородное поле $\boldsymbol{H}_0$ приложено вдоль оси $Oy$, намагниченность частиц линейно растет с ростом поля. Магнитная (пондеромоторная) сила, действующая на любую частицу, вычисляется как сумма вкладов всех остальных частиц системы, а возникающие деформации предполагаются малыми.

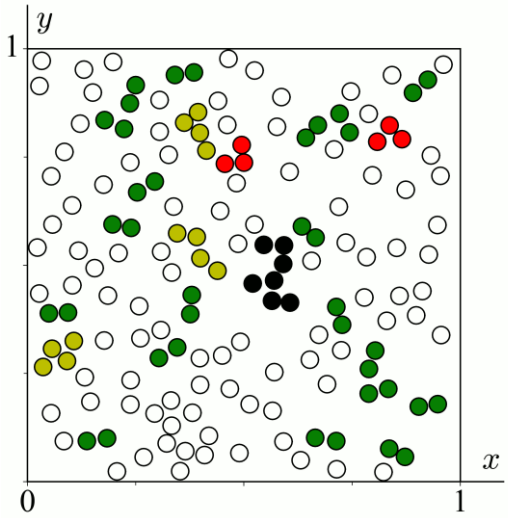



*Рис. 2. Пример случайного распределения 160 частиц в образце квадратной формы; радиус каждой частицы a = 0.02; на смежных сторонах квадрата (x = 1 и y = 0) смещения по нормали запрещены, см. условия (5). Цветом показан результат кластерного анализа: светлые частицы – «свободные», окрашенные – входящие в состав кластеров, см. раздел 3*

Поскольку надежные данные о морфологии реальных ММЭ отсутствуют, для расчета выбран образец со случайным размещением частиц. Пример реализации пространственной структуры показан на рисунке 2. Для получения статистики использован набор из 30 реплик начального состояния.

Для изучения механических свойств ММЭ представляется как континуум с кусочно-постоянными свойствами, упругими и магнитными. А именно, рассматривается плоский слой полимера (матрица) с $N$ круговыми лакунами диаметром $2a$ , в каждую из которых без зазора помещен круглый диск высоты $2a$ и того же диаметра из жесткого материала (частица). Расчет изменения формы образца при намагничивании, ведется в приближении малых деформаций и в предположении, что для обоих компонентов системы справедлив закон Гука.

В принятой модели уравнение равновесия образца и условие несжимаемости материала принимают вид:

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{f}_{\text{mag}} = 0\,,\ J_1(\mathbf{e}) = 0, \tag{1}$$

здесь σ – тензор напряжений Коши; $J_1$ – первый инвариант тензора малых деформаций **e**; а $f_{\text{mag}}$ – плотность магнитных сил.

Закон Гука для несжимаемого материала записывается в форме

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{g} + 2G\mathbf{e}\,, \tag{2}$$

где $p$ – гидростатическое давление; $\boldsymbol{g}$ – единичный тензор; $G$ – модуль сдвига. Как указано выше, в рассматриваемом случае $G$ – кусочно-постоянная функция, зависящая от координат; для полимерной матрицы ее значение принимается равным единице, а для магнитных частиц (металл или феррит) – $G = 10^5$. Таким образом, вводя функцию-индикатор $I_i(\boldsymbol{r})$, которая равная единице, когда радиус-вектор $\boldsymbol{r}$ принадлежит $i$-й частице, и нулю в противном случае, имеем

$$G(\boldsymbol{r}) = \sum_i \left\{ 10^5 I_i(\boldsymbol{r}) + \left[ I_i(\boldsymbol{r}) - 1 \right] \right\}. \tag{3}$$

Для тензора деформации принимается стандартное кинематическое соотношение

$$\mathbf{e} = \tfrac{1}{2}\left( \nabla\boldsymbol{u} + \nabla\boldsymbol{u}^T \right)\,, \tag{4}$$

выражающее его через градиенты вектора перемещений $\boldsymbol{u}$; индекс $T$ означает транспонирование матрицы. На двух смежных сторонах образца ($x = 1$ и $y = 0$) предполагается неразрывный контакт ММЭ со сторонами ограничивающего квадрата:

$$u_x\big|_{x=1} = 0, \quad u_y\big|_{y=0} = 0\,, \tag{5}$$

но допускается свободное скольжение вдоль них; две другие смежные стороны считаются свободными для смещений в плоскости $xOy$:

$$\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{\sigma}\big|_{x=0} = 0, \qquad \boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{\sigma}\big|_{y=1} = 0 \tag{6}$$

где $\boldsymbol{n}$ – вектор наружной нормали к границе слоя.

### *Магнитные силы*

В приближении малых деформаций задачи о расчете упругих напряжений и магнитных сил разделяются. Сначала в предположении о том, что индуцированные магнитные моменты частиц являются точечными, находятся парные магнитодипольные силы, которые действуют между частицами в исходной конфигурации. Энергия точечного магнитного диполя имеет вид:

$$U^{(i)} = -\boldsymbol{m}^{(i)}\cdot\boldsymbol{H}^{(i)}\,, \tag{7}$$

здесь $\boldsymbol{m}^{(i)}$ – магнитный момент $i$-й частицы, а $\boldsymbol{H}^{(i)}$ – вектор локального магнитного поля, определяемый как сумма внешнего однородного поля $\boldsymbol{H}_0$ и полей от всех остальных диполей в точке, где находится $i$-я частица:

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r}_i) = \boldsymbol{H}_0 + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} \left[ -\frac{\boldsymbol{m}^{(i)}}{r_{ij}^3} + \frac{3(\boldsymbol{m}^{(i)} \cdot \boldsymbol{r}_{ij})}{r_{ij}^5} \boldsymbol{r}_{ij} \right], \quad \boldsymbol{r}_{ij} = \boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j . \tag{8}$$

Далее для простоты частица предполагается сферической, что позволяет простым образом найти ее магнитный момент; он всегда направлен вдоль внешнего поля $\boldsymbol{H}_0$ и равен

$$\boldsymbol{m}^{(i)} = \frac{3\upsilon \boldsymbol{H}_0}{3\chi^{-1} + 4\pi}, \tag{9}$$

где $\upsilon$ – объем, а $\chi$ – объемная магнитная восприимчивость материала частицы. Для сильно намагничивающихся веществ (например, для железа, у которого $\chi \gtrsim 10^3$ формула (9) сводится к известному предельному выражению $\boldsymbol{m} = 3\upsilon \boldsymbol{H}_0 / 4\pi$.

Сила, приложенная к $i$-й частице, находится как градиент ее дипольной энергии:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{F}_i &= -\nabla \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} U^{(j)} = \boldsymbol{m}^{(i)} \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} \nabla \left[ -\frac{\boldsymbol{m}^{(j)}}{r_{ij}^3} + \frac{3(\boldsymbol{m}^{(j)} \cdot \boldsymbol{r}_{ij})}{r_{ij}^5} \boldsymbol{r}_{ij} \right] = \\ &= \sum_{j=1,\, j\neq i}^{N} \left\{ \frac{3}{r_{ij}^5} \left[ \left( \boldsymbol{m}^{(j)} \cdot \boldsymbol{m}^{(i)} \right) \boldsymbol{r}_{ij} + \left( \boldsymbol{m}^{(j)} \cdot \boldsymbol{r}_{ij} \right) \boldsymbol{m}^{(i)} + \left( \boldsymbol{m}^{(j)} \cdot \boldsymbol{r}_{ij} \right) \boldsymbol{m}^{(j)} \right] - \frac{15}{r_{ij}^7} \left( \boldsymbol{m}^{(j)} \cdot \boldsymbol{r}_{ij} \right) \left( \boldsymbol{m}^{(i)}{}_i \cdot \boldsymbol{r}_{ij} \right) \boldsymbol{r}_{ij} \right\} \end{aligned} \tag{10}$$

и равномерно «размазывается» по пространству занятому частицей, что удобно для механического расчета. Таким образом, распределению сил в образце придается форма кусочно-постоянной функции:

$$\boldsymbol{f}_{\text{mag}}(\boldsymbol{r}) = (\pi a^2)^{-1} \sum_i \boldsymbol{F}_i I_i(\boldsymbol{r}) . \tag{11}$$

### *Магнитострикционная деформация*

После нахождения магнитных сил уравнения теории упругости в образце решаются методом конечных элементов с помощью программного пакета FreeFEM++ [20]. Для его использования записывается общая вариационная постановка задачи в виде:

$$\int_V \left( \boldsymbol{\sigma} \cdot\cdot \delta\mathbf{e} + J_1(\mathbf{e}) \delta p \right) dV = \int_V \boldsymbol{f}_{\text{mag}} \cdot \delta \boldsymbol{u} \, dV ; \tag{12}$$

здесь функция $\boldsymbol{f}_{\text{mag}}$ определяется формулой (11). Подстановкой закона Гука (2) и кинематического соотношения (4) функционал (12) преобразуется к форме:

$$\int_V \left[ -p \nabla \cdot \delta \boldsymbol{u} + \tfrac{1}{2} G \left( \nabla \boldsymbol{u} + \nabla \boldsymbol{u}^T \right) \cdot\cdot \left( \nabla \delta \boldsymbol{u} + \nabla \delta \boldsymbol{u}^T \right) + J_1(\mathbf{e}) \delta p \right] dV = \int_V \boldsymbol{f}_{\text{mag}} \cdot \delta \boldsymbol{u} \, dV ; \tag{13}$$

входящие сюда модуль упругости и магнитная сила задаются кусочно-постоянными функциями (3) и (11) соответственно.

Минимизация функционала (13) производится на достаточно густой треугольной сетке, охватывающей образец вместе с частицами. В результате, по заданным магнитным силам $\boldsymbol{f}_{\text{mag}}$ находятся поля перемещений $\boldsymbol{u}$ и давления $p$. В качестве интегральной меры удлинения (сжатия) образца используется среднее перемещение его верхней границы (нижняя граница неподвижна):

$$\varepsilon = \int_0^1 u_y \,|_{y=1} dx . \tag{14}$$

В решаемой линейной задаче эта величина имеет смысл относительного удлинения. Поскольку в расчете безразмерное магнитное поле предполагается единичным ($H_0^2 / G_{\text{m}}$=1, где $G_{\text{m}}$ – модуль сдвига матрицы), то параметр ε численно совпадает с начальной «магнитострикционной восприимчивостью» $G_{\text{m}} (d\varepsilon / dH_0^2)_{H_0=0}$ изучаемого образца.

## Результаты 2D моделирования

Как показывает качественный анализ, деформация, индуцируемая в модельном образце приложенным однородным магнитным полем, должна содержать вклады, обусловленные как эффектом формы тела, так и структурной магнитострикцией. Прямая попытка установить, какой из вкладов является определяющим в рассматриваемом квадратном образце при данной концентрации частиц (~20% по занимаемой площади), терпит неудачу. Полученное распределение величины $\varepsilon$ (по 30 реализациям) не дает определенного ответа: вероятности получить удлинение или сжатие образца оказываются близкими, что видно из рисунка 3*а*. Иными словами, в изученных конфигурациях частиц магнитострикционный эффект сильно флуктуирует. Главную неопределенность вносит, конечно, структурная магнитострикция, величина и знак которой зависят от мелкомасштабных неоднородностей пространственного распределения частиц.

Для анализа полученных результатов, вернемся к качественному рассмотрению структурной магнитострикции, имея в виду трехмерный случай. Если предположить, что распределение частиц ММЭ имеет высокую степень равномерности на мезоскопическом масштабе, иными словами, почти все магнитные частицы изолированы и находятся друг от друга на расстояниях близких к среднестатистическому значению $l \leq (N/V)^{-1/3}$, то структурная магнитострикция такого «квазикристалла» не должна сильно отличаться от той же характеристики решеточной системы (рис. 1*б*) и, согласно проведенным рассуждениям, должна быть отрицательной.

Пусть теперь магнитный наполнитель специально внедрен в матрицу в виде одномерных линейных цепочечных кластеров, каждый из которых содержит ν частиц. Каждый такой магнитный «ν-мер» реагирует на приложенное поле как единый объект, стремясь ориентировать свою главную ось вдоль направления $\boldsymbol{H}_0$. При отличном от нуля начальном угле наклона поворот цепочки должен вызывать локальное растяжение матрицы в направлении $\pm \boldsymbol{H}_0$, и, тем самым, создавать положительную структурную магнитострикцию. Чем длиннее цепочка, тем сильнее будет эффект при данной величине поля.

Эти выводы были проверены на тех же 30 пространственных распределениях частиц, что использовались для получения рисунка 3*а*. Предварительно каждая конфигурация анализировалась следующим образом. Из полной совокупности частиц выбирались те, которые можно считать объединенными в группы (кластеры). Принадлежность к кластеру определялась из требования, чтобы каждая его частица имела не менее одного соседа на расстоянии, измеряемом между центрами частиц, не превышающем $2a(1+\delta)$, где для параметра было взято значение $\delta = 0.04$. Тем самым, все частицы образца разбивались на две группы: «свободные» и входящие в кластеры.

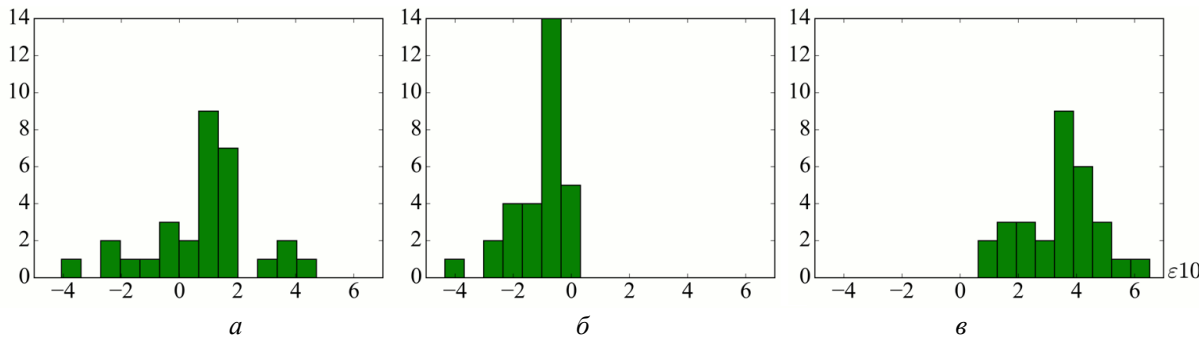



*Рис. 3. Гистограмма удлинений модельного ММЭ; вертикальная ось – число реализаций: а – все частицы имеют одинаковую магнитную восприимчивость; б – магнитными свойствами обладают только «свободные» частицы; в – магнитными свойствами обладают только частицы, объединенные в кластеры*

После выполнения кластерного анализа конфигурация преобразовывалась по двум вариантам. В одном, все «свободные» частицы оставляли без изменения, а частицам, входящим в кластеры, приписывали нулевую магнитную восприимчивость. Во втором варианте способность намагничиваться сохраняли только за частицами, принадлежащими кластерам, а изолированные частицы полагали немагнитными. Очевидно, что различия между так модифицированными системами должны проявляться только при намагничивании, поскольку в нулевом поле механические свойства любого из образцов тождественны исходному.

По каждому из двух вариантов задача о магнитодеформационном отклике была решена численно на 30 репликах, и оттуда по формуле (14) были найдены получившиеся удлинения $\varepsilon$. Эти результаты представлены гистограммами на рисунках 3*б* и 3*в*.

Поскольку начальная геометрия образца во всех расчетах одинакова, разница между графиками 3*а*–3*в* обусловлена исключительно наличием/отсутствием удлиненных кластеров. Рассмотрим рисунок 3*б*, который относится к образцам, где магнитные моменты есть только у изолированных, не входящих в кластеры, частиц. Несмотря на статистический разброс удлинений по абсолютной величине, на этой гистограмме нет положительных значений. Отсюда следует, что ММЭ, не содержащий магнитных кластеров при намагничивании *сжимается*. Напротив, образцы, где все частицы, обладающие магнитным моментом, собраны в кластеры, имеют явно выраженную положительную структурную магнитострикцию – см. рисунок 3*в* – то есть, при намагничивании они *удлиняются*. Выявленные тенденции позволяют легко объяснить гистограмму рисунка 3*а*, полученную для исходного образца, в котором свободные частицы сосуществуют с кластерами. Вполне естественно, что этот образец имеет самую широкую гистограмму деформаций, а математическое ожидание $\varepsilon$, определенное из нее, оказывается по абсолютной величине много меньше, чем соответствующие значения, которые следуют из рисунков 3*б* и 3*в*. Хотя представленные результаты нельзя считать исчерпывающим доказательством, они, тем не менее, являются серьезным доводом в пользу сформулированного выше общего утверждения о том, что характер мезоскопической организации частиц играет очень важную роль в макроскопической магнитомеханике ММЭ.

Еще одной иллюстрацией той ключевой роли, которую играет степень агрегирования служат результаты серии численных экспериментов на модельной системе, которая представляет собой плоский квадратный слой из ММЭ, содержащий 160 частиц, распределенных по случайному закону. Соотношение между площадями проекций частиц и матрицы на плоскость слоя составляет $\sim 20\%$. Для 30 реализаций распределения частиц был рассчитан магнитодеформационный отклик такого образца по отношению к намагничиванию в плоскости слоя. Как и следовало ожидать, в случае неагрегированных частиц структурная магнитострикция отрицательна. В то же время, в системах, где имеются кластеры, эта характеристика существенно положительна.

Конечно, результаты выполненных численных экспериментов нельзя соотносить с реальными ММЭ количественно. Однако они позволяют сделать важный качественный вывод о том, что структурная магнитострикция ММЭ должна быть тем сильнее, чем больше длина цепочечных кластеров, содержащихся в образце. Говоря шире – главную роль в формировании структурного магнитного отклика ММЭ играют анизотропные межчастичные корреляции высокого порядка [22]. Отсюда следует, что для адекватного описания таких материалов необходимо опираться на численное моделирование, поскольку теории типа среднего поля, такие как, например, модель, предложенная в работе [21]), здесь, скорее всего, бесперспективны.

Изложенные выше результаты получили прямое экспериментальное подтверждение в работе [23], где были выполнены измерения магнитодеформационного эф-

фекта в изотропном ММЭ на основе силиконового каучука, наполненного микрочастицами карбонильного железа со средним диаметром ~ 6 мкм; объемная доля ферромагнетика в композите составляла около 15%, распределение частиц было случайным. Один торец цилиндра диаметром 20 мм и высотой 10 мм был закреплен на подложке, другой торец был свободен; однородное магнитное поле напряженностью около 500 Э было направлено вдоль оси цилиндра. Нормальные к плоскости смещения поверхности свободного торца образца фиксировались с помощью оптической интерферометрии. Измерения были проделаны на более чем десятке образцов и все результаты были аналогичны. Типичные картины, полученные на одинаковых участках торцевой поверхности четырех различных образцов приведены на рисунке 4, взятом из работы [23]. Как показывает сопоставление со шкалой цвета, рельеф поверхности неоднороден и всегда представляет собой комбинацию положительных (осевое растяжение цилиндра) и отрицательных (сжатие) смещений.

Для интерпретации полученных изображений напомним, что наблюдение всегда дает суммарный результат действия магнитострикции формы и структурной магнитострикции. Рассматриваемый образец представляет собой сплюснутый цилиндр (диаметр больше высоты), так что влияние магнитострикции формы, которая требует осевого удлинения образца в нем относительно невелико, и это делает структурный магнитострикционный эффект более заметным. Напомним, что последний провоцирует сжатие в областях, где частицы преимущественно изолированы, и стремится вызвать растяжение в тех областях, где имеются анизометричные кластеры.

В макроскопически изотропном ММЭ есть области обоих типов и их распределение случайно. В условиях только структурной магнитострикции (то есть, без учета магнитострикции формы) распределение обозначающих цветов было бы приблизительно равным: красная гамма – растяжение, синяя гамма – сжатие. Добавление же внешнего эффекта, который всегда провоцирует растяжение, обеспечивает сдвиг цветовой картины в «красную» сторону. Именно такой тип окраски имеют все интерферограммы рисунка 4.

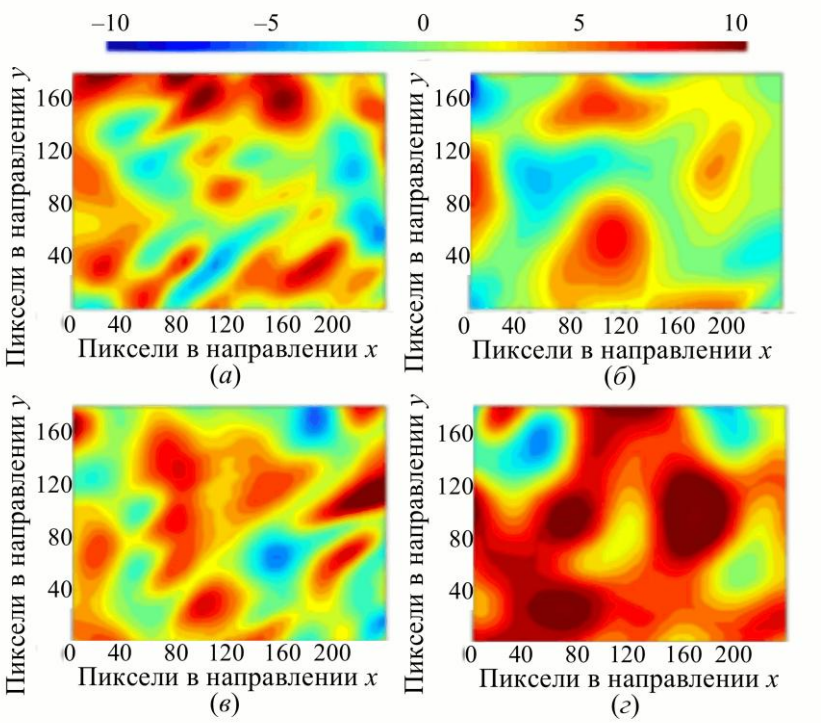



*Рис. 4. Интерферограммы участков торцевой поверхности цилиндров из ММЭ в продольном поле H = 500 Э; цветовая шкала (вверху) показывает области подъема / опускания относительно невозмущенного уровня (при H = 0); панели (а)–(г) соответствуют четырем разным образцам; взято из работы [23]*

Для интерпретации полученных изображений напомним, что наблюдение всегда дает суммарный результат действия магнитострикции формы и структурной магнитострикции. Рассматриваемый образец представляет собой сплюснутый цилиндр (диаметр больше высоты), так что влияние магнитострикции формы, которая требует осевого удлинения образца в нем относительно невелико, и это делает структурный магнитострикционный эффект более заметным. Напомним, что последний провоцирует сжатие в областях, где частицы преимущественно изолированы, и стремится вызвать растяжение в тех областях, где имеются анизометричные кластеры.

В макроскопически изотропном ММЭ есть области обоих типов и их распределение случайно. В условиях только структурной магнитострикции (то есть, без учета магнитострикции формы) распределение обозначающих цветов было бы приблизительно равным: красная гамма – растяжение, синяя гамма – сжатие. Добавление же внешнего эффекта, который всегда провоцирует растяжение, обеспечивает сдвиг цветовой картины в «красную» сторону. Именно такой тип окраски имеют все интерферограммы рисунка 4.

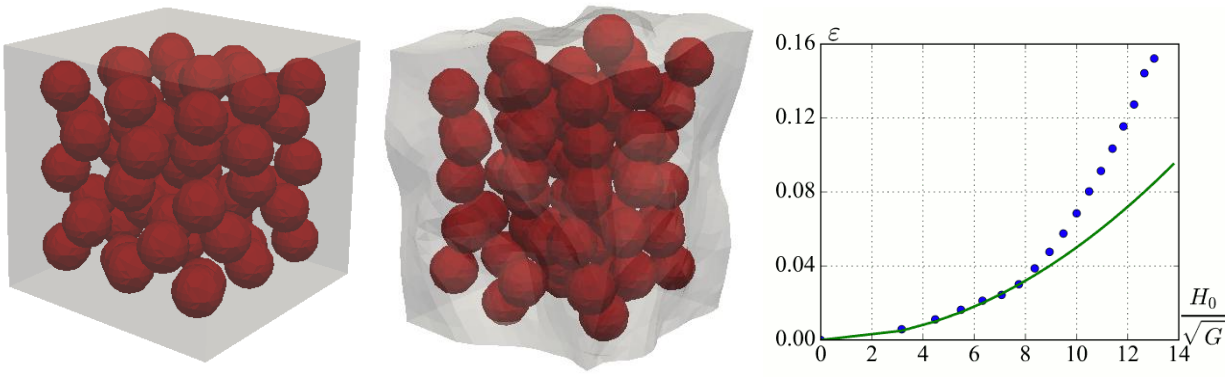
## Моделирование ММЭ в 3D

Двумерное моделирование позволяет установить важные функциональные свойства ММЭ, которые продиктованы особенностями их мезоскопической структурной организации. Однако ограничения, налагаемые при этом на конфигурационную свободу частиц и на их форму (диски или бесконечные цилиндры в направлении, нормальном к плоскости), заведомо ставят под сомнение применимость 2D моделей к количественному описанию реальных материалов.

Прежде всего заметим, что основные уравнения магнитостатики и теории упругости выше уже записаны в векторном виде, и никаких модификаций, кроме тривиальных (увеличение числа координат), при переходе к 3D представлению не претерпевают. Существенно изменяются только численные схемы, применяемые для расчетов.

Переход к трехмерному случаю с точки зрения технологии расчетов не представляет особых трудностей. Препятствием является резко возрастающий расход компьютерных ресурсов. Желание получить решение 3D задачи за обозримое время вынуждает уменьшать число частиц в рассматриваемом образце.

Рисунок 5 иллюстрирует результаты численного эксперимента над системой, содержащей 64 одинаковые сферические частицы из магнитомягкого ферромагнетика, центры масс которых случайным образом размещены в кубическом образце при объемном содержании твердой фазы около 26%. Таким образом, речь идет об имитации магниострикции в концентрированном ММЭ.




*а* *б* *в*

*Рис. 5. Пример расчета на модели из 64 частиц; а – исходное состояние образца; б – стрикционная деформация, вызванная наложением магнитного поля параллельного вертикальной грани куба; в – относительное удлинение в направлении поля: результаты численного моделирования (точки) в сопоставлении с аналитической оценкой в приближении малых деформаций (линия)*

Поскольку число частиц, принимаемых в расчет, на несколько порядков меньше, чем в любом реальном образце, такой объект является, скорее, мезоскопической моделью структурного элемента ММЭ. чем близким прототипом макроскопического образца. Однако, во-первых, рассматриваемая система является существенно трехмерной и, во-вторых, межчастичным взаимодействиям в ней доступны направления вдоль любой линии внутри полного телесного угла. Иными словами, частицы под влиянием магнитных сил могут формировать пространственные, а не плоские агрегаты.

Анализ результатов 3D моделирования указывает на существенные отличия по сравнению с 2D случаем. Применительно к магнитострикции главное следствие заключается в том, что в трехмерных значительно преобладает положительный эффект: образец, как правило удлиняется в направлении поля даже при полном отсутствии кластеров в исходной конфигурации системы. Напомним, что качественная трактовка удлинения в двумерных системах предполагает обязательное присутствие «затравочных» анизометричных агрегатов (например, парных кластеров, см. рисунок 2), наклонных к направлению поля. Стремясь уменьшить свою магнитостатическую энергию, такой объект поворачивается к направлению поля. Поскольку агрегаты «встроены» в матрицу, совокупным результатом создаваемых ими мезодеформаций является удлинение образца.

В трехмерном случае наиболее вероятный сценарий возникновения положительной магнитострикции несколько иной. Пусть система состоит исключительно из одиночных частиц. Первым этапом отклика на намагничивание является формирование достаточно искривленных цепочек, анизометрия которых лишь «в общих чертах» соответствует направлению поля. Эта группировка сопровождается незначительным сжатием образца. Вслед за ней наступает главная стадия процесса, которую обеспечивают два типа перемещений частиц: внутрицепочечные и межцепочечные. Каждая отдельная цепь стремится выпрямиться, что способствует дальнейшему уменьшению ее магнитостатической энергии. Вытяжка цепи перемещает полимер вокруг нее и на макроскопическом уровне приводит к удлинению образца ММЭ.

Межцепочечное взаимодействие также имеет магнитостатическую природу. Как известно [24], даже цепочки сферических частиц, несущих точечные магнитные моменты, могут испытывать взаимное притяжение в направлении перпендикулярном полю, если центры частиц одной цепи расположены приблизительно напротив межчастичных впадин соседней. Для цепей магнитополяризующихся частиц конечного размера, которые вследствие взаимной магнитной индукции намагничиваются неоднородно, эффект взаимного притяжения, как показано в [25, 26], значительно усиливается по величине. Кроме этого, из-за значительного расширения углового интервала притяжения, тенденция к сближению существует почти при любом взаимном расположении цепочек, исключение составляет узкая угловая область вокруг строгой конфигурации «центр против центра» в направлении, перпендикулярном приложенному полю. Очевидно, что взаимное сближение цепочек в силу фактической несжимаемости полимера также вызывает удлинение образца ММЭ.

Описанная качественная картина вполне объясняет изменение структуры малого образца ММЭ, для которого проводилось численное моделирование – ср. рисунки 5*а* и 5*б*. Рисунок 5*в* показывает, что эффект магнитострикции в этом случае существенно положителен и с ростом поля усиливается быстрее, чем квадратично, как это предсказывает приближение слабых полей.

## Заключение

Однородное магнитное поле, приложенное к образцу из ММЭ, намагничивая частицы наполнителя, создает два механизма магнитострикции. Первый связан с появлением у тела собственного макроскопического (размагничивающе-

го) поля, величина и пространственное распределение которого определяются формой образца и общим содержанием магнетика в материале. Этот эффект всегда вызывает удлинение тела, то есть магнитострикция формы положительна. Второй механизм действует на мезоскопическом масштабе и обусловлен неоднородностью локальных полей. По этой причине формируемая им структурная магнитострикция существенно зависит от типа ближнего порядка в подсистеме магнитных частиц, внедренных в эластомерную матрицу.

Магнитодеформационный отклик, одним из вариантов которого является магнитная стрикция – основа функциональности мягких магнитных эластомеров и главная отличительная особенность, обеспечивающая их ценность для практики. На наш взгляд, представленные выше результаты определенно указывают, что численное моделирование этих материалов в своем дальнейшем развитии вполне способно превратиться в мощный инструмент технологического «проектирования» ММЭ с заранее заданными магнитомеханическими свойствами.

## Библиографический список


1. *Алексеев А.Г., Корнев А.Е*. Магнитные эластомеры. – М.: Химия, 1987. – 240 с.
2. *Zrínyi M., Barsi L., Büki A*. Deformation of ferrogels induced by nonuniform magnetic fields // Journal of Chemical Physics. – 1996. – Vol. 104, No. 21. – P. 8750–8756.
3. *Никитин Л.В., Миронова Л.С., Степанов Г.В., Самусь А.Н*. // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2001. – Т. 43, № 4. – С. 698–706.
4. *Mitsumata T., Ikeda K., Gong J.P., Osada Y., Szabo D., Zrinyi M*. Magnetism and compressive modulus of magnetic fluid containing gels // Journal of Applied Physics. – 1999. – Vol. 85, No. 10. – P. 8451–8455.
5. *Shen Y., Golnaraghi M.F., Heppler G.R*. Experimental research and modeling of magnetorheological elastomers // Journal of Intelligent Materials Systems and Structures. – 2004. – Vol. 15, No. 1. – P. 27–35.
6. *Farshad M., Benine A*. Magnetoactive elastomer composites // Polymer Testing. – 2004. – Vol. 23, No. 3. – P. 347-353; *Farshad M., Le Roux M*. Compression properties of magnetostrictive polymer composite gels // Polymer Testing. – 2005. – Vol. 24, No. 2. – P. 163–168.
7. *Lattermann G., Krekhova M*. Thermoreversible ferrogels // Macromolecules: Rapid Communications. – 2006. – Vol. 27, No. 16. – P. 1373–1379.
8. *Ginder J.M., Clark S.M., Schlotter W.F., Nichols M.E*. Magnetostrictive phenomena in magnetorheological elastomers // International Journal of Modern. Physics B. – 2002. – Vol. 16, No. 17–18. – P. 2412–2418.
9. *Raikher Yu.L., Stolbov O.V*. Magnetodeformational effect in ferrogel samples // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003. – Vols. 258-259. – P. 477-479.
10. *Райхер Ю.Л., Столбов О.В*. Деформационное поведение эллипсоидального образца феррогеля в однородном магнитном поле // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – № 3. – С. 153–164.
11. *Gollwitzer C., Turanov A, Krekhova M., Lattermann G*. Measuring the deformation of a ferrogel sphere in a homogeneous magnetic field // Journal of Chemical Physics. – 2008. – Vol. 128, No. 16. – Art.no. 164709 (5 pages).
12. *Kankanala S.V., Triantafyllidis N*. On finitely strained magnetorheological elastomers // Journal of Mechanics and Physics of Solids. 2004. – Vol. 52, No. 12. – P. 2869-2908.
13. *Davies L.C*. Model of magnetorheological elastomers // Journal of Applied Physics. – 1999. – Vol. 85, No. 6. – P. 3348–3351.
14. *Jarkova E., Pleiner H., Müller H.W., Brand H.R*. Hydrodynamics of isotropic ferrogels // Physical Review. E. – 2003. – Vol. 68, No. 4. – Art. no. 041706 (8 pages).

15. *Bohlius S., Brand H.R., Pleiner H*. Macroscopic dynamics of uniaxial magnetic gels // Physical Review E. – 2004. – Vol. 70, No. 6. – Art. no. 061411 (10 pages).
16. *Morozov K., Shliomis M., Yamaguchi H*. Magnetic deformation of ferrogel bodies: Procrustes effect // Physical Review E. – 2009. – Vol. 79, No. 4. – Art. no. 040801 (4 pages).
17. *Zhou G.Y*. Shear properties of a magnetorheological elastomer // Smart Materials and Structures. – 2003. – Vol. 12, No. 2. – P. 139–146.
18. *Borcea L., Bruno O*. On the magneto-elastic properties of elastomer–ferromagnet composites // Journal of Mechanics and Physics of Solids. – 2001. – Vol. 49, No 12. – P. 2877–2919.
19. *Dorfmann A., Ogden R.W*. *N*onlinear magnetoelastic deformations // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. – 2004. – Vol. 57, No. 4. – P. 599–622.
20. http://www.freefem.org/ff++/index.htm (дата обращения: 10.06.2009).
21. *Shkel Yu.M., Klingenberg D.J*. Electrostriction of polarizable materials: Comparison of models with experimental data // Journal of Applied Physics. – 1998. – Vol. 83, No. 12. – P. 7834–7843.
22. *Raikher Yu. L., Stolbov O.V., Balasoiu M*. Modelling of magnetodipolar striction in soft magnetic elastomers // Soft Matter. **–** 2011. **–** Vol. 7, No.18. **–** P. 8484–8487.
23. *Gong X., Liao G, Xuan S*. Full-field deformation of magnetorheological elastomer under uniform magnetic field // Applied Physics Letters. – 2012. – Vol. 100, No. 20. – Art.no. 211909 (3 pages).
24. *Laskar J.M., Philip J., Baldev R*. Experimental evidence for reversible zippering of chains in magnetic nanofluids under external magnetic fields // Physical Review E. – 2009. – Vol. 80. No. 4. – Art. no. 041401 (8 pages).
25. *Биллер А.М., Столбов О.В., Райхер Ю.Л*. Силовое взаимодействие намагничивающихся частиц, помещенных в эластомер // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7. – № 1. – С. 61–72.
26. *Biller A.M., Stolbov O.V., Raikher Yu.L*. Modeling of particle interactions in magnetorheological elastomers // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 116. – Art. no. 114904 (8 pages).

# Умные материалы и конструкции: фантастика или реальность?

Юрлова Н.А.

Статья посвящена новой междисциплинарной области механики сплошных сред – smart-материалам и конструкциям: истории их появления, особенностям создания и принципов их работы, возможностям использования на практике.

На протяжении длительного исторического периода материалы человеком скорее использовались, чем создавались. Инструменты изготавливались, а убежища строились из доступных материалов, но при этом фундаментальная природа этих материалов не изменялась. По мере развития цивилизации возникла потребность, а затем и способность создавать материалы, которые бы удовлетворяли определенным требованиям. Так появились бронза, сталь, окрашенная ткань, керамика и т.д. Для каждого из этих материалов исходное сырье компоновалось и/или обрабатывалось таким образом, чтобы получился новый материал с особым набором необходимых свойств.

Стремительное развитие физических наук в двадцатом веке дало обширную теоретическую базу для объяснения свойств существующих природных и создания новых искусственных материалов, а появление мощных компьютеров позволило преобразовать эту базу в различные методологии практического конструирования и производства новых материалов.

Отличительной чертой человечества было его стремление управлять условиями окружающей среды для того, чтобы сделать жизнь более комфортной. На протяжении почти всей истории ключевым элементом этого управления было само человечество. По мере того как создавались все более и более сложные механизмы и конструкции, стала очевидной потребность в управлении небиологическими механизмами в зависимости от состояния окружающей среды в автоматическом режиме – без участия самого человека. Одним из примеров ранней системы такого управления, подстраивающегося под требования окружающей среды, был морской якорь, который использовался для удержания парусных судов в одной точке на волнах при спущенных парусах в штормовую погоду.

Вплоть до девятнадцатого столетия машины основного пользования и системы управления, связанные с ними, имели ограниченную сложность. Когда во время промышленной революции произошло стремительное развитие больших и мощных машин, одновременно стали создаваться механические адаптивные элементы управления. Простым примером такого управления является выпускной клапан для предохранения паровых двигателей от достижения предельных параметров давления и взрыва. В настоящее время область адаптивного управления расширилась весьма быстро, в основном за счет изобретения компьютера. Сложные модели механических систем теперь могут использоваться для определения и реализации законов управления.

Вследствие своей зависимости от цифрового компьютера исследования в области адаптивного управления могли возникнуть только в современную эпоху. Начиная со

второй половины XX века ученые начали искать пути создания электронных приборов, которые могли бы решать задачи способами, подобными тем, что использует человек. Тогда казалось, что такие приборы должны обладать «искусственным интеллектом». Цифровой компьютер, изобретенный в то время, изначально был плохо приспособлен для подобного типа исследований. Алгоритмы первых компьютеров отражали их внутренние фиксированные архитектуры и использовали линейную последовательную обработку данных. Алгоритмы программировались с помощью основных рабочих инструкций компьютера, на машинном языке, и были направлены на обработку больших массивов численных данных. С целью использования компьютера как инструмента для реализации искусственного интеллекта были разработаны символьные языки высокого уровня и созданы новые архитектуры параллельных, обладающих нейрологическими возможностями компьютеров (и алгоритмов). Следствием этого стали системы, основанные на компьютерах, которые использовали рекурсивные нелинейные методики для адаптации и переконфигурирования самих себя в зависимости от изменений окружающей среды (от входных данных).

Основная идея всей технологической эволюции, ведущей к возникновению smart-конструкций, – это идея адаптации. Одной из главных характеристик таких конструкций является то, что они адаптируются к изменяющимся условиям. Адаптивные материалы, адаптивные вычисления и адаптивные системы управления - все они представляют полноправные области в рамках исследований smart-конструкций.

В общем случае smart-конструкции должны включать в себя элементы, изготовленные из определенных материалов, которые обеспечивают способности:

– изменять свойства всей конструкции в целом под действием внешних полей различной физической природы (электрических, магнитных, температурных и т.п.);

– оценивать данные о состоянии объекта и принимать решение о действии (посредством вычислительных методов, разработанных в рамках исследований таких конструкций);

– определять и выполнять правильное действие (на основе знаний или соответствующих законов управления).

Способность к адаптации возникает не только на самом высоком уровне организации конструкции, она может также присутствовать на уровнях основного материала, из которого изготовлены элементы конструкции.

В техническом сообществе имели место обширные дискуссии по ряду вопросов, касающихся smart-материалов и smart-конструкций, а именно: что это такое; могут ли smart-материалы рассматриваться как подмножество smart-конструкций; одно и то же smart-конструкция и интеллектуальная конструкция и т.д. [3, 22, 24, 25]. Эта дискуссия как подпитывается, так и заводится в тупик техническим сообществом вследствие по-настоящему междисциплинарной природы этой новой области. Исследования smart-материалов и конструкций включают в себя так много технически различных областей, что для одной области стало почти типичным полное непонимание терминологии и текущего состояния дел в других сферах.

Зафиксированы различные термины: интеллектуальные, разумные, адаптивные, активные, чувствительные, метаморфные конструкции и/или материалы и/или системы.

Если строго следовать словарным определениям, то очевидно, что интеллектуальный, разумный, адаптивный и т.д. являются различными по смыслу прилагательными. *Интеллектуальность* подразумевает способность мыслить абстрактно и применять старые уроки к совершенно новым ситуациям, в то время как *разумность* означает способность собирать знания и использовать их правильным образом. *Чувствительность* означает способность собирать информацию и быть осведомленным о том, что она собирается, но это не предполагает способности учиться на основе этой информации и принимать решения. *Интеллектуальность* и *разумность*, вообще го-

воря, описывают умственную деятельность; а *адаптивный, активный и метаморфный* «отвечают» за физическую активность. Различие между этими терминами заключается, в основном, в типе деятельности. *Активный* просто означает, что происходит физическая активность, в то время как *адаптивность* подразумевает, что результатами деятельности являются только изменения существующей конфигурации. *Метаморфный*, в свою очередь, означает серьезные преобразования. Что касается терминов *материал* и *структура*, то они, по-видимому, отличаются только масштабом. И, наконец, – *система*, которая подчеркивает коллективность компонентов, работающих вместе для достижения общей цели, при этом ее компоненты по отдельности могут иметь цели, отличающиеся от коллективной.

Следует отметить, что термины *разумный*, *интеллектуальный* или *адаптивный* зачастую широко используются для описания одного и того же уровня функциональности. И ни в одном из них не говорится, как термин реализован в деталях. Например, *чувствительность* просто означает осведомленность, но не осведомленность через системы зрения, тактильные датчики и/или любую другую технологию датчиков. В последнее время стало принято считать, что интеллектуальные, разумные, адаптивные, активные чувствительные и/или метаморфные материалы и конструкции представляют совершенно *различные* системы и имеют отличающиеся атрибуты.

Smart-материалы или smart-конструкции можно охарактеризовать как системы, которые изменяют свои свойства в зависимости от изменений окружающей среды, которые они фиксируют.

Природа, как всегда, является главным источником вдохновения инженеров, что подразумевает подход к созданию технологических устройств, при котором идея и основные элементы устройства заимствуются из живой природы. По аналогии с биологическими объектами smart-системы содержат [3]:

– *чувствительные элементы*, действующие как нервная система (правый полный круг на рис. 1);

– *исполнительные механизмы*, подобные мускулатуре (левый полный круг на рис. 1);

– *устройства обработки данных в режиме реального времени*, действующие как центры по контролю за системой (нижний полный круг на рис. 1).

*Рис. 1. Классификация smart-материалов, приведенная в «Concise encyclopedia of composite materials» [3]*

На рис. 1 также показаны различные классы конструкций с точки зрения технологий. Особенно интересными представляются следующие:

– *чувствительные (пассивные) конструкции*, которые обладают структурно-интегрированной системой микрочувствительных элементов для определения состояния объекта и, возможно, окружающей среды, в которой он функционирует;

– *реагирующие smart-конструкции*, которые имеют «нервную систему» и замкнутую силовую систему автоматического регулирования для изменения свойств конструкции (жесткости, формы, положения, ориентации и скорости);

– *интеллектуальные системы*, которые способны к самообучению при адаптировании.

Итак, smart-материалы представляют новую философию проектирования, которая объединяет действия датчиков, исполнительных механизмов и схемы элементов управления в одной системе, способной изменять свою реакцию в удобной форме в зависимости от изменений окружающей среды.

Такие интеллектуальные конструкции имеют перед традиционными ряд существенных преимуществ, которые обосновал Henry Petroski в своей книге «To Engineer Is Human» [14]. Он отмечал, что при проектировании опытный конструктор всегда рассматривает наихудший случай. Как результат, проект имеет большой запас прочности благодаря многочисленным усилениям, подсистемам избыточного дублирования элементов и увеличенной массе. Такой подход, конечно, требует больше естественных ресурсов, чем, вообще говоря, нужно, и расходует больше энергии для поддержания работоспособности конструкции. При таком подходе также затрачивается больше человеческих усилий на предсказание обстоятельств, при которых правильно или неправильно будет эксплуатироваться сконструированный объект. Попытки предусмотреть наихудший случай имеют более серьезный и очевидный недостаток, о котором мы время от времени читаем в газетах и слышим в вечерних новостях: невозможность предвидеть все возможные обстоятельства. «Никто не хочет учиться на ошибках, но мы не можем получить достаточно сведений от успешных решений. В отличие от популярного определения инженеров-проектировщиков как интеллектуальных консерваторов они, несомненно, действительно среди авангарда. Они постоянно стремятся использовать новые концепции, чтобы уменьшить вес и, следовательно, стоимость конструкции, делать больше с меньшими расходами, и в результате конструкция представляет собой образец эффективного использования материалов. Инженер всегда верит, что он делает что-то без ошибок, но истина состоит в том, что каждая новая конструкция может привести к новому судебному разбирательству. … Объяснить, что пошло не так, и указать на изменения, которые сработали, намного легче, чем искать ошибки в проекте, который еще предстоит реализовать. После случившегося факта имеется полностью определенная задача для решения и демонстрации, «какие все умные». Но до этого случая нужно не только определить «загадки» проекта, но и протестировать свое «решение», проверяя все возможные способы, в которых возможно разрушение конструкции».

Это очень проницательное заявление, поскольку инженер имеет конечное количество времени и ресурсов для завершения проекта. Поэтому важно, чтобы он понимал и протестировал все возможные гипотезы о том, какие типы нагрузки, напряжений, температуры и т.д. будут встречаться в эксплуатационном режиме.

Системы интеллектуальных материалов, напротив, могут избегать многих из этих проблем. Созданные для определенной цели, они изменяют свое поведение при особых обстоятельствах. Например, перегруженная лестница, используя электрическую энергию, смогла бы предупредить человека и увеличить свою жесткость. Реакция лестницы может быть основана на фактическом опыте ее эксплуатации с учетом разрушения и старения. И, как результат, лестница, определив свое текущее состоя-

ние, тогда, когда она больше не в состоянии находиться в эксплуатации даже при минимальной нагрузке, сигнализировала бы об этом. В некотором отношении лестница напоминает живую кость, которая перестраивает себя при изменяющихся нагрузках. Но в отличие от кости, которая начинает реагировать через минуты после импульса и тратит месяцы для того, чтобы закончить свой рост, интеллектуальная лестница изменяется за считанные секунды.

Можно было бы покрывать мосты «умными красками», которые сообщат о ветровой нагрузке или загруженности, или здания, что позволит наблюдать за целостностью строения, подверженного нагрузкам, или даже устранять небольшие трещины сдвигом окружающего материала. Возможно изготовление специальных «чистых» комнат с активным покрытием, которое сможет собирать пыль и грязь в определенных для этого местах. Можно возводить стены, которые чувствуют вибрации и активно поглощают шум.

Но как же это можно реализовать на практике?!

Конструктивно smart-системы (материалы или конструкции) включают в себя [20] (рис. 2):

– встроенные или закрепленные на поверхности датчики;

– встроенные или установленные на поверхности исполнительные механизмы (актуаторы);

– схемы элементов управления для реализации системы контроля (позволяющие обрабатывать данные от датчиков для принятия соответствующего решения).

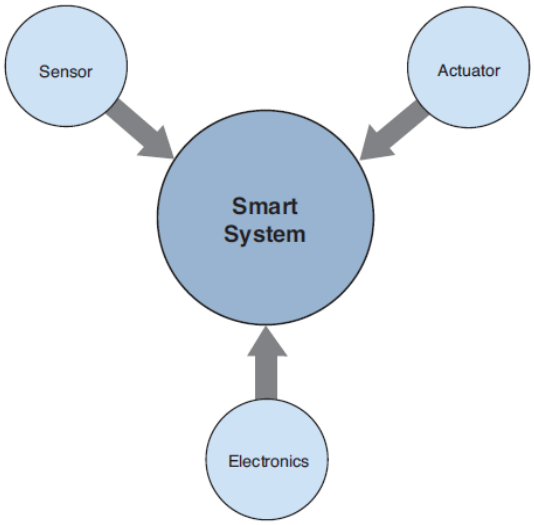



*Рис. 2. Схема концепции smart-конструкции [20]*

Датчики и актуаторы в конструкциях копируют природу в значительной степени. Сообразно нашим пяти чувствам (зрение, слух, обоняние, вкус и осязание) были разработаны визуальные/оптические, акустические/ультразвуковые, электрические, химические и тепловые/магнитные датчики. Отклики от этих первичных датчиков преобразуются в сигналы, которые передаются в центр обработки информации и блок управления (мозг) для дальнейшей обработки. В дополнение к обработке информации этот центр выполняет роль процессора, чтобы принять решение, основанное на входных данных.

Для реализации концепции smart-структур в самой простой форме наилучшим образом подходят основные материалы композитов, в которые при их изготовлении могут быть внедрены соответствующие датчики или актуаторы.

Рассмотрим основные структурные элементы smart-материалов [24].

## Датчики или сенсоры

Smart-структуры, имеющие в своем составе только датчики, называются пассивными. Встраивание датчиков внутрь при изготовлении композитного материала делает возможным наблюдение за внутренним состоянием материала, поэтому успешное развитие пассивных smart-структур зависит:

– от разработки и настройки пригодных датчиков;

– принципов работы датчиков и методов обработки сигналов;

– выбора подходящей схемы производства, позволяющей без больших затруднений встраивать датчики.

В настоящее время особое внимание исследователей сконцентрировано на двух типах материалов, которые наиболее удобны для встраивания в интеллектуальные системы в качестве датчиков или сенсоров, это оптические волокна и пьезоэлектрические материалы.

Датчики, основанные на волоконной оптике, могут измерять магнитные поля, деформации, вибрации и ускорение, хорошо вписываются в процесс изготовления композитного материала; способны выдерживать деформации, сравнимые с размером самого композита; обладают малыми размерами, легким весом и просты в изготовлении; невосприимчивы к электромагнитной интерференции и в жестких условиях превосходят по чувствительности другие датчики. Оптоволоконные датчики также могут быть легко интегрированы с другим оборудованием для удаленного контроля и позволяют проводить наблюдения за структурой композита в течение всех стадий его существования: изготовления, тестирования и эксплуатации; стойки к агрессивной окружающей среде и нечувствительны к электрическому и магнитному шуму; имеют широкую полосу частот отклика.

Оптоволоконные датчики хорошо себя зарекомендовали как при полном встраивании в материал, так и при внешнем закреплении. Встраивание оптического волокна влечет за собой необходимость внесения изменений в технологический процесс изготовления композитных материалов для того, чтобы расположить датчики строго в требуемых местах и быть уверенными, что сигналы от них могут быть введены и выведены через проводники. Для того чтобы быть пригодным к использованию, волоконный датчик должен:

– вызывать минимальные отклонения от заданного распределения упрочняющих волокон в композитном материале;

– по возможности не снижать механические свойства композита;

– не допускать чрезмерного ослабления сигнала и не разрушаться в процессе встраивания, иначе будет невозможно провести необходимые измерения;

– иметь подходящие средства для ввода и вывода лазерного света в систему через проводники.

Широкое применение пьезоэлектриков в качестве датчиков обеспечили их достоинства:

– широкая полоса частот;

– возможность использования очень тонких слоев пьезоэлектрика при закреплении их на поверхности или при встраивании внутрь материала (композита);

– отсутствие запаздывания регулирующего воздействия;

– механическая простота.

В последнее время чаще всего в качестве датчиков вместо пьезокерамики применяются пьезоэлектрические полимеры, такие как флуорид винилидена (polyvinylidene fluoride – PVDF), которые могут быть закреплены на поверхностях любых типов и любой, даже сильно искривленной, геометрии. Такие датчики способны повторять возможности человеческой кожи, определяя геометрические характеристики, такие как края и углы, температуру или различая разные материалы. Так, чувствительность полосок PVDF является достаточно высокой для того, чтобы различать шрифт в книгах для слепых и сорта наждачной бумаги.

## Актуаторы (исполнительные механизмы)

Для изготовления управляемых или реагирующих smart-структур (то есть активных или активно-пассивных) необходимы актуаторы или исполнительные механизмы, которые способны вызывать деформацию конструкции, опираясь на полученную от датчиков информацию, описывающую физическое состояние системы.

В настоящее время в качестве актуаторов применяют:

– сплавы с памятью формы;
– пьезоэлектрические материалы;
– электрострикционные материалы;
– магнитострикционные материалы;
– электрореологические жидкости.

Несмотря на кажущуюся фантастичность, smart-системы (материалы или конструкции) уже нашли применение в реальной жизни, причем неожиданно многочисленное и разнообразное. Например, это простые пьезоэлектрические громкоговорители, механизмы извлечения карт для переносных компьютеров, механизмы позиционирования окуляра на сканирующих микроскопах, самозатемняющиеся автомобильные стекла, автофокусирующиеся моторы для камер, домашний спортивный инвентарь с электрорегулируемым сопротивлением, саморазворачивающиеся устройства для поддержания коронарных сосудов в открытом состоянии после ангиопластики, медицинская аппаратура формирования изображения и т.д.

Конструкции, основанные на применении smart-технологий, начинают находить применение в качестве средств уменьшения шума в кабинах вертолетов и самолетов, в промышленных нагнетателях воздуха, холодильниках и вентиляторах, для звукопоглощения при выхлопах в дизельных двигателях и в кабинах грузовиков; для демпфирования вибраций двигателей, в полуавтоматических автомобильных подвесках, радарных системах избегания столкновений и в системах безопасности, на ответственных производствах или платформах с телекамерами, для подавления вибрации дисководов в компьютерах, лопаток турбомашин и эха от подводной лодки, для контроля формы и демпфирования колебаний космических конструкций, телескопов и т.д. Список можно продолжить, но и этого достаточно, чтобы показать всю широту возможного применения smart-конструкций.

Ранние разработки основывались на подражании внешним особенностям. Например, летающие машины Leonardo da Vinci основаны на подражании полету птиц, гладкий корпус корабля – как у рыбы, управление стабилизаторами самолетов – как у грифов. Развитие науки и технического обеспечения исследований вызвало интерес и множество новых идей, с помощью которых исследователи пытаются создать конструкции, подражающие особенностям наиболее умного из всех животных – человека.

Для эффективной борьбы с шумами в автомобиле smart-элемент улавливает вибрацию кузова, анализирует ее и приводит в действие механизм ее компенсации. Например, на пьезокерамические пластины подается сигнал, вызывающий искусственные колебания кузова в противофазе к той вибрации, которая подлежит устранению. В результате наложения двух вибраций шум гасится [10] (рис. 3).

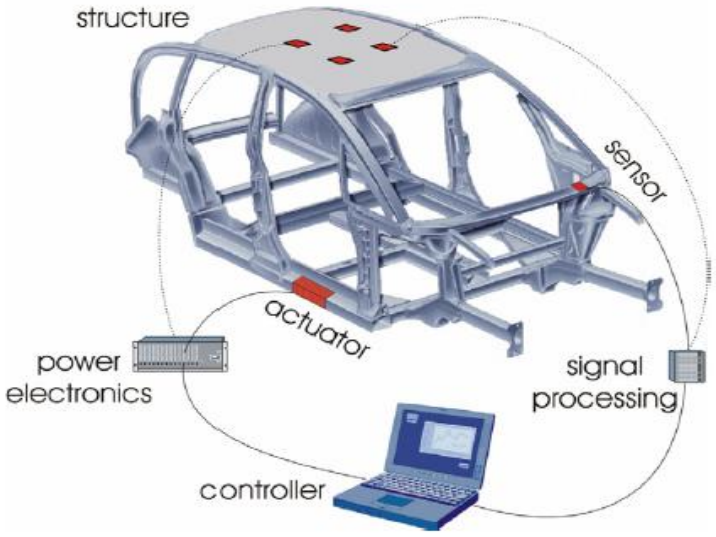



*Рис. 3. Механизм подавления вибрации кузова автомобиля [10]*

В Центре аэрокосмических исследований в Брауншвейге (Германия) создан композиционный материал из пьезокерамических волокон. Встроенная в кузов автомобиля пластина из такого материала, если подвести к ней электрическое напряжение, способна практически полностью поглощать звуки и тем самым играть роль щита, надежно изолирующего салон от внешнего шума. Все дело в том, что интегрированные в пластину элементы из пьезокерамики гасят звуковые колебания, если электрическое напряжение подобрано соответствующим образом. Пьезокерамические элементы без особых проблем могут быть вмонтированы в композиционный многослойный материал из углеродных волокон непосредственно в процессе его создания. Конструкторы автомобилей знают, что самым значительным источником шума в салоне являются не звуки, проникающие снаружи, и не гудение двигателя, а вибрация элементов кузова. Причем, если традиционные методы звукоизоляции еще способны кое-как справиться с внешним шумом, то против шума, вызываемого собственно вибрацией кузова, они бессильны. Между тем пьезокерамические элементы кузова могут не только с высокой точностью обнаружить источник такой вибрации и определить ее параметры, но и эффективно ее погасить.

Исследователи фирмы «Карл Шенк» в Дармштадте (Германия) предложили новый амортизатор оригинальной конструкции на основе электрореологической жидкости. В его основе субстанция, обладающая способностью изменять свою вязкость в зависимости от напряженности внешнего электрического поля, причем диапазон этого изменения весьма широк: от текучей жидкости (в отсутствие внешнего электрического поля) до желеобразной, почти твердой консистенции (при соответствующей его напряженности). При этом процесс изменения вязкости протекает строго синхронно с изменением напряженности электрического поля. Такая способность адекватно и быстро, без запаздывания, реагировать на внешние условия позволяет использовать электрореологические жидкости для высокоэффективной амортизации нежелательных вибраций.

«Умная» пьезокерамика находит применение не только в автомобилестроении, но и в авиационной промышленности. Самолетостроители используют ее для создания крыла с изменяющимся профилем. Такое крыло обретает способность оптимально приспосабливаться к аэродинамическим параметрам воздушного потока и тем самым обеспечивать более эффективное выполнение задач, стоящих перед самолетом на разных стадиях полета [1] (рис. 4).

*Рис. 4. Применение smart-технологий в авиации [1]*

В аэрокосмических приложениях демпфирование колебаний является сложной задачей, так как вес демпфирующих устройств должен быть как можно меньше. В литературе описано применение smart-подходов к демпфированию колебаний лопастей вертолета, подавлению нелинейного ультразвукового панельного флаттера (рис. 5) [4, 8, 17, 21].

Использование композитных материалов в сложных конструкциях, таких как высокоскоростные гражданские транспортные самолеты, средства выведения спутников на орбиту многократного использования, космические корабли, космические конструкции, бронированные машины, суда, вертолеты, ветровые турбины и другие, все более возрастает. Одним из факторов, которые ограничивают дальнейшее применение композитных материалов, является их относительно высокая восприимчивость к повреждению и, следовательно, проблемы безопасности и обслуживания. Различные типы повреждений материалов, к которым склонны композиты, включают в себя расслаивание, разрыв волокна, поглощение жидкости, ударные повреждения, разрушение матрицы, снижение прочности и жесткости при повышенных температурах, концентрацию напряжений. Таким образом, композитные материалы должны осматриваться или проверяться для обнаружения малых повреждений прежде, чем они станут катастрофическими для конструкции из-за возрастания их количества и, в результате, соединения с другими поврежденными участками [23].

Повреждения в космических, аэронавигационных, механических, инженерных и морских конструкциях часто возникают от действия таких факторов, как усталость,

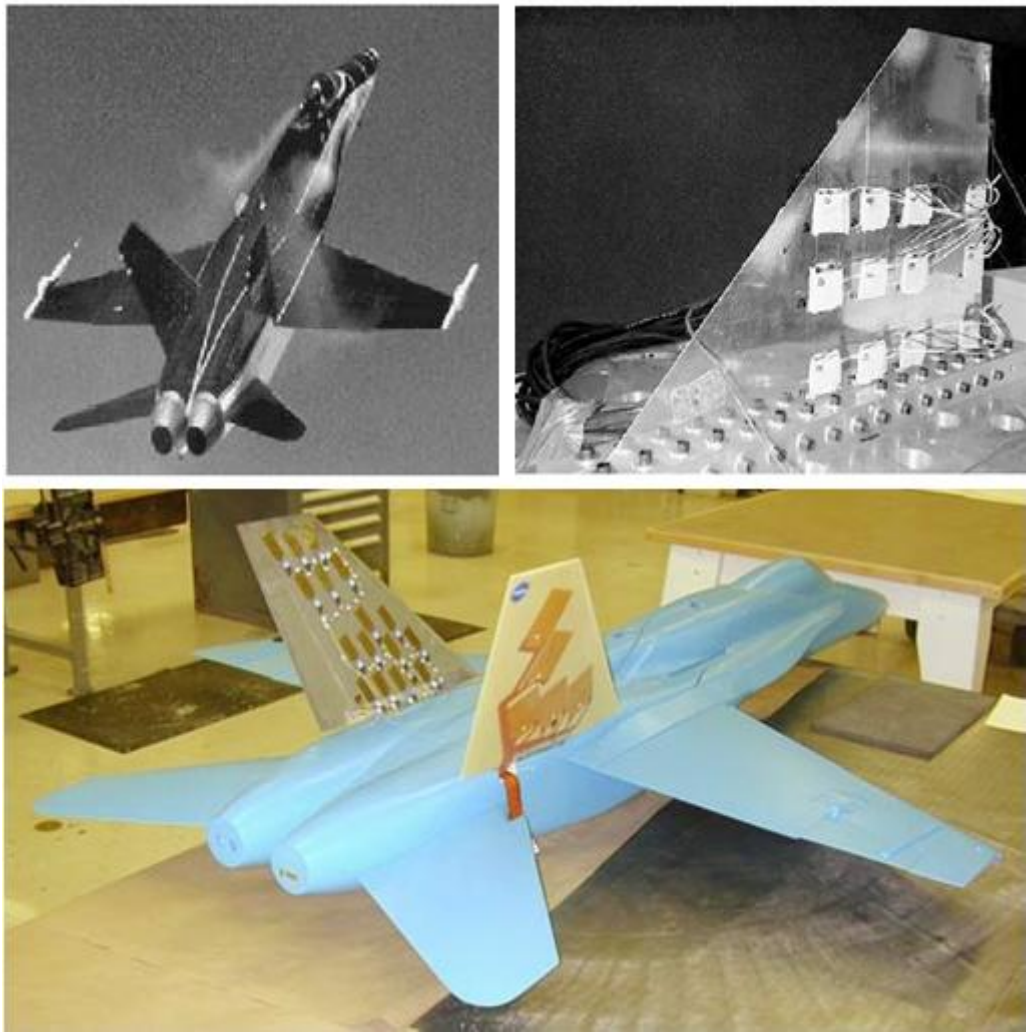


*Рис. 5. Модель истребителя с макроволоконными сенсорами и актуаторами (MFC) на килевых стабилизаторах [8, 21]*

коррозия и аварии. Эти повреждения, если не предпринять своевременные меры, могут возрастать с большой скоростью из-за концентрации напряжений и деформаций в окрестности повреждения, что приводит к увеличению уровня вибраций, снижению величины допустимой нагрузки, ухудшению нормальной работы элемента конструкции и даже к катастрофическому отказу. В большинстве ситуаций срок службы поврежденных компонентов может быть увеличен за счет ремонта вместо непосредственной замены. Поэтому эффективный ремонт поврежденного элемента конструкции – важная и актуальная проблема.

Эти проблемы можно решить путем применения smart-материалов для мониторинга конструкций в процессе их эксплуатации, так как они могут предоставить информацию, поступающую от системы датчиков, расположенных по месту измерения, в режиме реального времени, образуя пять уровней диагноза [18]:

1) обнаружение существования повреждения;
2) определение местоположения повреждения;
3) оценка величины повреждения;
4) обеспечение частичного саморемонта повреждения и
5) определение эксплуатационного ресурса конструкции.

В методиках неразрушающих оценок наличия повреждений конструкции в качестве актуаторов и сенсоров эффективно применяется пьезокерамика (PZT). По этой методике PZT-заплатка, выполняющая роль актуатора-сенсора, присоединяется к конструкции. Измерением электрического сопротивления, связанного с механическим состоянием рассматриваемой конструкции, может быть обнаружено изменение в свойствах объекта, вызванные повреждением. Преимущество этой техники состоит в том, что она может осуществлять непрерывный контроль on-line; PZT-заплатка является очень легкой и достаточно малой, чтобы осуществлять контроль в недоступных местах [16]. Эта методика была успешно проверена на таких конструкциях, как фермы, сложные укрепления стен, железобетонные мосты (рис. 6), трубопроводы и болтовые соединения в конструкциях [15].

В работе [23] рассматривается метод обработки сигналов для обнаружения расслоения в композитных конструкциях. В частности, для обеспечения мониторинга структуры композита в режиме реального времени применена техника вейвлет-ана-

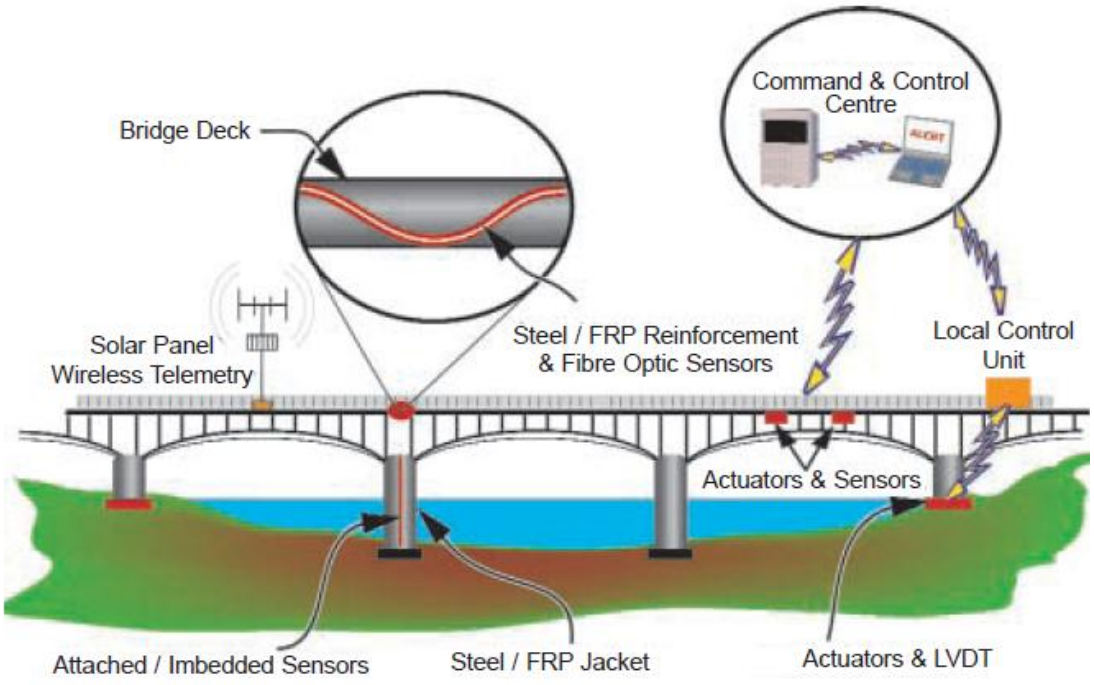



*Рис. 6. Схема интеллектуального моста [10]*

лиза, с помощью которой анализируется информация, поступающая с системы датчиков. Пьезоэлектрики используются для получения входного сигнала со специальной вейвлет-формой и измерения ответного сигнала. Далее ответный сигнал проходит через вейвлет-преобразование, и извлекается чувствительная к повреждениям составляющая от оригинального сигнала. Возможности метода рассмотрены на примерах расслоения при различных температурах и граничных условиях.

Данные методики широко применяются для мониторинга состояния мостов, ответственных инженерных сооружений (промышленных, исторических или высотных зданий и т.п.) или конструкций, находящихся в сейсмоопасных регионах, а также и для дефектоскопии отдельных объектов, например, для обнаружения износа вагонных колес (рис. 7) [12].

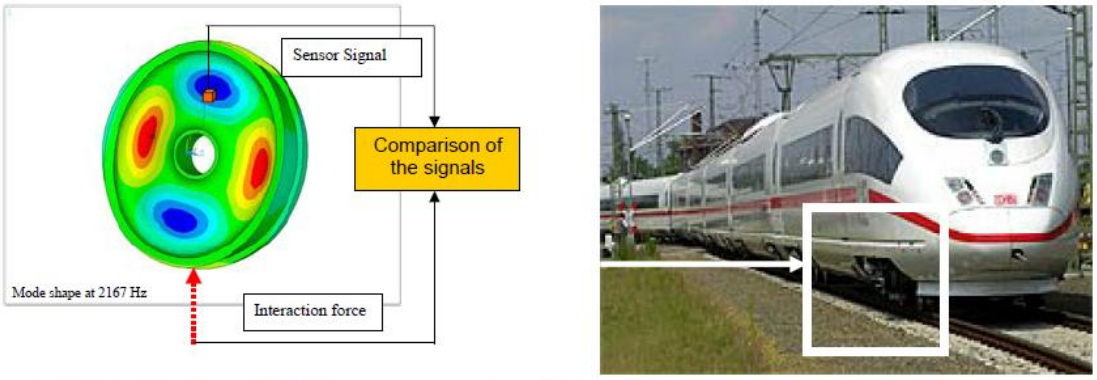



*Рис. 7. Дефектоскопия вагонных колес [12]*

Очень привлекательной выглядит идея частично излечивающей себя конструкции при малых повреждениях активацией растягивающейся арматуры (проводками), выпуском (выдавливанием) клея или другими путями, пока еще реализованная в единичных, в основном лабораторных, приложениях.

Самовосстанавливающиеся конструкции обладают лучшими эксплуатационными свойствами и более продолжительной работоспособностью по сравнению с обычными системами. Большая часть этих систем при появлении повреждения в ответ сразу же приступают к ремонту без внешней координации данного процесса.

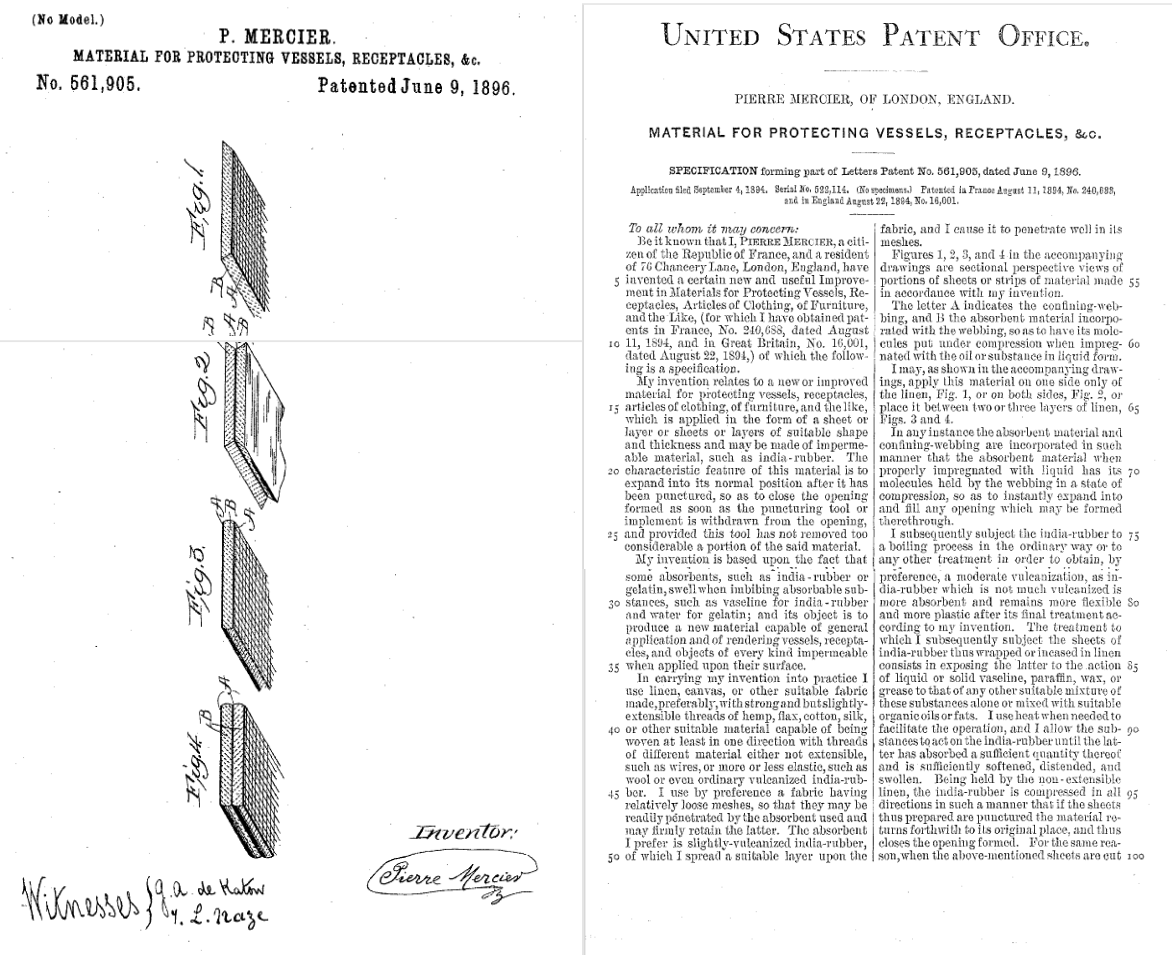
Исторически сложилось так, что с появлением резин и растворителей начали появляться самоуплотняющиеся материалы. Один из наиболее ранних патентов (1896 г.) принадлежит Mercier, который разработал материал, залечивающий самостоятельно прокол стенки (рис. 8) [9].

Технологии самоуплотняющихся сосудов с жидкостью нашли свое развитие с появлением различных современных систем, в которых неконтролируемая утечка жидкости может быть чрезвычайно опасной и привести к невозможности эксплуатации или уничтожению самой системы. Это, например, скафандры, автомобили и самолеты.

Хорошо спроектированная система может обрабатывать широкий диапазон рабочих условий, типичных повреждений и обладает способностью заблаговременного уведомления о критических повреждениях или при угрозе разрушения. Однако такого рода подход имеет целый ряд недостатков [5]:

– применяющаяся сенсорная система опирается на предсказуемость результатов, что является само по себе ограничивающим фактором во всем, кроме космической техники;

– реализованный подход самовосстановления с помощью термопластичных материалов ограничен в практическом применении, так как при работе по восстановлению целостности материала временно ослабляется конструкция, кроме этого, требуется такая геометрия элементов конструкций, чтобы материал мог легко поступить



(No Model.)

P. MERCIER.

MATERIAL FOR PROTECTING VESSELS, RECEPTACLES, &c.

No. 561,905. Patented June 9, 1896.

Fig. 1.

Fig. 2.

Fig. 3.

Fig. 4.

Inventor:

Witnesses:

UNITED STATES PATENT OFFICE.

PIERRE MERCIER, OF LONDON, ENGLAND.

MATERIAL FOR PROTECTING VESSELS, RECEPTACLES, &c.

SPECIFICATION forming part of Letters Patent No. 561,905, dated June 9, 1896.

Application filed September 4, 1894. Serial No. 522,114. (No specimens.) Patented in France August 11, 1894, No. 240,688, and in England August 22, 1894, No. 16,001.

*To all whom it may concern:*

Be it known that I, PIERRE MERCIER, a citizen of the Republic of France, and a resident of 76 Chancery Lane, London, England, have invented a certain new and useful Improvement in Materials for Protecting Vessels, Receptacles, Articles of Clothing, of Furniture, and the Like, (for which I have obtained patents in France, No. 240,688, dated August 11, 1894, and in Great Britain, No. 16,001, dated August 22, 1894,) of which the following is a specification.

My invention relates to a new or improved material for protecting vessels, receptacles, articles of clothing, of furniture, and the like, which is applied in the form of a sheet or layer or sheets or layers of suitable shape and thickness and may be made of impermeable material, such as india-rubber. The characteristic feature of this material is to expand into its normal position after it has been punctured, so as to close the opening formed as soon as the puncturing tool or implement is withdrawn from the opening, and provided this tool has not removed too considerable a portion of the said material.

My invention is based upon the fact that some absorbents, such as india-rubber or gelatin, swell when imbibing absorbable substances, such as vaseline for india-rubber and water for gelatin; and its object is to produce a new material capable of general application and of rendering vessels, receptacles, and objects of every kind impermeable when applied upon their surface.

In carrying my invention into practice I use linen, canvas, or other suitable fabric made, preferably, with strong and but slightly-extensible threads of hemp, flax, cotton, silk, or other suitable material capable of being woven at least in one direction with threads of different material either not extensible, such as wires, or more or less elastic, such as wool or even ordinary vulcanized india-rubber. I use by preference a fabric having relatively loose meshes, so that they may be readily penetrated by the absorbent used and may firmly retain the latter. The absorbent I prefer is slightly-vulcanized india-rubber, of which I spread a suitable layer upon the fabric, and I cause it to penetrate well in its meshes.

Figures 1, 2, 3, and 4 in the accompanying drawings are sectional perspective views of portions of sheets or strips of material made in accordance with my invention.

The letter A indicates the confining-webbing, and B the absorbent material incorporated with the webbing, so as to have its molecules put under compression when impregnated with the oil or substance in liquid form.

I may, as shown in the accompanying drawings, apply this material on one side only of the linen, Fig. 1, or on both sides, Fig. 2, or place it between two or three layers of linen, Figs. 3 and 4.

In any instance the absorbent material and confining-webbing are incorporated in such manner that the absorbent material when properly impregnated with liquid has its molecules held by the webbing in a state of compression, so as to instantly expand into and fill any opening which may be formed therethrough.

I subsequently subject the india-rubber to a boiling process in the ordinary way or to any other treatment in order to obtain, by preference, a moderate vulcanization, as india-rubber which is not much vulcanized is more absorbent and remains more flexible and more plastic after its final treatment according to my invention. The treatment to which I subsequently subject the sheets of india-rubber thus wrapped or incased in linen consists in exposing the latter to the action of liquid or solid vaseline, paraffin, wax, or grease to that of any other suitable mixture of these substances alone or mixed with suitable organic oils or fats. I use heat when needed to facilitate the operation, and I allow the substances to act on the india-rubber until the latter has absorbed a sufficient quantity thereof and is sufficiently softened, distended, and swollen. Being held by the non-extensible linen, the india-rubber is compressed in all directions in such a manner that if the sheets thus prepared are punctured the material returns forthwith to its original place, and thus closes the opening formed. For the same reason, when the above-mentioned sheets are cut

*Рис. 8. Патент США 1896 г. на изобретение самозалечивающегося материала [9]*

в поврежденные участки;

– недостаточное развитие алгоритмов обнаружения поврежденности: ранее существовавшее повреждение может поставить под угрозу базовые значения для системы мониторинга, снижает эффективность работы алгоритмов обнаружения повреждений;

– зависимость от времени алгоритмов обнаружения поврежденности; медленно растущие повреждения, такие как усталость, в настоящее время пока остаются незамеченными, так как применяемые методы основываются на довольно быстром отклонении отслеживаемой кривой состояния конструкции из-за повреждения (это аналогично различию между острыми и хроническими заболеваниями или болью в биологических системах).

Еще одним нерешенным вопросом является масштабируемость. В больших масштабах количество информации, поступающей от сети сенсоров, может стать настолько громоздким, что потребуется специальное управление самовосстановлением конструкции. Биологическим системам удалось справиться с этой проблемой путем добавления уровней иерархии системы через промежуточные узлы фильтрации и делегированием различных функций, каждая из которых может быть применена к инженерным системам.

Применение smart-материалов все расширяется, и в настоящее время их можно встретить даже в бытовых приложениях. Для нового поколения лыжных трамплинов, теннисных ракеток, сноубордов, клюшек для гольфа и бейсбольных бит (рис. 9) становится важным демпфирование возникающих колебаний, так как это не только увеличивает комфорт при их использовании, позволяет достигать лучших результатов, но и предотвращает от поломок.

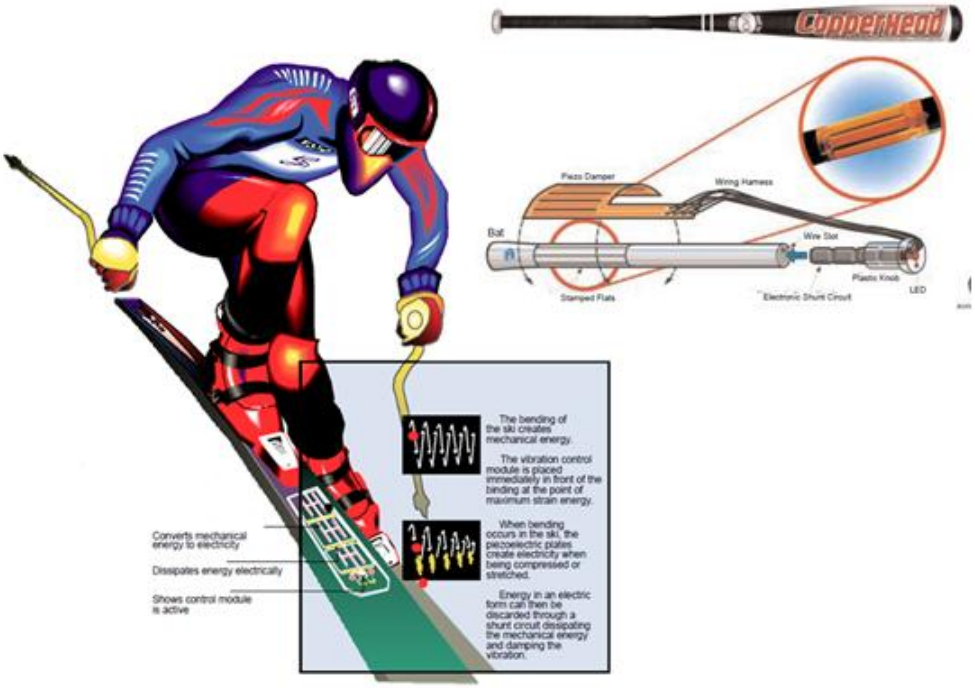



*Рис. 9. Применение smart-концепции в спортивном инвентаре [1, 13]*

Фирма «Head Intelligence» первой в мире выпустила теннисные ракетки из пьезоволокон [13]. Если до сих пор все попытки увеличить мощность ракеток ограничивались чистой механикой и «фокусами» с новыми материалами, то здесь ради той же цели разработчики впервые использовали электричество. Весь секрет таких ракеток заключен в пьезоэлектрических волокнах (head intellifibres), способных преобразовывать механическую энергию мяча в электрический импульс (волокна вырабатывают электричество при любом их малейшем изгибе или деформации). За счет этой «искры», проскакивающей по ободу за менее чем тысячную долю секунды, ракетка в момент удара приобретает дополнительную жесткость – отсюда и новый резерв мощности и к тому же – полное отсутствие вибрации. Эти технологии уже опробованы в горных лыжах и сноубордах.

Развитие smart-конструкций и smart-материалов, несомненно, становится одной из важнейших задач во многих областях науки и технологий, таких как микроэлектроника, информатика, медицина, науки о жизни, энергетика, транспорт, техника безопасности и военные технологии.

По своей сути технология smart-материалов и конструкций является весьма междисциплинарной областью, охватывающей фундаментальные науки – физику, химию, механику, компьютерную технику и электронику, и прикладные отрасли науки и техники, такие как аэронавтика и машиностроение. Именно этим можно объяснить довольно медленный и осторожный прогресс в применении интеллектуальных конструкций на практике, несмотря на то, что научные разработки в этой области продвигаются очень быстро [6].

Область исследований smart-материалов и конструкций привлекает пристальное внимание не только научной зарубежной общественности, но и правительственных структур самого высокого уровня, а также передовых коммерческих корпораций. В США перспективность этих исследований изучала комплексная комиссия, в которую входили представители Комитета по новым материалам для гражданских самолетов следующего поколения (Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft), Комиссии по конструкциям и техническим системам (Commission on Engineering and Technical Systems), Национального исследовательского Совета (National Research Council) [11].

На исследования по этой теме выделяются существенные финансовые средства. По сведениям, приведенным в [13], в 1992–1996 годах различные правительственные учреждения США выделяли около $ 40 млн ежегодно на исследования в области smart-материалов, и по $ 12 млн в год – коммерческие предприятия. Только ARPA (Advanced Research Projects Agency – Агентство передовых исследований, США) вложило за этот период $ 40 млн в развитие технологий, выделив дополнительно $ 30 млн на демонстрацию в рамках данного проекта возможностей практического применения интеллектуальных материалов. В Великобритании исследования smart-материалов и конструкций финансируются также не из одного источника. Основные средства на исследования и разработки поступают из Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) (Совет по техническим и физическим наукам), который финансирует 6 программ в 28 университетах, выделяя по £ 21 млн. В финансировании этих программ также участвуют Министерство обороны Великобритании, British Aerospace и компания Du Pont [19]. Министерство обороны при этом отмечает, что «smart-материалы и активные конструкции» являются приоритетным направлением развития технологий. Активные исследования в этой области проводятся также в Японии [7] и в Китае [2]. В России отдельные группы ученых в Санкт-Петербурге, Москве, Ростове-на-Дону, Краснодаре занимаются различными аспектами как разработки smart-материалов и конструкций, так и их приложений в различных высокотехнологичных отраслях экономики. В том числе и в Перми, в Институте механики сплошных сред УрО РАН проводятся исследования, посвященные оптимизации динамического поведения smart-конструкций, а именно, их диссипативных свойств [26-31]. В качестве объектов исследований приняты конструкции, в состав которых входят элементы, выполненные из пьезоматериалов, соединенные с внешними электрическими цепями. Целью работ является создание эффективных методов математического моделирования, позволяющих находить:

– наилучшее размещение пьезоэлемента на конструкции, обеспечивающее при его деформировании генерацию наибольшего по величине сигнала, то есть, эффективную работу пьезоэлемента,

– параметры элементов и тип внешней электрической цепи (последовательная, параллельная, либо их комбинация), обеспечивающие на заданных резонансных частотах максимальные демпфирующие свойства электроупругого тела с внешними электрическими цепями.

За немногими исключениями, рынок smart-материалов и их технологий относительно молод и остается плохо изученным. Большинство современных применений весьма просты или являются производными друг от друга. Но эти материалы найдут более сложное применение, новые реализации и приобретут массовость тогда, когда технологии будут достаточно разработаны, а для поставщиков и пользователей эти материалы станут обычными.

Smart-конструкции будут развиваться, постепенно стирая различия между искусственными технологиями и природой, между живым и неживым. Самообучаемые оборудование и программное обеспечение будут производить необходимые и желаемые (но уже кем?) собственные аппаратные средства и программное обеспечение.

## Библиографический список


1. *Akhras G.* Smart materials and smart systems for the future // Canadian Military Journal. – 2000. – № 3. – P. 25–32.
2. *Asundi A.K.* Smart structures research at NTU (College of Engineering Nanyang Technological University, Singapore) – 9 p. http://www3.ntu.edu.sg/mae/Research/programmes/Sensors/sensors/fos/smart-in.pdf

3. Concise encyclopedia of composite materials / ed. *A. Kelly*. – England, 1994. – 350 p.
4. *Grohmann B., Maucher C., Jänker P.* Actuation concepts for morfing helicopter rotor blades // 25th International Congress of the Aeronautical sciences. – Canada, 2006. – 10 p.
5. *Hurley D.A., Huston D.R.* Coordinated sensing and active repair for self-healing // Smart Mater. Struct. – 2011. – Vol. 20. – № 2. – 7 p. DOI:10.1088/0964-1726/20/2/025010.
6. *Lee H.-J., Saravanos D.* Layerwise finite elements for smart piezoceramic composite plates in thermal environments // NASA TM-106990 AIAA-96-1277, 1996. – 48 p.
7. *Matsuzaki Y.* Smart structures research in Japan. (Review article) // Smart Mater. Struct. – 1997. – № 6. – P. R1–R10.
8. *Mehrabian A.R., Yousefi-Koma A.* A novel technique for optimal placement of piezoelectric actuators on smart structures // Journal of the Franklin Institute. – 2011. – Vol. 348. – P. 12–23.
9. *Mercier P.* Material for protecting vessels, receptacles, &c. / US Patent Specification. – 1896. – 561905. – 3 p.
10. *Nader M., Irschik H., v. Garßen H.-G.* Aktive Schwingungskompensation im Leichtbau mit piezoelektrischen Materialien // Internationales Forum Mechatronik. – Linz, 2006.
11. New Materials for Next-Generation Commercial Transports / Report Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council 1996, 98 p.
12. *Nuffer J., Bein T.* Application of piezoelectric materials in transportation industry // Global Symposium on Innovative Solutions for the Advancement of the Transport Industry. – 2006. – 4–6 October, San Sebastian, Spain. – 11 p.
13. *Ouellette J.* How Smart are Smart Materials? // The Industrial Physicist. – 1996. – P. 10–13.
14. *Petroski H.* To Engineer is Human: The Role of Failure in Successful Design. – New York: St. Martin's Press, 1985. – 247 p.
15. Qualitative health monitoring of a steel bridge joint via piezoelectric actuator/sensor patches / *J.W. Ayres, F. Lalande, C.A. Rogers, Z. Chaudhry* // SPIE Nondestructive Evaluation Techniques for Aging Infrastructure & Manufacturing – 1996. – 3–5 December, Scottsdale. – 8 p.
16. Quantitative health monitoring of bolted joints using a piezoceramic actuator–sensor / *S. Ritdumrongkul, M. Abe, Y. Fujino, T. Miyashita* // Smart Mater. Struct. – 2004. – № 13. – P. 20–29.
17. Recent advances in Eurocopter's passive and active vibration control / *P. Konstanzer, B. Enenkl, P.-A. Aubourg, P. Cranga* // 64th Annual Forum of the American Helicopter Society. – Canada, Montreal. – April 29–May 1, 2008.
18. *Schulz M.J., Pai P.F., Inman D.J.* Health monitoring and active control of composite structures using piezoceramic patches // Composites: Part B. – 1999. – Vol. 30. – P. 713–725.
19. Smart Materials and Systems // Postnote. Parliamentary Office of Science and Technologe. 2008, № 299. – P.1–4.
www.parliament.uk/parliamentary_offices/post/pubs2008.cfm.
20. Smart materials for the 21st Century. Foresight Smart Materials Taskforce. Report Smart Materials & Systems Committee no. FMP/03/04/IOM3 56 p.
http://www.iom3.org/foresight.
21. *Sodano H.A.* Macro-Fiber Composites for Sensing, Actuation and Power Generation // PhD Thesis. – Blacksburg, Virginia, 2003. – 151 p.
22. *Spillman W.B., Jr., Sirkis J.S., Gardiner P.T.* Smart materials and structures: what are they? // Smart Mater. Struct. – 1996. – № 5. – P. 247–254.
23. Wavelet-based active sensing for delamination detection in composite structures / *H. Sohn, G. Park, J.R. Wait, N.P. Limback, C.R. Farrar* // Smart Mater. Struct. – 2004. – № 13. – P. 153–160.

24. *Wadhawan V.K.* Smart Structures and Materials // Resonance. – 2005. – № 11. – P. 27–41.
25. *Wang Z.L., Kang Z.C.* Functional and Smart Materials - Structural Evolution and Structure Analysis. – New York: Plenum Publish Corporation, 1998. – P. 93–149.
26. *Иванов А.С., Матвеенко В.П., Ошмарин Д.А., Севодина Н.В., Юрлов М.А., Юрлова Н.А.* Обоснование использования эквивалентных схем замещения для оптимизации диссипативных свойств электроупругих тел с внешними электрическими цепями // Известия РАН. МТТ, 2016. – № 3. – С. 40-54.
27. *Матвеенко В.П., Клигман Е.П., Юрлов М.А., Юрлова Н.А.* Моделирование и оптимизация динамических характеристик smart-структур с пьезоматериалами // Физическая мезомеханика, 2012. – Т. 15, № 1. – С. 75-85. Перевод: «Simulation and optimization of dynamic characteristics of piezoelectric smart structures» // Physical Mesomechanics, 2012. - V. 15, No. 3–4. – P. 190–199.
28. *Matveenko V.P., Sevodina N.V., Yurlova N.A., Oshmarin D.A., Yurlov M.A., Ivanov A.S.* Determination of parameters of the external electric circuits providing maximum damping of vibrations of electroelastic bodies / Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines (eds. H. Irschik, A. Belyaev, M. Krommer), Springer, 2016. – P. 93–100.
29. *Matveenko V.P., Yurlov M.A., Yurlova N.A.* Optimization of the damping properties electro-viscoelastic objects with external electric circuits // Mechanics of Advanced Materials/ eds. V.V. Silberschmidt and V.P. Matveenko. – Engineering Materials, Springer. – 2015. – P. 79–100.
30. *Матвеенко В.П., Ошмарин Д.А., Севодина Н.А., Юрлова Н.А.* Задача о собственных колебаниях электровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями и конечно-элементные соотношения для ее численной реализации // Вычислительная механика сплошных сред, 2016. – Т. 9, № 4. – С. 476–485.
31. *Sevodina N.V., Yurlova N.A., Oshmarin D.A.* The optimal placement of the piezoelectric element in a structure based on the solution of the problem of natural vibrations // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 243. – P. 67–74.

# Совершенствование методов определения прочности клеевых соединений на основе численного моделирования

Севодина Н.В., Федоров А.Ю.

Рассмотрены различные варианты испытаний на прочность клеевых соединений и проведен численный анализ напряженного состояния в образцах, используемых в этих испытаниях. Произведено сравнение полученных результатов с принятыми методиками оценки напряженного состояния. На основе поставленной оптимизационной задачи предложены оптимальные варианты геометрии в окрестности особых точек образцов. Подтвержден качественный вывод о том, что у оптимальных поверхностей имеются общие признаки, связанные со структурой решения в вершине соответствующего составного клина, которое определяет характер сингулярных решений в точках поверхности, где имеет место соединение различных материалов с различными условиями на поверхности контакта – идеальное прилипание, сухое трение, скольжение.

Склеивание, как один из традиционных методов скрепления различных элементов конструкций, используется в течение многих веков. Подавляющее большинство клеевых соединений применяется в различных отраслях промышленности: судостроении, авиационной промышленности, ракетно-космической отрасли, автомобилестроении, робототехнике, электронике, промышленности строительных материалов, легкой промышленности. Такое широкомасштабное использование клеевых соединений объясняется простотой их изготовления, низкими материальными и временными затратами, высокой коррозийной и усталостной стойкостью, трещиностойкостью, хорошими характеристиками демпфирования, меньшим весом по сравнению с другими методами скрепления. В качестве примера можно упомянуть о наблюдавшемся вплоть до 2009 года интенсивном увеличении спроса на клеи, применяющиеся в автомобилестроении. Тогда среднее потребление клеев и герметиков составило приблизительно 20 кг на одно транспортное средство [1]. В авиакосмической отрасли все больше количество клеев используется в гражданской авиации, достигая наибольшего уровня в новых авиалайнерах Boeing 787 Dreamliner и Airbus A350, которые более чем наполовину изготовлены из клеевых структур (композиционных материалов) [2]. С увеличением спроса на энергоэкономичные средства доставки, а позже и на энергоэкономичные транспортные средства, возросла потребность в проектировании облегченных конструкций, таких как элементы кузова автомобилей и фюзеляжа воздушных судов.

Все это привело к тому, что методы соединения листовых материалов получили стремительное развитие. Эти методы позволяют скреплять новейшие материалы, которые могут быть разнородными, плохо свариваемыми или иметь покрытие (краска, лак, грунтовка и т.д.). Одним из таких методов является склеивание, преимуществом которого является обеспечение непрерывного распределения напряжений по всей поверхности соединения.

Прочностные свойства клееных конструкций в значительной мере определяются прочностью их клеевых соединений. Однако теоретические основы, технология склеивания и оценки прочности клеевых соединений получили значительное развитие лишь в последние 70 лет [3–5].

## Экспериментальные оценки прочности клеевых соединений

Для оценки прочности клеевых соединений при склеивании как одинаковых, так и разных материалов существуют стандартные методы, определенные российскими государственными стандартами (ГОСТами) и зарубежными (международными и национальными, такими как международный ISO, британский BSI, французский AFNOR, немецкий DIN, американский ASTM, японский JIS и многими другими).

Действующие ГОСТы для определения прочности клеевых соединений можно условно разделить, например, по виду нагружения (отрыв, сдвиг, отслаивание, расслаивание) или по типу склеиваемых материалов (одинаковые, разные) (рис. 1).

Образцы, используемые для определения прочности клеевых соединений (как по российским, так и по зарубежным стандартам), имеют различные формы и размеры.

На рис. 2 представлены наиболее типичные варианты образцов, которые используются при определении прочности клеевого соединения одинаковых материалов на отрыв [6], сдвиг [7] и различных материалов (металл – резина) на отрыв [8]. Для этих образцов прочность при отрыве и сдвиге определяется по формуле

$$\sigma = P/F, \qquad (1)$$

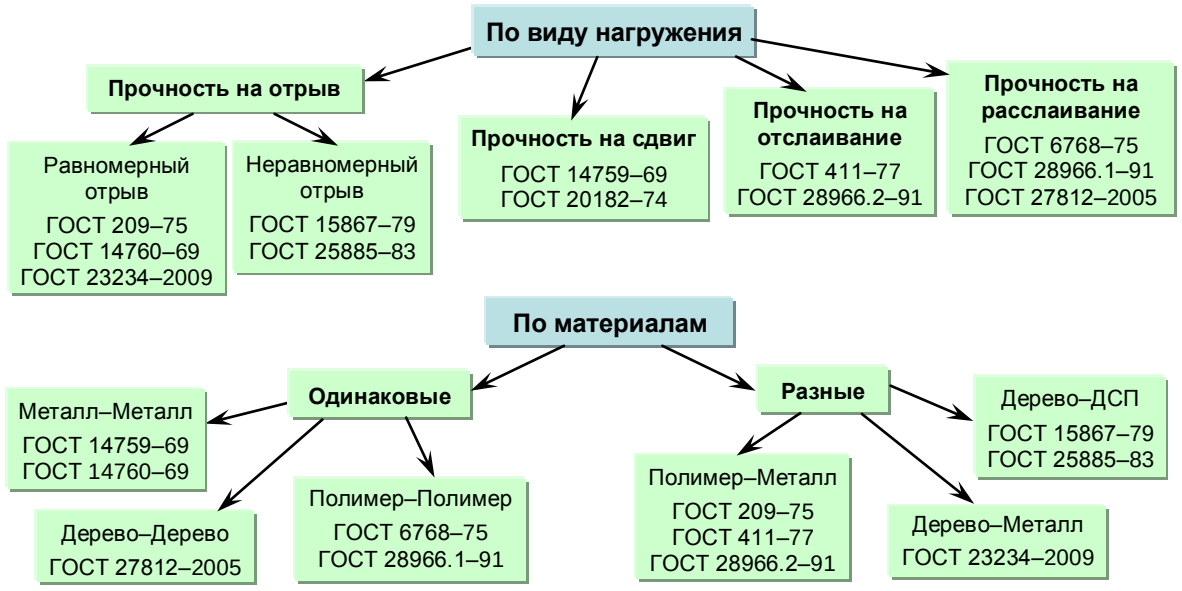



*Рис. 1. Классификация действующих ГОСТов для определения прочности клеевых соединений*

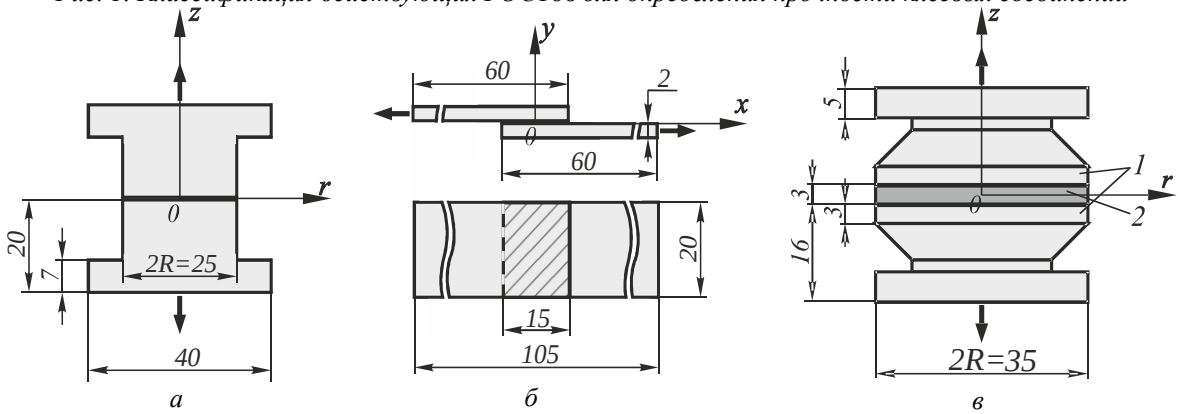



*Рис. 2. Форма и размеры (в мм) образцов, которые используются при определении прочности клеевого соединения по ГОСТам: одинаковые материалы, а – отрыв, б – сдвиг; различные материалы, в – отрыв (1 – металлические диски, 2 – резина)*

где $P$ – разрушающая нагрузка, $F$ – площадь склеивания.

Применение этой формулы основано на предположении о том, что распределение напряжений по поверхности контакта *материал – клей* является однородным. Но это предположение необоснованно, что доказывается исследованием напряженно-деформированного состояния в клеевом соединении.

## Численное моделирование клеевых соединений

Знание напряженно-деформированного состояния в клеевом соединении важно для предсказания его прочности. Для исследования напряженного состояния простых соединений внахлестку существуют аналитические и численные методы. В работе [9] приведен обширный обзор литературы о существующих аналитических моделях для простых и двойных клеевых соединений внахлестку. Среди численных методов наибольшее распространение получил метод конечных элементов, отличающийся своей гибкостью и универсальностью.

Как было отмечено выше, для образцов, представленных на рис. 2, предположение об однородном распределении напряжений по поверхности контакта *материал – клей* не всегда соответствует действительности, что является следствием как экспериментальных, так и теоретических исследований. В математической теории упругости главным аргументом этой необоснованности является то, что имеют место сингулярные решения, связанные с возможностью появления в отдельных точках области, называемых особыми точками, бесконечных значений напряжений. К таким особым точкам относятся, например, точки на поверхности тела, где нарушается гладкость поверхности, меняется тип краевых условий, контактируют различные материалы, или внутренние точки, где имеет место нарушение гладкости поверхности контакта различных материалов. Все эти точки могут иметь место и в расчетных моделях клеевых соединений. Результат теории упругости о бесконечных напряжениях в особых точках отражает наличие в реальном механическом объекте ярко выраженной концентрации напряжений в окрестности особой точки. Как показывают экспериментальные исследования, именно в зонах с ярко выраженной концентрацией напряжений происходит накопление повреждений и начинается процесс разрушения. Наличие сингулярного решения в рассматриваемых задачах определяется геометрией тела, механическими характеристиками и граничными условиями на поверхности контакта.

Для проверки и оценки правомерности использования предположения об однородности распределения напряжений по поверхности склеивания различных материалов при определении их прочности была получена реальная картина распределения напряжений в образцах на основе численного моделирования. Для расчета напряженно-деформированного состояния использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в пакете ANSYS (лицензия 392853). Эффективной оценкой точности полученных численных результатов при решении задачи на основе принципа возможных перемещений является погрешность выполнения естественных краевых условий на свободной от нагрузок боковой поверхности образцов и на поверхности контакта разнородных материалов. В настоящей работе использовались дискретизации, обеспечивающие погрешность выполнения естественных краевых условий менее одного процента вне трех-четырех элементов, прилегающих к особой точке.

Необходимо отметить, что при анализе напряженно-деформированного состояния тел с особыми точками численными методами, в том числе и МКЭ, возникают определенные трудности, связанные с оценкой точности и сходимости решения в окрестности этих особых точек. Использование стандартных процедур МКЭ требует в окрестности особых точек существенного сгущения конечно-элементной сетки, применения сложных адаптивных процедур ее оптимизации. Для этого на основе пакета ANSYS[1] были разработаны адаптивные алгоритмы построения сгущающихся к особым точкам конечно-элементных сеток.

На первом этапе исследования напряженно-деформированного состояния на поверхности контакта *материал – клей* необходимо оценить влияние толщины клеевой прослойки на прочность соединения. Этому вопросу посвящен ряд исследований, среди которых наиболее выделяются работы [10–12].

На рис. 3, *а* для образца, представленного на рис. 2, *а*, приведено распределение отрывных напряжений по поверхности контакта *материал – клей* для двух значений толщины слоя клея. Наличие в данном случае сингулярного решения проявляется в том, что распределение напряжений в окрестности края поверхности контакта *материал – клей* имеет существенно неоднородный характер, а на краю поверхности напряжения асимптотически стремятся к бесконечности при увеличении числа конечных элементов. Практически это означает, что окрестность края поверхности контакта материала и клея является зоной ярко выраженной концентрации напряжений. Размеры этой зоны зависят от толщины слоя клея. На рис. 3, *б* приведено распределение касательных напряжений по верхней границе контакта *материал – клей* для образца, представленного на рис. 2, *б*.

Для образца, представленного на рис. 2, *в*, приведено распределение отрывных напряжений по поверхности *металл – резина*, полученное без учета клеевой прослойки (рис. 4) и при добавлении в расчетную схему клеевой прослойки между металлом и резиной (рис. 5).

Результаты расчетов, приведенные на рис. 5, демонстрируют неоднородное распределение напряжений на поверхности контакта *металл – клей* с ярко выраженной концентрацией вблизи внешней боковой поверхности. Изменение толщины клеевой прослойки практически не оказывает влияния на распределение отрывных напря-

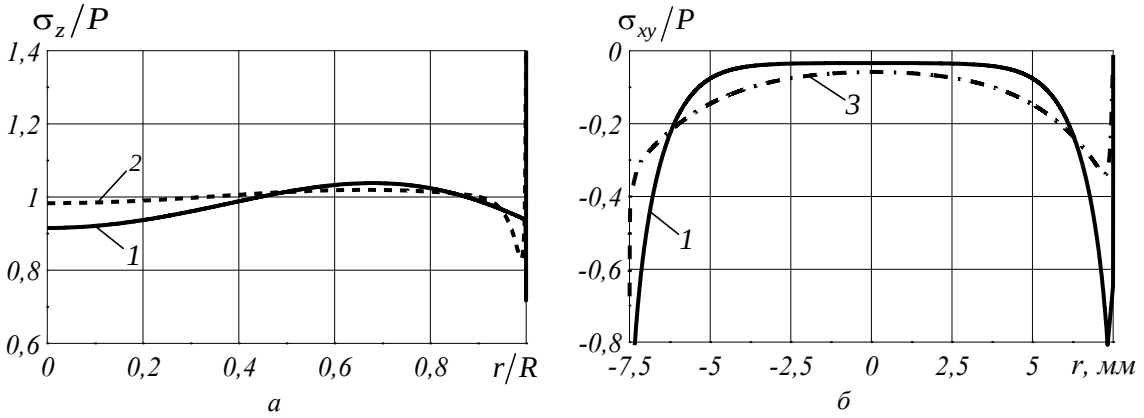



*Рис. 3. Распределение напряжений по поверхности контакта материал – клей с учетом толщины клеевой прослойки t, мм: 1 – 0,01; 2 – 0,5; 3 – 0,15*

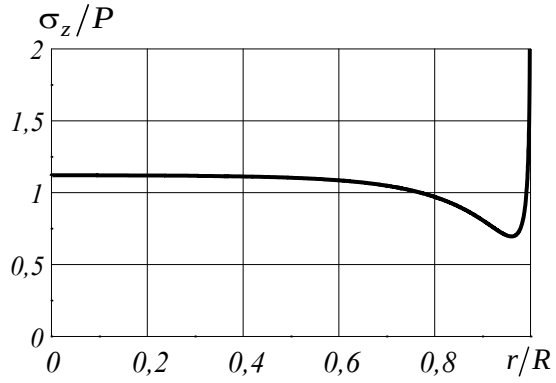



*Рис. 4. Распределение отрывных напряжений на поверхности контакта металл – резина в случае бесклеевого соединения*

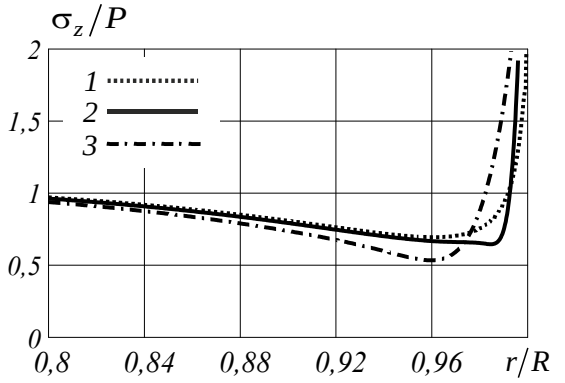



*Рис. 5. Распределение отрывных напряжений на поверхности контакта металл – клей при различных значениях толщины клеевой прослойки: 1 – 0,01 мм, 2 – 0,15 мм, 3 – 0,5 мм*

[1]Лицензия ANSYS Academic Research Mechanical and CFD № 1064623

жений по поверхности контакта *клей – резина*. На поверхности *металл – клей* при уменьшении толщины клеевого слоя зона концентрации напряжений в окрестности выхода клеевого слоя на поверхность уменьшается.

Таким образом, наличие концентрации напряжений в некоторых (особых) точках клеевого соединения нарушает однородность распределения напряжений по поверхности склеивания. Именно в этих точках и начинается процесс разрушения испытываемых образцов. Поэтому прочность клеевого соединения, определяемая по формуле (1), применяемой в ГОСТах, приводит к неточным значениям.

## Подходы к решению задачи снижения концентрации напряжений вблизи особых точек клеевых соединений

Существуют различные способы, методы и технологические приемы, направленные на увеличение прочности клеевых соединений. Эти подходы связаны с изменением геометрии клеевых соединений и основаны на том, что напряженно-деформированное состояние в зоне концентрации напряжений, а значит вблизи особых точек (линий), зависит от формы поверхности, механических характеристик материала или соотношения механических характеристик соединяемых материалов. Выделим несколько подходов:

1. *Изменение геометрии склеиваемых материалов*. Примером таких изменений служат различные конструктивные решения в области особых точек: галтели, выточки, скосы, скругления и др. Скругление углов устраняет особенность, поэтому малые локальные изменения геометрии имеют значительный эффект. При этом распределение напряжений более однородно, а максимум находится на некотором расстоянии от угла.

2. *Изменение геометрии клея*. Многие исследователи показали, что использование на концах области контакта специально сформированных излишков клея, обеспечивающих плавное сопряжение боковой поверхности клея со свободными гранями склеиваемых материалов, уменьшает концентрацию напряжений в клее и склеиваемом материале.

3. *Формообразование склеиваемых материалов и клея*. К данному подходу относятся различные изменения формы поверхности склеиваемых материалов в окрестности особых точек: скосы, волнообразность и т.д.

Принимая во внимание многообразие технических постановок и затраты, связанные с экспериментальным путем их решения, очевидной становится актуальность задачи поиска оптимального решения путем математического моделирования. Математически выбор того или иного подхода приводит к совершенно естественной постановке задачи оптимизации формы поверхности в окрестности особых точек и поиска значений упругих постоянных, при которых напряженное состояние удовлетворяет заданному прочностному критерию, либо возникающие напряжения являются минимальными из всех возможных конструктивных решений.

Рассмотрим задачу оптимизации для кусочно-однородного тела объема $V = V_1 + V_2$ и ограниченного поверхностью $S = S_1 + S_2$. Здесь нижние индексы обозначают принадлежность к одному из материалов. В данном случае, точки соединения поверхностей $S_1$ и $S_2$ являются особыми точками поверхности, где имеет место контакт двух материалов.

Для постановки задачи оптимизации вводится функционал

$$F\left(S_f\right) = \int_{S_k} \left[ \sigma_n - \frac{1}{S_k} \int_{S_k} \sigma_n ds \right]^2 ds, \qquad (2)$$

который определяет среднеквадратическую невязку отклонения (при отрыве – нормальных, при сдвиге – касательных) напряжений $\sigma_n$ по поверхности контакта $S_k$ материалов от их среднего значения на этой поверхности. Здесь $S_f$ – часть поверхности $S$ в окрестности особой точки, на которую могут быть наложены ограничения конструктивного характера.

Требуется найти поверхность $S_f$, минимизирующую функционал (2) либо обеспечивающую его значение меньше некоторой заданной величины. Функционал (2) преследует цель нахождения такой формы поверхности $S_f$, которая бы обеспечивала наиболее однородное распределение напряжений $\sigma_n$ по поверхности контакта $S_k$ различных материалов. Поэтому, используя данный функционал при поиске новых форм испытательных образцов для определения прочности клеевых соединений, можно получить образцы, для которых применение расчетной формулы (1), используемой в ГОСТах, будет обосновано.

На основе разработанных алгоритмов оптимизации был решен ряд задач по поиску оптимальной формы поверхности составных тел в окрестности особых точек. Решение отыскивается на ограниченном классе поверхностей. В качестве образующих для таких поверхностей могут использоваться кусочно-полиномиальные или другие функции, определенные по значениям координат или производных рассматриваемой функции в конечном числе узловых точек. Результаты решения оптимизационных задач показали, что во многих случаях из всего многообразия видов поверхностей достаточно описания формы поверхности в виде кубического сплайна или дуги окружности, основанных на двух узловых точках. С практической точки зрения это означает, что изготовление изделий с такими формами поверхностей технологически достижимо и предпочтительнее других видов поверхностей.

## Общее свойство оптимальных решений

Анализ характера поведения напряжений в окрестности особой точки поверхности, где имеет место соединение двух материалов, связан с рассмотрением задачи исследования собственных решений для составного клина при плоскодеформированном состоянии, который образован касательными к поверхности тела в особой точке [13, 14]. Различные варианты составных клиньев, которые могут встречаться в клеевых соединениях, приведены на рис. 6.

Собственные решения в полярной системе координат с центром в вершине клина имеют следующий вид:

$$u_i(r,\varphi) = r^{\lambda_k}\xi_i^{(k)}(\varphi),$$

где $\lambda_k$ – собственные значения, которые находятся из соответствующего характеристического уравнения.

Вопрос о возможности наличия или отсутствия сингулярности напряжений в вершине клина решается в зависимости от величины действительных частей собственных значений $\lambda_k$: если среди множества собственных значений имеется хотя бы один с действительной частью меньше единицы $\mathrm{Re}\,\lambda_k < 1$, то в вершине клина возможны бесконечные напряжения. В работах [15–18] предложен один из возможных методов

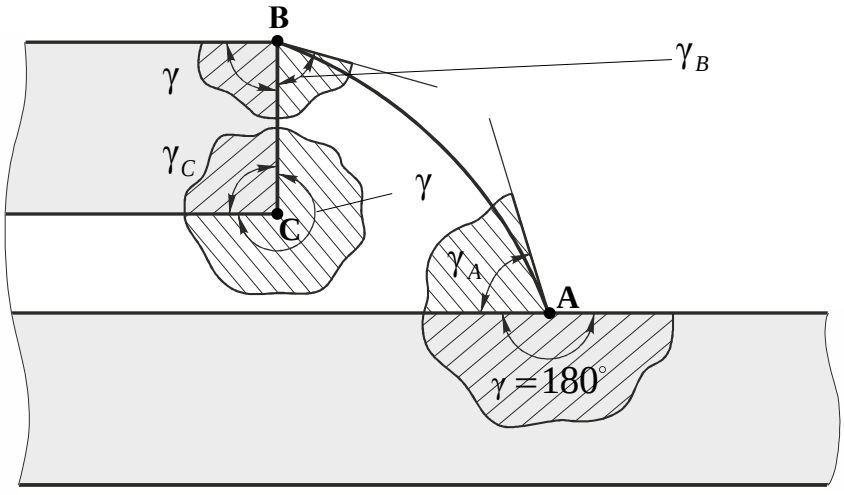



*Рис. 6. Варианты составных клиньев с вершиной в особых точках*

построения сингулярных решений для трехмерных и двумерных тел, численная реализация которого основана на методе конечных элементов.

Решения для составного клина, боковые грани которого свободны от напряжений (например рис. 6, особые точки **A** и **B**; $\gamma_1$, $\gamma_2$, соответственно, равны $\gamma$, $\gamma_A$ или $\gamma$, $\gamma_B$), позволяют оценить характер сингулярности напряжений в окрестности точки поверхности, где имеет место соединение двух разных материалов. Аналогично, решения для точки **C** (рис. 6) дают возможность определить характер сингулярности напряжений для внутренней особой точки, которая может иметь место в клеевых соединениях (например, при соединении с излишками клея).

Ранее в ряде работ [19–21] было показано, что в окрестности особых точек реальных конструкций оптимальные с точки зрения снижения уровня напряжений геометрии обладают общим свойством. Это свойство формулируется следующим образом: механические характеристики материалов и оптимальные углы, образующие касательные к поверхностям в особой точке в соответствующей задаче для клина, определяют границу между решениями с сингулярностью и без сингулярности.

Решение ряда оптимизационных задач позволило подтвердить данное свойство. Используя его, можно получить оптимальное решение, не ставя оптимизационную задачу. Для этого необходимо определить границу смены характера решения.

Подтверждение данного положения было получено и при оценке прочности клеевых соединений, работающих на отрыв (рис. 2, *а*, *в*) и сдвиг (рис. 2, *б*) в условиях идеального контакта, идеального скольжения или сухого трения на склеиваемых поверхностях. Так, например, при поиске оптимальной геометрии образца для испытаний на отрыв соединения *металл – резина* (рис. 2, *в*) вид кривой для соответствующего составного клина (особая точка типа **B**), которая разделяет решение с сингулярностью и без сингулярности, для конкретных механических характеристик материалов представлен на рис. 7.

Величины углов $\gamma$ и $\gamma_B$ у найденной оптимальной поверхности соответствуют одной из точек на кривой $\mathrm{Re}\,\lambda_k = 1$ (рис. 7). Картины распределения напряжений для геометрий, соответствующих различным точкам на кривой $\mathrm{Re}\,\lambda_k = 1$, отличаются незначительно. Имеющая место неединственность устраняется при обеспечении достаточной точности расчета напряженного состояния в процессе оптимизационного поиска. При этом оптимальный вариант будет соответствовать точке на кривой $\mathrm{Re}\,\lambda_k = 1$ с наибольшим углом (в данном случае $\gamma$) у более жесткого материала. Этот вывод полностью совпадает с результатами, полученными при поиске оптимальной геометрии в окрестности особой точки клеевого соединения – рис. 2, *в*. Расположенные на оптимальной кривой (рис. 7) точки $\varphi_1(\gamma_B) = 52°$, $\varphi_2(\gamma) = 7°$, $\varphi_1(\gamma_B) = 51°$, $\varphi_2(\gamma) = 90°$ различаются по величине напряжений в пределах одного процента.

Таким образом, полученные результаты показывают, что для выбранного класса поверхностей для обеспечения оптимального по напряжениям клеевого соединения необходимо, чтобы в окрестности особых точек был создан тот вариант искомой геометрии, который определяет границу между решениями с сингулярностью и без сингулярности в соответствующей задаче для составного клина. Достаточно близкими к оптимальному варианту являются геометрии, в которых отсутствуют сингулярные решения. Используя это свойство, можно получить оптимальное решение, не ставя оптимизационную задачу.

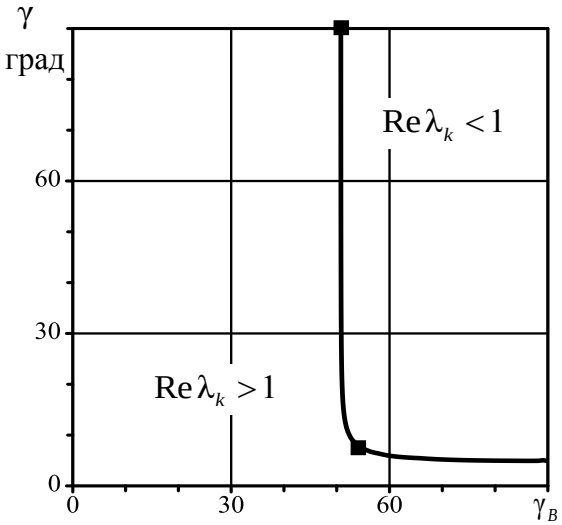



*Рис. 7. Кривая Re $\lambda_k$ = 1, разделяющая решение с сингулярностью и без сингулярности в плоскости параметров $\gamma$ и $\gamma_B$*

## Библиографический список


1. *He X.* A review of finite element analysis of adhesively bonded joints // Int. J. Adhes. Adhes. – 2011. – Vol. 31. – № 4. – P. 248–264.
2. *Speth D.R., Yang Y., Ritter G.W.* Qualification of adhesives for marine composite-to-steel applications // Int. J. Adhes. Adhes. – 2010. – Vol. 30. – № 2. – P. 55–62.
3. *Adams R.D., Comyn J., Wake W.C.* Structural adhesive joints in engineering – London: Chapman and Hall, 1998. – 376 p.
4. *Kinloch A.J.* Adhesion and adhesives: science and technology. – London: Chapman and Hall, 1987. – 441 p.
5. *Mays G.C., Hutchinson A.R.* Adhesives in civil engineering. – Cambridge University Press, 1992. – 348 p.
6. ГОСТ 14760-69. Клеи. Метод определения прочности при отрыве. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 6 с.
7. ГОСТ 14759-69. Клеи. Метод определения прочности при сдвиге. – М.: ИПК изд-во стандартов, 1998. – 13 с.
8. ГОСТ 209-75. Клей и резина. Методы определения прочности связи с металлом при отрыве. М.: Изд-во стандартов, 1993.
9. *Silva L.F.M. da, Neves P.J.C. das, Adams R.D. et al.* Analytical models of adhesively bonded joints. Part I: Literature survey // Int. J. Adhes. Adhes. – 2009. – Vol. 29. – P. 319–330.
10. *Adams R.D., Peppiatt N.A.* Stress analysis of adhesive-bonded lap joints // J. Strain. Anal. – 1974. – Vol. 9. – № 3. – P. 185–196.
11. *Crocombe A.D.* Global yielding as a failure criterion for bonded joints // Int. J. Adhes. Adhes. – 1989. – Vol. 9. – P. 145–153.
12. *Silva L.F.M. da, Rodrigues T., Figueiredo M.A.V. et al.* Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength // J. Adhes. – 2006. – Vol. 82. – № 11. – P. 1091–1115.
13. *Минакова С.Г.* Анализ сингулярности напряжений в точке поверхности, где имеет место контакт разнородных упругих материалов, при некоторых углах раствора клиньев, образующих зону контакта // Напряжения и деформации в конструкциях и материалах. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – С. 69–72.
14. *Матвеенко В.П., Федоров А.Ю*. Оптимизация геометрии составных упругих тел как основа совершенствования методик испытаний на прочность клеевых соединений // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2011. – Т. 4. – № 4. – С. 63–70.
15. *Матвеенко В.П., Накарякова Т.О., Севодина Н.В., Шардаков И.Н*. Исследование сингулярности напряжений в вершине конуса с эллиптическим основанием// ДАН. – 2006. – Т. 411. – № 3. – С. 326–329.
16. Matveyenko V.P., Nakaryakova T.O., Sevodina N.V., Shardakov I.N. Stress singularity at the vertex of homogeneous and composite cones for different boundary conditions // J. of Appl. Math. And Mech. – Vol.72. – 2008. – P. 331–337.
17. *Борзенков С.М., Матвеенко В.П*. Оптимизация упругих тел в окрестности особых точек // Изв. РАН МТТ. – № 2. – 1996. – С. 93–100.
18. *Korepanova T.O., Matveenko V.P., Sevodina N.V*. Numerical analysis of stress singularity at singular points of three-dimensional elastic bodies // Acta Mech. – 2013. – Vol. 224. – P. 2045–2063.
19. *Matveyenko V.P., Borzenkov S.M.* Semianalytical singular element and its application to stress calculation and optimization // Int. Journal For Numerical Methods In Engineering. – 1996. – Vol. 39. – P. 1659–1680.
20. Matveenko V.P., Sevodina N. V., Fedorov A.Yu. Optimization of geometry of elastic bodies in the vicinity of singular points on the example of an adhesive lap joint // J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 2013. – Vol. 54. – № 5. – P. 841–846.
21. *Fedorov A.Yu., Matveenko V.P.* Application of singular solutions for optimization of geometry of specimens used for testing the strength of adhesive joints // Topical Problems in Theoretical and Applied Mechanics / ed. *N.K. Gupta, A.V. Manzhirov, R. Velmurugan*. – New Delhi: Elite Publishing House PVT LTD, 2013 – P. 156–167.

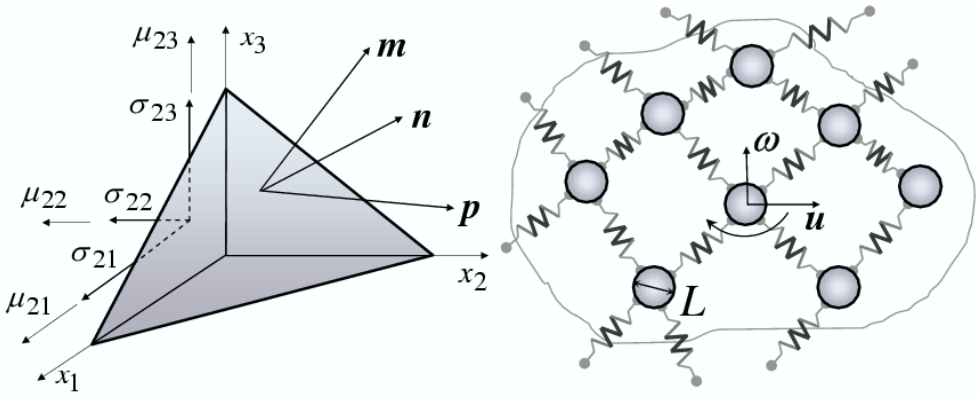
# Численный анализ экспериментальных схем по обнаружению моментных эффектов при статических и динамических внешних воздействиях

Корепанов В.В.

Даны основные понятия о теории континуума Коссера и некоторые исторические аспекты ее развития. Рассмотрены особенности теории и основные этапы, связанные с разработкой экспериментальных схем для обнаружения моментных эффектов на основе решения двумерных и трехмерных задач в рамках несимметричной теории упругости. Проведены численные исследования, направленные на оценку влияния различных факторов в изготовлении образца, схеме нагружения и выборе материала на уровень величин, измеряемых в эксперименте. Такие исследования позволяют оценить перспективность планируемых экспериментов, направленных на установление фактов моментного поведения материалов при статических и динамических внешних воздействиях.

В 1909 году была опубликована книга французских исследователей Эжена и Франсуа Коссера (Cosserat) «Теория деформируемых тел» [1], заложившая основы механики обобщенных континуумов.

Одной из основных гипотез классической механики сплошных сред (МСС) является принцип напряжений Коши, устанавливающий эквивалентность действия всех внутренних сил, приложенных к элементарной площадке, действию их равнодействующей, приложенной к центру площадки. Однако в общем случае действие произвольной системы сил эквивалентно действию главного вектора и главного момента. При этом в среде возникают не только напряжения $\sigma_{ij}$, но и моментные напряжения $\mu_{ij}$, образующие, вообще говоря, несимметричные тензоры (рис. 1, *а*). Чтобы учесть эти факторы, необходимо допустить в среде наличие дополнительных степеней свободы и рассмотреть физически бесконечно малый объем (по которому ведется усреднение свойств среды) не как материальную точку, а как более сложный объект,




*а* *б*

*Рис. 1. Модель среды Коссера*

обладающий новыми степенями свободы: ротационными, осцилляторными или способностью к микродеформации. Таким образом, для расширения спектра свойств сплошной среды необходимо предположить у физически бесконечно малого объема существование внутренней структуры (микроструктуры), обусловленной зернистостью или волокнистостью строения реальных материалов.

Среду, моделируемую таким образом, называют средой Коссера, а из-за появления моментных несимметричных напряжений эту теорию называют моментной, несимметричной или микрополярной теорией упругости. В силу того, что нагрузка на элементарный объем тела осуществляется также и посредством момента сил, для среды вводится независимая кинематическая характеристика, с которой связана работа данного вращающего момента. Этой характеристикой является вектор поворота ω. Можно предложить следующую модельную интерпретацию логики введения этого вектора. Пусть произвольная область тела (рис. 1, *б*) состоит из абсолютно твердых частиц, имеющих, в отличие от классической теории упругости, линейный размер $L$ и связанных между собой упруго, но эти связи действуют на внешний край частиц. В этом случае кинематика частицы будет определяться вектором перемещения центра масс $u$ и вектором поворота ω. В случае континуума Коссера эти вектора являются непрерывными функциями. То есть каждой материальной точке приписываются свойства частицы, имеющей масштаб и ориентацию. Таким образом, в среде появляются дополнительные физические параметры, характеризующие линейный размер и момент инерции частиц, а также свойства связей относительно вращения.

Можно сказать, что появление модели континуума Коссера знаменовало собой начало перехода в МСС от механики Ньютона, исходным объектом которой является материальная точка, к механике Эйлера, имеющей в качестве исходного объекта твердое тело.

До недавних пор считалось [2], что работа Коссера существует как бы «в вакууме», не имея ни предшественников, ни, долгое время, последователей. Но это не соответствует действительности. «Отцами-основателями» сред Коссера можно считать Якоба Бернулли, который в 1686 году ввел в рассмотрение момент количества движения, и Леонарда Эйлера, в 1765 году описавшего кинематику твердого тела конечных размеров.

До конца 19-го века физиками разрабатывались две теории эфира – теория квазижидкого (газоподобного) эфира и теория квазитвердого эфира. За разработкой квазижидкого эфира стояли такие известные ученые, как Р. Декарт, Дж. Максвелл, Г. Лоренц. Они предполагали, что в эфире существуют вихри из каких-то очень мелких частиц. Потоки этих частиц образуют магнитные поля, а движения частиц от одного заряженного тела к другому обеспечивают электростатическое взаимодействие. Последовательными сторонниками теории квазитвердого эфира выступали Дж. Мак-Куллаг, В. Томсон (лорд Кельвин) и Дж. Стокс. Согласно их теориям магнитные и электрические поля возникают в эфире в результате определенного вида деформаций.

В 1839 году Дж. Мак-Куллаг предложил модель эфирной среды как упругого тела, невосприимчивого к деформациям сжатия и изменения формы, но реагирующего на деформацию кручения относительно абсолютного пространства [3].

Вслед за Дж. Мак-Куллагом В. Кельвин смоделировал эфир с помощью волчков, то есть рассмотрел полярную среду, состоящую из вращающихся осесимметричных частиц, способных совершать большие повороты и перемещения общего вида [4]. В работе [5] найдена аналогия определяющих уравнений среды Кельвина и упругих непроводящих ферромагнетиков в состоянии насыщения.

Затем на протяжении нескольких десятилетий не было практически ни одной работы, посвященной континууму Коссера. И только приблизительно через полвека после выхода знаменитой работы братьев Коссера появились яркие труды, касающиеся возможностей применения положений микрополярного континуума в раз-

личных областях механики сплошных сред [6–10]. В значительной степени они посвящены концептуальным вопросам – описанию кинематики точки континуума, построению физических соотношений. Эти работы внесли большой вклад в развитие данной области знаний и послужили основой для дальнейших исследований. Но в 70–80-х годах прошлого века, судя по количеству публикаций, наблюдается некоторое «затишье» в изучении обобщенных континуумов.

Возможно, бурное развитие микромеханики в целом, а также достижения в сфере нанотехнологий послужили в конце XX века причиной новой волны интереса к теории обобщенного континуума. За прошедшие годы опубликованы тысячи работ, отражающих ее развитие и применение к описанию особенностей поведения как жидких сред, так и деформируемых твердых тел. Так, в работах [11, 12] теория микрополярного континуума используется для описания нелинейно-упругих сред с учетом больших деформаций. В [13] предложен вариант построения континуума Коссера, позволяющий учитывать вязкоупругие свойства материала. Особенностям волновых процессов в микрополярных средах посвящены статьи [14–20]. Необходимость учета кинематики внутренней структуры геоматериалов на различных линейных масштабах при динамических процессах отмечается в книге [21]. В работах [22–25] представлены интересные результаты исследований, связанных с особенностями волновых процессов в хиральных материалах, взаимодействующих с микрополярными упругими средами. В статьях [26–30] развиваются численные методы и алгоритмы решения статических и динамических краевых задач континуума Коссера.

Следует отметить, что во всем многообразии публикаций, посвященных микрополярным средам, экспериментальные исследования, особенно эксперименты, в которых удается зарегистрировать проявление моментных свойств материалов, занимают ничтожно малую часть.

В экспериментах по идентификации физических параметров симметричной теории упругости обычно наблюдается стремление обеспечить однородность напряженно-деформированного состояния и создать его определенный тип (чистый сдвиг, одноосное растяжение и т.п.). Однако из теоретических предпосылок микрополярного континуума известно, что моментные свойства среды имеют возможность проявить себя в виде отклика на макроуровне лишь в условиях неоднородного напряженного состояния и при достаточно высоком уровне градиентов напряжений и деформаций [31]. Это обстоятельство принципиально отличает необходимые условия экспериментального определения материальных параметров для физических уравнений микрополярного континуума. Обеспечение условий неоднородности и градиентности является одним из основных факторов, затрудняющих идентификацию материальных констант. Но это только одна из причин. Другая, не менее значимая и в не меньшей степени затрудняющая реализацию эксперимента причина состоит в том, что моментные свойства материала проявляются на линейных масштабах, близких к масштабам его структурных компонент (зерен – для металлов, сферолитов – для полимеров, зернистых и волокнистых включений – для композитов и т.п.). Последнее обстоятельство обусловливает необходимость тщательного анализа и выбора измеряемого макропараметра, а также предъявляет высокие требования к точности измерений.

Попытки определения материальных параметров для континуума Коссера на основе статических экспериментов можно найти в работах [32–35], описывающих испытание образцов на изгиб и кручение. Изгиб и кручение – это те «наипростейшие» виды напряженно-деформированного состояния, при которых в процессе деформирования могут быть зафиксированы и моментные параметры материала, но, в силу отсутствия при этом высоких градиентов напряжений и деформаций, зависимость измеряемых макропараметров от моментных свойств материала будет незначитель-

ной, что и подтверждается обобщающим выводом, сделанным в работе [31]. В статье [36] отмечается перспективность проведения динамических экспериментов для определения материальных параметров на основе анализа дисперсионных зависимостей. Такой подход к нахождению упругих параметров континуума Коссера используется в работе [37].

На основе вышеизложенного можно отметить, что на сегодняшний день остаются открытыми вопросы о четком обосновании экспериментов по поиску моментных эффектов. В связи с этим актуальными являются всесторонний анализ выбранных макропараметров, характеризующих моментное поведение материалов, оценка точности их измерения, а также разработка методов определения выбранных макропараметров в реальных физических экспериментах и средств их измерения.

Основные шаги для решения этой проблемы можно разделить на два этапа: анализ выбранных макропараметров из решения статических задач несимметричной (моментной) теории упругости и анализ выбранных макропараметров из решения динамических задач.

Первый этап состоит из следующих задач:

– определение набора макропараметров из анализа сравнения решений двумерных и трехмерных задач о статическом деформировании в рамках несимметричной и классической теорий упругости. Аналитические решения двумерных плоских задач приведены в работах [38–40], численные – в [26–30]. В работе [30] рассматриваются численные решения трехмерных задач.

Задачи второго этапа:

– определение набора макропараметров из анализа сравнения решений двумерных и трехмерных задач о свободных колебаниях.

На основании сформулированных задач первого и второго этапов необходимо:

– в каждой из рассмотренных задач оценить чувствительность выбранных макропараметров в зависимости от новых («моментных») физических констант материала и характерных размеров (масштабов);

– для каждого выбранного макропараметра оценить точность его измерения;

– предложить возможные методы определения выбранных макропараметров в реальных физических экспериментах и средства их измерения.

На первом этапе была рассмотрена серия двумерных плоских задач об одноосном растяжении пластины с отверстиями различных конфигураций с позиций их использования в качестве экспериментальных схем для идентификации механических параметров в модели континуума Коссера и установления факта моментного поведения при упругом деформировании материалов.

На основе анализа решений задач несимметричной теории упругости были определены такие значения параметров (характерные геометрические размеры, их соотношение и т.п.), при которых отклик моментных свойств материала на какую-либо макровеличину (экспериментально измеряемую), максимален.

В качестве такой макровеличины выбран макропараметр, определяющий степень искажения контура отверстий в двух взаимно перпендикулярных направлениях:

$$D = \left| \frac{u_y(0;R)}{u_x(R;0)} \right|. \qquad (1)$$

Здесь $u_x(R;0)$, $u_y(0;R)$ – компоненты вектора перемещений в соответствующих точках на контуре отверстия.

Величина $D$ привлекательна тем, что в классической (симметричной) теории упругости она постоянна, т.е. не зависит от механических свойств материала, размеров отверстий и величины прикладываемой нагрузки.

В качестве меры сравнения решений несимметричной теории упругости и классической, характеризующей моментный эффект, введем относительную величину

$$\delta = \left| \frac{D - D^*}{D^*} \right|, \qquad (2)$$

где $D$ – решение в рамках несимметричной теории упругости, $D^*$ – в рамках классической (симметричной) теории упругости.

Например, для задачи об одноосном растяжении бесконечной пластины (задача Кирша, рис. 2, *а*) в рамках классической теории упругости макропараметр $D$ всегда равен 3. В несимметричной теории упругости эта величина зависит от радиуса $R$ и механических характеристик материала, т.е. появляется некий характерный размер (масштаб) (в данной задаче – радиус отверстия $R$), от которого будет зависеть решение задачи. Рассматриваемая задача может быть использована для экспериментальных исследований. Измеряя при нагружении в области линейного поведения материала изменение диаметров в двух взаимно перпендикулярных направлениях, можно рассчитывать при соответствующей точности измерения и изготовления образца на проявление эффекта моментного поведения материала, связанного с отличием макровеличины $D$ от трех. На рис. 2, *б* представлена зависимость изменения величины отклика δ (2) на моментные свойства от характерного размера (радиуса отверстия $R$). Видно, что при уменьшении радиуса отверстия $R$ моментный эффект стано-

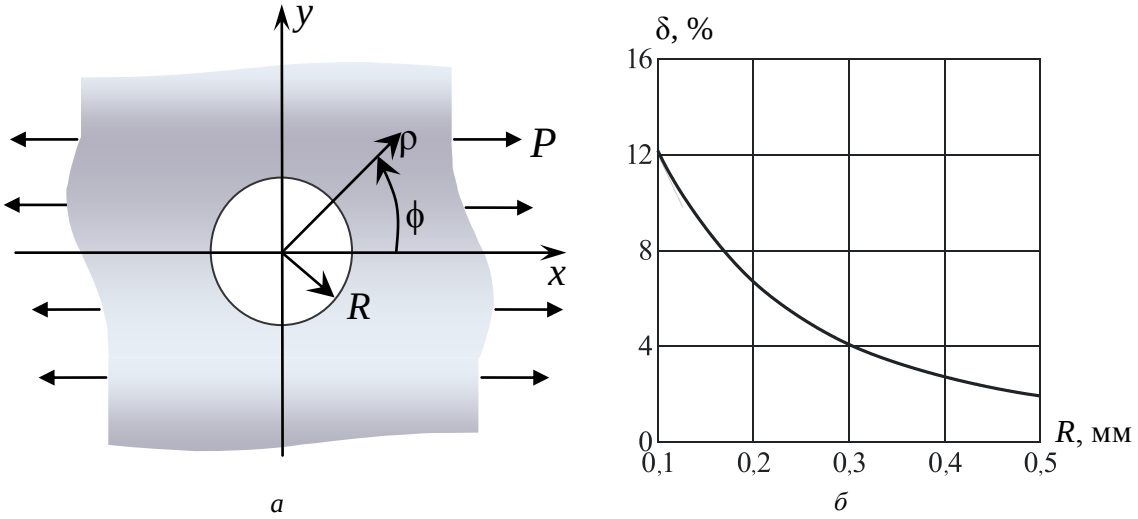



*Рис. 2. Задача о растяжении бесконечной пластины с круговым отверстием (задача Кирша) (а); зависимость меры отклика δ на моментные свойства от радиуса отверстия (б)*

вится более «ярким».

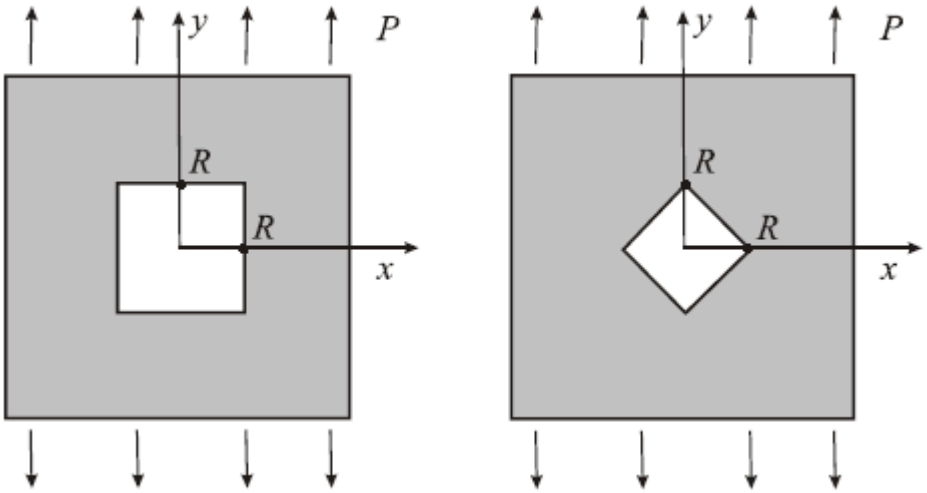
Также рассмотрен ряд задач о растяжении пластин с отверстиями различных конфигураций, в частности, в виде двух правильных многоугольников – квадрата (рис. 3, *а* и рис. 3, *б*) и восьмиугольника, различным образом ориентированных относительно направления внешних усилий.

Для этих задач в качестве макропараметра принимается величина, определяемая соотношением (1), где в качестве $R$ выступает радиус вписанной в квадрат и описанной вокруг квадрата (или восьмиугольника) окружности.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что по величине отклика δ на моментные свойства эти задачи являются сопоставимыми с задачей Кирша.

Также была рассмотрена задача для пластины с центральной трещиной. Здесь в качестве макропараметра выбрано перемещение $D = u_y$ в точке, характеризующее раскрытие трещины.

На основе найденных решений получена оценка проявления моментных эффектов по величине δ. Данный вариант по сравнению с пластиной с круговым отверсти-




*а* *б*

*Рис. 3. Задача о растяжении пластины с отверстиями квадратного сечения, различным образом ориентированных относительно действия внешней нагрузки P*

ем представляется менее предпочтительным для анализа моментных эффектов по макропараметру $D$ в силу меньшего отличия от классического решения и больших сложностей при экспериментальной реализации. Вместе с тем эта задача иллюстрирует, что наличие зоны ярко выраженной концентрации напряжений в вершине трещины, где должны проявляться моментные эффекты, слабо влияет на интегральные характеристики, определяющие раскрытие трещины.

Проводя численные расчеты для поиска моментных эффектов в той или иной схеме эксперимента, нужно оценивать границы применимости решения двумерных задач. В соответствии с этим для любого реального образца следует проводить оценку влияния его толщины на решение задачи, т.е. необходимо исследовать распределение макропараметра по толщине образца.

Поэтому была рассмотрена задача о растяжении пластины с круговым отверстием в трехмерной постановке. Получено распределение макропараметра $D$ по толщине пластины для различных соотношений толщины пластины и радиуса отверстия в рамках классической теории упругости на основе трехмерной постановки задачи. Аналогичные результаты получены в рамках несимметричной теории упругости. Если для классической теории упругости в двумерной постановке макропараметр $D$ совпадает для плосконапряженного и плоскодеформированного состояний, то в несимметричной теории упругости такого совпадения нет.

Также в рамках трехмерных постановок была рассмотрена задача о растяжении пластины с трещиной. Аналогичные результаты распределения макропараметра $D = u_y$ по толщине пластины получены для классической и несимметричной теорий упругости.

Результаты сравнения решений в двумерной и трехмерной постановках позволяют определить границы применимости двумерных решений с позиций их приложений для соответствующих экспериментов. Если расчеты, полученные в рамках трехмерной постановки, приводят к изменениям макропараметра $D$, которые находятся в пределах погрешности эксперимента, то двумерные решения приемлемы для интерпретации экспериментальных данных. Если данное условие не выполняется, то необходимо использовать результаты расчетов на основе трехмерных постановок задач и измерение макропараметра $D$ следует проводить с учетом значений координаты $Z$.

Еще один важный фактор, влияющий на точность измерения выбранных макропараметров – оценка влияния отклонения в образце формы отверстия от окружности на результат эксперимента. Для моделирования и оценки этого фактора были проведены численные эксперименты.

Для оценки влияния отклонения формы отверстия от окружности была рассмотрена задача о растяжении пластины с отверстием, радиус которой изменяется по закону

$$R_r = R + A\,(\sin(n\varphi) + \cos(m\varphi)). \qquad (3)$$

Здесь $R$ – радиус окружности, величина $A$ характеризует максимальную степень отклонения геометрии от окружности, а $n, m = 1,2,3,\ldots$ В данном случае макропараметр $D$ определяет отношение изменения диаметров в направлении осей $y$ и $x$.

Результаты численного моделирования позволили сделать вывод о значениях допусков на отклонение геометрии от окружности, при которых степень проявления моментных эффектов существенно превышает влияние на величину $D$ неправильной геометрии. В частности, для использованных в работе значений механических характеристик материала отклонение геометрии от правильной окружности ($A/R$) в пределах 1 %, вносит изменения на величину $\delta$, определяющую уровень проявления моментных эффектов, в пределах 2 %.

В качестве динамических задач были рассмотрены двумерные и трехмерные задачи о собственных колебаниях в рамках несимметричной теории упругости. Из решения большинства рассматриваемых задач следует, что спектры собственных частот, полученных в рамках классической (симметричной) теории упругости, практически совпадают со спектром собственных частот несимметричной теории упругости. Наиболее информативной оказалась задача о собственном колебании упругого кольца с жестким диском, вставленного внутрь этого кольца (рис. 4). Так, например, значение третьей собственной частоты в рамках классической теории упругости $p^* = 3349$ Гц, в рамках несимметричной теории $p = 4203$ Гц.

В качестве трехмерных задач была рассмотрена задача о собственном колебании плиты, закрепленной по одному из торцов, которая в отличие от двумерной задачи о собственном колебании пластины имеет большую информативность за счет появления крутильной формы колебаний, соответствующей третьей собственной частоте $p^* = 214$ Гц в рамках классической теории упругости и $p = 199$ Гц – несимметричной теории упругости.

Спектр собственных частот в рамках классической и несимметричной теорий упругости определялся при разных характерных размерах для каждой из задач. В качестве характерных размеров выступали один из геометрических размеров пластины (плиты) и радиус жесткого включения $R_0$ (рис. 4).

Таким образом, в результате расчета двумерных и трехмерных задач в рамках симметричной и несимметричной теорий упругости были найдены спектры собственных частот. Получено, что, как и в случае статических задач, проявление моментных свойств наиболее ярко реализуется по мере уменьшения линейного характерного размера задачи. Спектр собственных частот – экспериментально измеряемый макропараметр, откликающийся на моментные свойства среды. Поэтому анализ со-

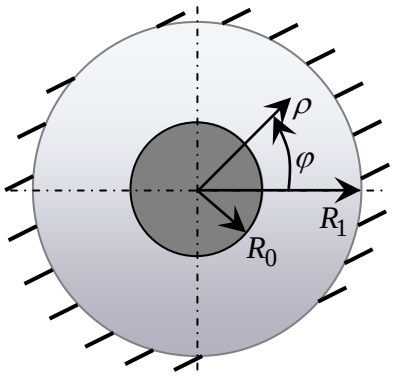



*Рис. 4. Задача о собственном колебании упругого кольца с жестким диском*

поставления спектра полученных частот соответственно для классической среды и континуума Коссера позволит определить принципиальные схемы экспериментов, демонстрирующих моментные свойства.

Для рассмотренных задач проведена оценка чувствительности выбранных макропараметров в зависимости от «моментных» констант и характерных размеров (масштабов). Показано, что при уменьшении характерного размера высокой чувствительностью обладают «моментные» константы, входящие в определяющие соотношения для тензора моментных напряжений.

## Библиографический список


1. *Cosserat E. et F*. Theorie des corps deformables. – Paris: Librairie Scientifique A. Hermann et Fils, 1909. – 226 p.
2. *Ерофеев В.И*. Братья Коссера и механика обобщенных континуумов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2. – № 4. – С. 5–10.
3. *MacCullagh J*. An essay towards a dynamical theory of crystalline reflection and resraction // Trans. Roy. Irish. Acad. Sci., 1839. – Vol. 21. – P. 17–50.
4. *Thomson W*. Mathematical and physical papers, 1882–1911. – 6 vols. – Cambridge University Press.
5. *Грекова Е.Ф., Жилин П.А*. Среда Кельвина и ферромагнетики: определяющие уравнения и волновые процессы // Нелинейная акустика твердого тела: сб. науч. тр. / под ред. *В.И. Ерофеева*. – Н. Новгород: Интелсервис, 1998. – С. 87–90.
6. *Аэро Э.Л., Кувшинский Е.В*. Основные уравнения теории упругости с вращательным взаимодействием частиц // Физика твердого тела. – 1960. – Т. 2. – Вып. 7. – С. 1399–1409.
7. *Миндлин Р.Д*. Влияние моментных напряжений на концентрацию напряжений // Механика: Сб. пер. – М.: Мир. – 1964. – № 4. – С. 115–128.
8. *Пальмов В.А.* Основные уравнения теории несимметричной упругости // ПММ. – 1964. – Т. 28. – Вып. 3. – С. 401–408.
9. *Тупин Р.А*. Теории упругости, учитывающие моментные напряжения. // Механика: Сб. пер. – 1965. – №. 3. – С.113–140.
10. *Nowacki W*. Couple-stresses in the theory of thermoelasticity // Bull. Acad. Polon. Sci. Ser. Sc. Techn. – 1966. – Vol. 14. – P. 505–512.
11. *Zubov L.M*. Nonlinear theory of dislocations and disclinations in elastic bodies. – Berlin: Heidelberg; N.Y.: Springer, 1997. – 205 p.
12. *Nikitin E., Zubov L.M*. Conservation lawsand conjugate solutions in the elasticity of simple materials and materials with couple stress // J. Elasticity. – 1998. – Vol. 51. – № 1. – P. 1–22.
13. *Ерофеев В.И., Кажаев В.В., Семерикова Н.П*. Макромеханическое моделирование упругой и вязко-упругой сред Коссера // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2009. – Т. 2. – № 2. – С. 40–47.
14. *Лялин А.Е., Пирожков В.А. Степанов Р.Д*. О распространении поверхностных волн в среде Коссера // Акуст. журнал. – 1982. – Т. 28. – № 6. – С. 838–840.
15. *Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н*. Построение и анализ аналитического решения для поверхностной волны Рэлея в рамках континуума Коссера // ПМТФ. – 2005. – Т. 46. – № 4. – С. 116–124.
16. *Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н*. О распространении упругих поверхностных волн в среде Коссера // ДАН. Механика. – 2005. – Т. 405. – № 2. – С. 196–198.
17. *Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н*. О распространении упругих поверхностных волн в среде Коссера // Акуст. журнал. – 2006. – Т. 52. – № 2. – С. 227–235.

18. *Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н*. Построение аналитического решения волны Лэмба в рамках континуума Коссера // ПМТФ. – 2007.– Т. 48. – № 1. – С. 143–150.
19. *Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н*. Дисперсия и поляризация поверхностных волн Рэлея для среды Коссера // Изв. РАН. МТТ. – 2007. – № 4. – С. 100–113.
20. *Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н., Улитин М.В*. Анализ волнового решения уравнений эластокинетики среды Коссера в случае плоских объемных волн // ПМТФ. – 2008. – № 2. – С. 196–203.
21. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидомеханика. – М.: Недра, 1996. – 447 с.
22. *Khurana A., Tomar S.K*. Longitudinal wave response of a chiral slab interposed between micropolar solid half-spaces // Int. J. Solids Struct. – 2009. – № 46. – P. 135–150.
23. *Khurana A., Tomar S.K*. Transmission of longitudinal wave at a plane interface between micropolar elastic and chiral solid half-spaces: Incidence from micropolar half-space // J. of Sound and Vibration. – 2008. – № 311. – P. 973–990.
24. *Tomar S.K., Khurana A*. Elastic waves in an electro-microelastic solid // Int. J. Solids Struct. – 2008. – № 45. – P. 276–302.
25. *Tomar S.K., Khurana A*. Reflection and transmission of elastic waves from a plane interface between two thermo-microstretch solid half-spaces // Int. J. of Appl. Math. Mech. – 2009. – № 5 (4). – P. 48–68.
26. *Садовская О.В*. Численное решение пространственных динамических задач моментной теории упругости с граничными условиями симметрии // Журн. вычисл. математики и математ. физики. – 2009. – Т. 49. – № 2. – С. 313–322.
27. *Корепанов В.В., Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н*. Аналитические и численные решения статических и динамических задач несимметричной теории упругости // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т. 10. – № 5. – С. 77–90.
28. *Корепанов В.В., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н*. Численное исследование двумерных задач несимметричной теории упругости // Изв. РАН. МТТ. – 2008. – № 2. – С. 63–70.
29. *Корепанов В.В., Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н*. Аналитические и численные решения в рамках континуума Коссера как основа для постановки экспериментов по обнаружению моментных эффектов в материалах // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2009. – Т. 2. – № 4. – С. 76–91.
30. *Korepanov V.V., Matveenko V.P., Shardakov I.N*. Finite element analysis of two- and three-dimensional static problems in the asymmetric theory of elasticity as a basis for the design of experiments // Acta Mechanica. – 2012. – Vol. 223. – № 8. – P. 1739–1750.
31. *Онами М., Ивасимидзу С., Гэнка К. Сиодзава К., Танака К*. Введение в микромеханику. – М.: Металлургия, 1987. – 280 с.
32. *Koiter W.T*. Couple-stress in the theory of elasticity // Proc. Koenicl. Acad. Wet. – 1964. – Vol. B67. – P. 17.
33. *Kroener E*. On the physical reality of torque stresses in continuum mechnics // Int. J. Eng. Sci. – 1963. – Vol. 1. – P. 261.
34. *Gauthier R.D., Jahsman W.E*. A quest for micropolar elastic constants // Trans. ASME. – 1975. – Vol. E42. – № 2. – P. 369–374.
35. *Lakes R*. Experimental methods for study of Cosserat elastic solids and other generalized elastic continua // Continuum models for materials with micro-structure. – N.-Y.: J. Wiley, 1995. – P. 1–22.
36. *Ерофеев В.И*. Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой. – М.: изд-во Моск. ун-та, 1999. – 328 с.
37. *Gauthier R.D., Jahsman W.E*. A quest for micropolar elastic constants // Arch. Mech. – 1981. – Vol. 33. – № 5. – P. 717–737.

38. *Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н*. Построение и анализ точного аналитического решения задачи Кирша в рамках континуума и псевдоконтинуума Коссера // ПМТФ. – 2001. – Т. 42. – № 4. – С. 145–154.
39. *Кулеш М.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н*. Построение аналитических решений некоторых двумерных задач моментной теории упругости // Изв. РАН. МТТ. – 2002. – № 5. – С. 69–82.
40. *Kulesh M.A., Matveenko V.P., Shardakov I.N.* Parametric analysis of analytical solutions to one-and two-dimensional problems in couple-stress theory of elasticity // Z. Angew. Math. Mech. – 2003. – Vol. 83. – № 4. – P. 238–248.

# Атомно-силовая микроскопия как эффективный инструмент исследования структуры и механических свойств полимерных материалов на микро- и наноуровне

Гаришин О.К.

Описаны основные принципы работы атомно-силового микроскопа (АСМ) – одного из наиболее перспективных инструментов изучения наноструктурированных материалов. Представлены экспериментальные результаты исследования структуры и локальных механических свойств полимерных материалов и нанокомпозитов на их основе. Описаны результаты теоретического моделирования контактного режима работы АСМ, необходимые для адекватной обработки и расшифровки экспериментальных данных. Определены условия применимости стандартных методик, используемых при расшифровке АСМ-сканирования для случая полимерных материалов.

## Как работает атомно-силовой микроскоп

Развитие современных нанотехнологий в области материаловедения требует все более глубоких знаний о внутреннем строении материалов и их физических свойствах на микро-, мезо- и наноуровне. Научившись эффективно управлять происходящими в этих масштабах процессами и явлениями, можно целенаправленно создавать материалы с принципиально новыми потребительскими качествами, недостижимыми в рамках использования традиционных технологий.

Одним из наиболее перспективных инструментов решения этой проблемы является атомно-силовая микроскопия (АСМ) [1]. Изобретенный еще в 1986 г. Гердом Биннингом, Келвином Куэйтом и Кристофером Гербером [2] сканирующий атомно-силовой микроскоп (Нобелевская премия по физике за 1986 г.) в настоящее время широко используется в самых разных областях современной науки – физике, химии, биологии и др. АСМ успешно применяется и в материаловедении при исследовании морфологии и локальных физико-механических свойств материала на наноструктурном уровне (т.е. в масштабах, когда уже надо учитывать эффекты, связанные с особенностями молекулярного строения вещества, хотя сам материал еще можно считать сплошной средой). Сегодня уже хорошо известно, что физические свойства наночастиц и кластеров, определяемые их чрезвычайно высокой удельной поверхностью, могут очень существенно отличаться от макроскопических характеристик. Например, если объем кристалла золота уменьшается до 5 нм, то температура плавления снижается на несколько сотен градусов [3].

С помощью АСМ ученые могут сегодня определять наноструктурные локальные упругие модули [4, 5], параметры упрочнения [6], ползучести [7], остаточные напряжения [8]. Данные технологии позволяют непосредственно наблюдать и количественно оценивать такие нанопроцессы, как появление дислокаций, возникновение сдвиговой нестабильности, фазовые переходы и многие другие явления, недоступные для ранее известных технологий [9].

В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между исследуемой поверх-

ностью и консольной балкой (кантилевером) с острым кремниевым щупом на свободном конце. Как правило, этот щуп (зонд) имеет форму конуса со скругленной вершиной. Длина балки составляет около 100–200 мкм, высота конуса 1–3 мкм. Радиус вершины зонда (который и определяет разрешающую способность прибора) у современных кантилеверов варьируется от 1 до 50 нанометров. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия щупа с исследуемым объектом. В современных микроскопах для этого используются оптические методы (рис. 1). Оптическая система АСМ юстируется таким образом, чтобы излучение полупроводникового лазера фокусировалась на консоли зондового датчика, а отраженный луч попадал на регистрирующий фотодиод. Достаточно полное популярное описание принципов работы АСМ можно найти, например, в [10, 11].

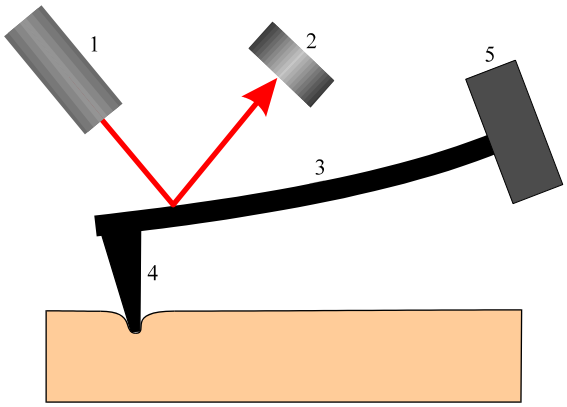



*Рис. 1. Принципиальная схема работы атомно-силового микроскопа. 1 – лазер, 2 – приемный фотодиод, 3 – кантилевер, 4 – щуп, 5 – основание*

В зависимости от характера действия силы между кантилевером и поверхностью образца выделяют три режима работы атомно-силового микроскопа: контактный, бесконтактный, полуконтактный.

В бесконтактном режиме пьезовибратором возбуждаются колебания зонда на некоторой частоте (чаще всего резонансной). Сила, действующая со стороны поверхности (чаще всего Ван-дер-Ваальса), приводит к сдвигу амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик зонда. По этому сдвигу можно судить о рельефе поверхности. Основное достоинство – зонд не «травмирует» образец; недостаток – нельзя получить информацию о механических свойствах поверхности.

В полуконтактном режиме также возбуждаются колебания кантилевера. В нижнем полупериоде колебаний кантилевер касается поверхности образца. Такой метод является промежуточным между полным контактом и полным бесконтактом.

В контактном режиме (его еще называют наноиндентацией) вершина зонда находится в непосредственном соприкосновении с поверхностью и монотонно вдавливается в образец. Последние два режима представляют наибольший интерес, так как они позволяют получать данные не только о рельефе поверхности, но и об ее локальных механических свойствах.

## Экспериментальное изучение структуры и механических свойств полимеров с помощью АСМ

В 2008 г. в ИМСС УрО РАН был установлен и введен в действие атомно-силовой микроскоп Pacific Nano-DRT, после чего в лаборатории «Микромеханики структурно-неоднородных сред» (зав. лаб. А.Л. Свистков) начались систематические исследования наноструктуры и механических свойств различных полимерных материалов (эластомеров, резин, наполненных термопластов и т.п.), а также и композитов на их основе.

Так, при финансовой поддержке РФФИ и Министерства промышленности, инноваций и науки Пермского края были проведены экспериментальные исследования структуры полимеров полиолефиновой группы (термопластов) и композитов с силикатным нанонаполнителем на их основе. Основным объектом для изучения был выбран полиэтилен ПЭ 107-02К, наполненный ультратонкими слоистыми силикатными частицами модифицированной глины марки Cloisite 20A. По химическому со-

ставу это $Na^+$-монтмориллонит, модифицированный поверхностно-активными веществами (ПАВ). Степень наполнения исследуемых нанокомпозитов варьировалась от 0 до 15 мас%. ПЭ 107-02К – это широко распространенный промышленный полиэтилен низкой плотности (0,91 г/см$^3$). Степень кристалличности составляет примерно 50 %, то есть в нем существуют хорошо выраженные надмолекулярные образования – кристаллиты. Проведенные механические макроиспытания показали, что начальный модуль упругости в зависимости от концентрации частиц изменялся от 70 МПа (чистый полимер) до 180 МПа (наполнение 15 мас%).

При исследовании наноструктуры таких материалов возникает одна серьезная проблема. В отличие от более мягких эластомеров, которые легко поддаются обработке стандартным режущим инструментом, поверхность полиэтиленового образца значительно труднее подготовить для АСМ сканирования. Кроме того, хорошо выраженная пластичность, присущая термопластам, способствует появлению остаточных деформаций на разрезаемой поверхности образца (и изменению механических свойств поверхности по сравнению с внутренними областями). Известная технология выделения кристаллитов за счет облучения образца мощным потоком ультрафиолетового излучения («выжигание» аморфной фазы) была недоступна нам ввиду отсутствия соответствующего оборудования. Поэтому была разработана специальная методика подготовки полимерной поверхности, основанная на предварительной термической обработке полимера. Образец в виде таблетки диаметром 5 мм и высотой 2–3 мм помещался в печь, нагревался до температуры, близкой температуре плавления (120–140 °C), и выдерживался определенное время (30 минут). Далее температура понижалась до 90–95 °C, и материал выдерживался еще два часа. В результате такой термической обработки в полиэтилене происходило сначала расплавление кристаллитов, а затем их восстановление (рекристаллизация) – «отжиг» материала. Убирались возможные при изготовлении образца повреждения на его поверхности, а кристаллитные образования становились более «рельефными».

Эксперименты проводили на атомно-силовых микроскопах Nano-DST и Bruker Icon. АСМ сканирование проводилось в полуконтактном режиме наномеханического картирования (PeakForce QNM). В этом случае зонд движется с гармонической частотой 2 Гц в нормальной к образцу плоскости, «постукивая» о поверхность. Информация о локальных физических свойствах определяется из анализа амплитуды отскока и сдвига по фазе. Одновременно с рельефом строились карты таких механических характеристик поверхности образца, как адгезия $F_{adh}$ и жесткость $E_s$. Измеряемый локальный модуль по модели Дерягина-Мюллера-Торопова [12, 13] (в основе которой лежит решение Герца плюс учет адгезии между зондом и поверхностью образца):

$$Es=3/4(1-\nu_s^2)(F-Fadh)/(Ru3)^{0.5},$$

здесь $F_{adh}$ – это максимальная сила на обратном ходе зонда АСМ, когда происходит прерывание его контакта с поверхностью, $u$ – глубина внедрения зонда, $F$ – сила на конце кантилевера, $\nu_s$ – коэффициент Пуассона образца.

Для исследований были выбраны образцы ПЭ 107-02К с наполнением 0 и 15 мас%. Сканировали квадратные области со стороной 1,5, 5 и 15 мкм. Большие 15-микронные сканы использовались для получения общего представления о структуре материала – кристаллитные образования и включения на них видны плохо. На малых сканах эти структуры выявляются намного лучше, особенно на 1,5-микронных. В результате была проведена оценка размеров и формы, как кристаллитов, так и силикатных включений, а также проведена оценка их механических свойств [14].

На рисунках 2, 3 и 4 показаны АСМ сканы рельефа, жесткости и адгезии для ПЭ 107-02К с 15 мас% содержанием нанонаполнителя. Все три картинки построены для одного и того же участка поверхности размером 1,5 на 1,5 мкм.

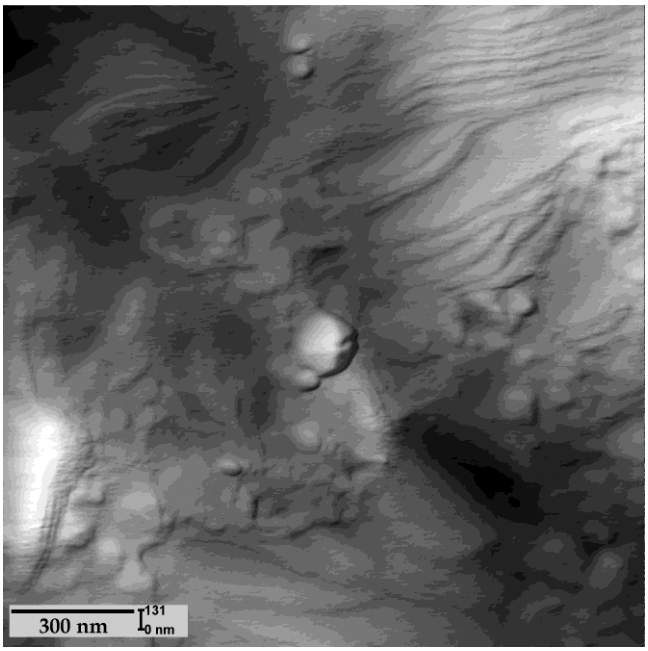



*Рис. 2. АСМ-скан рельефа наполненного полиэтилена (15 мас%). Впадины отображаются темным цветом, возвышенности – светлым. Светлое пятно в центре – силикатное включение. Полосы – кристаллитные образования с аморфной фазой между пластинами*

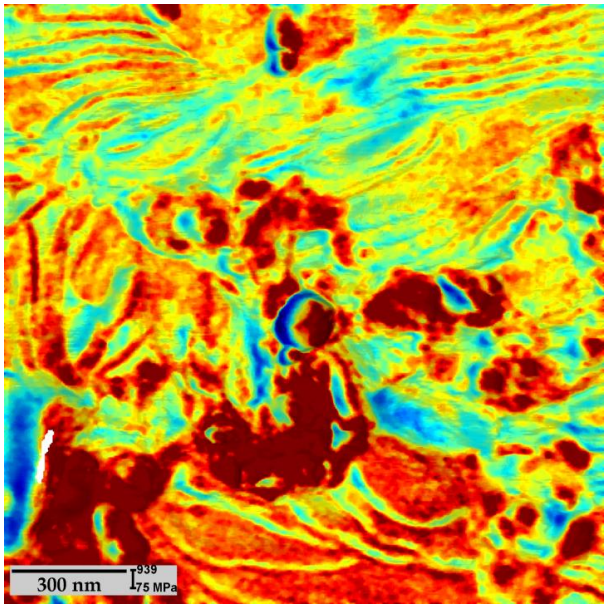



*Рис. 3. АСМ-скан жесткости ($E_s$) наполненного полиэтилена (15 мас%).*

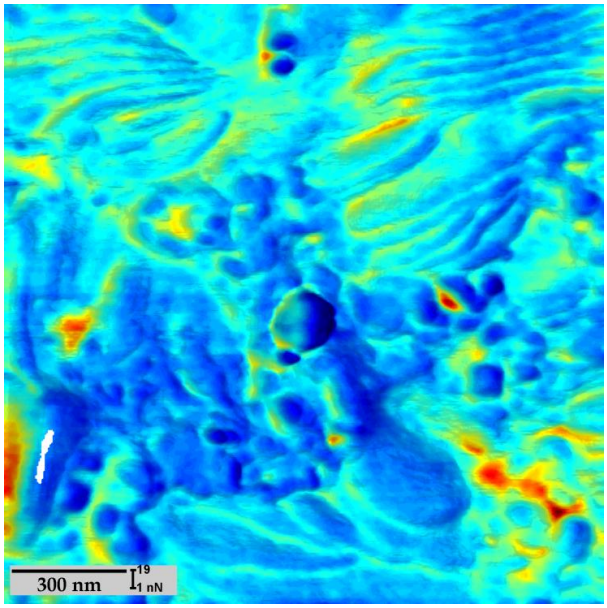



*Рис. 4. АСМ-скан адгезии ($F_{adh}$) наполненного полиэтилена (15 мас%).*

*Максимальные значения отображаются темно-красным, минимальные – синим, промежуточные значения по возрастанию: голубой – зеленый – желтый*

Установлено, что наибольшей жесткостью и наименьшей адгезией обладали частицы нанонаполнителя. Их жесткость достигала 1000 МПа. На самом деле она могла быть и выше, так как эти значения находились на пределе верхнего порога чувствительности кантилевера (конструк тивная особенность прибора такова, что все, что выше, он показывает как 1000 МПа). Сила прилипания к силикатным включениям соответствовала примерно 0,1–2 нН, то есть практически отсутствовала. Аморфная фаза была наименее жесткой – от 15 до 30 МПа, но обладала наибольшей адгезионной способностью – около 15–20 нН. Жесткостные и адгезионные характеристики кристаллитов лежали где то посередине: примерно 300 МПа и 7 нН соответственно.

Частицы наполнителя на сканах имеют форму плоских «монеток» с характерным диаметром порядка 80–100 нм. Кристаллиты, выходящие на поверхность образца, представляют собой образования из нескольких слабоизогнутых пачек параллельных пластин толщиной 30–60 нм. Количество этих слоев варьируется в пределах от 10 до 20.

Судя по полученным сканам (если сравнивать топологию наполненного и ненаполненного ПЭ), можно сделать вывод, что наличие частиц наполнителя слабо влияет на процесс кристаллизации.

## Картографирование АСМ-сканов

Нами была разработана методика топографического описания полученной с помощью атомно-силового микроскопирования поверхности (АСМ-скан), основанная на «картографическом» представлении ее рельефа. В ее основе лежит идея о введении нулевого уровня рельефа, относительно которого можно определить такие понятия как «равнины», «впадины» и «возвышенности» [15].

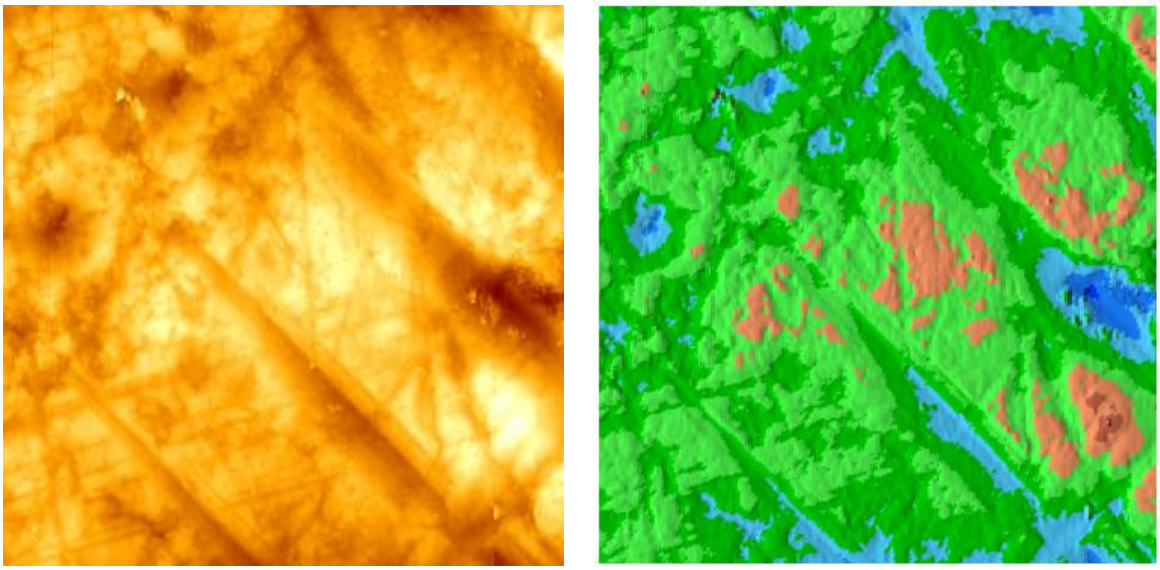
Методика реализована в виде программы в вычислительном пакете MatLab. На входе в программу задается полученный на атомно-силовом микроскопе трехмерный массив абсолютных координат точек сканирования поверхности ($x$ и $y$ – положение точки на плоскости, $z$ – абсолютное отклонение зонда АСМ по вертикали без учета его внедрения в образец). Далее определяется перепад высот $h$ как разность между максимальным и минимальным значениями $z$. Величина $h$ разбивается на $n$ интервалов $\Delta z$, и для каждого из них вычисляется площадь тех частей поверхности, координаты $z$ которых попали в этот интервал. Значение $z$, при котором площадь $S$ максимальна, и принимается за нулевой уровень $z_0$. Главное достоинство данного алгоритма состоит в том, что он исключает искажающее влияние очень больших, но узких пиков или трещин (обычно это какие-то искусственно нанесенные царапины), то есть показывает действительно тот уровень, на который приходится основная часть исследуемой поверхности.

Если взять интервал $\Delta z$ очень малым, функция $S(z)$ будет пульсирующей около некоторой кривой. Если увеличить значение $\Delta z$, то функция $S(z)$ сольется с кривой, около которой были пульсации при малых значениях $\Delta z$. Если еще больше увеличивать значение $\Delta z$, то функция $S(z)$ начнет «расплываться». По своему физическому смыслу кривая, около которой были пульсации при малом значении $\Delta z$, является плотностью распределения площади поверхности образца по высотам. Ее можно использовать для вычисления среднего значения высот, впадин, дисперсий и других статистических характеристик.

По аналогии с цветами, принятыми для физических географических карт, оттенками зеленого цвета обозначались «равнины», синего – «впадины», коричневого – «возвышенности». Границы смены цветов являются линиями постоянного уровня. Полученные с помощью данной программы картины и их сравнение со стандартными АСМ изображениями приведены на рис. 5, а и 5, б. Таким образом, использование данной программы позволяет радикально улучшать «читаемость» экспериментальных результатов и проводить их статистический анализ.

## Как обрабатывается полученная с помощью АСМ информация. Моделирование взаимодействия зонда АСМ с поверхностью

В процессе эксперимента зонд АСМ сканирует выбранную поверхность образца. Получаемые при этом данные представляют собой зависимости между координатами точек сканирования, силой реакции ($F$), действующей на зонд, и глубиной проникновения вершины щупа в исследуемый материал ($u$). Эти результаты



*а* *б*

*Рис. 5. Изображение поверхности, полученной на АСМ (а), и после картографической обработки (б)*

сами по себе (без дополнительных знаний о предмете исследований) малоинформативны, поэтому требуется их дальнейшая теоретическая расшифровка с привлечением различных физических и механических моделей. Их разработка является актуальной фундаментальной задачей, которой в настоящее активно занимаются многие исследователи как в России, так и за рубежом.

Стандартное математическое обеспечение, поставляемое для расшифровки результатов атомно-силового сканирования (АСМ), базируется в основном на моделях, использующих классическое решение задачи Герца о контакте двух линейно-упругих сфер (или сферы и плоского полупространства, если одна из них имеет бесконечно большой радиус). В большинстве случаев этого вполне достаточно. Однако существуют такие ситуации, когда решение Герца следует применять с большой осторожностью. Например: 1) очень «мягкие» материалы, когда зонд АСМ проваливается в образец на большую глубину; 2) зонд и материал контактируют не по нормали, а под углом; 3) поверхность образца может смещаться под действием давления зонда; 4) материал анизотропен и т.д. Остановимся на этих вопросах подробнее.

Механическую реакцию от взаимодействия зонда АСМ и поверхности образца определяли из решения контактной краевой задачи о вдавливании жесткого конуса со скругленной вершиной в более мягкую поверхность заданной формы (не обязательно плоскую) (рис. 6).

Решение искали численно – методом конечных элементов (как в линейной, так и в нелинейно-упругой постановке). В результате получали зависимости силы упругой реакции от механических свойств материала образца и геометрических характеристик зонда: радиуса вершины $R$ и угла раствора конуса α.

На рис. 7 представлены зависимости силы реакции ($F$), действующей на зонд, от глубины его проникновения в материал ($u$), рассчитанные по формуле Герца и численно («неогуковый» материал) (α = 40°). $C_s$ – неогуковая упругая постоянная. Для несжимаемой среды Cs соотносится с начальным модулем Юнга как $E_s = 6\,C_s$. Из графиков видно, что расхождение классического решения Герца [16] с нелинейно-упругим решением начинается при $u/R > 0{,}4$ (причем нелинейно-упругое решение лежит ниже). При меньших значениях ее вполне можно использовать.

Следует отметить, что в зависимости от механических свойств, испытываемых на АСМ материалов, используются различные зонды с различными геометрическими

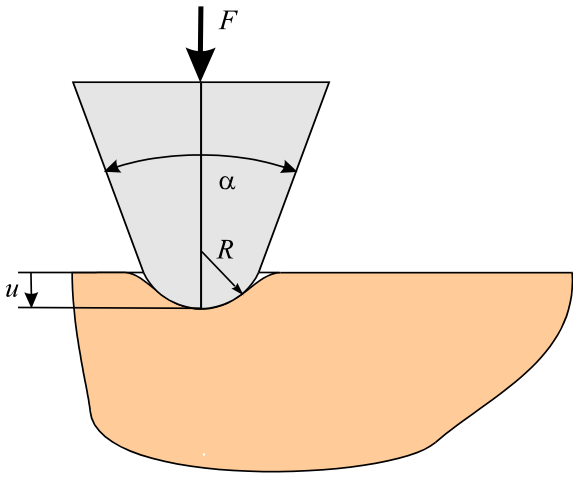



*Рис. 6. Расчетная геометрия зонда АСМ*

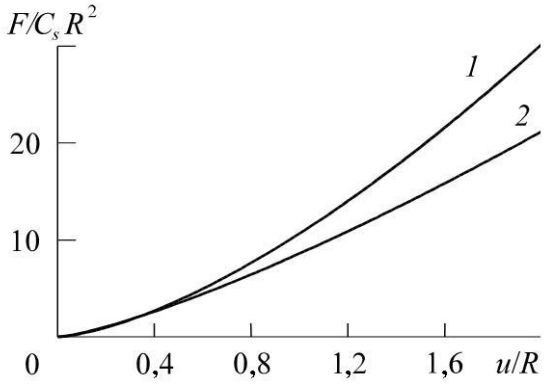



*Рис. 7. Зависимости силы реакции, действующей на зонд от глубины его проникновения в материал. 1 – формула Герца, 2 – численное нелинейно-упругое решение (неогук)*

характеристиками, что, конечно, должно сказываться на процессе наноиндентации. При определении зависимости $F$ от α значения аргумента варьировались от 0 (цилиндрический зонд со скругленной вершиной радиуса $R$) до 90°. Полученные зависимости представлены на рис. 8. Расчеты показали, что величина угла раствора конуса зонда начинает существенно влиять на силу реакции, когда глубина внедрения зонда в образец достигает значений 3–4$R$, то есть этот фактор надо обязательно учитывать при описании больших деформаций в зоне контакта. Так, при погружении зонда на глубину 4$R$, $F$(α = 90°) более чем в два раза превышает $F$(α = 0°).

Также были проведены модельные исследования по вдавливанию различающихся по геометрии зондов АСМ в трансверсально-изотропный материал с разной степенью анизотропии. Соотношение упругих модулей в трансверсальной плоскости и нормальном направлении $E_r/E_z$ варьировались от 0,1 до 1 (изотропный случай, кривая совпадает с решением Герца). Угол раствора конуса индентора α брали равным 30°, 40°, 60° и 90°. На рис. 9 показаны зависимости внедрения зонда АСМ в трансверсально-изотропный материал. Так как глубина внедрения относительно невелика – меньше или близко от высоты шаровой части зонда, – то параметр α практически не сказывается на усилии. Чем больше анизотропия материала, тем слабее реакция на вдавливание зонда. Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что анизотропия поверхности может очень существенно сказываться на силе реакции ($F$), и

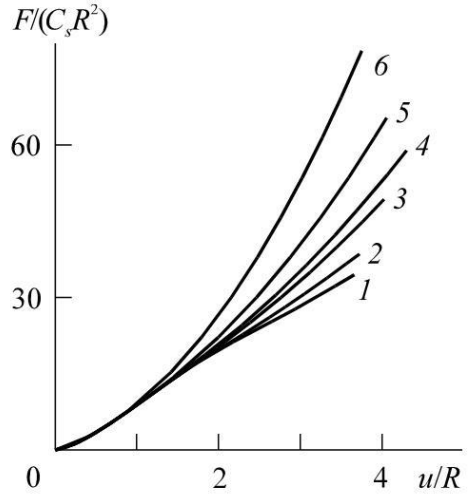



*Рис. 8. Зависимость силы реакции зонда АСМ от глубины внедрения в образец угла α. 1 – α = 0°, 2 – 12°, 3 – 30°, 4 – 38°, 5 – 56°, 6 – 90°*

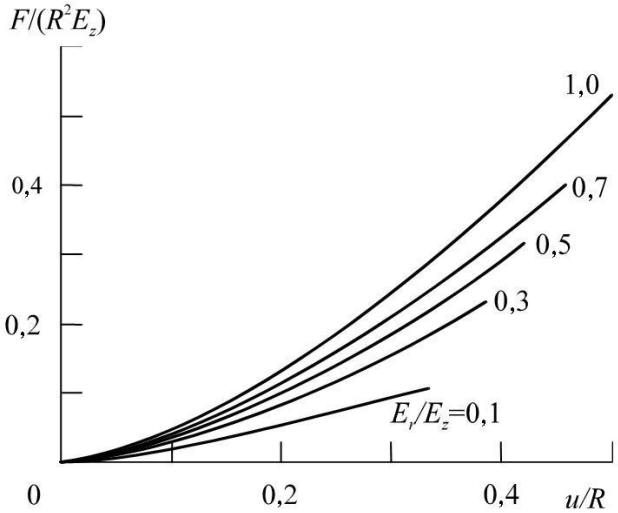



*Рис. 9. Внедрение зонда в анизотропную неповрежденную поверхность, $E_r/E_z$ = 0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 1,0; α = 30°, 40°, 60°, 90°*

для правильной адекватной расшифровки полученных при АСМ сканировании данных следует с большой осторожностью использовать стандартные модели, основанные на решении Герца.

В результате проведенных в ИМСС УрО РАН экспериментальных исследований [17] наноструктуры эластомеров и эластомерных нанокомпозитов в предразрывном состоянии было установлено, что в вершине трещины можно наблюдать волокнатяжи с отличными от основного материала механическими свойствами. Испытывались изопреновые каучуки СКИ 3, содержащие 30 и 50 массовых частей технического углерода марки N220. Образующиеся в вершине трещины тяжи были ориентированы в перпендикулярном к направлению разрыва. С помощью атомно-силовой микроскопии были определены характерные средние диаметр и длина волокон, составившие порядка 80 нм и 800–1000 нм соответственно.

Проведенный по экспериментальным данным расчет приведенного модуля упругости тяжей по ставшей уже стандартной модели Дерягина–Мюллера–Торопова (ДМТ-модель) [12, 13] показал, что жесткость волокон примерно в 3 раза выше, чем у остальной матрицы. Объяснить это можно тем, что полимер в тяжах находится в высокоориентированном состоянии (но тогда – как показывают приведенные в литературе оценки [18] – жесткость должна быть еще выше, причем намного). Проблема усугубляется еще и тем, что основанная на решении Герца ДМТ-модель предполагает взаимодействие зонда с плоской поверхностью только в перпендикулярном к направлению внедрения направлении. Понятно, что данное условие в случае контакта с тяжем не выполняется.

Для оценки этих факторов были проведены модельные исследования контактного взаимодействия зонда АСМ и тяжа в виде длинной «гребнеобразной» выпуклости на плоской поверхности (поперечное сечение имело вид треугольника со скругленной верхней вершиной). Расчетная схема показана на рис. 10. Высоту «гребня» ($h_s$) брали равной 5 радиусам вершины зонда $R$, а ширину основания ($b_s$) варьировали от 5 до 20$R$. Радиус скругления вершины «гребня» ($R_s$) задавали от 1,25 до 15$R$. Материал образца считали неогуковым, $E_s$ – начальный модуль Юнга материала. Задачу решали в 3D постановке методом конечных элементов.

Рассматривалось три варианта приложения точки контакта: а) в вершину гребня, б) в боковую поверхность, в) в основание выпуклости. На рис. 11 показаны зависимости упругой силы реакции зонда на вмятие в различные участки «узкого» тяжа (высота и основание равны 5$R$, радиусом $R_s$ – 1,25$R$). На рис. 12 представлены аналогичные зависимости для «широкого» тяжа: $h_s = 5R$, $b_s = 20R$, $R_s = 15R$.

В результате проведенных расчетов было установлено, что в случае «узкого»

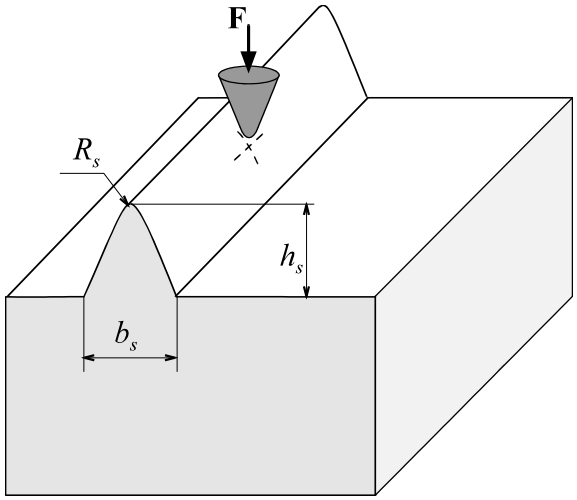



*Рис. 10. Расчетная схема по моделированию контакта зонда АСМ и полимерного нанотяжа в виде «гребня»*

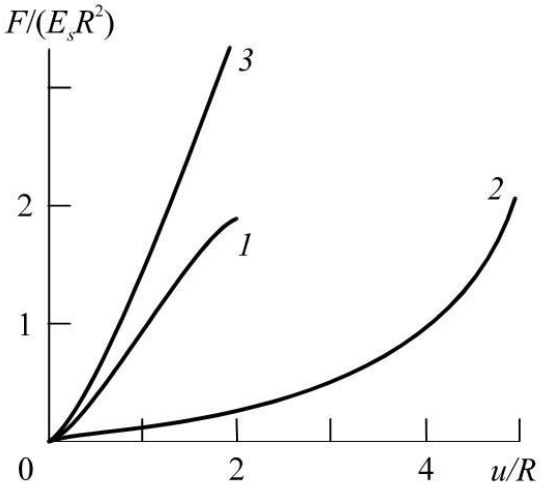



*Рис. 11. Внедрение зонда АСМ в «узкий» тяж: 1 – в вершину «гребня», 2 – в середину склона, 3 – в основание гребня*

гребня (основание выпуклости составляет порядка 5–10$R$) происходит его «прогиб» в горизонтальном направлении при воздействии зонда на боковую поверхность выпуклости, что, конечно, сильно сказывается на силе реакции на кантилевере ($F$). Так, для выпуклости с основанием, равным 5$R$, происходило более чем десятикратное падение силы F при контакте зонда с боковой поверхностью. На графиках (рис. 12) видно, что разброс кривых $F(u)$ для разных точек контакта все равно присутствует, хотя и стал значительно меньше (нет горизонтального смещения «гребня»).

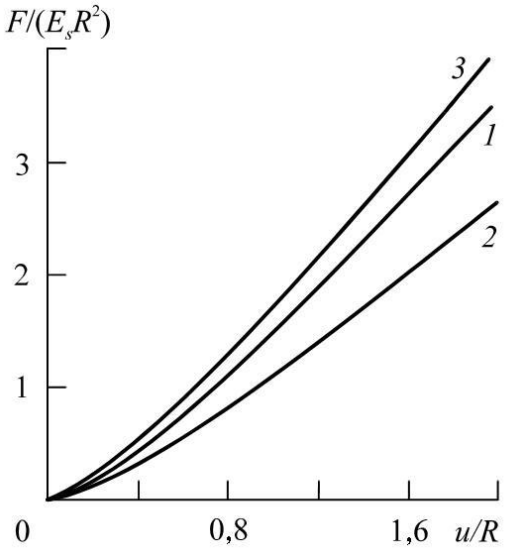



*Рис. 12. Внедрение зонда АСМ в «широкий» тяж: 1 – в вершину «гребня», 2 – в середину склона, 3 – в основание гребня*

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что проблема взаимодействия зонда АСМ и полимерного нанотяжа требует более тщательного и всестороннего исследования. Стандартные методы атомно-силовой микроскопии в этом случае нуждаются в существенном уточнении. Такие исследования планируется провести в следующем году. Для этого будут решены в 3D постановке контактные краевые задачи с реальной геометрией тяжа и различными граничными условиями (тяж находится в свободном пространстве, тяж лежит на поверхности матрицы, тяж углублен в поверхность матрицы, тяж предварительно растянут и т.д.).

## Библиографический список


1. *Schuh C.A*. Nanoindentation studies of materials // Materials Today. – 2006. – Vol. 9, № 5. – P. 32–40.
2. *Binnig G., Quate C.F., Gerber C*. Atomic force microscope // Surface studies by scanning tunneling microscopy // Phys. Rev. Lett. – 1986. – Vol. 56. – № 9. – P. 930–933.
3. *Чвалун С.Н*. Полимерные нанокомпозиты // Природа. – 2000. – № 7. – С. 22–30.
4. *Bhushan B*. Handbook of micro-mano-tribology. – Springer, 1999. – 433 p.
5. Relating elastic modulus to indentation response using atomic force microscopy / *M.R. Vanlandingham, S.H. McKnicht, G.R. Palmese, R.F. Eduljee, J.W. Gillepie, Jr.R.L. McCulough* // J. of Materials Science Letters. – 1997. – Vol. 16. – P. 117–119.
6. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented indentation / *M. Dao, N. Chollacoop, K.J. Van Vliet, T.A. Venkatesh, S. Suresh* // Acta Mater. – 2001. – Vol. 49. – B. 19. – P. 3899–3918.
7. *Fischer-Cripps A.C*. Nanoindentation and indentation measurements // Mater. Sci. Eng. – 2004. – Vol. 44. – P. 91–102.
8. *Carlsson S., Larsson P.-L*. On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing. Part I: theoretical and numerical analysis // Acta Materialia. – 2001. – Vol. 49. – № 12. – P. 2179–2191.
9. *Fischer-Cripps A.C*. Nanoindentation. Springer, 2002. – 217 p.
10. *Головин Ю.И*. Введение в нанотехнологию. – М.: Машиностроение, 2003. – 112 с.
11. *Миронов В.Л*. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Н. Новгород: изд-во Института физики микроструктур РАН, 2004. – 115 с.
12. *Derjaguin B.V., Muller V.M., Toropov Yu.P*. Effect of contact deformations on the adhesion of particles // J. Colloid. Interface Sci. – 1975. – Vol. 53. – № 2. – P. 314–326.
13. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М*. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.

14. *Гаришин О.К., Морозов И.А., Шадрин В.В*. Экспериментальные исследования полимер-силикатных нанокомпозитов с помощью атомно-силового микроскопа // Вестник ПНИПУ: Механика. – 2013. – № 2. – С. 84–95.
15. *Изюмов Р.И., Свистков А.Л*. Картографический метод анализа свойств поверхности // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2012. – Т. 22. – № 4. – С. 69–72.
16. *Тимошенко С.П*. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
17. *Морозов И.А., Солодько В.Н*. Исследование областей трещин каучуковых вулканизатов методами атомно-силовой микроскопии // Вестник Пермского университета. Серия Физика. – 2012. – Т. 22. – № 4. – С. 158–165.
18. *Свистков А.Л., Лауке Б*. Дифференциальные определяющие уравнения несжимаемых сред при конечных деформациях // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – С. 158–170.

# Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений

Пантелеев И.А., Наймарк О.Б.

Представлен обзор моделей подготовки тектонического землетрясения, базирующихся на подходах из различных отраслей знаний: механики деформируемого твердого тела, статистической физики, математической статистики, нелинейной физики. Особое внимание уделяется идеологии построения моделей в призме задачи прогноза землетрясений. Обсуждаются достоинства и недостатки существующих моделей и современные тенденции их развития.

Несмотря на современный технический и технологический прогресс, расширение сетей по регистрации сейсмической активности и огромный объем накопленных данных о феноменологических закономерностях землетрясений, это явление остается одним из наиболее катастрофических и недостаточно прогнозируемых природных катаклизмов. Значимость исследования природы землетрясений возрастает в связи с ростом заселенности в окрестности крупных активных разломов [63].

Исторически сложилось, что развитие подходов к описанию механизмов подготовки очага землетрясения происходило вследствие огромного желания человечества научиться прогнозировать это явление, влекущее за собой огромные человеческие и экономические потери. Наиболее интенсивное развитие этот раздел науки получил во второй половине прошлого века, что вызвано появлением и развитием комплексных сетей непрерывного сейсмического мониторинга. Непрерывное функционирование подобных сетей вкупе с геофизическими и геодезическими наблюдениями в ряде сейсмоопасных районов позлило начать получать на порядки больше информации о процессах, предшествующих землетрясениям и их сопровождающих.

В начале 80-х годов прошлого столетия в США начал осуществляться эксперимент по развитию методов прогноза. На Паркфилдском геодинамическом полигоне, оснащенном различной сейсмологической, геофизической и геодезической аппаратурой, на котором землетрясения с магнитудами, близкими к M = 6, происходили с регулярностью 20–25 лет, ученые из разных стран получили уникальную возможность изучать процессы подготовки землетрясения. Предполагалось, что наблюдения позволят выявить особенности деформационного режима и сопутствующих ему физических полей в различные периоды формирования очаговой области.

После нескольких несбывшихся прогнозов землетрясений, выданных учеными в десятилетний срок [52, 69], эксперимент был признан неудачным и закрыт. Через 16 лет после прогнозируемой даты произошло землетрясение M = 6 (28 сентября 2004 г.), когда его менее всего ждали. При этом оно не сопровождалось предваряющим крипом и форшоками [68], характерными для предыдущих землетрясений этого региона. Предварительный анализ данных геофизических полей, полученных перед его возникновением, также не позволил выявить каких-либо значимых аномалий, которые можно было бы трактовать как предвестники землетрясения [69].

В Японии, которая на рубеже XX–XXI веков имела одну из наиболее плотных сетей сейсмических и GPS-станций (расстояние между станциями 50–100 км), ученым-сейсмологам не удалось спрогнозировать сильное землетрясение Токачи-Оки, произошедшего в 2003 г. к юго-востоку от о. Хоккайдо. В Китае после успешного прогноза землетрясения в окрестности г. Хайченг 1975 г. (M = 7,3) последовало катастрофическое Таншаньское землетрясение 1976 г., не проявившееся в целом ряде предвестников, за которыми осуществлялось слежение.

В целом комплексное изучение сейсмического режима и деформаций выполнявшееся на различных геодинамических полигонах (Паркфилд, Гарм, Талгар) показало, что вероятны разные сценарии подготовки очага землетрясений и, по-видимому, невозможно выделить один или несколько прогностических признаков, которые бы достоверно регистрировались при подготовке землетрясений в различных районах нашей планеты. Замечаемые отдельными исследователями на примере нескольких землетрясений аномальные (предвестниковые) изменения какого-либо геофизического, геодезического или сейсмологического параметра при увеличении наблюдений и числа анализируемых землетрясений начинали проявляться нерегулярно [8].

На данный момент успешных прогнозов крупных землетрясений, выданных за последние 60–70 лет – единицы [19, 21, 22, 43], тогда как сильные землетрясения, способные вызвать обширные разрушения, случаются на планете примерно раз в две недели. Данное положение вещей привело к тому, что на рубеже веков оптимизм в поиске прогностических признаков в геофизических и сейсмологических полях сменился глубоким пессимизмом. Появились публикации, утверждающие, что землетрясения носят исключительно случайный характер и детерминированный подход бесперспективен [8], а как следствие, прогноз землетрясений принципиально невозможен [62]. С середины 90-х годов прошлого века в проблеме прогноза землетрясений на западе практически не появились новые идеи. Отрицательный результат относительно прогноза позволил прийти к пониманию того, что наши представления о механизме генерации землетрясений достаточно далеки от реального природного процесса и необходимо вернуться к переосмыслению первопричины появления землетрясения – механизмам деформирования больших массивов горных пород.

## Структура исследований землетрясений

Согласно работе [13] землетрясения необходимо рассматривать как систему, которая является частью более крупной системы – геодинамических процессов. Изучение этого природного явления требует системного подхода для выявления наиболее важных причинно-следственных связей. На рис. 1 представлена структура комплексных исследований землетрясений по И.Г. Киссину.

Для получения знаний, достаточных для осуществления практического прогноза, требуются комплексные исследования по двум основным направлениям:

1) геосреда, ее структура, неоднородность и прочностные свойства, выделение участков, подверженных сейсмическим деформациям;

2) характер напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, факторы на него влияющие, тектонические напряжения, их распределения и изменения по силе и параметрам.

Первое направление – исследование среды, ее свойств и топологии с позиции построения формализованных теорий подготовки землетрясения, позволит получить априорную информацию, необходимую для выделения объекта исследования из окружающей среды, а также информацию о структурном строении среды и объекта исследований – зоны формирования очага. Согласно концепции геофизической среды М.А. Садовского [39], которая в настоящее время является общепризнанной, геосреда имеет блоковое иерархическое самоподобное строение, которое и определяет

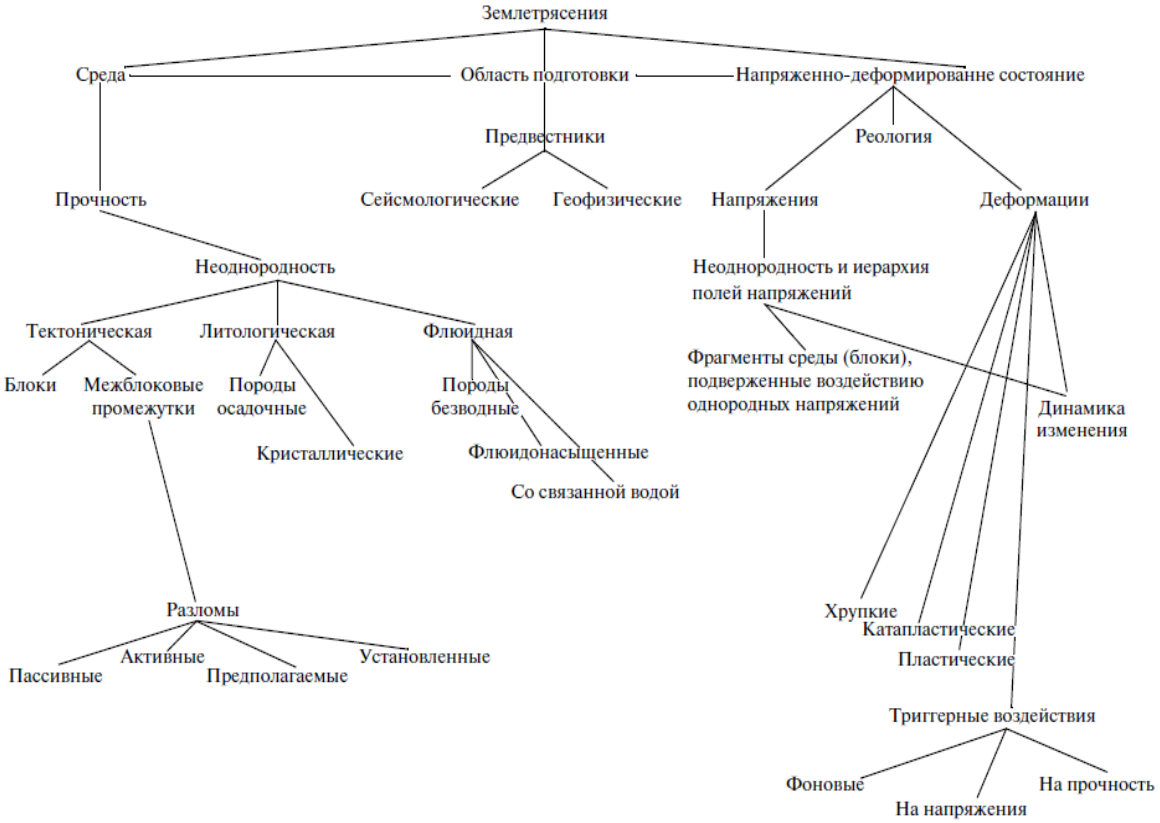



*Рис. 1. Структура исследований землетрясений [13]*

возможность среды накапливать, перераспределять, излучать и диссипировать энергию. Именно такие особенности строения среды определяют специфику сейсмических процессов [40].

Геосреда обладает ярко выраженной неоднородностью, которая определяется тремя факторами: литологическим, тектоническим и флюидным [65]. Литологическая неоднородность среды обусловливает резкое различие в механических и прочностных свойствах пород, расположенных в области формирующегося очага, которое может доходить до 2–3 порядков по величине (например, для модуля Юнга). Поэтому сейсмический процесс и его подготовка будет иметь свои особенности для очагов, расположенных в глубоких частях мощного осадочного покрова по сравнению с очагами, расположенными в консолидированной коре, представленной кристаллическими породами.

Тектоническая неоднородность среды определяет ее блоковое строение. Сейсмические деформации локализуются на ослабленных участках среды, к которым относятся межблоковые границы и системы разломов различного ранга. Блоковое строение геосреды влияет на характер ее деформирования в поле тектонических напряжений и особенности аномального изменения параметров геофизических полей, вызванного формированием очага землетрясения. Влияние флюида на сейсмический режим подтверждено многочисленными экспериментальными и натурными данными [14]. Это влияние определяется рядом факторов и процессов: эффектом Ребиндера, зависимостью критического касательного напряжения на плоскости разрыва от давления флюида, повышения напряжения за счет восходящего движения флюидов и расширения фильтрационных путей. По степени флюидонасыщенности земной коры выделяют осадочную и кристаллическую толщи [13]. В осадочной толще сейсмическая активность в основном сконцентрирована в нижней части, где порово-трещинные воды находятся под сверхгидростатическим давлением. В кристаллической

толще по характеру порово-трещинного пространства и проницаемости выделяют три типа пород: с повышенными значениями проницаемости, емкости пор и трещин; со сравнительно малой емкостью связанных каналов (порядка десятых долей процента); с очень низкой пористостью и трещиноватостью, почти нулевой проницаемостью. К первому типу относятся зоны разломов, ко второму – блоки и слои флюидонасыщенных пород, к третьему – массивы плотных пород.

Подобная градация четко выделяется на геофизических разрезах по скоростным и электрическим характеристикам. В соответствии с этой градацией места концентрации очагов землетрясений классифицируются по местоположению относительно флюидных систем консолидированной коры [13]: I – в пределах флюидных резервуаров или по соседству с ними; II – множественные очаги на субвертикальных путях миграции глубинных флюидов; III – с притоком воды при метаморфической дегидратации пород в зоне разрыва; IV – с притоком воды по путям фильтрации при подготовке очага; V – очаги в безводных породах (рис. 2).

Комплексное исследование структуры геосреды в сейсмоопасных районах с учетом тектонической, литологической и флюидной неоднородности ее строения позволит получить необходимую информацию для понимания процессов формирования и развития областей подготовки землетрясений, включая их пространственно-временную локализацию.

Второе направление исследований – исследование характера напряженно-деформированного состояния геосреды и физико-механических факторов, на него влияющих, с учетом существующих знаний о ее строении и структуре. Именно современные знания о структуре среды должны лежать в основе любого подхода к описанию эволюции напряженно-деформированного состояния среды в поле тектонических напряжений. Применительно к задаче прогноза землетрясений это направление исследований можно сформулировать более узко: изучение условий реализации того или иного способа релаксации напряжений массивами горных пород (в виде крупномасштабного хрупкого разрушения, катакластической или пластической деформации) в конкретной тектонической обстановке.

Современные знания, полученные в рамках обозначенных направлений, позволят сформулировать новую модель подготовки землетрясения, которая согласно И.Г. Киссину, в настоящее время отсутствует, и необходимость в ней очевидна [13].

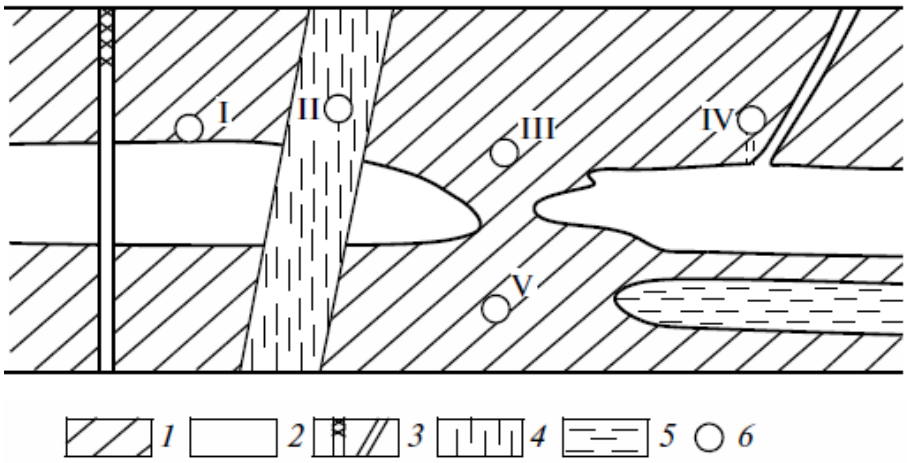



*Рис. 2. Положение очагов землетрясений в фильтрационном поле консолидированной коры [13]: 1 – массивы слабопроницаемые, практически сухие; 2–5 – флюидонасыщенные тела: 2 – субгоризонтальные зоны; 3 – субвертикальные и наклонные разломы (крестики – участки с изменением проницаемости); 4 – субвертикальные зоны концентрации очагов; 5 – зоны рассеянных скоплений флюидов; 6 – очаги землетрясений*

## Модели подготовки тектонического землетрясения

Большинство существующих моделей очага землетрясения являются развитием двух противоположных представлений о процессе формирования очага землетрясений, которые берут свое начало от работ Г.Ф. Рейда и Ч.Ф. Рихтера. Согласно Г.Ф. Рейду [79], земная кора находится в непрерывном перемещении и подготовка землетрясения начинается с возникновения некоторого препятствия этому перемещению. Препятствие, как правило, представляет собой зону жесткого зацепления на берегах разлома, вызывающую резкий рост напряжений в локальной пространственной области (накопление упругой энергии). В некоторый момент времени, когда уровень напряжений достигает предела прочности [53] или плотность запасенной потенциальной энергии достигает критического значения [5], происходит разрушение препятствия с образованием сдвигового разлома, представляющего собой очаг землетрясения [46].

Таким образом, потенциальными очагами землетрясения по Рейду являются локализованные в пространстве области повышенных напряжений, близких к пределу прочности породы. Согласно же Рихтеру [37], до землетрясения распределение деформаций и напряжений по пространству является однородным, а появление землетрясения связывается с возникновением, по тем или иным причинам, локализованной зоны пониженной прочности, которое также характеризуется пониженным уровнем девиаторных напряжений.

По И.П. Добровольскому [11] модели очага землетрясения, базирующиеся на подходах Рейда или Рихтера, можно разделить на две качественно различающиеся группы – по механизмам консолидации и деструкции. Наиболее известными и общепризнанными представителями этих групп являются две модели, которые появились в середине второй половины XX века, в период наиболее активных исследований в области физики и механики землетрясений – дилатантно-диффузионная модель (ДД-модель) и модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ-модель).

Согласно ДД-модели, предложенной в 1972 году учеными из США [2, 51], процесс подготовки землетрясения имеет следующие характерные стадии:

*1-я стадия* – упругая. Происходит рост упругих напряжений, растет разность главных напряжений, т.е. девиаторная часть тензора напряжений. Физическое состояние среды фактически не меняется.

*2-я стадия* – дилатантная. При достаточно большой разности главных напряжений образуются трещины отрыва, и поэтому возникает общее увеличение объема породы – дилатансия. Поровое давление падает, прочность пород возрастает.

*3-я стадия* – диффузионная. Осушение пород вызывает диффузию воды в зоне подготовки, поровое давление растет, прочность пород снижается, и процесс заканчивается магистральным разрывом.

На рис. 3 представлены характерные вариации физических параметров на каждой из трех стадий по ДД-модели [31]. Третья стадия, непосредственно предшествующая реализации землетрясения, характеризуется резким уменьшением скорости деформации в области готовящегося очага и резким увеличением электропроводности пород, что является прогностическим признаком, согласно данной модели.

Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования предложена советскими учеными в 1971 году [2, 26] и основана на результатах лабораторных исследований процессов разрушения горных пород. Согласно ЛНТ-модели, формирование очага землетрясения является результатом развития и взаимодействия большого количества сдвиговых трещин в гипоцентральной области и осуществляется в три стадии:

*1-я стадия* – однородное растрескивание. Под действием сдвиговых тектонических напряжений происходит медленный рост числа и размеров существующих трещин и образование новых. Трещины располагаются относительно далеко друг от

друга и практически не взаимодействуют. В статистически однородной среде при равномерном нагружении трещинообразование также статистически однородно, и это соответствует докритической стадии разрушения, обнаруженной в лабораторных экспериментах.

*2-я стадия* – лавинное взаимодействие трещин. При достижении во всем объеме или большей его части некоторой критической плотности трещин происходит их взаимодействие с удлинением тех из них, которые наиболее выгодно ориентированы по отношению к полю напряжений.

*3-я стадия* – стадия неустойчивости. Дальнейшее увеличение деформации приводит к локализации процесса деформирования в узкой пространственной области, характеризующейся повышенной концентрацией разрывов и являющейся прообразом будущего магистрального разрыва. Падение напряжения в этой зоне может привести к падению напряжения в рассматриваемом объеме геосреды. Среда разделяется на две зоны: A и B, с различными свойствами (рис. 4). В то время как в зоне локализующейся неустойчивой деформации продолжается ускоренное трещинообразование, существующие в окружающем объеме трещины вследствие частичной разгрузки перестают развиваться и становятся неактивными.

Начало процесса лавинного взаимодействия трещин определяется согласно кинетической концепции прочности [12] достижением концентрационным параметром критического значения, равного трем. При этом концентрационный параметр представляет собой отношение двух характерных пространственных масштабов в среде с трещинами: размера трещин $L$ и среднего расстояния между ними $l$:

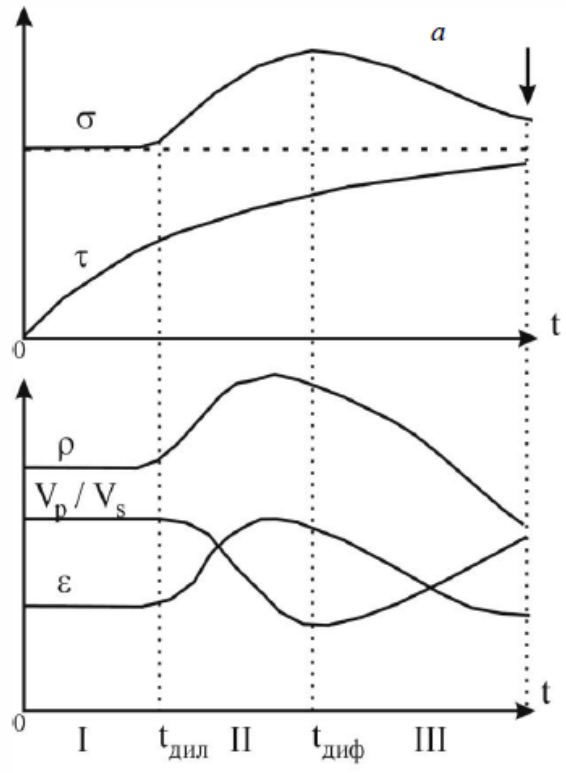



*Рис. 3. Схема изменения физических параметров для ДД-модели подготовки очага землетрясения: σ – напряжения, τ – прочность, ρ – электросопротивление, $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, $V_p/V_s$ – отношение скоростей продольных и поперечных волн, $t_{дил}$ – время начала дилатансии, $t_{диф}$ – время, когда скорость диффузии флюида превышает скорость дилатансии*

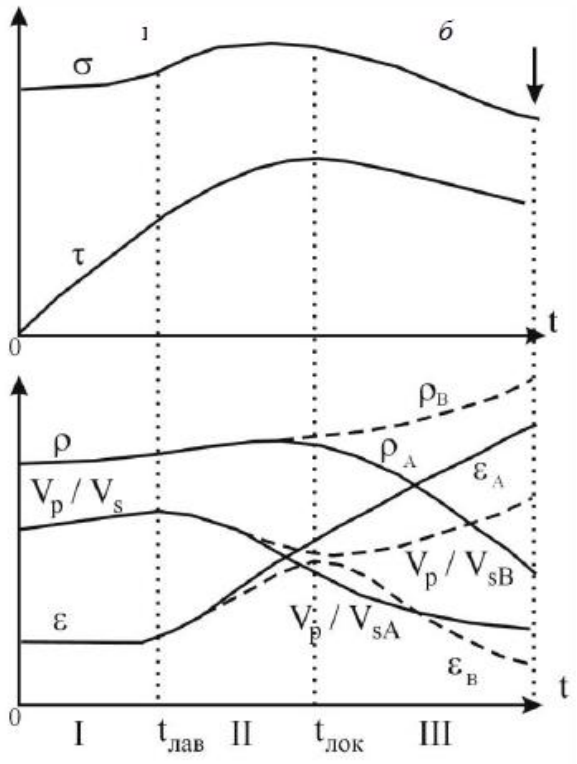



*Рис. 4. Схема изменения физических параметров для ЛНТ-модели подготовки очага землетрясения: σ – напряжения, τ – прочность, ρ – электросопротивление, $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, $V_p/V_s$ – отношение скоростей продольных и поперечных волн, $t_{лав}$ – начало лавинного нарастания трещин, $t_{лок}$ – начало локализации трещин в области будущего разрыва. A – зона локализации трещинообразования, B – зона, лежащая за пределами области локализации*

$$K = \frac{L}{l}. \qquad (1)$$

Согласно ЛНТ-модели, в отличие от ДД-модели, на завершающей стадии формирования очага землетрясений происходит резкое увеличение скорости деформации в области готовящегося очага и постепенное уменьшение отношения скоростей продольных и поперечных упругих волн (см. рис. 4).

Несмотря на распространенность, обе модели являются качественными и не позволяют описать краткосрочные предвестники, объяснение же средне- и долгосрочных предвестников с позиций данных моделей не выдерживает никакой критики под натиском новых фактов наблюдений.

В отличие от ЛНТ и ДД-модели, которые являются описательными, существует большое количество формализованных моделей подготовки тектонического землетрясения, которые также по механизму реализации накопленной упругой энергии можно разделить на модели по механизму деструкции и механизму консолидации. С другой стороны, в зависимости от используемых методов и подходов эти модели можно разделить на три класса:

1. Динамические модели, описывающие перенос импульса (напряжений, массовых скоростей) на разломах на основе детерминистического представления.

2. Статистические модели, описывающие вероятность сдвиговых нарушений на основе статистических данных о сейсмических событиях.

3. Модели механики деформируемого твердого тела.

К первому классу относятся модели распространения сдвиговых трещин в поле приложенных напряжений [67], скольжения по гладкому разлому с различными соотношениями для силы трения [54, 80], ряд моделей, являющихся развитием идеи «прерывистого скольжения» (stick-slip), высказанной Брайсом и Баерли [55]. Наиболее известной формализованной stick-slip-моделью является модель Барриджа–Кнопова, согласно которой подвижная плита движется по неподвижной благодаря скольжению блоков, связанных между собой и с плитой посредством пружин (рис. 5). Подобный подход позволил описать ряд статистических закономерностей развития сейсмических событий и получил развитие в работах ряда исследователей [50, 56–58, 66, 72, 76].

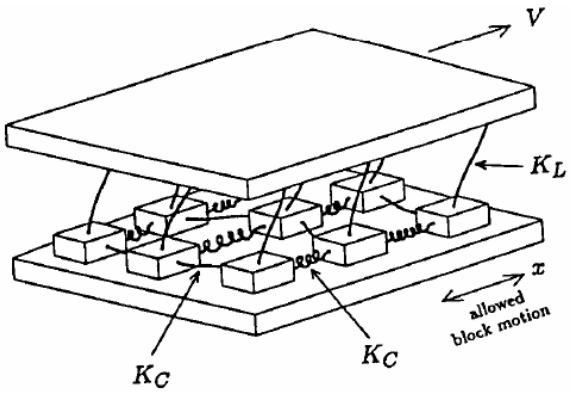



*Рис. 5. Модель сейсмичности Барриджа–Кнопова (V – скорость движения плиты, $K_L$, $K_C$ – жесткость пружин)*

Одним из ярких представителей класса статистических моделей является статистическая механика сейсмических явлений, развиваемая J.B. Rundle [82–84]. Рассматривается система локализованных сдвигов $s(x,t)$ по нарушениям сплошности в земной коре с заданной реологией последней, находящейся в поле приложенного напряжения. Статическое равновесие такой системы определяется соотношением

$$\sigma_e\left[x,t,s(x',t'),p\right] = \sigma_f\left[x,t,s(x,t)\right], \qquad (2)$$

где $\sigma_e(x,t)$ – упругие напряжения, определяемые смещением основания исходного нарушения земной коры, а также напряжениями, возникающими от сдвигов на нарушениях с координатами $(x',t')$; $\sigma_f(x,t)$ – напряжения трения на нарушениях земной коры, ассоциированные со сдвигами $s(x,t)$.

Перенос напряжений в земной коре обусловлен как динамическими эффектами, возникающими при распространении сейсмических волн, так и статическими – после их прохождения. Вопрос о природе фрикционных эффектов является одним из центральных и интенсивно обсуждается применительно к различным модельным представлениям. К основным из них можно отнести:

– Модели клеточных автоматов [85], основанные на введении статистических порогов разрушения, при которых реализуется скачкообразный сдвиг, уменьшающий значения напряжений до некоторого остаточного уровня. Различные сценарии эволюции нарушений связываются с условиями синхронного и асинхронного скачков для различных пространственно-распределенных нарушений, в том числе при различных масштабах временного запаздывания. Для рассматриваемых моделей установлено проявление длинно-корреляционных взаимодействий (модели «среднего поля») и наличие флуктуаций больцмановского типа.

– Модели сдвигового, скоростного разупрочнения, а также модели, учитывающие чувствительность фрикционного закона к скорости деформации, которые являются феноменологическим приближением к описанию физических механизмов, лежащих в основе явлений сдвига на нарушениях земной коры [59, 60, 81]. Кинетические особенности формирования сдвига отражены в представлениях о «бегущей волне плотности», отражающие результаты наблюдений о волновых закономерностях переноса импульса в системах с трением.

– Иерархические статистические модели [86, 87, 91], отражающие увеличение вероятности разрушения при росте внешних напряжений, позволяющие развить описание автомодельных закономерностей как основных сейсмических событий (майншоков), так и сопутствующих явлений (пре- и автершоков). Принципиально важной проблемой для данного подхода является выбор и обоснование закона для вероятности разрушения.

В рамках статистической механики сейсмических явлений удалось установить переходы между состояниями системы, характеризующимися глобальным минимумом энергии, к метастабильному состоянию при вариации безразмерного параметра, определяющего баланс соотношения энергий упругих возмущений в окрестности области сдвига, локализованного на нарушении земной коры, и длинно-коррелированными возмущениями «эффективного сдвигового поля», инициирующего, наряду с упругой составляющей поля, локальный сдвиг на выделенном нарушении.

Другими статистическими моделями, позволяющими описать автомодельные закономерности развития сейсмических событий, являются «модель нарастающих последовательностей» (ETAS-model – epidemic type aftershock sequence model) [74] и ее модификации [64, 73, 75, 78, 90, 94], а также модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных систем [38].

Класс моделей подготовки очага землетрясения, базирующихся на подходах механики деформируемого твердого тела, является наиболее малочисленным. Это связано с недостатком знаний о физико-механических процессах, протекающих в массивах горных пород на километровых глубинах, невозможностью проведения «натурных» экспериментов, полноценного верифицирования и идентифицирования разрабатываемых моделей. Поэтому базой для построения подобных моделей являются результаты лабораторных исследований широкого спектра горных пород при различных видах нагружения, без или в присутствии флюида (так же, как в случае создания качественных описательных моделей). Несмотря на все существующие сложности, необходимость создания моделей подобного рода очевидна, и связана она с необходимостью объяснения причинно-следственных связей между наблюдаемыми аномалиями в физических полях и процессами деформирования локальных объемов горных пород, вызывающих появление землетрясения. Именно понимание этих причинно-следственных связей и механизмов, за ними стоящих, позволит совершенно на другом уровне подойти к вопросу прогноза.

В рамках данного класса моделей особое внимание хотелось бы обратить на две различные по логике построения модели: модель консолидации И.П. Добровольского [11] и реологическую модель В.П. Мясникова, В.А. Ляховского [70, 71]. В модели консолидации процесс подготовки землетрясения состоит из двух стадий (рис. 6): подготовки землетрясения и стадии следования афтершоков.

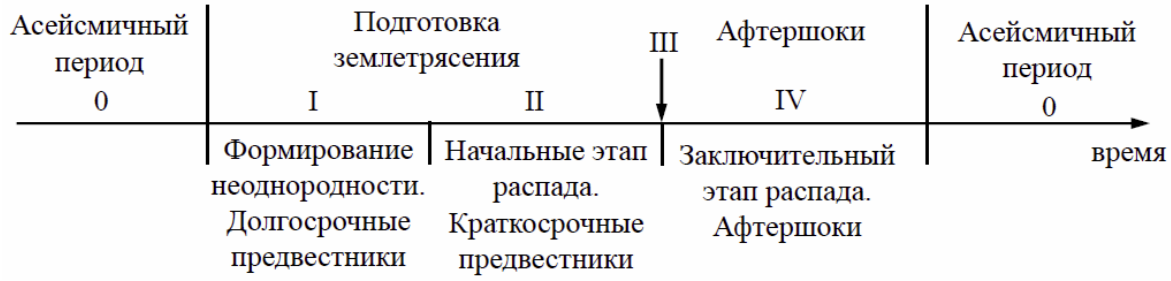



*Рис. 6. Процесс подготовки очага землетрясения по модели консолидации (стрелка – момент землетрясения)*

Согласно И.П. Добровольскому, стадия асейсмического состояния сменяется фазой консолидации, на которой два блока (отдельности) входят в относительно прочное зацепление, образуя консолидированную область или неоднородность, осредненные свойства которой отличаются от аналогичных ее свойств до зацепления. Неоднородность (консолидированная область) развивается, к ней могут присоединяться соседние блоки, изменяется ее физическое состояние, происходит сложное перераспределение напряжений внутри и вне неоднородности. Наконец, начинается распад неоднородности путем быстрых пластических подвижек, форшоков, магистрального разрыва и афтершоков, которые приводят среду вновь в асейсмичное состояние.

Модель консолидации полностью опирается на идею Рейда о процессе подготовки землетрясения, но в отличие от других моделей имеет развитый механико-математический аппарат, который позволил провести численные расчеты различных предвестников (деформационных, гидродинамических, электромагнитных) [9–11]. В рамках приближения дальнего поля рассматривается статическая задача о возмущении НДС нагруженной на бесконечности касательными напряжениями упругой полуплоскости шаровой неоднородностью упругих свойств. Область подготовки будущего очага (неоднородность) отличается от вмещающих ее пород только модулем сдвига. На основе известного решения задачи Эшелби о шаровой неоднородности в упругом полупространстве [49] в рамках модели консолидации получены аналитические выражения для компонент вектора перемещений и тензора деформаций. Далее полученные решения используются для прямых расчетов предвестниковых возмущений.

Реологическая модель В.П. Мясникова и В.А. Ляховского является вариантом формализованного представления ЛНТ-модели, согласно которой процесс подготовки состоит из трех последовательных стадий эволюции ансамбля трещин в геосреде на некотором пространственном масштабе. Согласно этой модели плотность свободной энергии может быть записана в виде

$$F_e = F_0 + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\lambda(\alpha)}{2} I_1^2 + \mu(\alpha) I_2 - \gamma(\alpha) I_1 \sqrt{I_2}\right), \qquad (3)$$

где $I_1 = \sum_i \varepsilon_{ii}$, $I_2 = \sum_{ij} \varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}$ – первый и второй инварианты тензора деформации, $\rho$ – плотность материала, $\lambda(\alpha) = \lambda_0 - \alpha\lambda_r$, $\mu(\alpha) = \mu_0 - \alpha\mu_r$, $\gamma(\alpha) = \alpha\gamma_r$, $\lambda_0, \mu_0$ – константы Ляме неповрежденного материала, $\lambda_r$, $\mu_r$, $\gamma_r$ – параметры, характеризующие вклад повреждений в упругие свойства, $F_0 = F_0(T)$ – константа в изотермическом случае. Безразмерная переменная $\alpha$ ($0 < \alpha \le 1$) определяет степень поврежденности среды.

Выражение для плотности свободной энергии получено в предположении об отсутствии взаимодействия между трещинами. В рамках данной модели может быть описана первая стадия развития формирования источника землетрясения – стадия однородного растрескивания. Для описания перехода от диффузного накопления трещин к состоянию самоорганизованного растрескивания в работе [70] вводится дополнительная переменная $\varphi \geq 0$, определяющая степень взаимодействия между разрывами. По аналогии с фазовыми переходами параметр порядка $\alpha$ имеет смысл обратной температуры. В этом случае плотность свободной энергии с учетом степени взаимодействия между разрывами может быть представлена в виде

$$F(\varepsilon_{ij}, \alpha, \varphi, \nabla\alpha, \nabla\varphi) = F_e(\varepsilon_{ij}, \alpha) + F_i(\varepsilon_{ij}, \alpha, \varphi, \nabla\alpha, \nabla\varphi), \quad (4)$$

где $F_e(\varepsilon_{ij}, \alpha)$ задается соотношением (3). При этом кинетическое уравнение для параметра поврежденности $\alpha$ представляется в виде уравнения Гинзбурга–Ландау:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} -K_\alpha \dfrac{\partial F(\varepsilon, \alpha, \varphi)}{\partial \alpha}, & \dfrac{\partial F(\varepsilon, \alpha, \varphi)}{\partial \alpha} \leq 0, \\ 0, & \dfrac{\partial F(\varepsilon, \alpha, \varphi)}{\partial \alpha} > 0. \end{cases} \quad (5)$$

В случае учета пространственной неоднородности параметра поврежденности в выражении для компонент тензора напряжения появляется слагаемое, отражающее эффекты нелокальности в терминах параметра $\varphi$.

Данный подход позволил описать такие эффекты, как ускорение сейсмического энерговыделения [42, 93] и рост корреляционной длины слабой сейсмичности перед большим землетрясением [92, 95]. В квазистатическом приближении он позволяет описать две из трех стадий подготовки источника землетрясения, введенных в ЛНТ-модели.

Каждая из моделей построена с большим количеством гипотез относительно строения и свойств геосреды, в которой формируется очаг землетрясения, однако между ними есть отличие принципиального характера. Если в модели консолидации причиной формирования неоднородности – прообраза очага землетрясения, является зацепление берегов двух блоков (отдельностей, разломов и т.д.), имеющее один характерный пространственный масштаб (радиус неоднородности), то в случае второй модели очаг землетрясения является следствием развития ансамбля взаимодействующих трещин. При этом, хотя явно это не вводится, такая система содержит уже два характерных масштаба: размер трещин и среднее расстояние между ними, которые и определяют нелинейный характер развития трещиноватой среды в поле приложенного напряжения.

## Обсуждение

Существенным недостатком моделей подготовки тектонического землетрясения, использующих подходы механики деформируемого твердого тела, является игнорирование ряда современных представлений о процессе разрушения, основанных на лабораторных и полевых наблюдениях. Осознание этой проблемы пришло в начале XXI века, когда остро стал вопрос о пересмотре существующих представлений о механизме генерации землетрясений. В качестве примера приводим ряд цитат из работ различных российских ученых:

Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37: *«Если рассмотрим наиболее известные концепции подготовки и развития отдельно взятого крупного землетрясения, то наличие фрагментации материала коры далеко не всегда играет в них важную роль»*.

Киссин И.Г. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений // Физика

Земли. 2013. № 4. С. 147: *«Современная модель, учитывающая условия деформирования блоковой среды, влияние флюидов, нелинейность сейсмических процессов и другие факторы, отсутствует, и необходимость в ней очевидна».*

Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. №. 5. С. 97–112: *«Понять и изучить механизмы разрушения, а тем более научиться их предсказывать, фиксируя внимание только на макроскопическом масштабе усредненного описания, невозможно в принципе»*.

Ребецкий Ю.Л. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений // Проблемы тектонофизики. М., 2008. С. 364: *«Отрицательный результат в проблеме прогноза показывает, что наши представления о механизме генерации землетрясений достаточно далеки от реального природного процесса. <…> Многие представления о процессе подготовки землетрясения перекочевали из механики прочности конструкционных материалов и не учитывают особенности строения сейсмогенных участков земной коры – разломных зон».*

Гольдин С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 1. С. 6: *«В существующих концепциях землетрясения структура очаговой области никак не декларируется (самое большее – указывается появление области локализации деформации, в которой и развивается сам разрыв), либо же рассматривается достаточно простая геометрия поверхности, вдоль которой происходит прерывистое скольжение одной плиты относительно другой».*

Эти цитаты подчеркивают тот факт, что в существующих моделях, использующих подходы механики деформируемого твердого тела и направленных на описание процесса подготовки тектонического землетрясения, в полной мере не учитывается ни структура разломных зон, ни нелинейный характер их поведения в поле приложенных напряжений. Только в последние несколько лет для описания процесса формирования очага землетрясения стали использоваться подходы, основанные на концепции геосреды как неравновесной критической системы [23, 44, 45, 89]. Согласно этой концепции, с приближением момента сильного землетрясения характеристики индивидуального поведения структурных элементов геосреды становятся менее существенными, в отличие от коллективных эффектов, охватывающих все пространственно-временные масштабы системы. Под структурными элементами понимаются дефекты геосреды того или иного масштабного уровня – поверхности механического нарушения сплошности, образующиеся в геосреде как в деформируемом твердом теле под действием внешних сил (трещины, разломы, границы блоков и т.д.). Наличие пространственно-иерархической структуры дефектов литосферы определяет существенную неоднородность полей напряжения того или иного масштаба, а как следствие, влияет и на способ диссипации накопленной горными массивами упругой энергии (хрупкое крупномасштабное разрушение, катакластическое течение или локализованное пластическое течение). Следствием иерархического (блочно-иерархического) строения геосреды является самоподобный (автомодельный) характер развития процессов деформирования и разрушения на каждом из пространственных масштабов, проявляющийся в виде ряда масштабно-инвариантных закономерностей:

– закона Гуттенберга–Рихтера и Омори для сейсмических событий и сигналов акустической эмисии;

– универсального принципа фрактальной делимости твердых тел и сред [25];

– разломо-блоковой делимости литосферы [48, 88];

– степенного распределения трещин в деформируемом материале по размерам [1].

Впервые гипотеза о единстве природы развития несплошностей на широком спектре пространственных масштабов была высказана во второй половине прошлого века М.В. Гзовским [5].

Необходимым фундаментом для построения формализованных теорий эволюции геосреды под действием внешних напряжений (в частном случае – моделей подготовки тектонического землетрясения) должно являться понимание иерархического строения геосреды с дефектами, а также самоподобного (автомодельного) характера развития процессов деформирования и разрушения такой среды на каждом из пространственных масштабов. Особенность современного этапа развития формализованных теорий подготовки очага землетрясения заключается в том, что существующие теории формально ни на одном этапе своего построения не используют свойство статистической автомодельности или самоподобия развития процесса деформирования и разрушения геосреды. Также из логики построения теорий, как правило, не следует автоматическое выполнение обозначенных авторами следствий, что вызвано «искусственностью» связи между выдвинутой гипотезой самоподобия (если она вообще принимается) и используемым математическим аппаратом. К исключению, с точки зрения авторов, можно отнести статистическую механику землетрясений [84] и статистическую модель геосреды с дефектами [28], разрабатываемую в лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уро РАН (г. Пермь).

При построении статистической модели геосреды с дефектами, в отличие от модели J. Rundle [84], используются подходы как статистической физики, так и механики деформируемого твердого тела. Вводятся тензорные структурные переменные, ассоциированные с двумя характерными типами дефектов: трещинами и локализованными сдвигами (рис. 7).

Процедура осреднения структурных переменных по статистическому ансамблю дефектов с учетом гипотезы статистической автомодельности позволила получить уравнение самосогласования, определяющее зависимость макроскопического тензора деформации, индуцированной дефектами, от величины внешних напряжений, исходной структуры и взаимодействия дефектов, которое в безразмерном случае содержит только один параметр – параметр структурного скейлинга. Параметр структурного скейлинга является аналогом концентрационного параметра [12] и определяется отношением характерных структурных масштабов: размером дефектов и средним расстоянием между дефектами.

В результате решения уравнения самосогласования в рамках статистической модели геосреды с дефектами получено три характерных реакции геосреды с дефектами на рост внешнего напряжения (рис. 8), которые определяются величиной параметра структурного скейлинга. Формулировка неравновесной свободной энергии для среды с дефектами в форме, аналогичной разложению Гинзбурга–Ландау, позволила записать эволюционные уравнения для введенных параметров порядка (деформации, обусловленной дефектами, и параметра структурного скейлинга) и исследовать их собственные решения (рис. 9).

При $\delta > \delta_*$ имеет место устойчивое квазипластическое деформирование среды, локализованное в регулярно расположенных пространственных областях, характеризующееся отсутствием коллективных ориентационных эффектов. Примерами таких областей, по мнению авторов, могут служить внутриплитные зоны концентрированной деформации [20] и зоны регулярности в нарушенности разрывами субстрата разломных зон [41] активно исследуемые в настоящее время.

Интервал $\delta_c < \delta < \delta_*$ значений параметра структурного скейлинга характеризуется появлением области метастабильности в поведении среды с дефектами, когда при некотором критическом напряжении $\sigma_m(p_m)$ происходит ориентационный переход в ансамбле взаимодействующих дефектов, сопровождающийся резким скачком деформации. При этом на масштабе наблюдения (осреднения) этот переход проявляется в виде локализованной катакластической деформации [35], мигрирующей по пространству со скоростью на порядки меньшей скорости звука – «медленной» де-

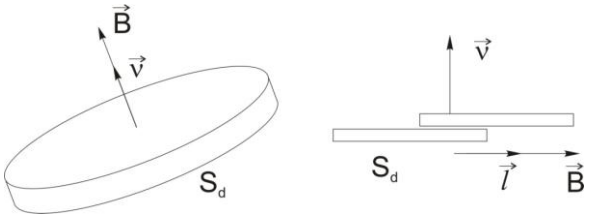



*Рис. 7. Характерные типы дефектов: дискообразная трещина и локализованный сдвиг ($\vec{\nu}$ – единичный вектор нормали к основанию площадки сдвига или основанию микротрещины, $\vec{l}$ – единичный вектор в направлении сдвига)*

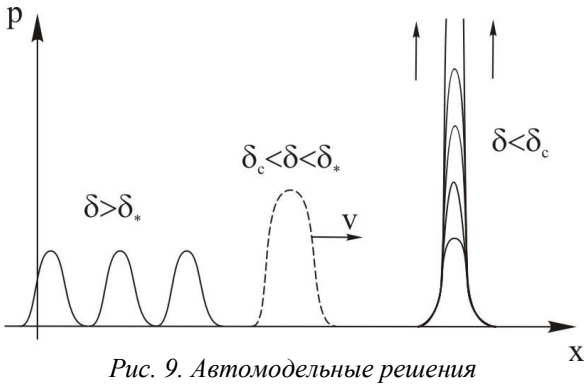



*Рис. 9. Автомодельные решения кинетического уравнения для деформации, обусловленной дефектами: периодические пространственные структры (при $\delta > \delta_*$), автосолитонные волны (при $\delta_c < \delta < \delta_*$) и локализованные диссипативные структуры обострения $(\delta < \delta_c)$*

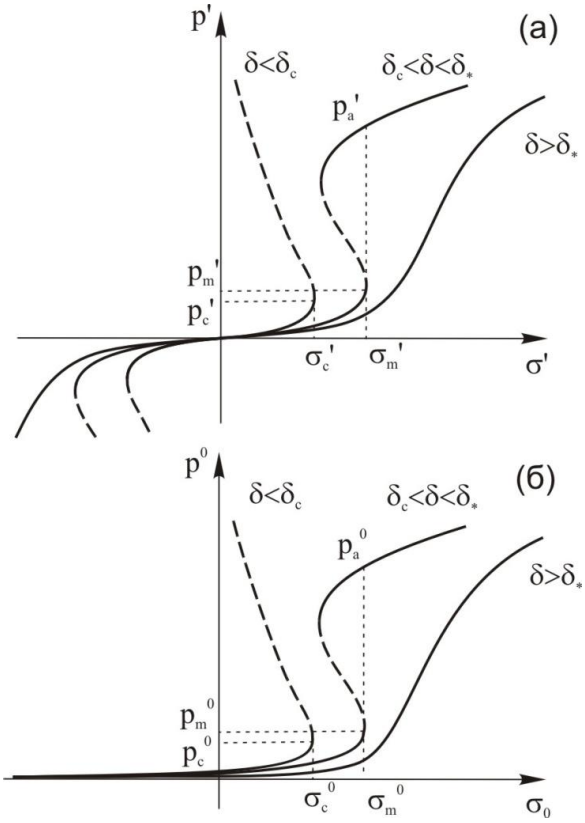



*Рис. 8. Характерные зависимости девиаторной (а) и шаровой (б) частей деформации обусловленной дефектами от приложенного напряжения для различных значений параметра структурного скейлинга*

формационной волны, являющейся неотъемлемым фундаментальным свойством самоорганизации деформируемой среды (см. рис. 9).

В работах [7, 23, 24] подчеркивается особая роль «медленных движений» в процессах деструкции твердого тела (от лабораторного образца до масштаба литосферы) как одного из основных способов переноса энергии.

Дальнейшее уменьшение среднего расстояния между дефектами ($\delta < \delta_c$) приводит к вырождению ориентационной метастабильности и формированию в среде локализованных диссипативных дефектных структур, которые при достижении критического напряжения $\sigma_c(p_c)$ развиваются в режиме с обострением – режиме лавинно-неустойчивого роста дефектов в локализованной пространственной области, уменьшающейся с течением времени.

На масштабе наблюдения этот процесс проявляется в виде хрупкого разрушения с формированием зоны разрушения соизмеримой с самим масштабом наблюдения. Таким образом, эволюция дефектной подсистемы в режиме с обострением является заключительной стадией перед переходом процесса деформирования и разрушения на следующий пространственный масштаб, что, согласно работам [23, 24], является общим свойством всех деформируемых твердых тел и сред.

Теоретические предположения о появлении обостряющихся локализованных диссипативных структур при локализации разрушения впервые были высказаны в работе [27] и получили свое развитие в работах [28–30, 77]. Фундаментальным свойством реализации режима с обострением [17, 18] является «замораживание» развития процесса деструкции на всем рассматриваемом пространственном масштабе, кроме локальной области, на которой это обострение будет происходить. Физически это проявляется в виде зон затишья, которые имеют место перед землетрясениями

[6, 47, 84–86]. Особое внимание хотелось бы обратить на важное следствие из полученных результатов: предельное напряжение, требуемое для начала формирования очага макроскопического хрупкого разрушения, меньше, нежели для реализации локализованного катакластического течения. Поэтому высокий уровень локальных напряжений не является индикатором и необходимым условием начала хрупкого разрушения. Этот вывод согласуется с последними результатами по тектонофизической реконструкции природных напряжений в ряде районов крупных землетрясений, выполненными методом катакластического анализа разрывных смещений, активно развивающегося коллективом Ю.Л. Ребецкого [32–34, 36].

По итогам реконструкции обнаружено, что очаги крупных землетрясений не совпадают с областями максимального уровня напряжений, а располагаются в области среднего уровня девиаторных и изотропных напряжений, соседствующих с участком большого градиента этих напряжений.

Таким образом, статистическая модель поведения геосреды с дефектами в поле внешних напряжений позволяет описать основные способы релаксации напряжений массивами горных пород: хрупкое крупномасштабное разрушение и катакластическое деформирование, которые являются следствиями коллективного поведения дефектов, определяемого величиной параметра структурного скейлинга.

Обобщая все вышесказанное, можно заключить, что пессимизм относительно возможности прогноза крупного тектонического землетрясения, имевший место на рубеже XX и XXI веков в научной среде, сменяется оптимистичным взглядом в будущее благодаря новым достижениям в ряде областей науки: геомеханике, тектонофизике, геофизике, механике горных пород и др. Современными направлениями исследований, результаты которых, по мнению авторов, предоставляют новую уникальную информацию для понимания процессов подготовки крупных землетрясений и разработки формализованных моделей, использующих подходы механики деформируемого твердого тела, являются:

– разработка и развитие методов реконструкции тектонических напряжений сейсмоактивных участков земной коры [32, 34];

– определение строения, степени активности и механизмов активизации разломных зон земной коры [41, 48];

– лабораторные и натурные исследования строения и механизмов деформирования межблоковых контактов, разломов с учетом свойств их заполнителя [15, 16];

– разработка и развитие методов комплексных геофизических непрерывных скважинных измерений, позволяющих отслеживать изменения характера НДС геосреды в зоне наблюдений [3, 4, 61].

## Библиографический список


1. *Ботвина Л.Р., Баренблатт Г.И.* Автомодельность накопления повреждаемости // Проблемы прочности. – 1985. – № 12. – С. 17–24.
2. *Брейс В.Ф., Мячкин В.И., Дитрих Дж.Х., Соболев Г.А.* Две модели объяснения предвестников землетрясений // Сборник советско-американских работ по прогнозу землетрясений. – Душанбе – М.: 1976. – Т. 1. – Кн. 2. – С. 9–15.
3. *Гаврилов В.А.* Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // ДАН. – 2007. – Т. 414. – № 3. – С. 389–392.
4. *Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В.* Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // Физика Земли. – 2014. – № 1. – С. 89–103.
5. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 535 с.
6. *Гольдин С.В.* Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 37–54.

7. *Гольдин С.В., Юшин В.И., Ружич В.В., Смекалкин О.П.* Медленные движения – миф или реальность // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: материалы 9-й междунар. школы-семинара. – Красноярск, 2002. – С. 213–220.
8. *Дещеревский А.В., Лукк А.А., Сидорин А.Я.* Флуктуация геофизических полей и прогноз землетрясений // Физика Земли. – 2003. – № 4. – С. 3–20.
9. *Добровольский И.П.* Гидродинамические явления // Физика Земли. – 2005. – № 1. – С. 89–96.
10. *Добровольский И.П.* Гравитационные предвестники тектонического землетрясения // Физика Земли. – 2005. – № 4. – С. 23–28.
11. *Добровольский И.П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 240 с.
12. *Журков С.Н.* Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. – 1968. – Вып. 3. – С. 46–52.
13. *Киссин И.Г.* О системном подходе к проблеме прогноза землетрясений // Физика Земли. – 2013. – № 4. – С. 145–160.
14. *Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: геофизические и тектонофизические аспекты. – М.: Наука, 2009. – 328 с.
15. *Кочарян Г.Г.* Разломная зона как нелинейная механическая система // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. Спец. выпуск. – С. 5–17.
16. *Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М.* Экспериментальное исследование закономерностей деформирования малопрочных тонких слоев геоматериалов // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – № 6. – С. 63–70.
17. *Курдюмов С.П.* Режимы с обострением. Эволюция идеи / под ред. Г.Г. Малинецкого. 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 312 с.
18. *Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.* Синергетика – теория самоорганизации. Идеи, методы, перспективы. – М.: Знание, 1983. – 64 с.
19. *Левин Б.В., Сасорова Е.В., Ким Ч.У., Коровин М.Е., Малашенко А.Е., Савочкин П.В., Тихонов И.Н.* Землетрясение 17(18) августа 2006 г. на Сахалине и первая реализация комплексного прогноза // ДАН. – 2007. – Т. 412. – № 3. – С. 396–400.
20. *Леонов М.Г.* Зоны концентрированной деформации и внутриплитная делимость земной коры и литосферы // Тез. докл. Пятого Междунар. симпозиума «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», Бишкек, 19–24 июня 2011. – Бишкек, 2011. – С. 214.
21. *Любушин А.А.* Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г.: долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам // Геофизические приборы и биосфера. – 2011. – Т. 10. – № 1. – С. 9–35.
22. *Любушин А.А.* Анализ микросейсмического шума дал возможность оценить магнитуду, время и место сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г. // Наука и технологические разработки. – 2011. – Т. 90. – № 1. – С. 3–12.
23. *Макаров П.В.* Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – №3. – С. 19-35.
24. *Макаров П.В.* Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблема моделирования // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – №6. – С. 39-56.
25. *Макаров П.В.* Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 7. – С. 724–746.
26. *Мячкин В.И.* Процессы подготовки землетрясений. – М.: Наука, 1978. – 232 с.
27. *Наймарк О.Б.* О деформационных свойствах и кинетике разрушения твердых тел с микротрещинами // Преп. О термодинамике деформирования и разрушения твердых тел с микротрещинами. – Свердловск, 1982. – С. 3–34.
28. *Пантелеев И.А, Плехов О.А., Наймарк О.Б.* Нелинейная динамика структур обострения в ансамблях дефектов как механизм формирования очагов землетрясения // Физика Земли. – 2012. – № 6. – С. 43–55.

29. *Пантелеев И.А.* Коллективные эффекты поведения дефектов геосреды при формировании потенциального источника землетрясения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – №4 (2). – С. 508–510.
30. *Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б.* Некоторые автомодельные закономерности развития поврежденности при квазихрупком разрушении твердых тел // Вычислительная механика сплошных сред. – 2011. – Т. 4 – № 1. – С. 90–100.
31. *Ребецкий Ю.Л.* Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений // Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 359–395.
32. *Ребецкий Ю.Л.* Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения // Геофизический журнал. – 2007. – Т 29. – № 6. – С. 96–115.
33. *Ребецкий Ю.Л.* Оценка величин напряжений в методе катакластического анализа разрывов // ДАН. – 2009. – Т. 428 – № 3. – С. 397–402.
34. *Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Доклады РАН. – 2003. – Т. 3. – № 2. – С. 237–241.
35. *Ребецкий Ю.Л.* Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминированного подхода // Геофизический журнал. – 2007. – Т. 29. – № 4. – С. 92–110.
36. *Ребецкий Ю.Л.* Третий и четвертый этапы реконструкции напряжений в методе катакластического анализа сдвиговых разрывов // Геофизический журнал. – 2009. – Т. 31. – № 2. – С. 93–106.
37. *Рихтер Ч.Ф.* Элементарная сейсмология. – М.: Иностр. лит., 1963. – 670 с.
38. *Родкин М.В.* Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных подсистем // Физика Земли. – 2011. – № 11. – С. 18–26.
39. *Садовский М.А.* Автомодельность геодинамических процессов // Вестн. АН СССР. – 1986. – № 8. – С. 3–11.
40. *Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
41. *Семинский К.Ж.* Тектонофизический анализ внутренней структуры разломных зон // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы первой молодежной школы семинара. – М., 2009. – С. 258–276.
42. *Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С.* Анализ процесса выделения энергии при формировании магистрального разрыва в лабораторных исследованиях по разрушению горных пород и перед сильными землетрясениями // Физика Земли. – 2000. – № 2. – С 44–55.
43. *Тихонов И.Н., Ким Ч.У.* Успешный прогноз Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. (MLH=6,2) на юге о-ва Сахалин // ДАН. – 2008. – Т. 420. – № 4. – С. 532–536.
44. *Тюпкин Ю.С.* Динамика формирования потенциального очага землетрясения // Физика Земли. – 2004. – № 3. – С. 26–33.
45. *Тюпкин Ю.С.* Формирование потенциального очага землетрясения: аналогия с фазовым переходом // Вычислительная сейсмология. – 2004. – № 35. – С. 296–311.
46. *Уломов В.И., Мавашев Б.З.* О предвестниках сильного тектонического землетрясения // ДАН СССР. – 1967. – Т. 176. – № 2. – С. 319–323.
47. *Федотов С.А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги – М.: Наука, 2005. – 301 с.
48. *Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В.* Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии // Тихоокеанская геология. – 1999. – Т. 18. – № 2. – С. 41–53.

49. *Эшелби Дж.* Континуальная теория дислокаций. – М.: ИЛ, 1963. – 248 с.
50. *Akishin P.G., Altaisky M.V., Antoniou I., Budnik A.D., Ivanov V.V.* Burridge-Knopoff model and self-similarity // Chaos, Solitons and Fractals. – 2000. – Vol. 11. – P. 207–222.
51. *Anderson D.L., Witcomb J.H.* The Dilatancydiffusion model of earthquake prediction // Proc. Conf. of tectonic problems of the San Andreas fault systems. – Stanf. Univ. Publ., 1973. – XIII. – P. 417.
52. *Bakun W.H., et al.* Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfild earthquake // Nature. – 2005. – Vol. 437. – № 13. – P. 969–974.
53. *Benioff H.* Earthquakes and rock creep. T. 1; Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks // Bull. Seismol. Soc. America. – 1951. – Vol. 41. – № 1. – P. 31–40.
54. *Ben-Zion Y., Rice J.R.* Dynamic simulations of slip on a smooth fault in a elastic solid // Journal of geophysical research. – 1997. – Vol. 102. – № B8. – P. 17771–17784.
55. *Brace W.F., Byerlee J.D.* Stick-slip as a mechanism for earthquake // Science. – 1966. – Vol. 153. – P. 990–992.
56. *Burridge R., Knopoff L*. Model and theoretical seismicity // Bull. Seism. Soc. Am. –1967. – Vol.57. – № 3. – P. 341–372.
57. *Carlson J.M., Langer J.S., Shaw B.E., Tang C.* Intrinsic properties of a Burridge-Knopoff model of an earthquake fault // Phys. Rev. A. – 1991. – Vol. 44. – P. 884–897.
58. *Clancy I., Corcoran D.* Criticality in the Burridge-Knopoff model // Phys. Rev. E. – 2005. – V. 71. – P. 046124.
59. *Dieterich J.H.* Time dependent friction in rocks // J. Geophys. Res. – 1972. – Vol. 77. – P. 790–806.
60. *Fisher D.* Sliding charge density waves as a dynamic critical phenomenon // Phys. Rev. – 1985. – B31. – P. 1396–1427.
61. *Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V.* Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks // Russian Journal of Earth Science. – 2013. – Vol. 13. – ES100.
62. *Geller R.* Earthquake prediction: critical review // Geophys. J. Int. – 1997. – Vol. 131. – P. 425–450.
63. *Kagan Y.Y.* Observational evidence for earthquakes as nonlinear dynamic process // Physica D. – 1994. – Vol. 77. – № 4. – P. 160–192.
64. *Kagan Y.* Likelihood analysis of earthquake catalogues // Journal of Geophysical Research. – 1991. – Vol. 106. – Ser. B7. – P. 135–148.
65. *Kissin I.G.* Middle- and short-term precursors of earthquakes and their factors determining reliability // Journal of earthquake prediction research. – 1997. – Vol. 6. – № 3. – P. 367–386.
66. *Knopoff L., Landoni J.A., Abinante M.S.* Dynamical model of an earthquake fault with localization // Phys. Rev. A. – 1992. – Vol. 46. – P. 7445.
67. *Kostrov B.V.* Self-similar problems of propagation of shear cracks // J. Appl. Mech. – 1964. – Vol. 28. – P. 1077–1087.
68. *Langbein J., et al.* Preliminary report on the 28 September 2004 M 6.0 Parkfield, California earthquake // Seism. R. Let. – 2005. – Vol. 76. – № 1. – P. 10–26.
69. *Lindh A.G.* Success and failure at Parkfield // Seism. R. Let. – 2005. – Vol. 76. – № 1. – P. 3–6.
70. *Lyakhovsky V.A., Ben-Zion Y., Agnon A.* Distributed damage, faulting, and friction // J. Geophys. Res. – 1997. – Vol. 102. – P. 27635–27649.
71. *Lyakhovsky V.A., Myasnikov V.P.* On behavior of viscoelastic cracked solid // Phys. Solid Earth. –1985. – Vol. 4. – P. 28–35.
72. *Muratov C.B.* Traveling wave solutions in the Burridge-Knopoff model // Phys. Rev. E. – 1999. – Vol. 59. – P. 3847.
73. *Musmeci, F., Vere-Jones D.* A variable-grid algorithm for smoothing clustered data // Biometrics. – 1986. – Vol. 42. – P. 483–494.
74. *Ogata Y.* Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point

processes // Journal of the American Statistical Association. – 1988. – Vol. 83. – P. 9–27.
75. *Ogata Y., Zhuang J.* Space–time ETAS models and an improved extension // Tectonophysics. – 2006. – Vol. 413. – № 1–2. – P. 13–23.
76. *Olami Z., Feder S., Christensen K.* Self-Organized Criticality in a Continuous, Nonconservative Cellular Automaton Modeling Earthquakes // Physical Review letters. – 1992. – Vol. 68. – № 8. – P. 1244–1247.
77. *Panteleev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B.* Model of geomedia containing defects: collective effects of defects evolution during formation of potential earthquake foci // Geodynamics & Tectonophysics. –2013. – Vol. 4. – № 1. – P. 37–51.
78. *Rathbun S.L.* Modeling marked spatio-temporal point patterns // Bulletin of the International Statistical Institute. – 1993. – Vol. 55. Book 2. – P. 379–396.
79. *Reid H.F.* The California Earthquake of April 16 1906 // Vol. 2. The Mechanics of the Earthquakes. The Carnegie Inst. – Washington, 1910.
80. *Rice J.R.* Spatio-temporal complexity of slip on a fault // J. Geophys. Res. – 1993. – Vol. 98. – P. 9885–9907.
81. *Ruina A.L*. Slip instability and state variable friction laws // J. Geophys. Res. – 1983. – Vol. 88. – P. 10359–10370.
82. *Rundle J.B.* A physical model for earthquakes, 1. Fluctuation and interactions // J. Geophys. Res. – 1988. – Vol. 93. – P. 6237–6254.
83. *Rundle J.B.* A physical model for earthquakes. 3. Thermodynamic approach and its relation to nonclassical theories of nucleation // J. Geophys. Res. – 1989. –Vol. 94. – P. 2839–2855.
84. *Rundle J.B., Gross S., Klein W, Ferguson C., Turscotte D.L.* The statistical mechanics of earthquakes // Tectonophysics. – 1997. – Vol. 277. – P. 147–164.
85. *Rundle J.B., Klein W.* Scaling and critical phenomena in a cellar automaton slider block model for earthquakes // J. Stat. Sol. – 1993. – Vol. 72. – P. 405–412.
86. *Saichev A., Sornette D.* Distribution of the Largest Aftershocks in Branching Models of Triggered Seismicity: Theory of the Universal Bath's law // Phys. Rev. E – 2005. – Vol. 71. – P. 056127.
87. *Saichev A., Sornette D.* Power law distribution of seismic rates: theory and data // Eur. J. Phys. B. – 2006. – Vol. 49. – P. 377–401.
88. *Sherman S.I.* Destruction of the lithosphere: Fault-block divisibility and its tectonophysical regularities // Geodynamics & Tectonophysics. – 2012. – Vol. 3. – № 4. – P. 315–344.
89. *Sornette D.* Critical phenomena in natural sciences. Chaos, Fractals, Self-Organization and Disorder: Concepts and Tools // Springer Ser. Synerg. Springer-Verlag. Heidelberg, 2000. – 423 p.
90. *Sornette D., Werner M.J.* Constraits on the size of the smallest triggering earthquake from the ETAS model, Bath's law and observed aftershock sequences // J. Geophys. Res. – 2005. – Vol. 110. – P. B08304.
91. *Turcotte D.L., Newman W.I., Shcherbakov R.* Micro and macroscopic models of rock fracture // Geophys. J. Int. – 2003. – Vol. 152. – № 3. – P. 718–728.
92. *Tyupkin Yu.S., Di Giovambattista R.* Correlation length as an indicator of critical point behavior prior to a large earthquake // EPSL. – 2005. – Vol. 230. – P.85–96.
93. *Varnes D.J.* Predicting earthquakes by analyzing accelerating precursory seismic activity // PAGEOPH. – 1989. – Vol. 130. – № 4. – P. 661–68669.
94. *Zhuang, J., Ogata Y., Vere-Jones D.* Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences // Journal of the American Statistical Association. – 2002. – Vol. 97. – № 3. – P. 369–380.
95. *Zöller G., Hainzl S., Kurths J.* Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes // J. Geophys. Res. – 2001. – Vol. 106. – P. 2167–2176.

# Роль мониторинга сооружений и конструкций в нашей жизни

Цветков Р.В.

Рассмотрена новая современная отрасль науки и техники – мониторинг состояния конструкций и сооружений. Показаны принципы и примеры построения систем мониторинга.

Инженерные конструкции, сооружения и механизмы окружают жизнь современного человека и выполняют многие важные функции. Они являются неотъемлемым элементом человеческой цивилизации и в то же время показателем научно-технического прогресса. В настоящее время некоторые здания имеют высоту более полукилометра (рис. 1, *а*), количество этажей достигает 150, длина мостовых переходов доходит до 35 км, а высота пилонов – свыше 300 м. Такие чудеса современной инженерной мысли, как и многие известные сооружения, конструкции, воздвигнутые в прошлом (египетские пирамиды (рис. 1, *б*), Великая китайская стена, Эйфелева башня), являются культурным достоянием человечества, и важно сохранить их для потомков.

Простых людей беспокоит, как правило, собственная безопасность, а она связана с повседневной жизнью. Другими словами, для человека важна безопасная эксплуатация существующих рядом с ним конструкций, зданий и механизмов. Существует мнение, что в настоящее время стало более безопасно жить. И действительно, новые знания о мире, новые технологии, квалифицированные специалисты способствуют укреплению этого мнения. Свободный человек в свободном мире, благодаря самоконтролю, может качественно и эффективно работать, не то что какие-то там рабы или крепостные крестьяне! Однако, обратите внимание, до нашего времени сохранились сооружения, воздвигнутые еще при рабовладельческом и феодальном строе, возраст которых превышает тысячу лет. Оказывается, рабы и крепостные умели строить на века. И ведь ничего удивительного в этом нет, поскольку в те времена ограничений по срокам возведения и по использованию людских ресурсов было меньше, поэтому можно было

*а* *б*

*Рис. 1. Уникальные сооружения*

строить крепкие сооружения. Отчасти это связано с тем, что в те времена не умели производить прочностные расчеты, и поэтому строительство вели с большим запасом прочности, нередко эти сооружения использовались для защиты от нападения.

В современном капиталистическом мире строители и инженеры не могут себе позволить такую роскошь и поэтому вынуждены оптимизировать свои затраты и идти на компромисс. Часто находится конкурент, который предлагает свои услуги по более низкой цене, а покупатель или заказчик не всегда может отказаться от такого предложения, поскольку тоже живет по законам капиталистического мира.

Мы все прекрасно видели действие этих законов на примере строительства дорог в нашем крае, когда работу выполняли фирмы, предлагающие более низкую цену, и как через сезон-два эти дороги приходили в негодность. Аналогичная ситуация в той или иной степени может возникнуть при отсутствии должного контроля и в строительстве инженерных сооружений – в настоящее время никто не будет возводить объекты с тысячелетним сроком эксплуатации, вроде древних пирамид.

Следует отметить, что использование не до конца проверенных технологий, строительство в сложных грунтовых условиях тоже увеличивают риски возникновения аварийных ситуаций, последствия которых нередко приводили к человеческим жертвам.

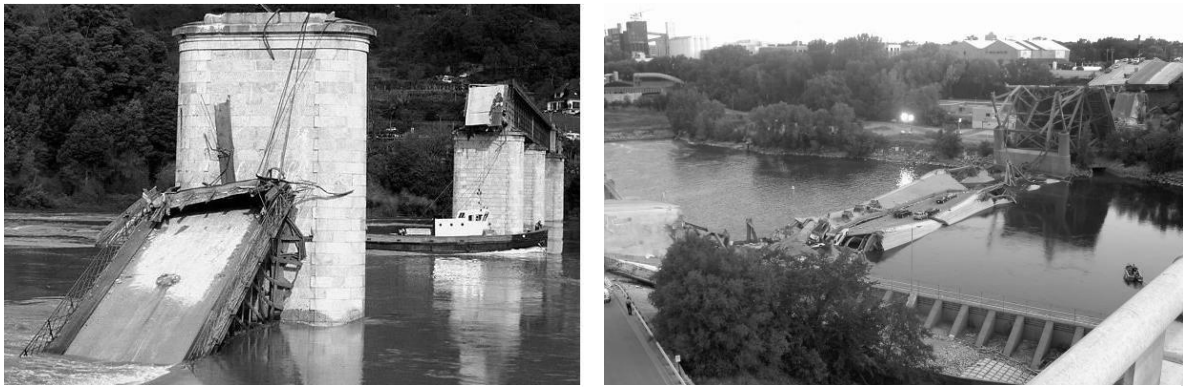
Приведем несколько примеров аварий и катастрофических разрушений зданий за последние десятилетия: обрушение отеля New World в Сингапуре в 1986 г., жертвами которого стали 33 человека; разрушение здания Sampoong Department (рис. 2, *а*) в Южной Корее в 1995 г., жертвами которого стали более 500 человек; обрушение перехода в отеле Hyatt Regency в Канзасе (США) в 1981 г. (114 жертв); обрушение крыши центра массового отдыха «Трансвааль-парк» в Москве в 2004 г. (рис. 2, *б*), в результате чего погибли 28 человек; обрушение крыши торгового центра «Басманный рынок» в Москве в 2006 г. (66 жертв).

За последние 150 лет аварии регулярно случались и с мостовыми переходами, что также приводило к человеческим жертвам и экономическим потерям. На рис. 3 показаны примеры таких аварий в 21-м веке: разрушение моста Hintze Ribeiro (Португалия) в 2001 г., в результате которого погибло 59 человек (рис. 3, *а*); разрушение моста Minneapolis I-35W через реку Миссисипи (США) в 2007 г., в результате чего погибли 13 человек и больше ста пострадали (рис. 3, *б*).

Опасность для людей представляют и такие гидротехнические сооружения, как дамбы и плотины. Особенность связанных с ними аварий заключается в том, что опасности подвергаются не только люди, находящиеся на самой конструкции и в непосредственной близости от нее, но и оказавшиеся в момент аварии за много километров ниже по течению. Наглядной иллюстрацией такой ситуации (рис. 4) служит катастрофа, произошедшая с плотиной Мальпассе во Франции в 1959 году, в результате чего погибли 423 человека.

*а* *б*

*Рис. 2. Примеры разрушений зданий*



*а* *б*

*Рис. 3. Примеры разрушения мостов*

Причины, вызывающие аварийные ситуации в конструкциях, могут быть различными [13]: ошибки при проектировании; ошибки при изготовлении и монтаже; неправильная эксплуатация; износ; стихийные бедствия; внешние воздействия и др. Поэтому для обеспечения безаварийной работы конструкции или механизма необходимо контролировать множество параметров и учитывать много факторов.

Следует отметить, что подобные аварии и катастрофы приносят не только тяжелые социальные и моральные потрясения, связанные с гибелью людей, но и экономические потери, связанные с восстановлением объекта и возникшей его неработоспособностью. Кроме этого, в современных развитых странах жизнь человека оценивается достаточно высоко, например, жертвы моста Minneapolis I-35W в США получили 38 миллионов долларов. Поэтому аварии крупных конструкций и объектов даже по экономическим соображениям выгоднее предотвращать, проводя весьма затратные специальные защитные мероприятия. Регулярное систематическое проведение таких мероприятий и именуется мониторингом.

Первоначально одним из основных средств мониторинга состояния конструкций являлся визуальный осмотр с выявлением видимых дефектов: трещин, отслоений, коррозий, а также геометрических искажений. Визуальный осмотр может сигнализировать о процессах, происходящих в конструкции, однако только на его основании сложно давать однозначную оценку состоянию конструкции и прогнозировать развитие ситуации. Дело в том, что в конструкции возможны дефекты, не заметные глазу при наблюдении. Кроме этого, при визуальном осмотре важную роль играет фактор субъективного восприятия. Тем не менее до сих пор визуальный осмотр конструкции играет важную роль при организации системы мониторинга, поскольку служит как первоначальным этапом, позволяющим определить проблемные зоны конструкции,

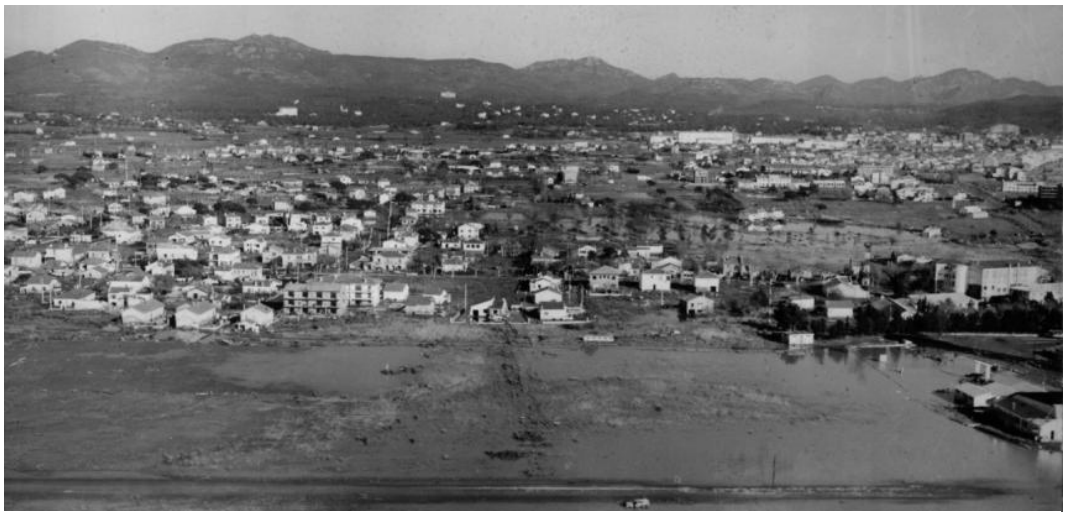


*Рис. 4. Последствия разрушения плотины Мальпассе*

так и последующим этапом для проверки адекватности математической модели.

В дальнейшем появились методики обследования сооружений и конструкций [1, 4–6] с применением приборов, измеряющих различные параметры конструкций [2, 3] и физико-механические характеристики материалов. Например, определять дефекты можно следующими методами:

– *электромагнитный метод.* Позволяет в железобетонных материалах оценивать степень армирования за счет явления электромагнитной индукции или рассеяния магнитного поля;

– *радиография.* Позволяет за счет просвечивания гамма-излучением находить стальную арматуру в бетоне, для чего с одной стороны помещается источник излучения, а с другой – детекторы;

– *радарный метод.* Позволяет за счет сравнения посланного и возвращенного электромагнитного импульса определять коэффициент отражения в этой точке. Зная скорость распространения волны и отношение амплитуд посланного и отраженного сигнала, можно точно охарактеризовать место и характер материала или повреждения;

– *ультразвуковой метод.* Схож с радарным, в качестве волн выступают механические (ультразвуковые) колебания;

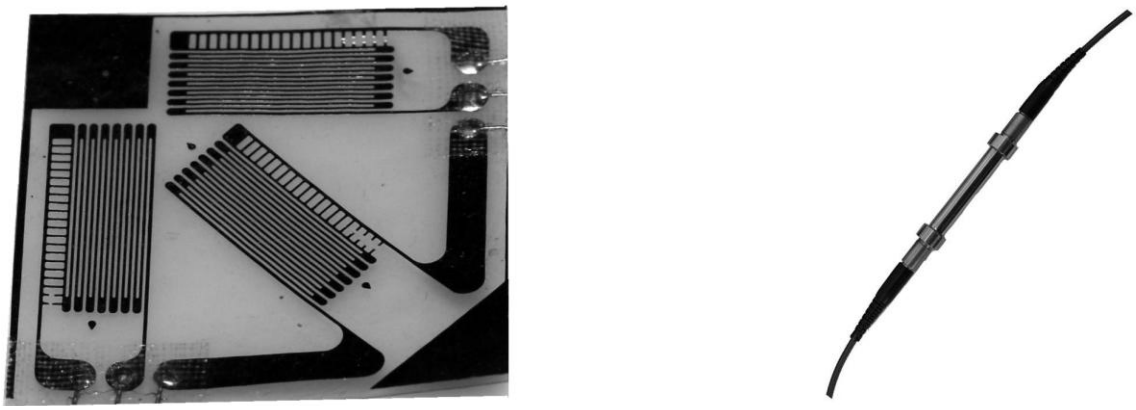
– *метод акустической эмиссии.* Вследствие пластических деформаций возникают кратковременные высокочастотные волны, которые можно детектировать.

Методики обследования конструкций со временем совершенствовались, однако их результаты в значительной степени являлись основой для оценки только текущего состояния элементов конструкции и не могли быть надежной основой для прогноза безопасности эксплуатации сооружения, поскольку измерения осуществлялись в ручном режиме и требовали больших временных затрат. Для прогнозирования необходимо проводить измерения с большей частотностью, но это приводит к существенным временным и финансовым затратам, поскольку требуется привлечение квалифицированных специалистов. С учетом роста числа ответственных сооружений и конструкций такой вариант «ручного» мониторинга был неприемлем.

С развитием электроники, средств коммуникации и информационных технологий стало возможным осуществлять измерения и передавать данные в непрерывном режиме. Это послужило толчком к появлению систем автоматизированного мониторинга состояния сооружений и конструкций. Однако, как было уже сказано выше, вследствие многообразия факторов, негативно воздействующих на конструкцию, необходимо использовать датчики, измеряющие различные параметры.

В настоящее время существует множество различных датчиков, которые преобразуют механические (и другие) параметры в регистрируемые величины. Наиболее известны датчики, измеряющие деформацию, которые получили название тензодатчиков. Существуют тензодатчики, основанные на разных принципах действия, но наибольшую известность получили электронные датчики, основанные на резистивном принципе действия. В массовом сознании тензодатчик и ассоциируется с тензорезистивным датчиком (рис. 5, *а*). Однако существуют датчики (деформации и других величин) на иных принципах действия, характеристики которых более стабильны в течение длительного времени.

В последние годы получили развитие датчики, основанные на оптических принципах действия [8, 10]. Эти датчики интегрируются в оптоволокно и имеют ряд достоинств. Самым главным их преимуществом является использование самого оптического волокна для передачи сигнала от группы датчиков к регистрирующей аппаратуре. Характеристики оптического волокна позволяют располагать регистрирующую аппаратуру на значительном удалении от чувствительного элемента. Благодаря этому стало возможно создавать сети оптико-волоконных датчиков и буквально «опутывать» ими интересующий объект.



*а* *б*

*Рис. 5. Датчики деформации: тензорезистивный (а) и оптико-волоконный (б)*

Можно отметить еще одну тенденцию последних лет – это появление спутниковых навигационных систем [9], которые позволяют с сантиметровой точностью (при определенных обстоятельствах с погрешностью 2–3 мм) отслеживать абсолютное положение объекта. Использование нескольких таких датчиков на протяженном объекте помогает отслеживать геометрические параметры конструкции объекта во времени. Принцип работы спутниковых систем навигации основан на измерении расстояния от антенны на объекте до спутников, положение которых известно с большой точностью. Зная расстояния до нескольких спутников системы, с помощью обычных геометрических построений можно вычислить положение объекта в пространстве.

Для задач мониторинга также представляют интерес датчики, измеряющие динамические характеристики – акселерометры, велосиметры, сейсмометры. Их характеристики могут быть различными и определяются масштабом исследуемого объекта или его части. На рис. 6 представлен пьезоэлектрический акселерометр KB12VD (рис. 6, *а*) для определения вибраций в зданиях и велосиметр CMG-3T (рис. 6, *б*) для сейсмических исследований.

Многообразие возможных датчиков на исследуемом объекте приводит к проблеме – как выбрать нужные датчики для систем мониторинга и как трактовать получаемый поток результатов.

В настоящее время существует два подхода. Первый подход исторически основан на измерении величин, предельные значения которых оговорены в нормативных документах (например, прогибы, неравномерные осадки, крены и т.д.) или измерении величин, которые служат непосредственной информацией для деформационного анализа. Как правило, такими данными являются геотехнические и геодезические измерения. В качестве датчиков и приборов могут использоваться уровнемеры, теодолиты, спутниковые навигационные системы, радары, лазерные сканеры. Анализ результатов может заключаться или в непосредственном сравнении измеренной в эксперименте величины с предельно допустимой, или с рассчитанной величиной в результате моделирования на основе экспериментальных данных. Это интуитивно понятный подход, в котором развитие деформационных процессов в конструкции непосредственно отражается на показаниях приборов. Нет изменений в показаниях – значит, с объектом все в порядке. А если что-то изменяется в показаниях, то в

*а* *б*

*Рис. 6. Вибрационные датчики*

конечном итоге, на основе результатов деформационного мониторинга, решение о возможности дальнейшей эксплуатации объекта или проведения ремонтных работ будет принимать человек. На основе этого подхода можно создавать так называемые системы деформационного мониторинга, структуру которого рассмотрим ниже.

Существует еще один подход, который заключается в поиске дефектов в сооружениях и конструкциях. За последние 20 лет из ряда направлений по определению дефектов возникла новая отрасль инженерной науки – Structural Health Monitoring (SHM), что переводится как «мониторинг здоровья конструкции», или «мониторинг состояния сооружения», основной целью которого является поиск дефектов, их локализация, типизация и определение масштабов. В настоящее время основными объектами исследования SHM являются сложные инженерные конструкции, от функционирования которых зависит непосредственно жизнь и безопасность людей, а также системы жизнеобеспечения. К таким объектам можно отнести мосты, тоннели, дамбы, плотины, атомные и гидроэлектростанции, высотные здания и конструкции, авиационные двигатели и элементы конструкций летательных аппаратов и др. Следует отметить, что под эгидой Structural Health Monitoring проводятся научные конференции и издаются журналы.

В работах [7, 11] сформулированы основные принципы (аксиомы) Structural Health Monitoring, которые заключаются в том, что в любой конструкции есть дефекты и все определяется их масштабом, с помощью принципов SHM на основе обработки информации с датчиков можно их выявлять. Исходной информацией для этого служат измерения статических и динамических деформационных параметров. Основная сложность при использовании SHM заключается в обработке данных и поиске закономерностей в сигналах, свидетельствующих об изменениях в конструкции из-за появления дефектов. Нередко для выявления зависимостей показаний датчиков от наличия дефектов проводят натурные эксперименты с различными конструкционными элементами или уменьшенными копиями (моделями) реальных объектов. Дефекты привносят в эти «модели» искусственно и следят за изменениями в показаниях датчиков. Эти эксперименты позволяют выявлять особенности в механическом поведении конструкции и вносить корректировки в математические модели.

Рассмотрим процесс создания системы мониторинга на основе SHM. На первом этапе при помощи документации и визуального осмотра создается приближенная математическая модель конструкции, которая описывает ее механическое поведение. В настоящее время подобные системы создаются для уникальных объектов, поэтому процесс моделирования нужно проводить для каждого конкретного случая. Эксперименты с математической моделью объекта позволяют оценить поведение конструкции при различных сценариях и тем самым выбрать наиболее интересные измеряемые параметры и диапазоны их изменения. По результатам моделирования, а также визуального осмотра определяются типы и места установки датчиков.

*Рис. 7. Геодезическое оборудование*

Затем происходит монтаж и установка датчиков, а также систем сбора и передачи данных. Далее начинается важный этап – накопление данных, в ходе которого наблюдают за показаниями различных датчиков и условиями окружающей среды и выявляют соответствующие закономерности. На основе полученной информации вносят изменения в математическую модель, чтобы добиться ее адекватности. Этот процесс может занять целый год и больше, поскольку условия окружающей среды летом и зимой значи-

тельно отличаются. Только после этого система мониторинга на основе SHM готова к поиску дефектов. Для поиска дефектов разрабатывают специальные алгоритмы, при помощи которых постоянно обрабатывают поступающий поток данных от датчиков, – так называемый структурный анализ. По результатам обработки данных можно производить оценку состояния конструкции и предсказывать остаточный ресурс. Необходимо отметить, что эти оценки носят вероятностный характер. В конечном итоге возможно создание такой автоматизированной системы мониторинга, которая без участия человека будет с определенной вероятностью давать заключение о состоянии объекта.

Обобщая вышесказанное, приведем компоненты системы мониторинга, построенной на принципах Structural Health Monitoring:

– подсистема сенсоров;
– подсистема сбора и передачи информации;
– подсистема управления данными;
– подсистема первичной обработки данных;
– подсистема диагностики: идентификация изменения структурной модели, оценка состояния, предсказание остаточного ресурса.

В системе деформационного мониторинга также будут присутствовать датчики, подсистемы сбора, передачи, хранения и обработки данных. Отличаться будет только последний пункт – подсистема деформационного анализа.

## Пример системы Structural Health Monitoring

Вантовый мост Ting Kau в Гонконге (рис. 8). Длина моста составляет 1 177 м. Длины пролетов – 475, 448, 127 и 127 метров.

Всего в системе мониторинга на мостовом переходе установлено 236 датчиков 7 типов: 5 GPS, 7 анемометров, 83 температурных датчика, 45 акселерометров, 88 датчиков деформации, 2 датчика перемещения, 6 датчиков веса для проезжающего транспорта. Использование анемометров обусловлено наличием в данном океанском регионе ветров, которые могут вызывать колебания данного моста. Измерения

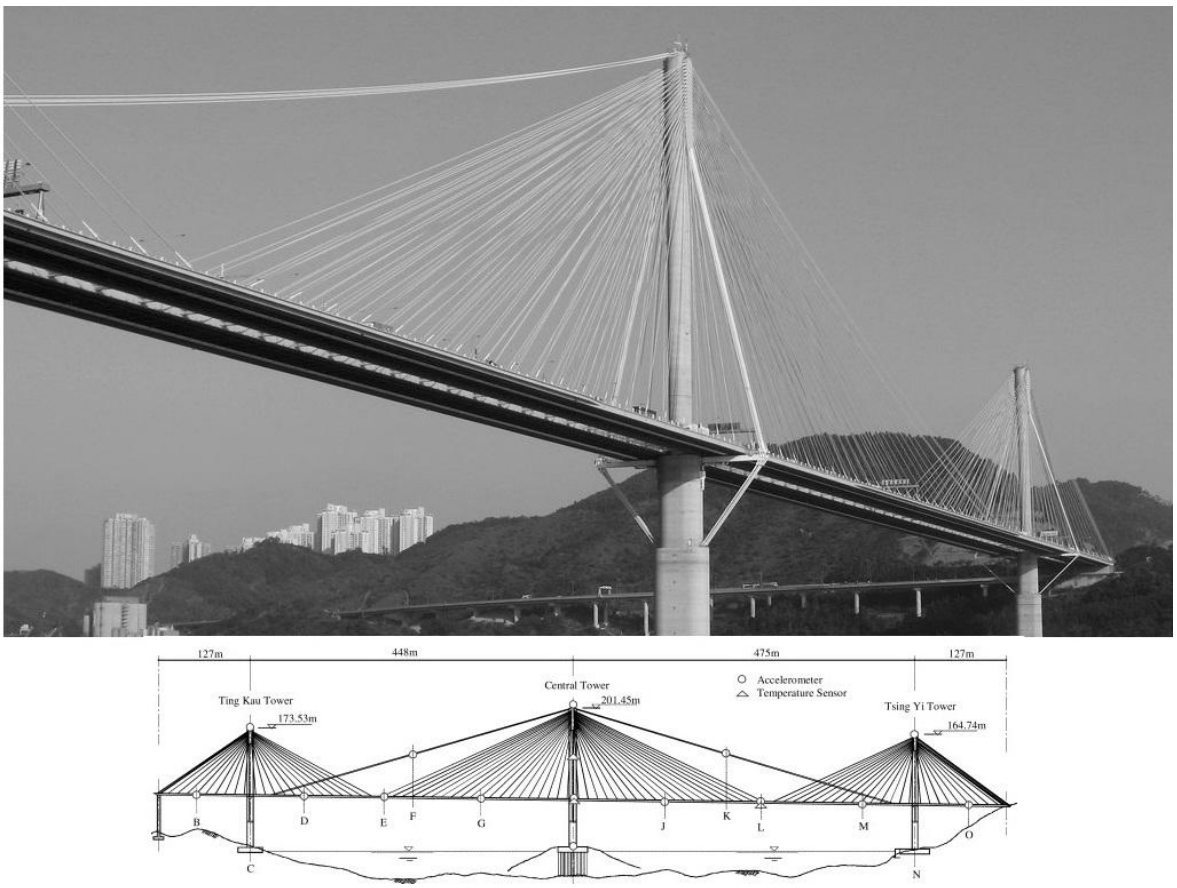



*Рис. 8. Мост Ting Kau*

начаты в 1998 г. и продолжаются до сих пор. Для определения положения повреждений из вибрационных данных используется технология нейронных сетей [12].

График изменения собственных частот со временем, взятый из источника [14], приведен на рис. 9. Как можно видеть из графика, заметны суточные колебания различных собственных частот, по всей видимости, связанные с изменениями температуры воздуха. Из рис. 9 следует, что разные собственные частоты по-разному реагируют на изменение внешних условий. По всей видимости, поскольку отсутствуют данные о глобальных изменениях параметров данного мостового перехода, его конструкция находится в порядке.

Системы мониторинга структурного здоровья сооружений в настоящее время активно развиваются и применяются пока на уникальных и ответственных инженерных сооружениях. Для обычных зданий и сооружений такие системы в настоящее время еще не стали доступными, как охранная или пожарная сигнализации. Но, возможно, уже в скором времени такие системы будут устанавливаться повсеместно на обычные здания и сооружения, и тогда жизнь в городских каменных джунглях станет более безопасной.

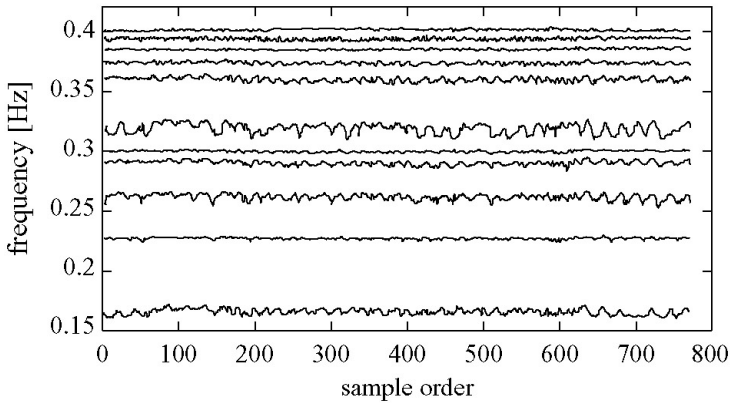



*Рис. 9. Изменение собственных частот конструкции моста со временем*

## Библиографический список


1. *Бойко М.Д.* Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий. – М.: Стройиздат, 1975. – 335 с.
2. *Брайт П.И., Медвецкий Е.Н.* Измерение осадок и деформаций сооружений геодезическими методами. – М.: Изд-во геодезической литературы, 1959. – 199 с.
3. Вибрационный метод испытания жилых и общественных зданий / *Г.А. Шапиро, Ю.А. Симон, Г.Н. Ашкинадзе* [и др.] – М.: Наука, 1972. – 160 с.
4. *Колотилкин Б.М.* Долговечность жилых зданий. – М.: Стройиздат, 1965. – 254 с.
5. Обследование и испытание сооружений. / *О.В. Лужин, А.Б. Злочевский, И.А. Горбунов, В.А. Волохов* – М: Стройиздат, 1987. – 263 с.
6. *Физдель И.А.* Дефекты и методы их устранения в конструкциях и сооружениях. – М.: Стройиздат, 1987. – 336 с.
7. *Farrar C.R., Worden K.* An introduction to structural health monitoring // Philosophical transactions of the royal society A. – 2006. – Vol. 365. – P. 303–315.
8. *Othonos A.* Fiber Bragg gratings // Rev. Sci. Instru. – 1997. – Vol. 68. – I. 12. – P. 4309–4341.
9. *Parkinson B., Spilker J.* Global Positioning System: Theory and Applications. – Washington: American Institute of Aeronautics, Astronautics, 1996. – 793 p.
10. *Rao Y.J.* In-fibre Bragg grating sensors // Measurement Science Technology. – 1977. – Vol. 8. – P. 355–375.
11. The fundamental axioms of structural health monitoring / *K. Worden, C.R. Farrar, G. Manson, G. Park* // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2007. – Vol. 463. – P. 1639–1664.
12. Vibration-based damage localization in Ting Kau bridge using probabilistic neural networks / *Y.Q. Ni, X.T. Zhou, J.M. Ko, B.S. Wang* // Advances in Structural Dynamics. – 2000. – Vol. 2. – P. 1069–1076.
13. *Wearne P.* Collapse: when Buildings fall down. – London: Channel 4 Books, 2000. – 256 p.
14. *Wenzel H.* Health monitoring of bridges. – U.K.: Wiley, 2008. – 652 p.

# Натурное испытание строительных сооружений – шаг к повышению деформационной безопасности

Гусев Г.Н., Матвеенко В.П., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.

Рассмотрены основные принципы создания экспериментального стенда, позволяющего зафиксировать предкритические и критические процессы в конструкции. Разработана модель, описывающая особенности деформационного поведения железобетонной конструкции в начальной стадии накопления повреждений. Представлены результаты моделирования для элементов железобетонной конструкции в масштабе 1:2. Определены необходимые параметры экспериментального стенда и условия работы нагружающих устройств. Приведена схема создаваемого экспериментального стенда.

Проектирование и создание современных амбициозных строительных и инженерных сооружений обусловливает особую актуальность безопасности их эксплуатации. Их разрушение может приводить к гигантским материальным потерям, а иногда и человеческим жертвам.

Процесс разрушения строительного сооружения начинается с образования и накопления дефектов. Первоначально их появление, как правило, не приводит к разрушению сооружения, но является его предвестником. Поэтому необходимо осуществлять контроль развития дефектов во времени. Традиционные методы наблюдения за повреждениями включают непосредственный визуальный осмотр с выявлением видимых дефектов и измерением размеров повреждений. В настоящее время появляются новые методики обследования сооружений и конструкций [1–3]. Следует отметить работы Е. Арендарского, Х.А. Асанбекова, В.А. Лисенко, Э. Грунау и других, посвященные долговечности сооружений [4–6] и описанию методик, способных предсказать наступление разрушения [7, 8]. Самым современным подходом, позволяющим контролировать состояние конструкций и сооружений, является использование интеллектуальных автоматизированных систем деформационного мониторинга [9–14]. Эти системы должны не только осуществлять регистрацию деформационных параметров, но и прогнозировать время и место реализации критического состояния в том или ином элементе конструкции.

Основным материалом для строительных конструкций является бетон. В работе [15] исследуется разрушение бетонных оболочек при динамическом воздействии и вероятностном распределении физико-механических характеристик материала. Анализу деформационных процессов при критическом состоянии бетона посвящены работы [16, 17], в которых моделируется распространение трещин. В [18] применяется энергетический подход к анализу распространения трещин. Процесс регистрации трещинообразования методами акустической эмиссии рассмотрен в [19]. В [20] предложен подход, позволяющий давать оценку остаточного ресурса конструкции. Конечно-элементное моделирование развития и распространения трещин в стержневых конструкциях из железобетона рассматривается в работах Z.J. Yang и др. [21,

22]. Модель разрушения бетона, предложенная K.J. Willam, E.D. Warnke [23], была использована для численной реализации в работе [24]. В [25] выведены основные соотношения и даются примеры расчета строительных стержневых конструкций из железобетона.

В настоящее время имеются единичные исследования, выполняемые на экспериментальных стендах, моделирующих особенности деформационного поведения отдельных элементов инженерных и строительных сооружений. Так, в работе А.В. Кухты [26] описываются стенды, моделирующие поведение плитного железобетонного фундамента и каркаса здания. В работе А.А. Карякина и др. [27] приведены результаты испытаний натурного фрагмента сборно-монолитного каркасного сооружения. Фрагмент каркаса состоял из двух типичных ячеек конструкции, что явно недостаточно для исследования деформационной картины сооружения в целом.

Однако до сих пор остается малоизученным как с точки зрения фундаментальной, так и прикладной науки вопрос о закономерностях деформационного поведения ансамбля элементов строительной или инженерной конструкции, передающего не только свойства отдельных элементов, но и многообразие механизмов их взаимодействия. Особенно важными становятся эти вопросы в условиях перехода конструкции от предкритического состояния к критическому.

Актуальной задачей является также изучение пространственно-временного распределения деформационного отклика несущих элементов конструкции на возникновение критического состояния в отдельных ее частях. Следует отметить, что особый интерес представляет решение указанных проблемных задач с привязкой к реальным масштабам исследуемых объектов.

Решение данных фундаментальных задач дает подходы к разработке современных систем деформационного мониторинга, усиливая такое важное их качество, как оценка времени, оставшегося до наступления критического состояния в каком-либо элементе конструкции.

Провести такие исследования и найти ответы на поставленные вопросы помогло успешное участие Института механики сплошных сред УрО РАН в конкурсе Российского научного фонда с проектом «Экспериментально-теоретические исследования закономерностей деформационного поведения элементов строительных и инженерных конструкций в условиях перехода к критическим состояниям». Реализация этого проекта позволит разработать и создать уникальный испытательный центр, предназначенный для исследования закономерностей деформационных процессов в разнообразных конструкциях, приближенных по масштабу и свойствам к реальным. Отличительной особенностью такого подхода является то, что испытываемый модельный объект будет представлять собой совокупность «типовых ячеек» объекта-прототипа, которая сохраняет ансамблевые деформационные свойства исходной конструкции. Такой ячейкой, например, может быть фрагмент железобетонного каркасного сооружения, размеры которого определяются расстоянием между опорными колоннами в пределах одного этажа. Создаваемый центр является уникальным инструментом, позволяющим изучать свойства не только строительных сооружений, но и разнообразных сложных металлических конструкций. По своему масштабу, свойствам, универсальности и современности оснащения такой испытательный центр не имеет аналогов в России.

Работа над созданием центра требует решения ряда важных задач.

**Первая задача** заключается в разработке математических моделей, характеризующих деформационные процессы в элементах испытуемой конструкции. На основе численных экспериментов с указанными моделями будут разработаны принципиальные схемы экспериментальных стендов, с помощью которых планируется

изучать деформационное поведение реальных конструкций. Результаты численных экспериментов позволят выделить деформационные параметры, пригодные для регистрации в эксперименте, установить диапазоны и точность измерений, назначить частотность измерений во времени и выбрать рациональную локализацию точек измерения по элементам конструкции с целью наиболее точного описания пространственно-временного распределения предвестников критического состояния по элементам.

**Вторая задача** состоит в разработке и создании экспериментального стенда. Решение этой задачи в значительной степени опирается на результаты проведенных численных экспериментов. Испытательный стенд будет оснащен специальными нагружающими устройствами, системами датчиков, регистрирующих деформационные параметры, средствами сбора экспериментальных данных и их математической обработки и анализа. Испытания на экспериментальном стенде дадут возможность наблюдать изменение состояния конструкции под действием нагрузок, появление и накопление дефектов в ней и даже ее разрушение.

В этих исследованиях наиболее интересным и значимым является этап, предшествующий разрушению конструкции. На этом этапе можно наблюдать появление симптомов, свидетельствующих о приближении разрушения материала конструкции. Именно на этом этапе можно получить информацию, способную значительно обогатить разрабатываемые системы мониторинга. Основываясь на этих результатах, можно существенно повысить надежность предсказания интервала безопасной эксплуатации реальных сооружений и конструкций.

**Третья задача** заключается в разработке математической модели деформационных процессов в исследуемой конструкции во взаимодействии ее с экспериментальным стендом. Она в значительной степени опирается на разработанную при проектировании стенда математическую модель конструкции и должна отражать все многообразие реализующихся в ней деформационных процессов, а также иметь возможность адаптироваться для описания эволюции напряженно-деформированного состояния элементов конструкции, в особенности в моменты, предшествующие ее разрушению. Кроме того, она необходима для интерпретации результатов натурных экспериментов на стенде.

**Четвертая задача** состоит в разработке и создании модельного варианта автоматизированной системы деформационного мониторинга на основе созданного экспериментального стенда. При решении этой задачи должны быть разработаны конкретные структурные схемы автоматизированной системы мониторинга, определены ее основные блоки и описано их функциональное взаимодействие. На последующих этапах эксперимента («проверочных») будет протестирована способность системы мониторинга осуществлять предсказание возможности развития критической ситуации в элементах исследуемой конструкции по оценке появления предвестников критического состояния в точках конструкции, оснащенных датчиками.

В настоящее время в Институте механики сплошных сред ведутся работы над первыми двумя задачами. Разработана математическая модель сборно-монолитной конструкции из железобетона, которая является уменьшенной вдвое копией реально существующего объекта (рис. 1).

Модельный объект включает в себя 24 типичных ячейки конструкции, объединенные в 4 этажа. Общая высота сооружения – 6 м, длина 9 м, и ширина 6 м. Выбранный масштаб позволяет удобно разместить модель на экспериментальном стенде.

На рис. 2, *а* представлено поле вертикальных перемещений элементов конструкции, спровоцированных вертикальным смещением колонны $K_u$ (рис. 1, *а*). Для наглядности картины перемещения увеличены в 50 раз. Получена зависимость усилий,

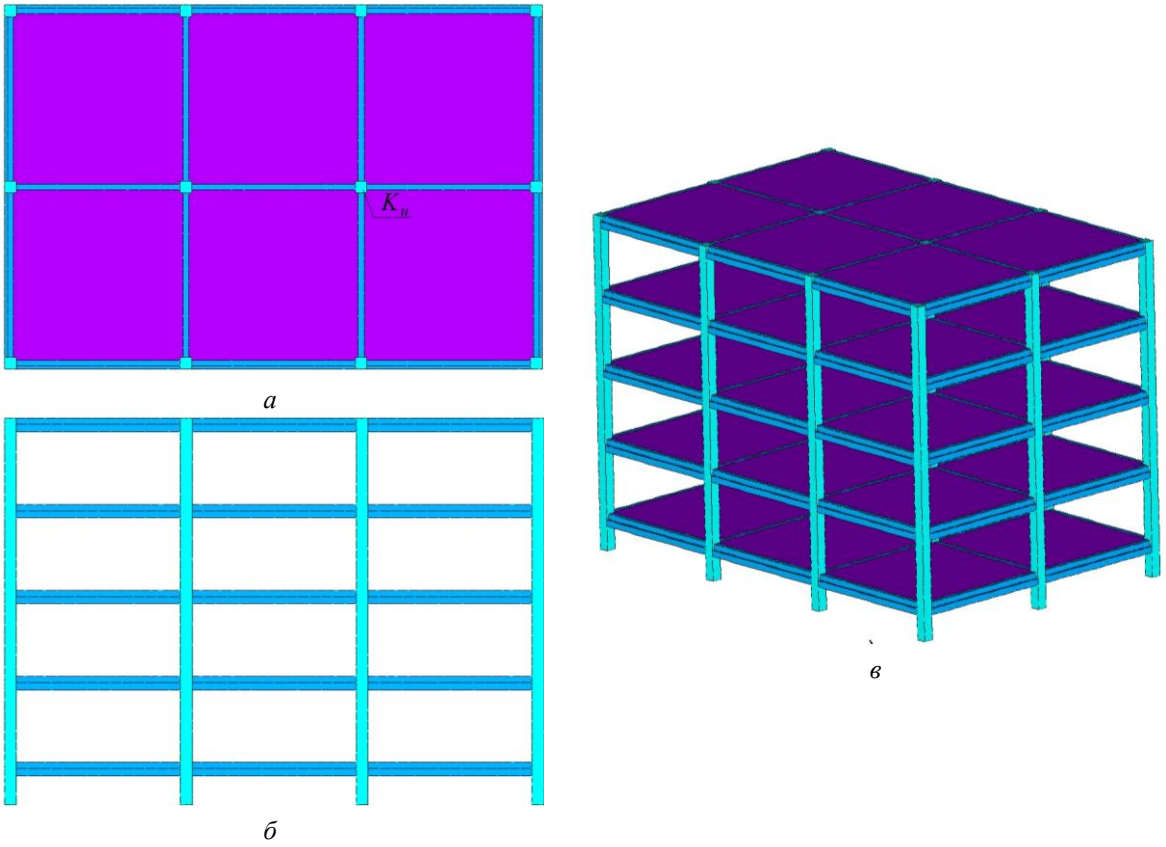



*Рис. 1. Модель сборно-монолитной конструкции: а – вид сверху; б – вид сбоку; в – пространственный вид; $K_u$ – колонна, моделирующая вертикальное смещение*

возникающих в колонне $K_u$, от величины ее вертикального смещения (рис. 2, *б*). На основе этой зависимости выделены ключевые точки в процессе деформирования конструкции вплоть до ее разрушения: $T_1$ ($F$ = 147 кН, $U$ = 0 мм) – конструкция нагружена собственным весом, перемещения колонны отсутствуют; $T_2$ ($F$ = 260 кН, $U$ = 0,5 мм) – появление в конструкции первых трещин, локализующихся в растянутой зоне ригелей; $T_3$ ($F$ = 621 кН, $U$ = 5,2 мм) – появление трещин в плитах перекрытий, что соответствует реализации максимальных усилий в колонне; $T_4$ ($F$ = 590 кН, $U$ = 11,6 мм) – разрушение сжатой зоны ригелей. Проведенные расчеты позволили определить основные характеристики нагружающего устройства, которое будет использоваться для испытаний модельной конструкции на экспериментальном стенде: для того чтобы гарантированно выполнить разрушение, необходимо предусмотреть диапазон усилий нескольких сотен тонн; в то же время для выполнения контролируемого перехода конструкций из упругого состояния в стадию разрушения должна быть обеспечена точность задания перемещений не ниже 0,1 мм.

Масштабность исследуемого объекта и испытательных нагрузок предъявляет особые требования к прочности и жесткости элементов создаваемого испытательного стенда. Проведенные расчеты позволили выбрать характерные размеры и материалы конструкции испытательного стенда.

Экспериментальный стенд представляет собой металлическую рамную конструкцию на железобетонном основании с размерами в плане 12×8 м (рис. 3). Основными несущими элементами являются четыре силовых контура, выполненные из прокатного профиля и объединенные горизонтальными и вертикальными связями. Нижние части силовых контуров объединены двухуровневой опорной рамой, замоноличенной в железобетонное основание толщиной 3 м. На рис. 4 показан внешний вид экспериментального стенда, внутри которого размещена модельная конструкция в масштабе 1:2.

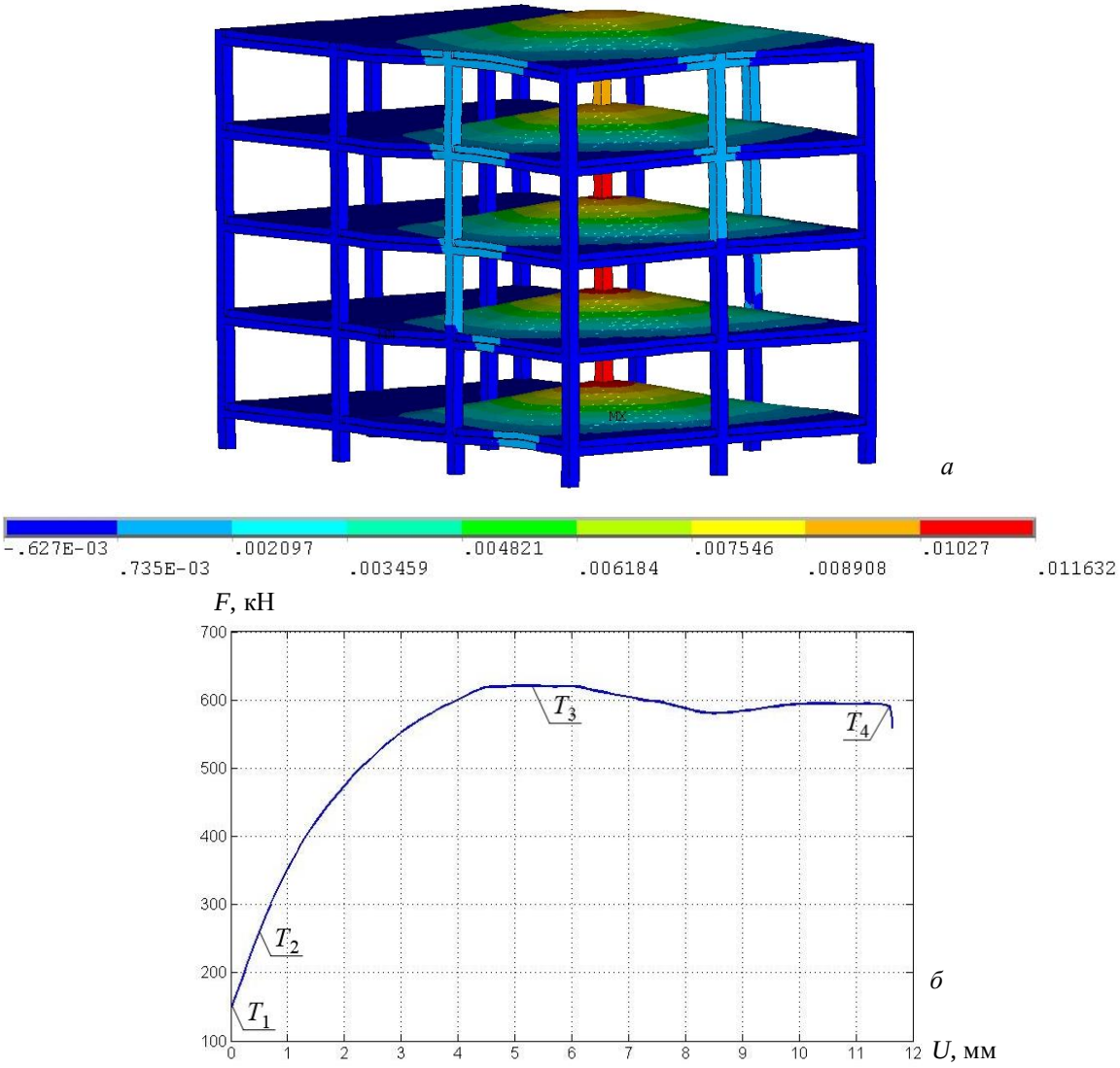



*Рис. 2. Результаты моделирования: а – поле вертикальных перемещений; б – усилия, реализующихся в колонне в зависимости от приложенных перемещений (точками $T_i$ обозначены ключевые состояния конструкции)*

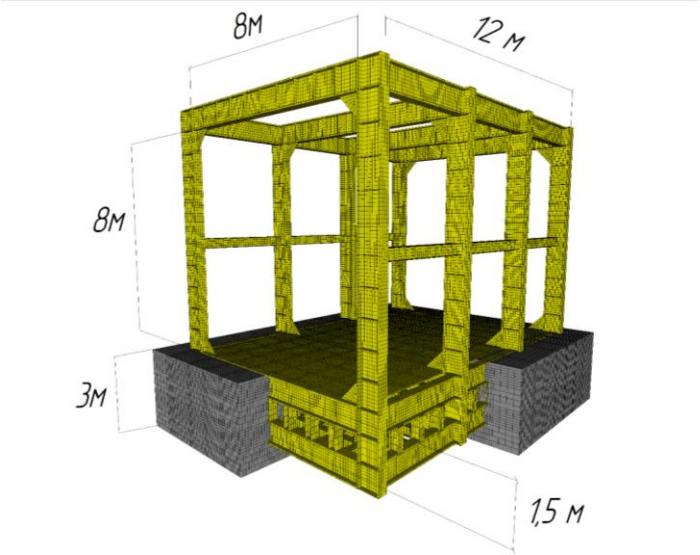



*Рис. 3. Конструкция экспериментального стенда*

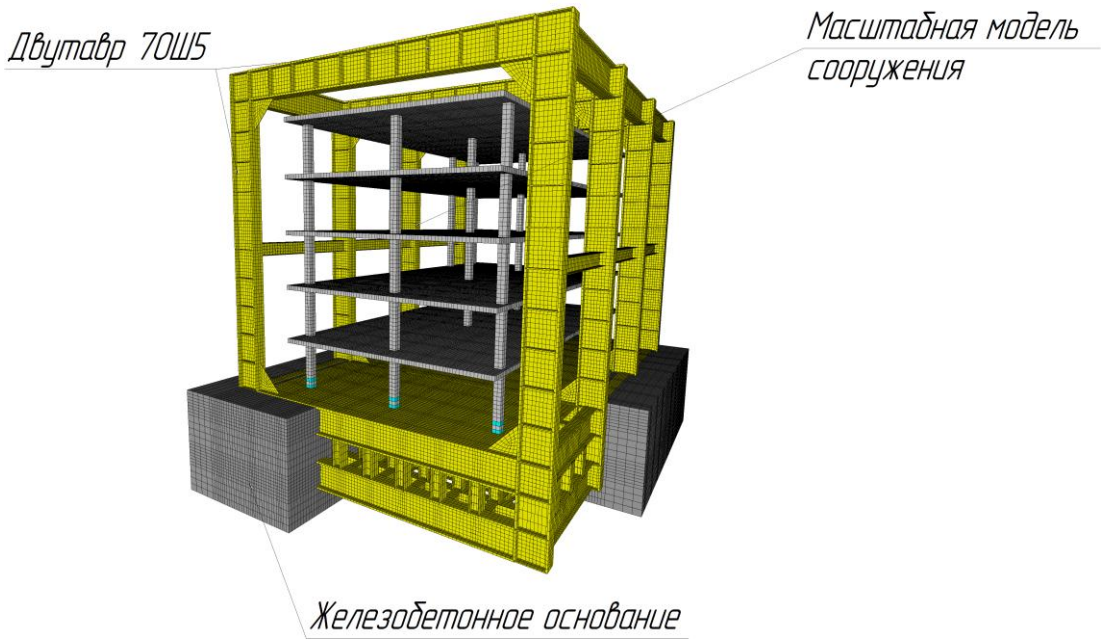



*Рис. 4. Экспериментальный стенд с масштабной моделью конструкции*

После создания экспериментального стенда и проведения натурных испытаний будут установлены закономерности деформационного поведения элементов строительных конструкций в условиях перехода от предкритических состояний к критическим. Разрабатываемые на основе полученных закономерностей автоматизированные системы деформационного мониторинга обеспечат существенный прогресс в прогнозировании поведения строительных конструкций в течение их жизненного цикла и предсказании интервала безопасной эксплуатации.

## Библиографический список

1. *Добромыслов А.Н.* Оценка зданий и сооружений по внешним признакам: Справочное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 72 с.
2. Организация и проведение обследования технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений */ А.С. Морозов, В.В. Ремнева, Г.П. Тонких* и [др.] – М, 2001. – 212 с.
3. *Ройтман А.Г.* Деформации и повреждения зданий. – М.: Стройиздат, 1987. – 160 с.
4. *Арендарский Е.* Долговечность жилых зданий: пер. с польск. / под ред. *С.С. Крамилова*. – М.: Стройиздат, 1983. – 255 с.
5. *Асанбеков Х.А.* Долговечность сборных конструкций многоэтажных зданий. – М.: Стройиздат, 1985. – 104 с.
6. *Колотилкин Б.М.* Долговечность жилых зданий. – М.: Стройиздат, 1965. – 254 с.
7. *Грунау Э.* Предупреждение дефектов в строительных конструкциях. – М.: Стройиздат, 1985. – 215 с.
8. Предупреждение деформаций и аварий зданий и сооружений / под ред. *В.А. Лисенко* – Киев: Будівельник, 1984. – 120 с.
9. *Коргин А.В., Емельянов М.В*. Особенности построения интеллектуальных систем автоматического мониторинга технического состояния ответственных строительных сооружений // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 3. – С. 32–34.
10. *Патрикеев А.В., Салатов Е.К.* Основы методики динамического мониторинга деформационных характеристик зданий и сооружений // Вестник МГСУ. – 2013. –

№ 1. – С. 133–138.

11. *Хорошилова Ж.А., Хорошилов В.С.* Деформационный мониторинг инженерных объектов как составная часть геодезического мониторинга // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. – 2012. – Т. 1. – № 1. – С. 77–80.
12. *Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.* Система мониторинга неравномерных осадок сооружений с использованием ip-камер // Вестник Волгоградского архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – 2013. – № 30 (49). – С. 95–100.
13. *Богоявленская В.А., Матвеенко В.П., Шардаков И.Н., Цветков Р.В*. Моделирование в системах мониторинга механического поведения инженерных сооружений и природных объектов // VI Сессия Научного совета РАН по механике: материалы Всерос. Конференции. – Барнаул, Белокуриха, 26–31 июля 2012. – С. 38–39.
14. *Bartolomey M.L., Glot I.O., Shardakov I.N., Tsvetkov R.V.* The Analysis of the deformation state of the building structure based on the measuremenst with an automated monitoring system // Structural Health Monitoring for Infrastructure Sustainability. Proceedings of the 6-th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure – SHMII-6. – Hong Kong – 9–11 Dec. 2013. Электрон. оптич. диск. (CD.)ISBN 978-962-367-768-4 – 7 p.
15. *Герасимов А.В., Пашков С.В.* Моделирование естественного дробления твердых тел при ударных и взрывных нагружениях // Химическая физика. – 2004. – Т. 24. – № 11. – С. 48–54.
16. *Reinhardt H. W., Xu S.* Crack extension resistance based on the cohesive force in concrete // Engineering Fracture Mechanics. – 1999. – Vol. 64. – P. 563–587.
17. *Prasad M.V.K., Krishnamoorthy C.S.* Computational model for discrete crack growth in plain and reinforced concrete // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 2002. – Vol. 191, Is. 25–26. – P. 2699–2725.
18. *Bolander Jr.J.E., Le B.D.* Modeling crack development in reinforced concrete structures under service loading // Construction and Building Materials. – 1999. – Vol. 13, Is. 1–2. – P. 23–31.
19. *Ohtsu M., Kaminaga Y, Munwam M. C*. Experimental and numerical crack analysis of mixed-mode failure in concrete by acoustic emission and boundary element method // Construction and Building Materials. – 1999. – Vol. 13, Is. 1. – P. 57–64.
20. *Шматков С.Б.* Расчет остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Строительство и архитектура. – 2007. – Т. 94. – № 22. – С. 56–57.
21. *Yang Z.J., Chen J.* Finite element modelling of multiple cohesive discrete crack propagation in reinforced concrete beams // Engineering Fracture Mechanics. – 2005. – Vol. 72. – P. 2280–2297.
22. *Yang Z.J., Proverbs D.* A comparative study of numerical solutions to non-linear discrete crack modelling of concrete beams involving sharp snap-back // Engineering Fracture Mechanics. – 2004. – Vol. 71. – P. 81–105.
23. *Willam K.J., Warnke E.D.* Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete // Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering. – 1975. – Vol. 19. – P. 174.
24. *Fuschi P., Dutko M., Peric D., Owen D.R.J.* On numerical integration of the five-parameter model for concrete // Comput & Structures. – 1994. – Vol. 53. – Is. 4. – P. 825–838.
25. *Ветюков М.Ю., Елисеев В.В.* Моделирование каркасов зданий как пространственных стержневых систем с геометрической и физической нелинейностью // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3. – № 3. – С. 32–45.

26. *Кухта А.В.* Экспериментальные стенды «Конструктор», «Плита» и «Створ» для решения задач строительного мониторинга: особенности. Возможности. Проблемы // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2013. – № 1. – С. 46–59.
27. *Карякин А.А., Сонин С.А., Попп П.В., Алилуев М.В.* Испытание натурного фрагмента сборно-монолитного каркаса системы Аркос с плоскими перекрытиями // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Строительство и архитектура – 2009. – № 35 (168). – С. 16–20.

# Междисциплинарные подходы к ранней диагностике и скринингу опухолевых и предопухолевых заболеваний (на примере рака молочной железы)

Гилева О.С., Фрейнд Г.Г., Орлов О.А., Либик Т.В., Герасимова Е.И., Плехов О.А., Баяндин Ю.В., Пантелеев И.А.

Описаны состояние, проблемы и перспективы применения метода инфракрасной термографии (ИКТ) в комплексе диагностических и скрининговых методик для практической онкологии. Представлены этапные результаты клинико-лабораторных исследований, освещающие: процесс внедрения методики ИКТ-обследования молочных желез в клиническую практику; качественные характеристики ИК-образа здоровых и пораженных раком МЖ; данные анализа результатов ИКТ методами нелинейной динамики. Определено наличие количественных различий в пространственных распределениях флуктуаций температур в визуально неизмененных и пораженных тканях; продемонстрированы качественные различия их фазовых портретов (хаосограмм). По данным DFA-анализа охарактеризованы температурные сигналы в различных топографических зонах иссеченной по поводу опухоли ткани. В сравнительном аспекте изучены корреляционные свойства температурных сигналов интактных и пораженных фокусов.

Одна из основных проблем российской онкологии – поздняя диагностика злокачественных новообразований. Подавляющее большинство онкологических заболеваний (ОЗ) выявляется на запущенных стадиях, когда даже современная комбинированная длительная противоопухолевая терапия не всегда позволяет надеяться на полное выздоровление пациента, кардинально улучшить качество его жизни. Современная онкология, как мультидисциплинарная наука, требует содружественного решения многих актуальных проблем, связанных как с выявлением закономерностей возникновения и развития злокачественных новообразований, так и поиском оптимальных методов их ранней диагностики и лечения. В настоящее время научные основы онкологии представляют собой сплав фундаментальных исследований в области онкогенетики, молекулярной онкологии, биофизики и нанотехнологий, а также созданных на их основе передовых клинических разработок. Известно, что в организме человека нет органов или тканей, в которых не могли бы развиваться различные по гистогенезу опухоли.

Онкологические заболевания относятся к группе наиболее социально значимых болезней. По данным Всемирной организации здравоохранения (WHO, 2011), в 2010 году смертность населения планеты от ОЗ приблизилась к 8 млн человек и достигла 13 % в общей структуре мировой смертности населения. По прогнозам ВОЗ (WHO, 2011), в 2015 году этот показатель увеличится до 9 млн человек, а в 2030 г. достигнет 11,4 млн. В 2010 году показатель поражаемости ОЗ на 100 000 населения России составил 364,2 и на 17,8 % превысил таковой в 2000 г., что отражает неблагоприят-

ные тенденции современной онкологии. Уровень ОЗ у населения Пермского края в целом соответствует общероссийскому и отражает насущную необходимость существенной модернизации всей системы оказания онкологической помощи.

Современная мировая медицина кардинально пересматривает роль методов диагностики ОЗ, делая первоочередной акцент на проблему их раннего выявления по обращаемости и/или в процессе скрининговых обследований населения на доврачебном этапе и врачами общей практики. К числу наиболее распространенных (среди населения земного шара, РФ и Пермского края) клинико-топографических вариантов ОЗ с высоким уровнем смертности относится рак молочной железы (РМЖ). По данным ВОЗ (2010 г.), ежегодно в мире наблюдаются у онколога по поводу РМЖ и проходят онкологическое лечение 11 млн женщин, причем каждый год регистрируется до 1,2 млн новых случаев этого ОЗ, а погибает до 500 тыс. женщин. В 2006 г. в России выявлено 48 821 больных РМЖ, причем прирост заболеваемости за период 1996–2006 гг. составил – 24,6 %. Выявляемость РМЖ на ранних стадиях процесса (I–II) составила 62,1 %, показатель запущенности (III–IV ст.) – 37,2 % [1].

Традиционные подходы к ранней диагностике и скринингу РМЖ имеют свои «за и против». Наиболее востребованы следующие методы: маммография, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, УЗИ. Маммография – стандартный анатомо-топографический метод лучевой диагностики опухолей молочной железы, применение которого позволяет снизить смертность в 22 % случаев РМЖ [3]. Однако при всей ценности метода маммографии – стандартного скринингового метода первого ряда, он имеет ряд недостатков, к которым относятся дозовая лучевая нагрузка, финансовая затратность обследования, требующего специального дорогостоящего оборудования и оснащения, вариативность информативности метода, например, при плотном фоне железы (у молодых женщин, на фоне заместительной гормональной терапии и др.), а также трудности объективного анализа результатов, стимулирующие развитие цифровой маммографии.

Новые возможности объективизации результатов стандартной маммографии с помощью мультифрактального анализа изображений маммограмм (WTMM-analysis) продемонстрированы в исследованиях P. Kestener et al. [3]. Специалисты считают, что результаты стандартной маммографии не дают возможности поставить окончательный диагноз РМЖ, а лишь указывают на его возможность с определенной степенью вероятности. Правильность предварительного диагноза в значительной степени может зависеть от использования дополнительных диагностических процедур, т.е. применения маммографии в тандеме с другими клинико-функциональными методами обследования.

Прогресс современной ядерной медицины в онкологии во многом связывается с внедрением скрининговых методов функциональной визуализации опухолей, которые в отличие от анатомо-топографических методов лучевой диагностики (маммография, магниторезонансная томография, компьютерная томография) способны не только охарактеризовать состояние и динамику опухолей по их размерам и структуре, но, что особенно важно, выявить функциональную (физиологическую) составляющую процесса: степень васкуляризации опухолей, уровень нарушений ее метаболизма и др.

К методам функциональной визуализации справедливо относят метод инфракрасной термографии (ИКТ), основанный на регистрации и обработке путем естественного теплового излучения здоровых и пораженных тканей в диапазоне электромагнитного спектра 9 000–14 000 нм. ИК-образ аналогичен анатомическому, отражает его функциональные особенности (тканевой метаболизм, ангиогенез и др.) через температурные характеристики: распределение «горячих» и «холодных» участков, их размеры и границы; разность температур по сравнению с перифокальной зоной, симметричными участками; появление аномальных зон гипо- и гипертермии и др.

За последние 15 лет мировой медициной накоплен определенный опыт использования ИКТ в онкологии, прежде всего при РМЖ. Специалистами определены конкретные конкурентные преимущества ИКТ в системе онкоскрининга – возможность анатомо-топографической и функциональной оценки пораженной ткани, неинвазивный характер, безопасность и возможность многократного применения метода; мобильность оборудования (ИКТ-камеры), позволяющая широко использовать ИКТ специалистами доврачебного звена и врачами общей практики.

В ряде зарубежных обзоров, посвященных диагностике рака, отмечено, что эффективность применения ИКТ для диагностики опухолей молочной железы составляет 83–90 % и, соответственно, аномалии МЖ, выявляемые по данным ИКТ, – важный фактор риска РМЖ [4]. В США с 1982 г. ИКТ одобрена в качестве дополнительного метода при скрининге РМЖ («The Biomedical Engineering Handbook, Medical Devices and Systems» (2006)).

Несмотря на значительный объем работ по применению ИКТ в онкологии до настоящего времени не определены точное место и роль этого метода в программах целевого онкологического скринингового обследования населения. Обсуждаются вопросы о целесообразности применения ИКТ как важнейшей части полимодального подхода к диагностике ОЗ, основанного на определенной последовательности применения клинических методов обследования, маммографии и ИКТ. Кроме того, перспективно оценить возможности применения ИКТ как самой ранней скрининговой процедуры.

Критический анализ состояния вопроса об объективизации результатов ИКТ свидетельствует о том, что критерии риска, определяемые по термограммам, зачастую являются описательными: повышение температуры тела от 1 до 6 °С, асимметрия термической картины, наличие существенных градиентов температур и т.д. Всесторонняя и точная интерпретация ИК-образа формулируется в качестве ключевой проблемы ранней диагностики ОЗ, разрешаемой только на основе междисциплинарных взаимодействий, что предполагает установление корреляций между состоянием сосудистой системы в опухолевом очаге и его перифокальных зонах, тепловыми выделениями и локальными молекулярно-морфологическими изменениями, которые, отражаясь на флуктуациях температурного поля, могут объективно характеризовать качественные закономерности стадийности онкогенеза.

Организационным ключом к решению столь важной междисциплинарной проблемы может стать формирование единой трансдисциплинарной группы специалистов, обладающих соответствующими квалификациями и компетенциями, в составе которой организаторы здравоохранения, врачи-онкологи, врачи-патоморфологи, молекулярные биологи, физики, математики, программисты. Так, на протяжении последних десяти лет клиницисты (онкологи, патоморфологи, стоматологи и др.) ГБОУ ВПО ПГМА им. ак. Е.А. Вагнера Минздравсоцразвития России, Пермского краевого онкологического диспансера и коллектив специалистов лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН, объединившие свои усилия, разрабатывают фундаментальные и прикладные аспекты использования метода ИКТ. В состав трансдисциплинарной группы входят 13 участников, в т.ч. 4 доктора наук, 5 кандидатов наук и молодые ученые, из которых 9 человек – представители Российской Федерации, 1 – Франции, 3 – Израиля.

За эти годы дальнейшее развитие получили методы корреляционного анализа, основанные на обработке данных инфракрасного сканирования с использованием инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M и данных 3D-количественной морфологии с использованием интерферометра-профилометра высокого разрешения New View 5000; разработаны методы анализа статистики флуктуаций температурного поля с использованием развитых методов оценки пространственно-временных инвариантов, сопоставлением последних с «симметрийными инвариантами», соответствующими типам установленных коллективных мод; предложено обобщение метода оценки условий термолизации в терминах «эффективных температур» применительно к анализу флуктуаций температурного поля при инфракрасном сканировании биологических объектов [2].

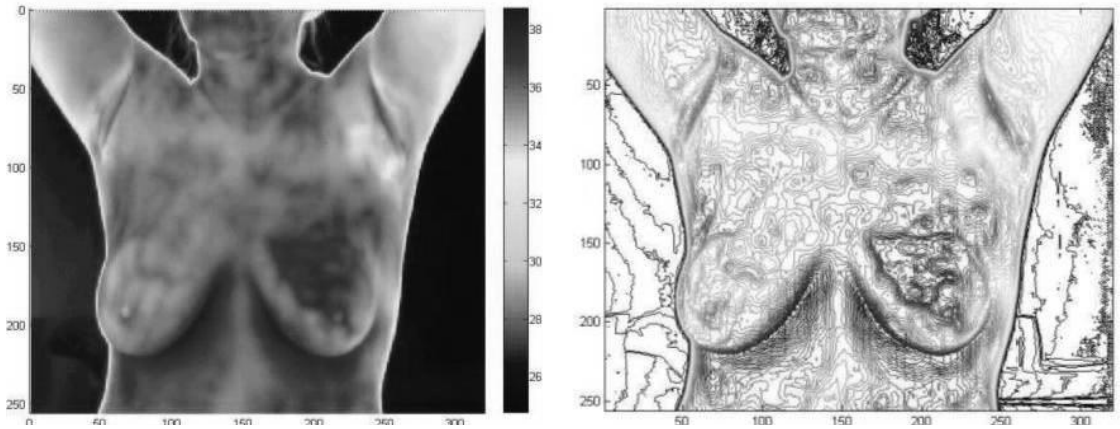
В плане клинической адаптации методологии инфракрасного сканирования объектов проведено инфракрасное сканирование 46 пациентов с признаками онкопатологии (РМЖ), в том числе в условиях «холодового» и «глюкозного» тестов, результаты которого представлены на рис. 1.

Проведен спектральный и корреляционный анализ флуктуаций температурного поля (Фурье- и вейвлет-спектры пространственных распределений флуктуаций температуры). Установлены достоверные количественные различия в пространственных распределениях флуктуаций температур здоровых (визуально неизмененных) и пораженных раком МЖ. Также определены качественные различия фазовых портретов – хаосограмм здоровых и пораженных раком МЖ (рис. 2–4).

На этапах оперативного вмешательства по поводу опухоли МЖ проведен забор биоматериала и исследованы температурные сигналы в различных топографических зонах иссеченной ткани, а также изучены корреляционные свойства температурного сигнала в опухоли, перифокальной и интактной ткани МЖ; установлена устойчивая тенденция к коррелируемости температурного шума в опухолевой ткани (рис. 5, 6).

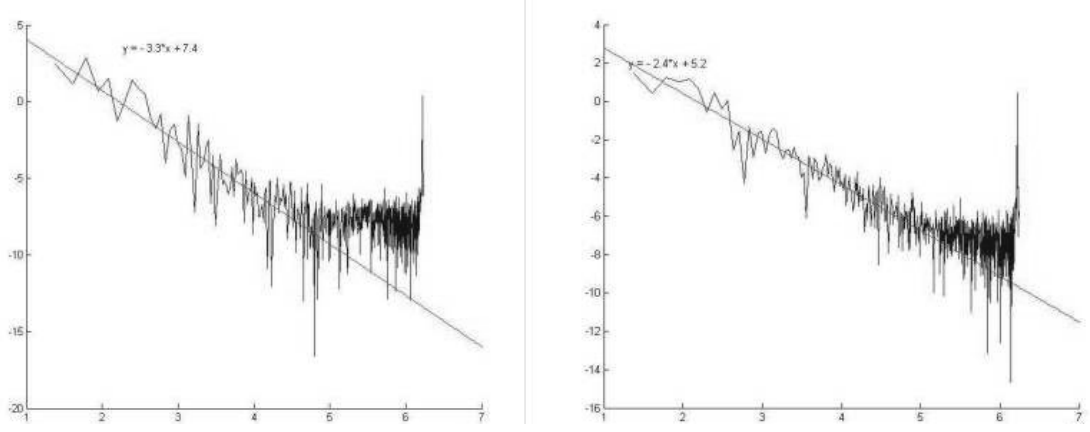
Впервые установлено, что в здоровой и прилежащих к опухоли тканях молочной железы температурные сигналы являются преимущественно антикоррелированными, а в опухоли наблюдается устойчивая тенденция к коррелируемости температурного шума.

Общеизвестно, что процессы онкогенеза тесно связаны с изменениями морфологических признаков опухолей как качественного, так и количественного характера. В медицинской практике количественные методы исследования дополняют традиционные, являясь более объективными и точными по сравнению с качественными.



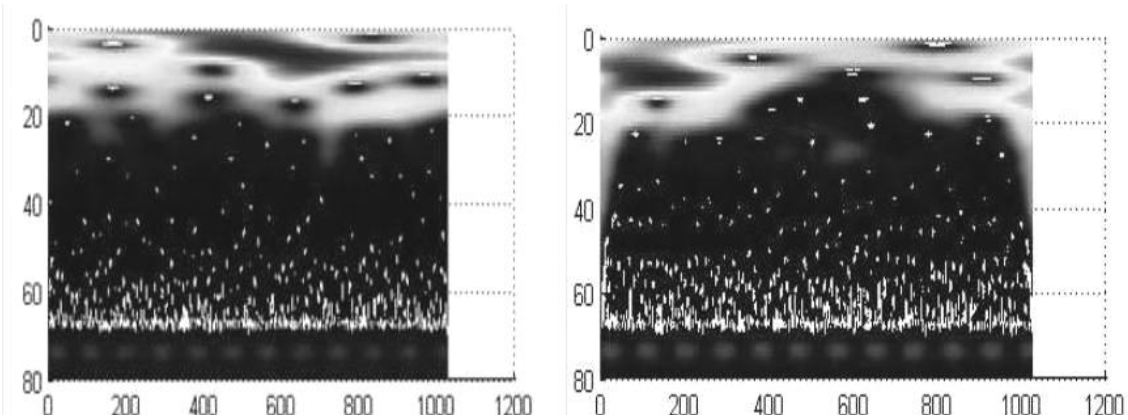
*а* *б*

*Рис. 1. Температурный образ молочных желез (а) и изолинии температуры (б)*



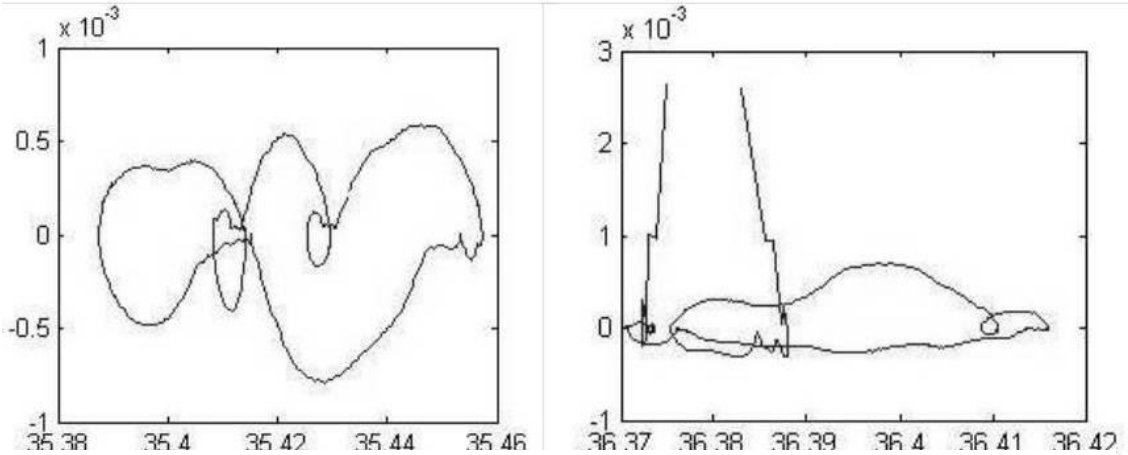

*а* *б*

*Рис. 2. Фурье-спектр температурного сигнала для здоровой (а) и пораженной (б) молочной железы*




*а* *б*

*Рис. 3. Амплитуды вейвлет-коэффициентов для здоровой (а) и пораженной (б) молочной железы*

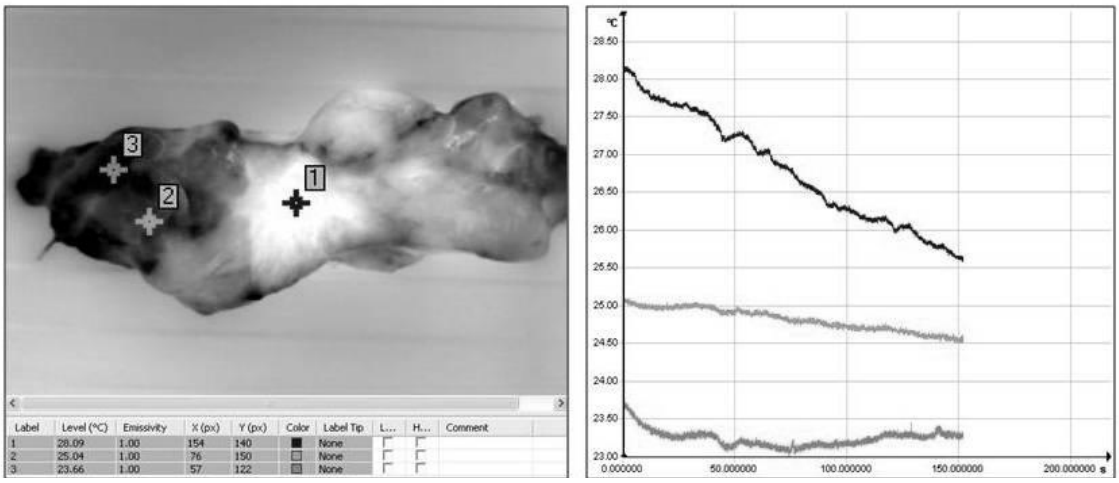



*а* *б*

*Рис. 4. Типичный фазовый портрет температурного сигнала для здоровой (нехаотичная диаграмма – а) и пораженной (хаотичная диаграмма – б) ткани молочной железы*

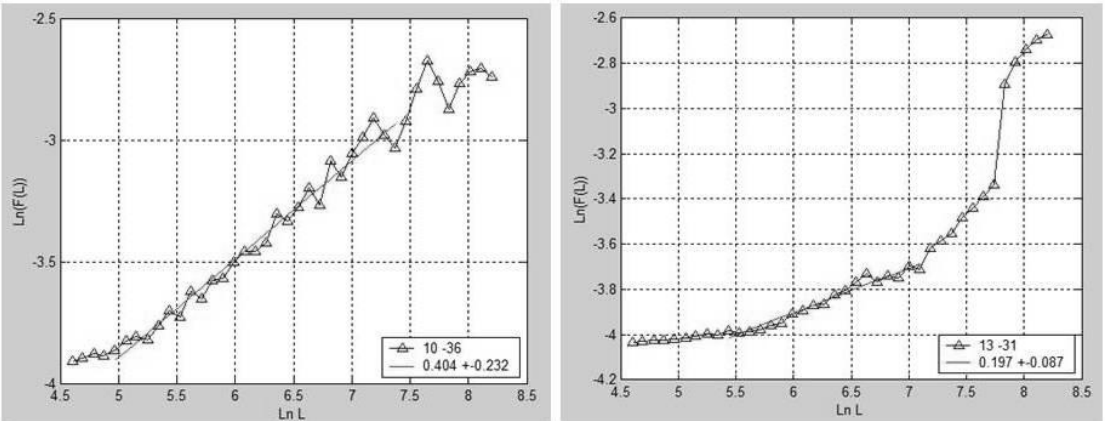
Последнее десятилетие характеризуется продвижением тех областей медицинской науки, которые связаны с разработкой современных количественных методов исследования морфологии ткани. Так, специалистами, входящими в состав трансдисциплинарной группы, освоена методика забора, подготовки и исследования биоматериала опухоли МЖ методом атомно-силовой микроскопии (АСМ, аппарат «Nano-DST»), определены оптимальные параметры для характеристики микрорельефа поверхности клеток, получены первые АСМ-образы клеток при РМЖ и соответствующие им рельефы высот для различных пространственных сечений. Глубокие и всесторонние исследования морфологических признаков онкогенеза, роли молекулярно-генетических изменений, особенностей их динамики при стадировании процесса являются важнейшими аспектами фундаментальных и клинических исследований в онкологии, направленных на решение одной из ее актуальных проблем – ранней морфологической диагностики предрака и рака.

Таким образом, критически анализируя состояние поднимаемой проблемы, реально оценивая опыт и возможности международной исследовательской группы, связывая молекулярно-морфологические признаки онкогенеза с коллективными эффектами, устанавливаемыми на основе развиваемых динамических моделей поведения ансамблей ДНК, разрабатывая экспериментальные подходы к определению инвариантов в терминах «эффективных температур» по данным ИКТ высокого пространственно-временного разрешения, представляется возможным по-новому качественно и количественно охарактеризовать закономерности онкогенеза при различных сценариях молекулярно-морфологических и функциональных изменений в тка-




*а* *б*

*Рис. 5. Распределение температуры на поверхности исследуемого образца ткани молочной железы (а) и соответствующие температурные сигналы (б)*




*а* *б*

*Рис. 6. Корреляционные свойства температурного сигнала в опухоли (а) и здоровой ткани (б) молочной железы (по данным DFA (Detrended Fluctuation Analysis)-метода)*

нях, обозначить наиболее значимые маркеры риска ОЗ, предложить оптимальные тандемы морфофункциональных методик для ранней диагностики онкопатологии и, в конечном итоге, выбрать наиболее рациональный вариант критической технологии онкологического скрининга больших групп населения.

## Библиографический список

1. Алгоритмы выявления онкологических заболеваний у населения Российской Федерации: метод. рекомендации для организаторов здравоохранения, врачей первичного звена, врачей-специалистов. – М., 2009. – 38 с.
2. *Белкин А.Н., Герасимова Е.И., Пахомова А.О.* Метод инфракрасной термографии в диагностике рака молочной железы // Материалы 44-й Всероссийской научной конференции с международным участием студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы теоретической, экспериментальной, клинической медицины и фармации», Тюмень, 2010. – С. 172.
3. Wavelet-based multifractal formalism to assist in diagnosis in digitized mammograms / *P. Kestener* [et al.] // Image Anal. Stereol. – 2001. – Vol. 20. – P. 169–174.
4. *Read J.F., Elliott R.L.* Breast thermography // Cancer, 1995; 79: 186–188; *Wright T., McGechan A.* Breast cancer: new technologies for risk assessment and diagnosis // Mol. Diagn, 2003; 7(1): 49–55.

# Диагностика функционального состояния системы микроциркуляции на основе термометрии высокого разрешения

Подтаев С.Ю., Мизева И.А., Смирнова Е.Н.

Дан краткий обзор результатов исследований системы микроциркуляции с помощью термометрии высокого разрешения. Низкоамплитудные температурные колебания на поверхности кожи возникают вследствие периодического изменения тонуса поверхностных сосудов и коррелируют с изменениями кровотока. Спектральный анализ температурных колебаний позволяет оценивать вклад различных механизмов микроциркуляторной регуляции. Результаты получены в совместной работе сотрудников лаборатории гидродинамики ИМСС УрО РАН, специалистов Пермской медицинской академии и отделения современной механики Университета науки и технологии Китая. Метод контактной термометрии прост в применении, не требует дорогостоящего оборудования и может быть использован в широкой клинической практике для скрининговой диагностики эндотелиальной дисфункции при различных патологиях.

Кровообращение в микрососудах диаметром до 100 мкм, обеспечивающих процессы обмена между кровью и тканями, называют микроциркуляцией. Более широкий подход трактует микроциркуляцию как весь комплекс процессов обмена и транспорта жидкости в тканях, отводя для внутрисосудистых процессов понятие «микрогемоциркуляция». Микроциркуляторное звено в сердечно-сосудистой системе можно определить как центральное, так как все другие звенья этой системы, по существу, призваны обеспечить основную функцию, выполняемую этим звеном, – транскапиллярный обмен. Принципиальное значение имеет оценка степени нарушений микроциркуляции при изучении патогенеза сахарного диабета, атеросклероза, синдрома Рейно, острого панкреатита и других заболеваний, так как данная система играет ключевую роль в развитии трофических нарушений. Наблюдается неуклонный рост интереса к изучению микроциркуляции (рис. 1). Необходимо отметить, что значительную часть в общем объеме публикаций занимают работы, посвященные разработке и развитию методов наблюдения и оценки состояния системы микроциркуляции [7].

Сосуды микроциркуляторного русла представляют собой своего рода тканевые «водопровод и канализацию, встроенные в стены дома», то есть тесно связаны с основой органов, состоящей из соединительной ткани. Эта конструкция известна как структурно-функциональный элемент органа или ткани. Соответственно строению структурно-функциональных элементов разных органов микроциркуляторные сосуды имеют свои особенности. Данная часть периферического органного кровеносного русла повсюду состоит из микроциркуляторных единиц типового состава. В них входят капилляры, мельчайшие артериолы и венулы, артериоло-венулярные анастомозы, метартериолы и «предпочтительные каналы» (рис. 2), а также лимфоносные сосуды. В

типичной микроциркуляторной единице имеется одна приносящая артериола, снабженная выраженным мышечным слоем, и две выносящие посткапиллярные венулы.

Для описания поведения микроциркуляторного русла традиционно привлекается понятие «сосудистый тонус» (*tonus* (лат.) – напряжение) – «общее сокращение сосуда». Факторы регуляции сосудистого тонуса вызывают сложные непериодические изменения перфузии (прохождения крови через ткань). Эти изменения могут быть зарегистрированы с использованием различных исследовательских методик. Одной из них является метод лазерной допплеровской флоуметрии (ЛДФ), широко используемый для исследования микрогемодинамики [2]. Метод основан на оптическом неинвазивном зондировании тканей монохроматическим сигналом. Отраженное от неподвижных компонентов ткани лазерное излучение не изменяет своей частоты, а отраженное от подвижных частиц (эритроцитов) имеет допплеровское смещение частоты относительно зондирующего сигнала. Спектральный анализ переменной составляющей ЛДФ-сигнала позволяет оценивать состояние сосудистого тонуса и действие механизмов регуляции кровотока в микроциркуляторном русле. В спектре колебаний кожного кровотока выделяют пять поддиапазонов, соответствующих различным факторам регуляции сосудистого тонуса [11].

*Пульсовая волна* (0,8–1,6 Гц). Амплитуда пульсовой волны, приносящейся в микроциркуляторное русло со стороны артерий, изменяется в зависимости от состояния тонуса резистивных сосудов.

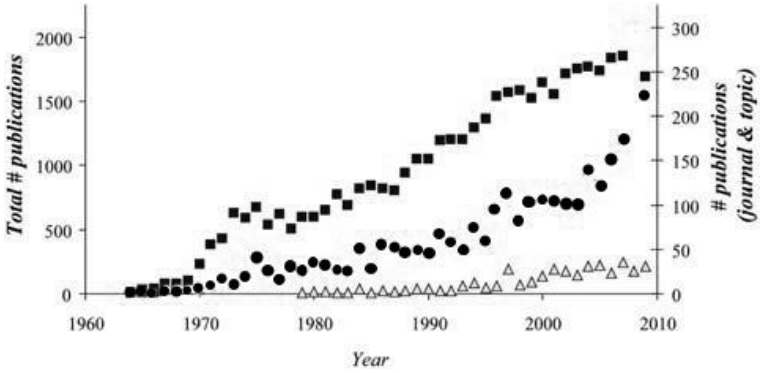
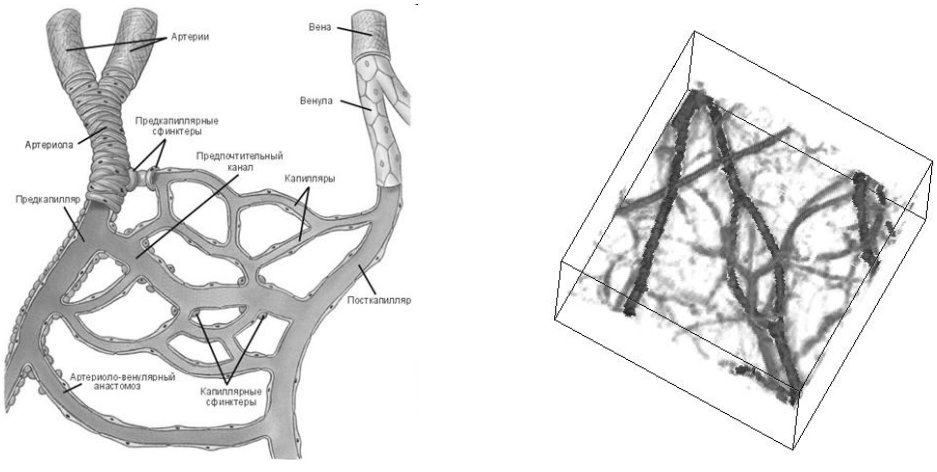



*Рис. 1. График роста количества публикаций по теме «Микроциркуляция»: ■ – все публикации, ● – биофизические исследования, ∆ – публикации, основанные на исследованиях при помощи лазерной допплеровской флоуметрии*




*а* *б*

*Рис. 2. Схема микрогемоциркуляторной единицы (а) и изображение участка микроциркуляторного звена (in vivo), полученное методом оптоакустической томографии (б) [27]*

*Дыхательная волна* (0,15–0,4 Гц) обусловлена динамикой венозного давления при легочной механической активности, присасывающим действием «дыхательного насоса». Дыхательные ритмы в системе микроциркуляции локализованы в венулах.

*Миогенные колебания* (0,07–0,15 Гц), происхождение которых связывают с локальными пейсмекерами внутри гладких мышечных волокон. Исследованию миогенных колебаний в микроциркуляторном русле посвящено преобладающее число публикаций, относящихся к изучению и практическому применению осцилляций микрокровотока.

*Нейрогенная активность* (0,02–0,052 Гц). Физиологическая природа нейрогенных колебаний связана с низкочастотными симпатическими адренергическими (в основном терморегуляторными) влияниями на гладкие мышцы артериол и артериолярных участков артериоловенулярных анастомозов (в тех участках кожи, где они имеются). Нейрогенная симпатическая активность накладывается на миогенные колебания резистивных микрососудов и подчиняет их.

*Эндотелиальная активность.* Эндотелий – однослойный пласт плоских клеток мезенхимного происхождения, выстилающий внутреннюю поверхность кровеносных и лимфатических сосудов. По современным представлениям, эндотелий – это активный эндокринный орган, самый большой в теле, диффузно рассеянный по всем тканям. Одна из функций эндотелия – синтез вазоактивных субстанций, в частности, оксида азота (NO) и простагландинов [10].

Информацию об изменениях тонуса сосудов кожи также можно получить из данных измерения кожной температуры. Долгое время в работах по инфракрасной (ИК) термометрии этим флуктуациям не придавалось большого значения и они рассматривались как шумы, которые необходимо исключить во время обработки изображений. При дальнейших исследованиях было установлено, что низкоамплитудные температурные колебания на поверхности кожи возникают вследствие периодического изменения тонуса поверхностных сосудов [13]. Установлена статистически значимая корреляция между колебаниями температуры кожи и изменениями кровотока, регистрируемыми допплеровским флоуметром [6, 12]. Это позволяет использовать регистрацию и спектральный анализ колебаний температуры на поверхности кожи для анализа механизмов регуляции тонуса сосудистой системы, обусловленных миогенной, нейрогенной и эндотелиальной активностью.

В ИМСС УрО РАН в последние годы выполнен цикл работ по разработке и апробации метода диагностики системы микроциркуляции на основе термометрии высокого разрешения. Ниже дается краткий обзор результатов исследований микроциркуляции с помощью этого метода, полученных в совместной работе сотрудников лаборатории гидродинамики ИМСС УрО РАН (руководитель – профессор П.Г. Фрик), специалистов Пермской медицинской академии и отделения современной механики Университета науки и технологии Китая, (Hefei, China, руководитель – профессор Ying He).

## Колебания кожной температуры при проведении непрямой холодовой пробы

Особый интерес представляет изучение реакции сосудистой системы на внешние воздействия – функциональные пробы. Одним из наиболее обоснованных тестов для функциональной оценки микрососудистого русла является холодовая проба, которая создает условия для выявления нарушений микроциркуляции уже на ранних этапах. В зависимости от целей исследования меняются продолжительность охлаждения, температура и объем охлаждаемой поверхности. В некоторых исследованиях описывается локальное охлаждение, однако наиболее информативным является применение холодового прессорного теста, при котором охлаждается большая поверхность кожи. Представляет интерес изучение микроциркуляторных реакций контралатеральной конечности (непрямая холодовая проба) как системного

ответа организма на холодовой прессорный тест [9]. В процессе проведения холодовой пробы кисть левой руки погружается в ванночку с водно-ледовой смесью (температура 0 °С) на 3 минуты, а регистрация температуры происходит на правой руке.

Пространственное распределение и динамику температурных изменений в некоторых случаях удобно оценивать с помощью ИК-термометрии. Пример температурных изменений на ладонной поверхности кисти во время контралатеральной холодовой пробы показан на рис. 3. Для этой демонстрации была использована ИК-камера Flir FC 5000 с разрешающей способностью по температуре 0,02 °С.

ИК-термометрия дает общую пространственную картину температурных изменений, но для получения информации о низкоамплитудных температурных колебаниях необходимо использовать дорогостоящие тепловизоры с высоким разрешением и сложные алгоритмы обработки сигналов. Контактная термометрия высокого разрешения значительно дешевле (что является важным преимуществом при широком клиническом использовании) и проще в применении. Современная электроника позволяет реализовать на практике устройства для регистрации температуры с разрешением порядка 0,001 °С. Типичные изменения температуры, зарегистрированные с помощью контактной термометрии во время непрямой холодовой пробы, показаны на рис. 4. В этом случае требуется следить за изменениями спектрального состава регистрируемого сигнала, происходящими на временах, сопоставимыми с периодом колебаний. Такие задачи выходят за рамки традиционного спектрального анализа, но хорошо решаются методами вейвлет-анализа.

Слово «вейвлет» (wavelet) означает «маленькая волна» и указывает на то, что, в отличие от традиционного спектрального анализа, в качестве эталонных сигналов используется семейство самоподобных функций, описывающих короткую осцилляцию заданной частоты вблизи заданного момента времени. При проведении исследования вейвлет заданного масштаба, как шаблон, «прикладывается» к анализируемому сигналу в самом его начале и постепенно продвигается до его конца. При этом для каждого положения вейвлета вычисляется степень соответствия (вейвлет-

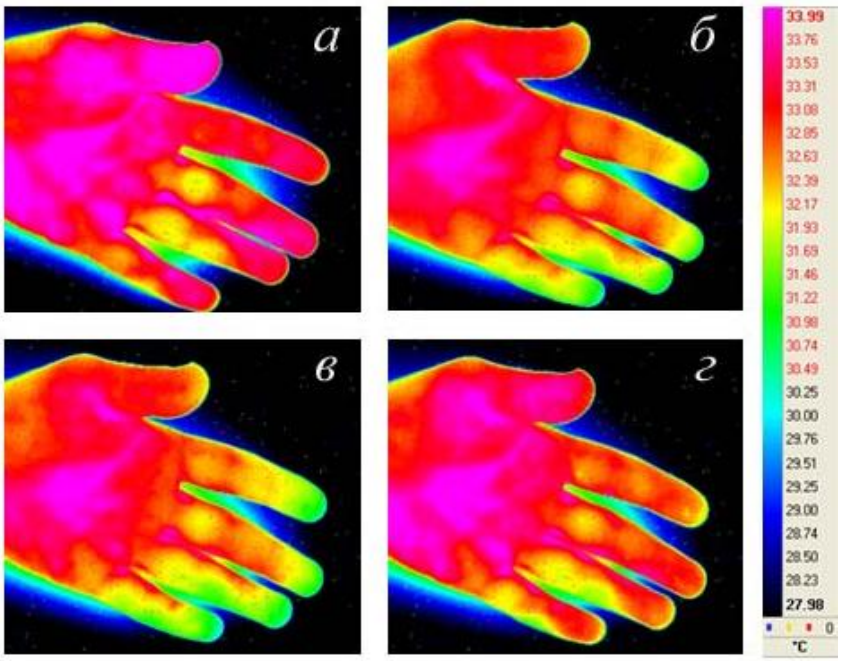



*Рис. 3. Поле температур, зарегистрированное ИК-камерой во время проведения контралатерального холодового теста:*
*а – до начала охлаждения, б – через 2 минуты после начала охлаждения,*
*в – через три минуты после начала охлаждения (максимальное охлаждение),*
*г – через 3 минуты после окончания холодового теста*

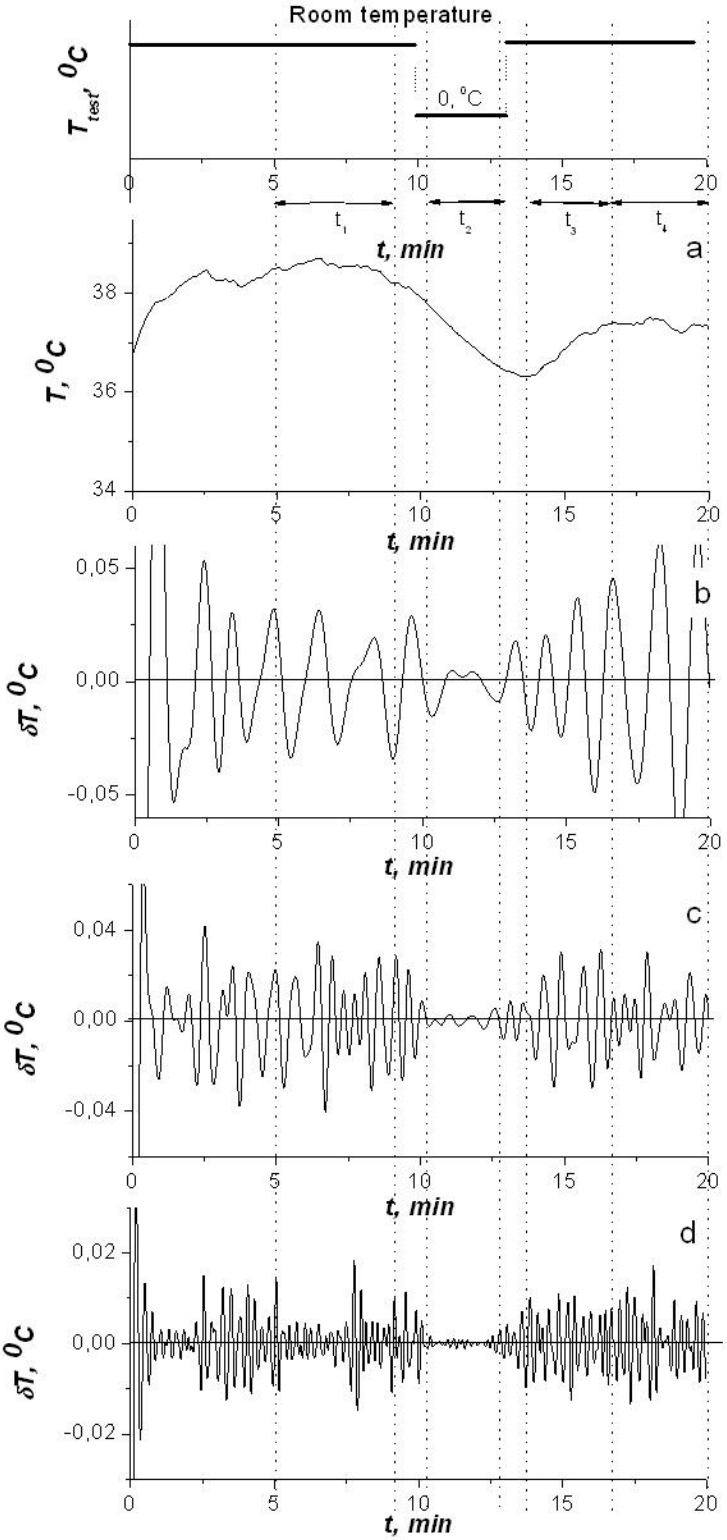



*Рис. 4. Схема эксперимента (вверху), термограмма (a) и результат вейвлет-фильтрации в различных частотных диапазонах, соответствующих эндотелиальному (b), нейрогенному (c) и миогенному (d) механизмам регуляции сосудистого тонуса*

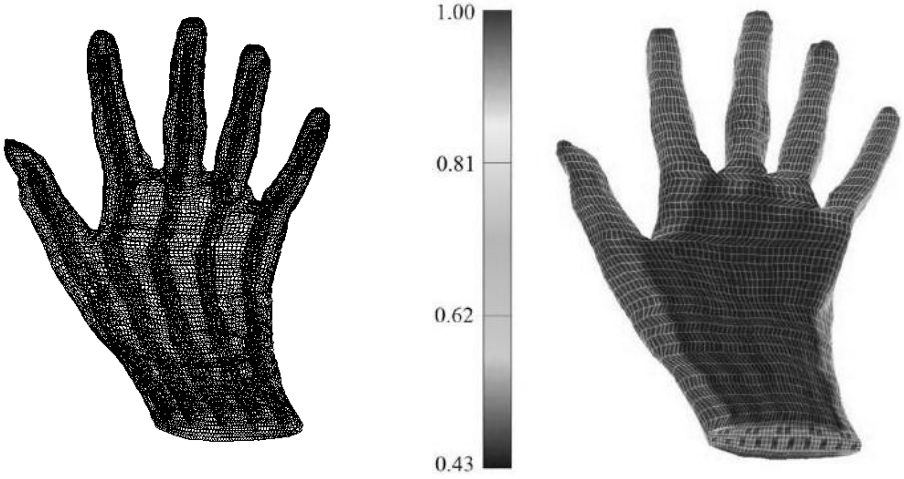
коэффициент) сигнала и вейвлета. В результате получается вейвлет-плоскость – таблица или график зависимости вейвлет-коэффициента от масштаба (частоты) и времени. На вейвлет-плоскости можно видеть, как меняется со временем спектральный состав сигнала, или узнать, в какие моменты в сигнале появлялись всплески различной продолжительности.

Подробно математические основы метода изложены в книге [4], а пример

использования в медицине приведен в статье [5]. Данным методом можно провести фильтрацию сигналов, восстанавливая по отдельности составляющие, отвечающие интервалу частот, связанных с определенным механизмом регуляции кровотока. На рис. 4 показан результат вейвлет-фильтрации термограммы (*a*) в трех частотных диапазонах, соответствующих эндотелиальному (*b*), нейрогенному (*c*) и миогенному (*d*) механизмам регуляции сосудистого тонуса.

## Математическое моделирование колебаний кожной температуры

Целью теоретического исследования является вопрос о связи колебаний тонуса сосудов в коже и тканях с поверхностной температурой. Новизна работы заключается в том, что внимание уделяется не стационарным решениям, а пульсациям поля скорости и температуры. Для решения этой задачи совместно с проф. Y. He (Китай) была построена математическая модель кисти руки человека. В решении используется магниторезонансное изображение кисти руки человека, по которому восстанавливается положение кости, ткани и основных кровеносных сосудов (рис. 5). Кровь в кисть руки поступает по артериям, протекает по сосудам микроциркуляторного звена и возвращается по венам. Течение крови в крупных сосудах задает зависящий от времени приток артериальной крови в микроциркуляторное звено, поток пульсирующий (в нем сохраняется «память» о пульсациях сердца), но на выходе из микроциркуляторного звена давление постоянно, что хорошо согласуется с натурными наблюдениями. Для течения крови в крупных сосудах (диаметр более 1 мм) решается одномерная задача о потоке идеальной жидкости по цилиндрическому каналу с эластичными стенками. В микроциркуляторной системе плотность капилляров составляет величину порядка 200 микрососудов на 1 мм$^3$, поэтому решение задачи для каждого выделенного сосуда очень сложно и не имеет практического смысла. Эффективным методом упрощения течения крови в микроциркуляторном русле является приближение перфузии через пористую среду, в котором ткань рассматривается как жесткий матрикс. Для решения задачи о потоке в микроциркуляторном русле используется уравнение Дарси. Плотность микрососудистой сетки может отличаться на порядок в разных тканях, с этим связан параметр проницаемости пористой среды (таблица). При изучении процесса теплопереноса в живых тканях используется уравнение Пенне [11]. Тепло может продуцироваться из-за процесса метаболизма, но в данной модели мы его не учитываем. Важным допущением этой модели является то, что весь теплообмен между кровью и тканью происходит в капиллярах. Охлаждение на поверхности кожи осуществляется за счет теплоизлуче-




*а* *б*

*Рис. 5. Расчетная сетка и поле температур*

**Значения параметров, использованных в численных исследованиях**

| Параметр | Дермис | Эпидермис | Сухожилия | Ткань | Кости | Кровь |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Теплоемкость, $c_c$ (Дж/кг К) | 3391 | 3391 | 3768 | 3500 | 2094 | 3300 |
| Плотность, ρ (кг/м$^3$) | 1200 | 1200 | 1270 | 1250 | 1418 | 1100 |
| Теплопроводность, λ (Вт/м К) | 0,53 | 0,21 | 0,35 | 0,36 | 2,21 | 0,5 |
| ω – перфузия ткани кровью, (мл/мл/мин) | 24/100 | 0 | 3,43/100 | 24/100 | 2/100 | |

ния, конвекции и испарения. При задании граничных условий на поверхности кожи эти механизмы учтены. Подробно вывод уравнений дан в работе [8].

Под колебаниями сосудистого тонуса в МЦР мы понимаем изменения диаметра артериол, включение шунтирующих капилляров, изменение количества активных капилляров путем открытия или закрытия артериоловенулярных анастомозов. Все это приводит к изменению эффективной пористости ткани. Существенным недостатком такой модели является невозможность отследить, какой именно из трех вышеперечисленных механизмов привел к изменению потока крови через МЦР, тем не менее он позволяет смоделировать изменение температуры на поверхности кожи.

Положив изменение пористости по гармоническому закону в отсутствие контралатерального холодового воздействия, линейное убывание пористости во время пробы, можно воспроизвести результаты эксперимента с контралатеральной холодовой пробой (рис. 6).

До 600-й секунды система находится в покое, пористость тканей меняется по гармоническому закону (моделирование вазомоций), в момент времени 600 с – начало холодовой пробы, которое смоделировано уменьшением проницаемости среды по линейному закону. На 720-й секунде система начинает возвращаться в начальное состояние.

Работа по численному исследованию полей температур и скорости кровотока находится на начальном этапе, и развитие данного подхода позволит смоделировать влияние функциональных проб на систему микроциркуляции. Предполагается провести работы по изучению распространения колебаний различной частоты, исследовать поле скорости течения крови и поверхностной температуры кожи кисти в зависимости от частоты и амплитуды колебаний.

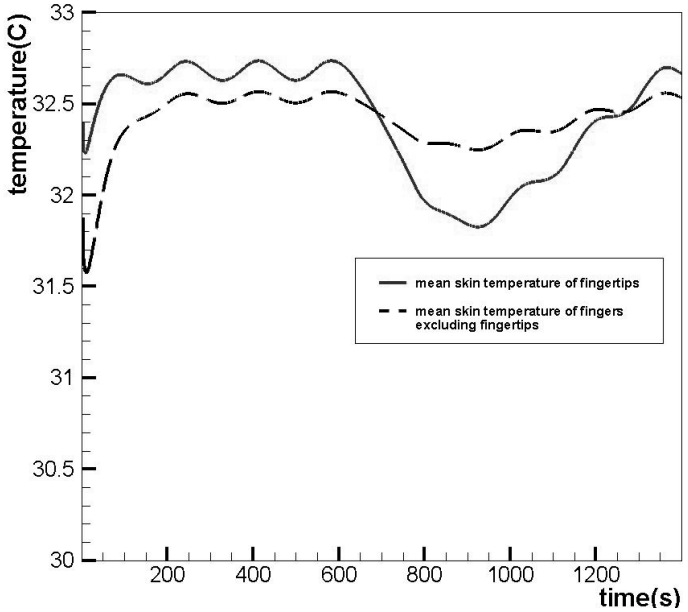



*Рис. 6. Поведение кожной температуры на второй (сплошная линия) и на первой фаланге (пунктирная линия) указательного пальца*

## Клинические приложения метода

Исследования по клиническому применению метода сфокусированы на разработке диагностической методики оценки нарушений регуляции сосудистого тонуса при сахарном диабете (СД). Это заболевание называют чумой XXI века, и по некоторым оценкам, к 2030 году в мире будет насчитываться более 439 миллионов человек в возрасте от 20 до 79 лет, больных диабетом, и в два раза больше – с синдромом нарушения толератности к глюкозе.

Основной причиной инвалидизации и летальности при СД являются микро- и макрососудистые осложнения, приводящие к развитию сердечно-сосудистых заболеваний [1]. Диагностика диабетических осложнений в настоящее время осуществляется только на клинической стадии, а лечение в большинстве случаев направлено на уменьшение прогрессирования ангиопатий. Можно предположить, что стадия обнаружения нарушения толерантности к глюкозе (НТГ) является той стадией, когда запускается процесс сосудистых изменений и проявляется эндотелиальная дисфункция. Именно эндотелию принадлежит главная роль в поддержании тонуса сосудов, гемостаза и развитии ремоделирования и местного воспаления. Само расположение эндотелия на границе с потоком крови делает его уязвимым к воздействию различных факторов риска развития сосудистых осложнений, в том числе к гипергликемии [1]. Для оценки эндотелиальной дисфункции на ранних этапах глюкометаболических нарушений использована методика непрямой холодовой пробы.

Обследование пациентов проходило в Клинике эндокринологии и диабета г. Перми. Группу СД составили пациенты с СД 2-го типа в возрасте 46–65 лет со средней длительностью заболевания 10±1 год; группу НТГ – 18 пациентов в возрасте 31–60 лет. Группа контроля состояла из практически здоровых мужчин и женщин в возрасте от 39 до 60 лет. В исследование не включались пациенты с известными осложнениями в работе сердечно-сосудистой системы (инфаркт миокарда, стенокардия, нарушение мозгового и периферического кровообращения) и выраженными микрососудистыми расстройствами (ретинопатия 2-й и 3-й стадии, протеинурия).

Для оценки вклада различных механизмов регуляции сосудистого тонуса была выбрана величина среднеквадратичных амплитуд колебаний кожной температуры в соответствующем частотном диапазоне. Среднеквадратичные амплитуды колебаний вычислялись в четырех временных интервалах (см. рис. 4). Первый интервал $t_1$ – 300–500 с выбран с учетом выхода системы на стационарный тепловой режим и характеризует спокойное состояние человека. Среднеквдратичные амплитуды колебаний, полученные за этот период, использовались как исходный уровень для вычисления относительных изменений амплитуд во время и после пробы. Реакция на холодовую пробу регистрировалась во втором интервале $t_2$ (650–730 с). После холодового воздействия было фиксировано 2 интервала для оценки динамики восстановительного процесса: интервал $t_3$ – первые 3 минуты после холодовой пробы (830–960 с) и через 6 минут после начала воздействия – $t_4$ (960–1200 с). В контрольной группе амплитуда колебаний кожной температуры во время функциональной нагрузки в эндотелиальном, нейрогенном и миогенном диапазонах достоверно снижалась и восстанавливалась до исходных значений в течение 3 минут.

У пациентов с СД реакция на холодовую пробу отличалась от результатов контрольной группы. В диапазонах частот, соответствующих эндотелиальному и миогенному механизму регуляции сосудистого тонуса, после снижения амплитуды колебаний кожной температуры не восстанавливались, увеличение амплитуд непосредственно после пробы носило недостоверный характер, и не происходило увеличения амплитуд колебаний в течение последующих 10 минут после пробы. В нейрогенном диапазоне реакция сравнима с реакцией здоровых людей. Результаты группы НТГ

имели сходный характер с результатами группы СД в эндотелиальном и миогенном частотных диапазонах.

Таким образом, учитывая отсутствие статистически значимых различий между амплитудами колебаний кожной температуры во время и после пробы в эндотелиальном и миогенном диапазонах, можно заключить, что нарушения механизмов вазодилатации у больных СД и пациентов с НТГ имеют сходный характер. У пациентов НТГ имеются характерные для диабета изменения в эндотелиальном диапазоне колебаний амплитуд кожной температуры с сохранением физиологической реакции в нейрогенной части. Эти данные позволяют предположить, что эндотелиальная дисфункция имеет место на доклинической стадии диабета и в первую очередь проявляется поражением эндотелиальной части регуляции. При прогрессировании диабета патологический процесс усугубляется нарушением нейрогенных и миогенных эффектов вазодилатации.

## Заключение

Метод контактной термометрии прост в применении, не требует дорогостоящего оборудования и может быть использован в широкой клинической практике для скрининговой диагностики как самостоятельно, так и в комплексе с другими методами оценки микроциркуляции.

Проведенные исследования подтвердили высокую чувствительность метода для выявления эндотелиальной дисфункции. Нарушение реакции на холодовую прессорную пробу в эндотелиальном диапазоне частот может быть признаком нарастающей эндотелиальной дисфункции и служить ранним предиктором дальнейших сосудистых расстройств.

## Библиографический список


1. *Балаболкин М.И.* Роль гликирования белков, окислительного стресса в патогенезе сосудистых осложнений при сахарном диабете // Сахарный диабет. – 2002. – № 4. – С. 8–17.
2. *Крупаткин А.И.* Лазерная допплеровская флоуметрия микроциркуляции крови: руководство для врачей / под ред. *А.И. Крупаткина, В.В. Сидорова* / ОАО «Издательство «Медицина», 2005. – 256 с.
3. *Попов А.В., Подтаев С.Ю., Фрик П.Г., Ершова А.И., Жукова Е.А.* Исследование низкоамплитудных колебаний кожной температуры при проведении непрямой холодовой пробы // Региональное кровообращение и микроциркуляция. – 2011. – № 10-1. – С. 89–94.
4. *Фрик П.Г*. Турбулентность: подходы и модели: монография. Изд. 2-е, испр. и доп. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2010. – 342 с.
5. *Фрик П.Г., Подтаев С.Ю., Попов А.В., Думлер А.А., Степанов Р.А.* Оценка состояния сердечно-сосудистой системы на основе вейвлет-анализа данных неинвазивных измерений // Вестник Пермского научного центра. – 2010. – № 1. – С. 9–19.
6. *Bandrivsky A., Bernjak A., McClintock P., Stefanovska A.* Wavelet Phase Coherence Analysis: Application to Skin Temprature and Blood Flow // Cardiovasc Eng. 2004. – № 4. – P. 89–93.
7. *Daly S.M., Leahy M.J.* «Go with flow»: a review of methods in blood flow imaging // J. Biophotonics. 2012. – № 1. – P. 39.
8. *He Y., Himeno R., Liu H., Yokota H., Sun Z.G.* Finite element numerical analysis of blood flow and temperature distribution in three-dimensional image-based finger model // International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. – 2008. – Vol. 18. – No. 7/8. – P. 932–953.

9. *Isii Y., Matsukawa K., Tsuchimochi H., Nakamoto T.* Ice-Water Hand Immersion Causes a Reflex Decrease in Skin Temperature in the Contralateral Hand // J. Physiol. Sci. – 2007. – Vol. 57. – No. 4. – P. 241–248.
10. *Kvernmo H.D., Stefanovska A., Bracic M., Kirkeboen K.A., Kvernebo K.* Spectral analysis of the laser Doppler perfusion signal in human skin before and after exercise // Mic. Res. – 1998. – № 56. – P. 173–182.
11. *Pennes H.* Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm // Journal of Applied Physiology. – 1948. – Vol. 1. – No. 2. – P. 93–122.
12. *Podtaev S., Morozov M., Frick P.* Wavelet-based correlations of skin temperature and blood flow oscillations // Cardiovasc Eng. – 2008. – № 8. – P. 185–189.
13. *Shusterman V., Anderson K.P., Barnea O.* Spontaneous skin temperature oscillations in normal human subjects // Am. J. Physiol. Regulatory Integrative Comp. Physiol. – 1997. – № 273. – P. 1173–1181.
14. *Zhang H.F., Maslov K., Wang L.V.* In vivo imaging of subcutaneous structures using functional photoacoustic microscopy // Nature Protocols. – 2007. – № 2. – P. 797–804.

# Изучение ионных, молекулярных и клеточных механизмов формирования электрического импеданса в биологических жидкостях и тканях

Зуев А.Л., Мишланов В.Ю., Судаков А.И., Шакиров Н.В.

Проведено экспериментальное изучение основных физических закономерностей биоэлектрического импеданса в проводящих внутриклеточных и внеклеточных биологических жидкостях, содержащих также различные белковые молекулы, клеточные элементы и микробы, с целью разработки оригинального лабораторного импедансометрического анализатора для исследования состава крови, тканевой жидкости и конденсатов, определения концентрации в них органических элементов и скорости биохимических и иммунных реакций.

В современной медицине одним из важнейших инструментов для диагностики и контроля за состоянием организма и течением патологических процессов является анализ молекулярного состава и физико-химических свойств внутриклеточной и внеклеточной (интерстициальной и сосудистой) биологических жидкостей. В настоящее время с этой целью широко применяются такие методы, как биохимический, иммуноферментный, иммунофлюоресцентный, радиоимунный и пр. Однако большинство из них имеют высокую себестоимость и требуют продолжительного времени, наличия хорошо оснащенных лабораторий, высококвалифицированного медицинского персонала, дефицитных и дорогостоящих реагентов и материалов. Поэтому разработка новых методов исследования содержания в биологических жидкостях различных составных компонент с возможностью мониторинга динамики изменения их концентрации при развитии различных заболеваний может иметь большое практическое значение для их диагностики. Таким методом кондуктометрической диагностики клеточного состава крови вполне может стать реографический, основанный на регистрации биоэлектрического импеданса (электрического сопротивления биологических тканей и сред переменному току).

В последние годы импедансометрические методы неинвазивной диагностики внутренних органов человеческого организма приобретают все большую популярность, не в последнюю очередь благодаря своей исключительной доступности, простоте и дешевизне. Так, областями современного применения этих методов в клинической практике являются исследование состояния сердечно-сосудистой системы (реокардиография и аналогичные методики) [1–4]; дифференциальная диагностика заболеваний паренхиматозных органов (печень и др.); изучение водных секторов организма человека; определение жировой и костно-мышечной массы тела человека [5] и др.

Как известно, электрическим импедансом называется полное (комплексное) сопротивление среды переменному току, состоящее из активного (омического) и реактивного (емкостного) слагаемых. Принципиальная особенность биологических тканей заключается в том, что они представляют собой весьма сложные по химическому составу многокомпонентные среды, значительно различающиеся по физическим ха-

рактеристикам, в том числе по электропроводным и диэлектрическим свойствам. Токопроводящие свойства характерны для всех биологических внеклеточных жидкостей на основе растворов электролитов (плазма крови, интерстициальная жидкость, желчь). В них свободные ионы, обеспечивающие токи проводимости, образуются за счет диссоциации неорганических солей и белковых молекул. Основными катионами являются соли натрия, калия, кальция и, в меньшей концентрации, других одновалентных и двухвалентных металлов, анионами – хлориды и гидрокарбонаты. Диэлектрические свойства растворов электролитов в основном определяются характерными временами релаксации зарядов и явлениями поляризации – ориентационной дипольной поляризацией молекул диэлектрика-растворителя (воды) и электролитической концентрационной поляризацией раствора вблизи электродов.

В реальных биологических жидкостях, таких как кровь, содержащая различные структурные диэлектрические компоненты (например, органические липидные или белковые молекулы, клеточные комплексы и пр.), появляется дополнительная макроструктурная поляризация, при которой положительные и отрицательные ионы, перемещаясь под действием внешнего электрического поля в противоположных направлениях, доходят до поверхности этих непроницаемых для них объектов, где и скапливаются, создавая дополнительные дипольные моменты. Поскольку времена релаксации макроструктурной поляризации не очень велики (~$10^{-3}$–$10^{-8}$ с), на соответствующих низких частотах в таких биологических средах проявляется значительное реактивное (емкостное) сопротивление, вносящее в свой вклад в биоимпеданс. Вследствие этого удельное сопротивление крови, содержащей, кроме форменных элементов, растворы белков, жиров и полисахаридов, оказывается существенно выше сопротивления электролитических физиологических растворов. Кроме того, воспаление биологических тканей сопровождается повреждением и гидратацией клеток, что приводит к изменению емкости клеточных и внутриклеточных мембран. Степень активности воспалительных процессов коррелирует с содержанием в крови лейкоцитов и молекул белков, обладающих характерной электрической проводимостью. Поэтому анализ изменений проводящих и диэлектрических свойств биологических жидкостей (таких как кровь, желчь, интерстициальная жидкость и пр.) является весьма перспективным в медицине для оценки структуры, состояния и жизнеспособности тканей, а также определения интенсивности протекающих в них биологических процессов.

Целью настоящего исследования являлось построение адекватной биофизической модели процессов, связанных с регистрацией электрического импеданса в проводящих модельных и биологических жидкостях, содержащих заряженные или диэлектрические белковые и клеточные включения и комплексы; экспериментальное изучение основных физических зависимостей параметров биоимпеданса от свойств и состава органических жидкостей в широком диапазоне частот зондирующего переменного тока; разработка оригинального лабораторного импедансометрического анализатора, измерительных кювет и методик лабораторного анализа для исследования биохимического состава крови и тканевой жидкости; создание программных алгоритмов расчета концентрации содержания органических элементов в биологических жидкостях, скорости протекания в них процессов седиментации, биохимических и иммунных реакций; повышение точности и надежности определения основных показателей жизнедеятельности биологических тканей по данным импедансометрии.

## Материалы и методы

### *Электроимпедансный анализатор*

Многоканальный полуавтоматический прибор предназначен для измерения полного сопротивления (импеданса) и углов фазового сдвига тока и напряжения в биологических жидкостях в широком диапазоне изменения зондирующей частоты и

времени измерения [6]. Прибор создан на базе АЦП-ЦАП Zet-210 с добавленными электронными платами усилителей, генератора, фазоанализатора и мультиплексора аналоговых сигналов. Подключение прибора осуществляется через порт «USB-2» к персональному переносному компьютеру-ноутбуку (рис. 1). Дополнительного источника питания для прибора не требуется. Для проведения более точных измерений прибор первоначально нужно прогреть не менее 10 минут, рекомендуется отключать блок питания ноутбука и работать на аккумуляторе, поскольку блок питания может создавать значительные помехи.

***Основные технические характеристики прибора:***

– разрядность АЦП – 16 бит;

– разрядность ЦАП – 14 бит;

– питание прибора +5 В от порта USB-2 с током потребления < 500 мА через USB-2 порт компьютера;

– количество каналов (ячеек) регистрации импеданса и фазового угла – 8;

– диапазон измерения величины импеданса – от 10 Ом до 100 кОм (разбит на 2 поддиапазона);

– диапазон измерения угла фазового сдвига – от 0 до 90°;

– диапазон зондирующих частот – от 10 до 30 000 Гц;

– величина зондирующего тока – от 0,05 до 5 мА;

– время измерения каждой ячейки – от 1 до 60 с;

– общее время измерения в каждом опыте – до 480 с;

– максимальная частота опроса регистрируемых данных в опыте – 33 точки в секунду (при этом производится отбраковка сбойных точек и усреднение по реально замеренным 167 000 точкам);

– погрешность прибора – от 0,01 до 2 % в зависимости от диапазона измерения импеданса и угла;

– установка параметров измерения (частоты, тока, времени измерения ячейки, общего времени измерения, частоты регистрации) производится программно с помощью файла управления;

– вывод результатов измерения выполнен в виде графиков и текстовых таблиц с указанием номера ячейки, частоты зондирования и количества точек усреднения данной ячейки за все время измерения в опыте.

***Измерительные ячейки и электроды***

Измерения проводимости исследуемых модельных жидкостей проводилось в специальных измерительных ячейках (микрокамерах) в виде пластиковых трубочек длиной 18 мм и внутренним диаметром 1,2 мм. Объем микрокамеры составлял

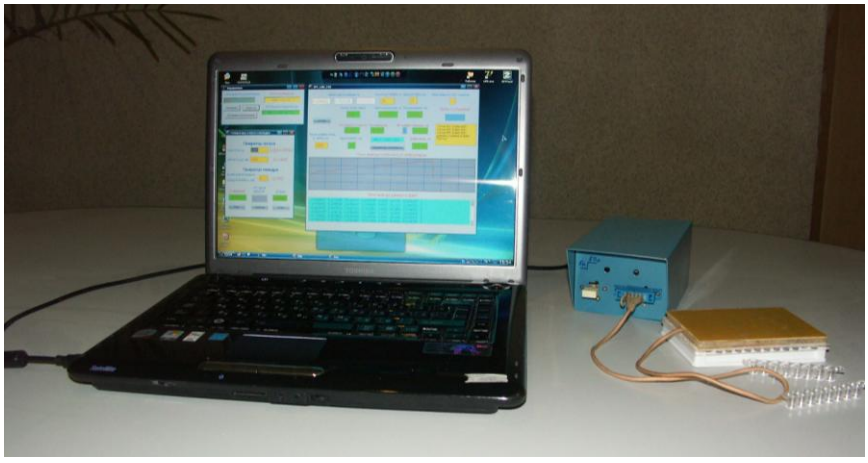


*Рис. 1. Лабораторный электроимпедансный анализатор (ноутбук, измерительный блок, иммунологический планшет)*

20,35 мкл. Отдельное внимание было уделено тщательности заполнения микрокамер тестируемой жидкостью, для чего использовались ячейки как с двумя, так и с тремя выходными отверстиями. В первом случае одно из отверстий использовалось для заполнения камеры, а второе – для регулировки ее равномерного заполнения. Во втором случае камера имела дополнительное центральное отверстие, конгруэнтное к носику пипетки-дозатора, для ее заполнения биологической жидкостью и два боковых, предназначенных для регулировки ее равномерного заполнения. На концах микрокамеры закреплялись металлические (стальные или нихромовые) электроды сложной цилиндрической и конусной формы, внешние концы которых представляли собой воронку для плотного прилегания носика микропипетки, а внутренние концы имели конусную форму для предотвращения вытекания жидкости во время процедуры измерения. Перед измерениями камеры тестировались на проводящих жидкостях с хорошо изученным и известным удельным сопротивлением (такими, как растворы NaCl), измеренные значения импеданса сравнивались с расчетными для данной геометрии рабочих ячеек.

В клинических условиях измерение параметров импеданса исследуемых биологический жидкостей производится в ячейках стандартного иммунологического планшета, широко применяемого в различных областях клинической медицины. Иммунологический планшет представляет собой выполненные из пластика и соединенные между собой плоскодонные лунки объемом 300 мкл. Планшет состоит из 96 лунок, расположенных по 8 штук в виде отдельных 12 иммунологических стрипов, фиксируемых в специальной закрепляющей рамке. Измерительные датчики находятся в крышке иммунологического планшета. Крышка планшета выполняется из текстолитовой платы, размером 125×90 мм, имеющей с одной стороны выступающие из нее проволочные вертикальные парные электроды для 8 лунок пластикового иммунологического планшета. Все 16 электродов имеют длину 5 мм, расположены в одном ряду и выполнены из жесткого нихромового провода диаметром 1 мм (первая ячейка планшета находится в левом верхнем вертикальном ряду). Расстояние между двумя парными электродами для одной лунки 3 мм. Расположение электродов позволяет их помещение сверху в лунки иммунологического планшета без усилия или касания электродов стенок лунки планшета. Измерительные датчики с помощью кабеля с разъемом подключается к измерительному блоку.

***Исследуемые жидкости***

Исследованы различные концентрации растворов проводящих жидкостей: хлорида натрия NaCl (9, 20, 40, 70, 100 г/л); хлорида калия KCl (4,1, 5,1 ммоль/л); хлорида кальция $CaCl_2$ (2,0, 2,5, 3,0 ммоль/л); сульфата магния $MgSO_4$ (0,5, 0,8, 1,0 ммоль/л); растворы глюкозы в 0,9 %-ном NaCl (4, 5, 14, 26, 56 ммоль/л); растворы альбумина в 0,9 %-ном NaCl (63, 67, 70, 71, 80, 90, 100 г/л); растворы иммуноглобулина в 0,9 %-ном NaCl (6,5, 10, 16, 40, 60, 100 г/л); растворы общего холестерина в 0,9 %-ном NaCl (2,59, 3,1, 3,62, 4,14, 4,65 ммоль/л); растворы альфа-холестерина в 0,9 %-ном NaCl (0,423, 0,564, 0,705, 0,846, 0,987, 1,128, 1,269, 1,410 ммоль/л); триглицеридов (нейтральных жиров) в 0,9 %-ном NaCl (0,228, 0,684, 0,912, 1,140, 1,596, 1,824, 2,052 ммоль/л). Холестерин в концентрации 200 мг/дл (5,17 ммоль/л), альфахолестерин в концентрации 54,6 мг/дл (1,41 ммоль/л), и калибратор «Триглицериды» в концентрации 200 мг/дл (2,28 ммоль/л) были предоставлены в тестовом наборе для расчета концентраций этих препаратов фирмы Human.

Исследована сыворотка крови 22 больных ишемической болезнью сердца (ИБС) в форме нестабильной (прогрессирующей) стенокардии, в период стационарного лечения в ГАУЗ ПК Городская клиническая больница № 4 (г. Пермь), 20 больных множественной миеломой (ММ), в период стационарного лечения в кардиологическом отделении МУЗ Пермская краевая клиническая больница (г. Пермь). Возраст боль-

ных ИБС от 53 до 82 лет, среди них 12 женщин и 10 мужчин. Возраст больных ММ – 40–75 лет, 7 женщин, 13 мужчин. 6 больных ММ имели несекретирующий вариант, 14 – вариант G. Для сравнения с результатами импедансного исследования определялись концентрация общего белка в сыворотке крови биуретовым методом, концентрация глюкозы – глюкозооксидазным методом. Определение общего холестерина, альфа-холестерина, триглицеридов осуществляли с применением тестовых наборов фирмы Human. Средняя величина концентрации IgG составила 24,0±22,80 г/л, вариационный размах – от 1,8 до 68,61 г/л.

***Методика измерений***

Органические вещества брались из тестового набора для биохимического анализа (ампулы объемом 100 мл, содержащие некоторое количество препарата определенной концентрации) и разводились физиологическим раствором в соотношениях долей по объему 90:10, 80:20, 70:30 и т.д. Измерения проводились не менее чем для 3 образцов каждой концентрации на 6 различных частотах (20, 100, 1, 5, 10, 20 кГц), значения модуля и фазового угла импеданса усреднялись по всем образцам для каждой частоты. Зондирующий ток имел синусоидальную форму, амплитудная сила тока составляла 0,03 мА. Напряжение тока в цепи варьировалось в зависимости от импедансной нагрузки объекта (1–10 кОм) от 0,3 до 3 В. Время одного измерения 3 с (что при частоте дискретизации (оцифровки) АЦП 192 кГц давало почти 600 000 точек). Погрешность измерений < 0,1 %. Строились дисперсионные зависимости модуля и фазового угла от частоты и зависимости параметров импеданса от концентрации органического вещества.

Программное обеспечение на языке «Delphi» для операционных систем «Windows XP» и «Windows 7» имеет удобный пользовательский интерфейс современного дизайна, обеспечивающий учет обследуемых пациентов с созданием соответствующей базы данных по параметрам: ФИО, возраст, диагноз, дата обследования, результаты обследования. Объем базы данных не менее 250 000 пациентов. Программное обеспечение позволяет проводить последовательное измерение электрического импеданса в каждой из 8 лунок иммунологического пластикового планшета сразу для 8 пациентов с фиксацией результатов измерения, расчетом соответствующих электрических параметров по специальным математическим формулам и автоматическим внесением результатов в базу данных. Программное обеспечение позволяет вывести результаты измерений и расчетов на экран и/или на печать с указанием полных сведений из базы данных дифференцированно по дате исследования и конкретной фамилии пациента из базы данных.

## Результаты измерений

Измерения показали, что, так же, как для чисто проводящих растворов солей хлорида натрия, хлорида калия, хлорида кальция, сульфата магния, модульное значение электрического импеданса биологических растворов уменьшается в зависимости от увеличения частоты зондирующего переменного электрического тока. При достижении частоты 5 кГц значения модуля импеданса уже перестают изменяться и остаются примерно постоянными. Одновременно наблюдается и уменьшение фазового угла, который на высоких частотах (более 5 кГц) составляет всего ~1–2 градуса. Это свидетельствует о том, что на высоких частотах электрическое сопротивление жидкости определяется только лишь активным (омическим) сопротивлением, а роль емкостной составляющей сопротивления становится пренебрежимо мала. Характер же зависимости модульной величины импеданса от концентрации биологического компонента определяется его электрическими свойствами. Выяснилось, что можно различить два типа биологических жидкостей, отличных по поведению удельного сопротивления.

В первую группу входят растворы тех веществ, молекулы которых не обладают электрическим зарядом и являются диэлектриками: например, глюкозы или липидов (сложных эфиров глицерина и одноосновных жирных кислот), в частности нейтральных жиров, как триглециридов, поступающих в организм с пищей, синтезирующихся в жировой ткани, печени и кишечнике и являющихся главным источником энергии для клеток. В этих растворах (жиры + водный раствор хлорида натрия NaCl) увеличение концентрации триглециридов при сохранении общего объема раствора означает одновременное уменьшение концентрации ионов хлорида натрия, что приводит к значительному (в несколько раз) повышению активного (омического) сопротивления раствора (рис. 2). В результате появляется возможность уверенного (с относительно большой точностью) определения концентрации триглециридов в таких растворах по значениям их электрического импеданса.

Во вторую группу входят растворы тех веществ, молекулы которых сами обладают электрическим зарядом и способны вносить дополнительный вклад в ионную проводимость растворителя (физиологического раствора NaCl): растворы общего холестерина, альфа-холестерина, альбумина, иммуноглобулина. В этих растворах, при росте в них концентрации белка, увеличение активного сопротивления за счет уменьшения концентрации ионов хлорида натрия компенсируется дополнительной ионной проводимостью, создаваемой самими белковыми молекулами. В результате общее сопротивление (модуль импеданса) таких растворов в целом или не меняется, или чуть-чуть увеличивается или уменьшается, в зависимости от конкретного вещества (рис. 3). Поэтому однозначное определение концентрации белков в таких растворах по значениям их активного сопротивления оказывается невозможным.

Однако на низких частотах – от 20 до 10 000 Гц (в так называемой области альфа-дисперсии электрического импеданса), вклад емкостной составляющей сопротивления, тем не менее, не является малым (значения фазового угла доходят до 20–30 градусов). При этом обнаружено, что зависимости фазового угла от частоты оказались весьма специфичными для каждой биологической жидкости (рис. 4–7) и, следовательно, их вид может быть использован для идентификации и расчетов концентрации этих веществ как в монорастворах, так и в смешанных растворах биологических соединений и сыворотке крови человека при различных заболеваниях. Однако для реализации этой возможности и определения в клинической практике концентраций биологических веществ по параметрам их емкостного сопротивления требуется построение математических моделей и эквивалентных электрических схем замещения для расчета активной и емкостной проводимости, индивидуальных для каждого биологического вещества.

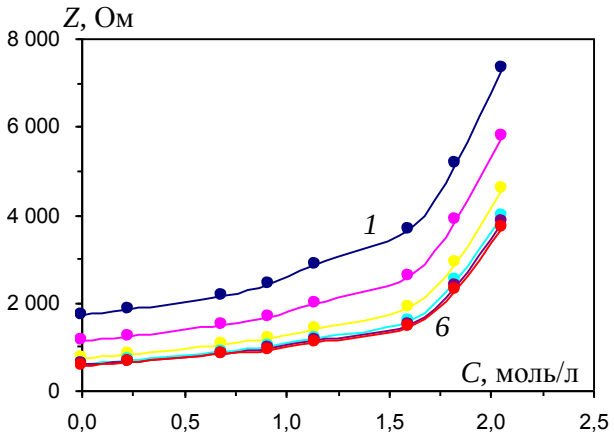



*Рис. 2. Зависимости модуля импеданса от концентрации триглицеридов при частоте 20 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 5 кГц, 10 кГц, 20 кГц (кривые 1–6)*

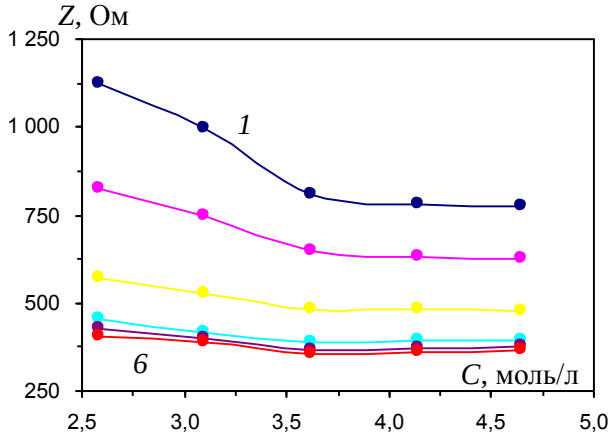



*Рис. 3. Зависимости модуля импеданса от концентрации холестерина при частоте 20 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 5 кГц, 10 кГц, 20 кГц (кривые 1–6)*

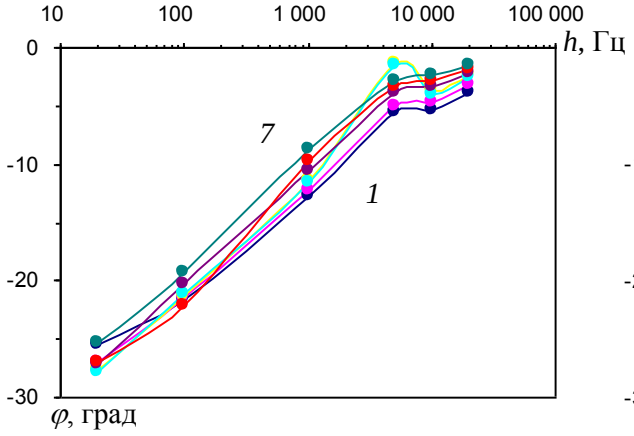



*Рис. 4. Зависимости фазового угла импеданса от частоты для концентраций альбумина 63, 67, 70, 71, 80, 90, 100 г/л (кривые 1–7)*

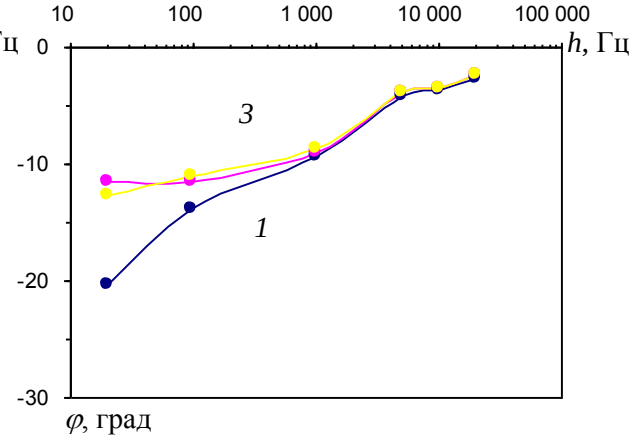



*Рис. 5. Зависимости фазового угла импеданса от частоты для концентраций иммуноглобулина 40, 60, 100 г/л (кривые 1–3)*

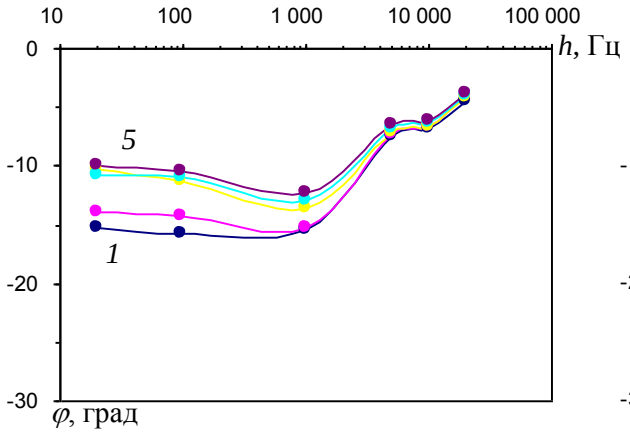



*Рис. 6. Зависимости фазового угла импеданса от частоты для концентраций холестерина 2.59, 3.1, 3.62, 4.14, 4.65 ммоль/л (кривые 1–5)*

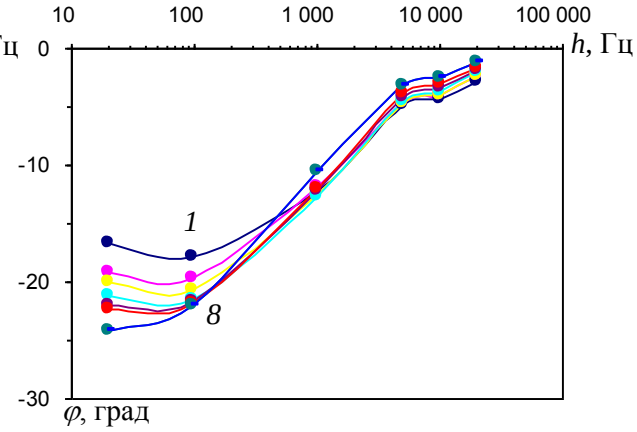



*Рис. 7. Зависимости фазового угла импеданса от частоты для концентраций альфа-холестерина 0.423, 0.564, 0.705, 0.846, 0.987, 1.128, 1.269, 1.41 ммоль/л (кривые 1–8)*

## Обсуждение результатов

Полученные результаты экспериментальных и клинических исследований были обработаны статистическими методами с помощью программного пакета Statistica 8.0. Так, электрический импеданс растворов глюкозы характеризуется высокими значениями, несмотря на то что экспериментальные исследования были выполнены с растворами глюкозы, приготовленными не на дистиллированной воде, а на физиологическом растворе натрия хлорида. Свойства электрической резистивности становятся явными у растворов глюкозы, имеющих концентрацию выше физиологической (более 27 ммоль/л, особенно выражено более 56 ммоль/л), что характерно для концентрации глюкозы в сыворотке крови больных осложненными формами сахарного диабета. Растворы холестерина представляют собой растворы белка, связанного со сложным спиртом холестерином. Тем не менее растворы холестерина отличаются по электроимпедансной характеристике от растворов иммуноглобулинов тем, что имеют более значительное увеличение фазового угла φ в зависимости от частоты зондирующего переменного электрического тока. Это указывает на увеличение емкостного сопротивления тканей, крови и других биологических жидкостей у больных с повышенным содержанием общего холестерина.

Триглицериды являются классом липопротеидов, имеющим большое количество жирных кислот по отношению к количеству молекул холестерина и апо-белков. Вероятно, именно химическое строение молекулы триглицеридов вызывает появление емкостных свойств и увеличивает реактивную составляющую электрического импеданса. Выявлено значительное изменение соотношения фазового угла на различных частотах зондирующего переменного электрического тока. Напротив, растворы альфа-холестерина, молекула которых содержит апо-белки, характеризуются снижением электрического импеданса по сравнению с растворами триглицеридов и даже с растворами иммуноглобулинов. В отношении электропроводности холестерин-альфа является полной противоположностью триглицеридам. При увеличении концентрации холестерина-альфа электрический импеданс растворов снижается, что характерно для белковых растворов с низкими диэлектрическими свойствами.

При исследовании состава сыворотки крови традиционными унифицированными биохимическими тестами было установлено, что сыворотка крови больных ИБС отличается достоверным увеличением концентрации общего холестерина и триглицеридов, имеет небольшое увеличение концентрации глюкозы по отношению к принятым нормам и средним величинам в группе здоровых лиц. В сыворотке больных ММ отмечается увеличение концентрации общего белка за счет иммуноглобулинов. Сыворотка крови представляет собой многокомпонентный раствор, в основе которого электролиты и белки, в меньших концентрациях представлены липиды и углеводы. Высокие свойства электропроводности ионных молекул и белковых растворов стоят в противофазе с характеристиками липопротеидов и растворов глюкозы, обладающих определенными диэлектрическими свойствами. Были построены математические модели зависимости концентраций изученных биохимических показателей от изменения электроимпедансных характеристик экспериментальных биологических жидкостей и изученных образцов сывороток крови [7–9]. Полученные аппроксимирующие формулы использовались для расчета концентраций биологических веществ в сыворотке крови [10]. Измерение электрического импеданса сыворотки крови больных ИБС и множественной миеломой и расчет концентраций биологических веществ по формулам соответствия, полученным на основании анализа монокомпонентных растворов этих биологических веществ в эксперименте, позволили получить величины, сопоставимые с результатами традиционных биохимических тестов. Точность метода электроимпедансного определения концентрации глюкозы, общего холестерина, триглицеридов, альфа-холестерина, альбумина, иммуноглобулина G и электролитов $Na^+$, $K^+$, $Ca^{++}$ была определена с указанием средней ошибки измерения, 25- и 75 %-ного диапазона ошибки в конкретных образцах сыворотки крови, минимального и максимального значения ошибки в изученных образцах сыворотки крови.

Результаты демонстрируют удовлетворительную точность электроимпедансного метода для клинических целей диагностики изменений основных биохимических показателей, способных вызывать угрожающие жизни человека клинические состояния, и дают ориентировочные результаты для предварительной постановки диагноза. Удовлетворительные показатели точности метода показаны для определения показателей липидного спектра крови, среднее значение ошибки при определении общего холестерина составило менее 1 ммоль/л, триглицеридов – менее 0,7 ммоль/л, альфа-холестерина < < 0,6 ммоль/л. Еще меньше оказалась средняя погрешность определения концентрации ионов кальция и калия. Ошибка при определении уровня общего белка (средняя ошибка – 6,1; 25 %; 75 % – p 1,2; 10,0; min и max значения ошибки – 0,3; 13,8 г/л), ионов натрия (средняя ошибка 12,7 ммоль/л) была высокой, но удовлетворяющей потребностям практического здравоохранения и позволяющей подозревать или диагностировать гипо- и гиперпротеинемию, гипо- и гипернатриемию.

## Заключение

1. Разработаны экспериментальная методика и измерительная аппаратура для определения электрического импеданса в проводящих биологических жидкостях, содержащих заряженные (ионные) или диэлектрические (белковые и клеточные) включения и комплексы.

2. Определены характерные частотные зависимости модуля и угла фазового сдвига импеданса для растворов модельных и биологических жидкостей различного состава и концентрации; выявлены специфические изменения электрических свойств растворов биологических молекул, определяемые концентрацией различных химических компонентов и сохраняющиеся в многокомпонентных биологических жидкостях.

3. Разработаны эквивалентные электрические схемы и математические модели, предложены аппроксимирующие расчетные формулы и программные алгоритмы расчета концентрации содержания органических элементов в биологических жидкостях.

4. На основании полученных в исследовании зависимостей показателей электрического импеданса и концентрации биологических веществ в растворах предложен новый оригинальный экспресс-метод лабораторной диагностики наиболее важных параметров биохимического состава сыворотки крови, состояния жизнеспособности биологических структур и оценки динамики течения ряда заболеваний внутренних органов; проведено сопоставление полученных данных с результатами других клинических методов, продемонстрировавшее их удовлетворительное согласование.

5. Определены пределы точности нового метода для анализа концентрации содержания глюкозы, общего белка, иммуноглобулинов, альбуминов, показателей липидного спектра и электролитов в крови здоровых людей и больных ишемической болезнью сердца и множественной миеломой, показавшие возможность его применения в клинической практике на этапе формирования первичного медицинского заключения и доврачебного обследования пациентов.

6. Создан и успешно апробирован опытный образец портативного лабораторного поличастотного 8-канального электроимпедансного анализатора для клинических исследований биохимического состава сыворотки в стандартном иммунологическом планшете.

Разработанная аппаратура и методики исследований служат основой проектирования нового типа медицинских импедансометрических биохимических анализаторов, предназначенных для дифференциальной диагностики заболеваний внутренних органов в клинической практике. Внедрение импедансометрических методов анализа в широкую медицинскую практику и их сопоставление с результатами клинических наблюдений позволит в будущем выработать и рекомендовать оптимальную систему оценки состояния пациента при различных социально значимых заболеваниях, таких, как сердечная недостаточность, ишемическая болезнь сердца, артериальная гипертензия, заболевания органов дыхания, нарушения иммунной системы, онкология и др.

## Библиографический список

1. *Кубарев А.М., Борисов В.И*. Пульсация крови в артериальной системе и ее влияние на электрическое сопротивление тела // Нижегородский медицинский журнал. – 2008. – № 4. – С. 35–41.
2. *Цветков А.А*. Биоимпедансные методы контроля системной гемодинамики. М.: Слово, 2010. – 330 с.
3. Экспериментальное моделирование реографической диагностики биологических жидкостей / *А.Л. Зуев, В.Ю. Мишланов, А.И. Судаков, Н.В. Шакиров* // Биомеханика. – 2010. – № 3. – С. 68–78.

4. Физические основы импедансной кардиографии / *А.Л. Зуев, В.Ю. Мишланов, А.И. Судаков, Н.В. Шакиров* // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. – 2011. – № 2. – С. 52–61.
5. Биоимпедансный анализ состава тела / *Д.В. Николаев, А.В. Смирнов, И.Г. Бобринская, С.Г. Руднев* – М.: Наука, 2009. – 404 с.
6. Устройство для измерения импеданса биологических сред / *А.И. Судаков, Н.В. Шакиров, А.Л. Зуев, В.Ю. Мишланов* // Патент Российской Федерации на изобретение № 2462185 от 27.09.2012.
7. Математическое моделирование электрических параметров биологических сред / *А.Л. Зуев, В.Ю. Мишланов, А.И. Судаков, Н.В. Шакиров* // Труды XVII Зимней школы по механике сплошных сред, Пермь, 2011 [Электронный ресурс – 1 электрон. оптич. диск (CD-ROM)]. Пермь–Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 5 р.
8. *Зуев А.Л., Судаков А.И., Шакиров Н.В.* Тождественные электрические модели // Сб. трудов конф. «Актуальные проблемы математики, механики, информатики». – Екатеринбург, 2012. – С.18–23.
9. Эквивалентные электрические модели биологических объектов / *А.Л. Зуев, В.Ю. Мишланов, А.И. Судаков, Н.В. Шакиров, А.В. Фролов* // Российский журнал биомеханики. – 2012. – Т. 16. – № 1 (55). – С. 110–120.
10. *Зуев А.Л., Мишланов В.Ю., Мишланова И.В.* Измерение электрического импеданса с целью оценки биохимического состава сыворотки крови // Тез. докл. XVIII Зимней школы по механике сплошных сред. – Пермь, 2013. – Пермь–Екатеринбург: УрО РАН, 2013. – С. 146.

# Изучение влияния профессионального отбеливания на микроструктуру эмали человеческих зубов

Морозов И.А., Свистков А.Л., Скачков А.П., Гилёва О.С., Ерофеева Е.С.

Изложены результаты исследования влияния отбеливания на микроструктуру эмали при помощи атомно-силовой микроскопии. Для описания общего вида микрорельефа предложен картографический метод – на эмали выделялись «равнинные» участки, а также низменности и возвышенности. Разработана методика структурного анализа этих составляющих. Результаты показали, что первое отбеливание снимает пелликулу (пленка адсорбированных из слюны протеинов) с поверхности эмали. Дальнейшие отбеливания приводят к стиранию эмали, особенно в области низменностей рельефа; форма возвышенностей и впадин становится более округлой.

Отбеливание зубов – одна из самых распространенных косметических стоматологических процедур, востребованных пациентами. Желание иметь белые зубы все больше возрастает у населения благодаря средствам массовой информации, которые широко пропагандируют звезд шоу-бизнеса с их ослепительными голливудскими улыбками. Использование различных отбеливающих технологий привлекает и врачей-стоматологов, так как отбеливание представляет собой относительно неинвазивную (без нарушения целостности тканей) и легко выполнимую процедуру.

Еще в III в. до н.э. люди старались, по возможности, изменить цвет и форму своих зубов. С древности люди украшали зубы различными стразами, проводили косметическое контурирование. Древние римляне полировали зубы при помощи мочевины (карбамида). В средние века отбеливание зубов проводилось цирюльниками, которые не только удаляли зубы, но и отбеливали их раствором aqua fortis. Последний в своем составе содержал азотную кислоту. Лечение начиналось с обработки зубов железной теркой. В XX в. для лечения зубов с измененным цветом применяли в основном ортопедические методы, заключающиеся в протезировании металлокерамическими коронками. Использование перекиси водорода в качестве отбеливающего препарата стало известно лишь в 1884 г. благодаря A.W. Harlan. Однако эффективность и безопасность отбеливающих препаратов была признана Американской ассоциацией стоматологов (ADA) лишь в 1994 г. Лишь после этого началось широкое применение процедуры отбеливания зубов.

Стойкое окрашивание твердых тканей зубов (дисколорит) возникает по разным причинам. Оно может быть внешнее, связанное с окрашиванием поверхностных структур зуба различными красителями, содержащимися в кофе, чае, красном вине, табаке, и внутреннее – окрашивание твердых тканей зубов изнутри.

Отбеливание зубов – это химический процесс окисления, в результате которого под действием кислорода происходит расщепление органических веществ до углекислого газа и воды. Перекись водорода является активным окисляющим агентом. В процессе отбеливания она проникает в эмаль и дентин по органической матрице, расположенной между неорганическими кристаллами твердых тканей зубов, и

вызывает окислительное расщепление пигментов. По виду применения отбеливание разделяется на клиническое и домашнее; по области нанесения – наружное, внутреннее и комбинированное. При отбеливании зубов в клинических условиях используют 15–38 %-ную перекись водорода или 30–35 %-ную перекись карбамида. В клинике применяют либо систему химической активации («Opalescence Xtra Boost» Ultradent Products Inc.), либо форсированную систему отбеливания. Для последней применяются специальные лампы, которые отличаются по виду излучения: ультрафиолетовый свет, «холодный свет» (галогеновый, «синий»), плазменно-дуговые лампы, ксеноновые дуги, лазерная система.

При этом следует учитывать некоторые побочные эффекты, которые могут возникнуть при использовании высококонцентрированных отбеливающих препаратов:

1. Отбеливающие препараты содержат пероксиды. Они увеличивают мутагенный эффект других химических соединений, например тех, которые присутствуют в сигаретах.

2. Типичным побочным эффектом отбеливания является временная повышенная чувствительность зубов. Практически во всех случаях она устраняется после прекращения отбеливания и проведения реминерализации тканей зуба фторсодержащими препаратами.

3. Сразу после отбеливания не следует производить реставрацию зуба, поскольку прочность соединения пломбировочного материала с тканями зуба снижается. Реставрацию рекомендуется проводить не раньше, чем через 2 недели после отбеливания.

Результат отбеливания с течением времени ослабевает, и через некоторое время могут потребоваться дополнительные процедуры отбеливания. Эти изменения могут быть вызваны различными причинами, например, употреблением кофе, красного вина, фруктовых соков, курением.

Целью данного исследования являлась разработка методики анализа микроструктуры эмали зубов, полученной при помощи атомно-силовой микроскопии, и, в дальнейшем, ее приложение к исследованию влияния различных методик отбеливания. Детальный количественный анализ особенностей микрорельефа даст новую информацию о состоянии эмали и ее изменениях под действием внешних или внутриорганных воздействий.

## Материалы и методы экспериментальных исследований

Материалом для проведения экспериментальных исследований служили биопрепараты неповрежденных зубов человека, удаленных по пародонтологическим показаниям по разработанной нами методике (рацпредложение № 2488 от 30 ноября 2009 г. ГОУ ВПО ПГМА им. ак. Е.А. Вагнера Росздрава). Первоначально исследованию подвергалась поверхность эмали неотбеленного зуба, после чего данный зуб отбеливали, повторяя процедуру дважды. В качестве отбеливающего средства использовался гель «Opalescent Xtra Boost», клиническая эффективность которого подтверждена в ранних исследованиях авторов [4].

Эксперименты проводили на базе Института механики сплошных сред УрО РАН на атомно-силовом микроскопе «Nano-DST» в полуконтактном режиме работы. Микроскоп такого типа позволяет получать трехмерные картины поверхности исследуемых материалов с расстоянием между отдельными точками изображения до нескольких нанометров. До и после каждого этапа отбеливания со средней части поверхности эмали были получены картины рельефа 15×15 мкм с разрешением в латеральной плоскости 1024×1024 точки, т.е. расстояние между пикселями полученных изображений составило ~15 нм, что сопоставимо с размерами используемых стандартных зондов с радиусом кончика <10 нм. Обработка результатов производилась при помощи алгоритмов, специально разработанных исследователями Института механики.

## Полученные результаты и их обсуждение

Микроструктура эмали представляет собой сложный рельеф. Изображения, на первый взгляд, существенно отличаются и трудны для сравнения (рис. 1).

Для классификации полученных результатов был предложен картографический метод анализа, давно применяемый в географии. Речь идет об использовании понятий «уровень мирового океана, «равнины», «возвышенности и горы», «впадины». Для их изображения на карте применяются соответствующие цвета. Используются обозначения:

1. Черный цвет – очень глубокие впадины («ущелья, у которых не видно дна»).
2. Синие цвета – впадины.
3. Зеленые – равнины.
4. Коричневые – возвышенности и горы.
5. Белый цвет – очень высокие горы («покрытые снегом»).

Применительно к микрорельефу эмали, вначале определяется «уровень мирового океана», то есть уровень, от которого происходит отсчет высот «гор» и глубин «впадин». Делается это следующим образом.

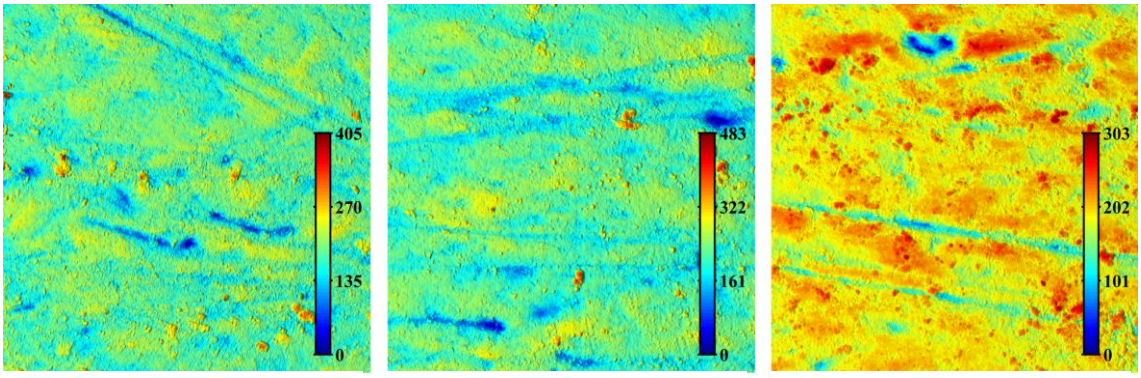
1. Для значений координаты $h$ (где $h$ – это координата на вертикальной оси) вычисляется площадь тех частей поверхности зуба $Sh$, координаты $h$ которых попадают в интервал от $h–\Delta h$ до $h+\Delta h$.

2. Строится функция зависимости площади $Sh$ от значения $h$. Определяется, где эта функция имеет максимум. То значение $h$, при котором функция $Sh$ имеет максимальное значение, и выбирается за уровень отсчета.

На рис. 2 представлены изображения обработанного микрорельефа (рис. 1). Части рельефа, высоты которых больше по абсолютной величине 100 нм, были обрезаны. На рисунке они выглядят как черные «впадины» или белые вершины «гор».

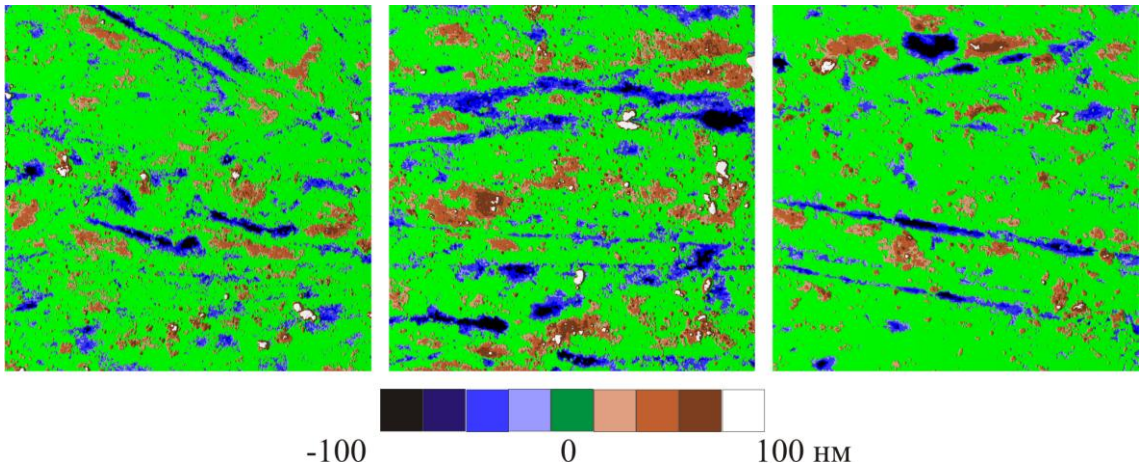
На рис. 2 видно, что рельеф неотбеленного и отбеленного один раз зуба, по сравнению с отбеленным три раза, более неоднороден, впадины и возвышенности занимают значительную площадь изображения. Диаграммы процентного соотношения между составляющими рельефа представлены на рис. 3.

Шероховатость поверхности эмали (среднее квадратичное отклонение высоты) составила 29, 34 и 22 нм для неотбеленной, отбеленной один раз и три раза эмали соответственно. Полученные значения шероховатости, а также данные, представленные на рис. 4, говорят о том, что наиболее неровной является эмаль однократно отбеленного зуба. Можно предположить, что в результате первого отбеливания были удалены фрагменты пелликулы (пленка адсорбированных из слюны протеинов) зуба и обнажен поверхностный слой эмали. Повторное двукратное отбеливание привело к очаговой деминерализации (порозности) поверхностного слоя эмали, при этом процентное соотношение как возвышенностей, так и низменностей упало приблизительно в 2 раза.



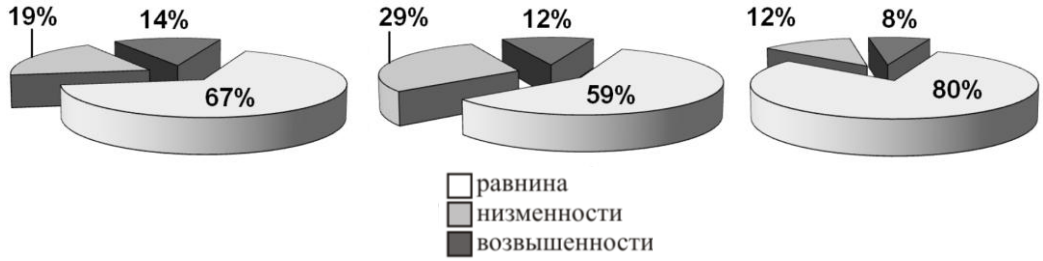

*а* *б* *в*

*Рис. 1. Изображения поверхности зуба: неотбеленного (а), отбеленного один раз (б) и три раза (в)*



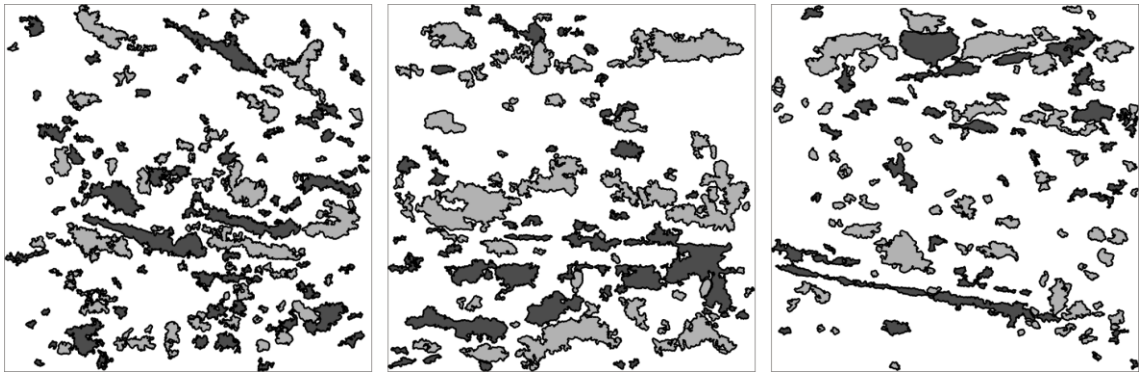

*а* *б* *в*

*Рис. 2. Обработанные изображения поверхности эмали зуба: неотбеленного (а), отбеленного один раз (б) и три раза (в)*




*а* *б* *в*

*Рис. 3. Процентное соотношение между составляющими рельефа эмали зуба: неотбеленного (а), отбеленного один раз (б) и три раза (в)*



*а* *б* *в*

*Рис. 4. Результат разбивки непрерывного изображения на отдельные объекты*

Перейдем к анализу отдельно структуры впадин и возвышенностей, для этого применим процедуру, аналогичную описанной в работе [1], разбив непрерывный рельеф на отдельные «островки» низменностей и возвышенностей, оставив только те, которые не пересекают границу изображения и чья площадь сечения основания $A \geq 0{,}05$ мкм$^2$ (рис. 4). Имея в наличии набор низменностей и возвышенностей, можно вычислить их геометрические характеристики – средний размер $\langle d \rangle$, площадь $\langle A \rangle$, объем $\langle V \rangle$ (таблица).

Анализ геометрии возвышенностей показал, что первое отбеливание сопровождается уменьшением толщины поверхностных структур эмали, формированием порозного поверхностного слоя эмали – размер, площадь и объем возвышенных участков

**Средние значения размеров, площадей и объемов структур эмали**

| Эмаль | Возвышенности | | | Низменности | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | <*d*>, мкм | <*A*>, мкм$^2$ | <*V*>, мкм$^3$ | <*d*>, мкм | <*A*>, мкм$^2$ | <*V*>, мкм$^3$ |
| Неотбеленная | 0,38 | 0,24 | 0,003 | 0,43 | 0,40 | 0,006 |
| Отбеленная 1 | 0,47 | 0,39 | 0,006 | 0,59 | 0,47 | 0,005 |
| Отбеленная 3 | 0,44 | 0,27 | 0,004 | 0,45 | 0,32 | 0,005 |

возрастают. Повторные процедуры отбеливания приводят к выравниванию рельефа эмали (снижение средних характеристик возвышенностей). В отличие от возвышенностей структура низменностей, их размеры, площадь и объем не уменьшаются после первого отбеливания. Средний размер увеличивается – структуры становятся более вытянутыми относительно горизонтали (см. рис. 2), а неуменьшающийся объем, наряду со снижением доли возвышенностей и низменностей (рис. 3), говорит о том, что происходит углубление отрицательных частей рельефа. Уменьшение объема возвышенностей и постоянство (или рост) объема низменностей указывают на то, что процесс истирания эмали вглубь идет быстрее, чем выравнивание ее поверхности.

В 1975 году французским ученым Бенуа Мандельбротом было введено понятие фрактальности [3]. Под фракталом понимается самоподобная геометрическая фигура, каждый фрагмент которой повторяется при уменьшении масштаба. Многие объекты в природе обладают фрактальными свойствами, например, побережья, облака, кроны деревьев, кровеносная система. Фрактальные структуры обладают дробной метрической размерностью или метрической размерностью, превосходящей топологическую, а также могут быть построены при помощи рекурсивной процедуры. Величину, коэффициент самоподобия, связывающую характеристики объекта и являющуюся неизменной, называют фрактальной размерностью [2, 3, 5].

В результате анализа фрактальных связей между периметрами и площадью, а также объемом и размерами структур поверхности эмали были сделаны следующие заключения:

1. Геометрия впадин и возвышенностей на неотбеленной эмали не является фрактальной – невозможно подобрать величину фрактальной размерности, которая бы связывала объем и размеры объектов с достаточной степенью достоверности. Скорее всего, это связано с тем, что на поверхности неотбеленного зуба имеется большое количество «искусственных» изменений рельефа, нанесенных при удалении зуба и его первичной обработке.

2. О некоей фрактальности структур можно уверенно говорить лишь в случае отбеленной эмали. Это свидетельствует о самоподобии геометрии низменностей или возвышенностей на всем масштабе наблюдаемых размеров, то есть большие массивные неровности поверхности эмали состоят из некоторого числа подобных, но более мелких образований.

3. Форма впадин и возвышенностей становится более округлой – фрактальная размерность, связывающая объем и размеры структур, возрастает и стремится к трем (для шара эта величина равна 3).

Дальнейшие исследования по данной тематике направлены на применение разработанных методик для исследования влияния различных отбеливающих средств на структуру поверхности эмали. Для изучения эволюции структуры в результате отбеливаний строго определенного участка эмали на поверхность зуба предложено наносить царапины при помощи установки Nanotest 600 (Пермский государственный университет). Царапанье производится индентором Берковича (усеченная трехгранная алмазная пирамидка) с силой внедрения 200 мН. Далее при помощи атомно-силового микроскопа снимается топология микрорельефа в районе царапин, видимых в оптический микроскоп прибора, а также фиксируется изменение самих царапин в результате отбеливания (рис. 5).

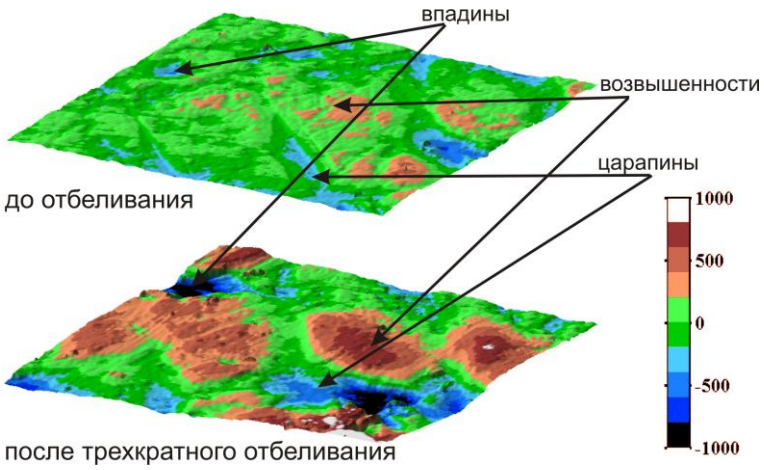



*Рис. 5. Изменение одного и того же участка эмали в районе нанесенных царапин*

Подобный подход позволит более «адресно» изучить влияние отбеливания на структуру эмали, а также определить толщину слоя эмали, снимаемого с ее поверхности в результате применения того или иного отбеливающего средства.

## Заключение

Разработана методика структурного исследования эмали зубов при помощи атомно-силовой микроскопии. На первом этапе полученный рельеф выравнивался относительно нулевого уровня, за который выбиралась часть рельефа, имеющая наибольшую площадь в общей поверхности снятого изображения. По аналогии с географическими картами были введены понятия равнин, низменностей и возвышенностей поверхности зуба.

На основе предложенной методики проведен структурный анализ низменностей и возвышенностей рельефа эмали, исследованы следующие характеристики: компактность, размер, периметр, площадь, объем, фрактальные размерности.

Полученные в условиях эксперимента результаты свидетельствуют о том, что профессиональное отбеливание биопрепаратов удаленных интактных зубов системой «Opalescent Xtra Boost» в режиме однократной процедуры, имитирующей лечебный режим отбеливания, не оказывает прямого негативного воздействия собственно на структуру эмали. Повторное отбеливание повреждает структуру эмали, особенно в области низменностей рельефа, что сопровождается углублением дефектов на поверхности зуба.

## Библиографический список

1. *Герасименко Н.А., Апрелов С.А.* Фрактальные методы анализа степени упорядоченности наноструктур // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2, № 1–2. – С. 136–139.
2. *Ерофеева Е.С., Гилева О.С.* Влияние процедуры отбеливания зубов на возникновение гиперчувствительности зубов // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы стоматологии». – Уфа, 2009. – С. 83–84.
3. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. – М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
4. *Морозов И.А.* Анализ микроструктуры наполненной резины при помощи атомно-силовой микроскопии // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 83–94.
5. *Федер Е.* Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

# Исследование и разработка процесса формирования региональной киберинфраструктуры на основе λ-grid-технологий

Масич Г.Ф., Масич А.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н., Бобров А.В., Чугунов Д.П., Тирон Г.Г., Файзрахманов Р.А., Щапов В.А.

Приведены сведения о создаваемой на Урал киберинфраструктуре, призванной использовать все усовершенствования в сфере высокопроизводительных вычислений и состоящей из объединенных скоростной оптической сетью вычислителей, систем хранения данных и установок. Показаны проблемы организации соединений между оконечными системами по скоростным протяженным линиям связи и пути их решения посредством параллелизма соединений. Особое внимание уделено архитектурному решению обработки интенсивного потока экспериментальных данных на удаленном суперкомпьютере в реальном времени, демонстрирующему принципиально новые возможности проведения экспериментальных исследований.

Понятие «киберинфраструктура» в начале XXI столетия емко сформулировано Национальным научным фондом (NSF) США [Cyberinfrastructure (CI) Visionfor 21st Century Discovery NSF, March 2007]. Всестороннюю инфраструктуру, которая должна объединять все усовершенствования в сфере информационных технологий (IT), назвали киберинфраструктурой (Cyberinfrastructure – CI). CI в интерпретации NSF объединяет в себе аппаратные средства для вычислений, данные и сети, цифровые датчики, обсерватории и экспериментальные установки, взаимодействующий набор программного обеспечения и услуг микропрограммных средств и инструментов. Из всего многообразия аспектов CI в рамках данного проекта (рис. 1) решается задача построения *скоростной сети*, разрабатывается программное обеспечение, обеспечивающее *соединение* экспериментальной установки с суперкомпьютером для измерения характеристик потоков и течений при проведении *экспериментальных исследований*.

*Скоростные сети* – существенная компонента CI. Появившаяся в начале 21-го столетия возможность приобретения свободной емкости оптических волокон (darkfiber – темное волокно) у компаний по протяженным линиям связи привела к построению в мире собственных научно-образовательных (R&E – Researchand Education) оптических инфраструктур со спектральным уплотнением каналов. Это обстоятельство стимулировало работы по построению глобальной λ-системы, продвигающей парадигму глобальных λ-сетей (GLIF – Global Lambda Integrated Facility, Рейкьявик, Исландия, август 2003, http://www.glif.is). Сообщество GLIF разделяет взгляды в построении LambdaGrid парадигм грид-вычислений, в которых центральный архитектурный элемент – это оптические сети, параллелизм которых заключен в многочисленных длинах волн света (λ) в одном оптическом волокне.

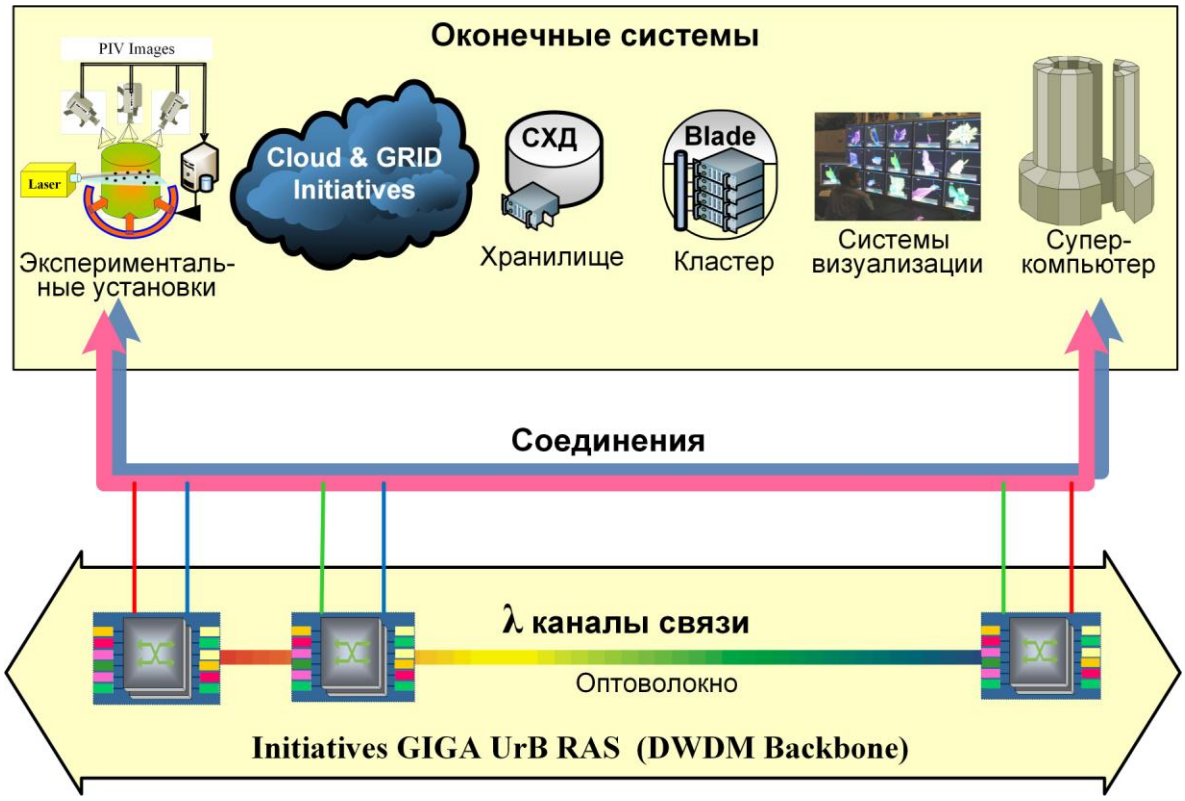



*Рис. 1. Территориальная киберинфраструктура Урала*

*Соединения* между оконечными системами. Одним из основных источников ухудшения совокупной производительности территориально распределенных высокоскоростных приложений является низкая скорость передачи данных по прокладываемому соединению между оконечными системами по протяженным скоростным линиям связи. Поэтому вторая задача проекта – исследование, анализ и решение проблем взаимосвязи (межплатформенное ПО) подключаемых к скоростной сети оконечных систем. Эти системы характеризуются большой и сложной памятью, процессорами и подключенными к сети каналами ввода/вывода с иерархиями и наследуемым параллелизмом в различных подсистемах, и требуют разработки новых методов и технологий эффективного использования архитектур и ресурсов оконечных систем.

*Экспериментальные исследования* являются третьей целью проекта, заключающейся в апробации, тестировании и использовании разрабатываемых архитектурных решений на научных задачах (приложения), требующих предельной производительности компонент создаваемой CI. Одной из таких задач является обработка в реальном времени потока изображений, генерируемых экспериментальными установками на скорости 1–10 Гбит/с.

## Скоростная сеть

Следуя мировому опыту, в Уральском отделении РАН реализуется проект «Инициатива GIGA UrB RAS», направленный на построение оптической магистрали, связывающей научные центры Отделения [8, 11]. Целесообразность Инициативы заключается в следующем.

В Научных центрах УрО РАН ***созданы свои оптические сети***, объединение которых решит проблему скоростей Отделения.

***Удачная организационно-территориальная структура*** УрО РАН позволила Президиуму УрО РАН выступить в роли заказчика проекта, удовлетворяющего не только Научные центры Отделения, но и ВУЗы, а также предприятия промышленного

сектора экономики, с которыми традиционно Уральское отделение выполняет совместные научно-исследовательские работы. К тому же охватываемая территория от Архангельска до Екатеринбурга способствует использованию технологий оптоволоконных систем передачи данных со спектральным уплотнением каналов, поскольку чем больше протяженность (L ~ 2340 км) и чем выше скорость передачи, тем более заметны преимущества оптических сетей.

***Экономическая эффективность*** показана на примере равенства разовых затрат на построение собственной скоростной DWDM магистрали «Архангельск – Сыктывкар – Ижевск – Пермь – Екатеринбург» на скорости 40 Гбит/с и возможных ежегодных затрат в случае аренды каналов связи между Научными центрами на скорости 0,2 Гбит/с.

***Инвестиционная привлекательность*** заключается в возможности поэтапного наращивания производительности DWDM-системы до терабитных скоростей и согласуется с мировой тенденцией развития R&E сетей.

Следует также отметить, что судьба пропускной способности и динамика развертывания сети оказывается на «кончиках пальцев» у институтов УрО РАН, а не у операторов связи, что позволяет оперативно настраивать λ коммуникационный сервис для разнообразных потребностей вместо одного арендуемого потока, приспосабливаемого для всех приложений/проектов.

***Соучастие*** в проекте образовательных учреждений и инновационной промышленности Уральского региона и прилегающих территорий формируется в рамках Соглашений и Договоров с УрО РАН.

Предоставлена возможность ***создания принципиально новых инструментов*** проведения научных исследований, показывающих влияние скоростных сетей на распределенные вычисления.

Инициативы GIGA UrB RAS: поддержка исследований по сетевой тематике, продвижение приложений и услуг следующего поколения, создание простого интерфейса взаимодействия между научно-образовательными сетями, являются фрагментом национальной научно-образовательной сети передачи данных.

## 1. DWDM тракт Пермь – Екатеринбург.

Сформулирован следующий класс услуг передачи данных [13], охватывающий 3 уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем (L1-L3 OSIRM):

а) **λ-услуга** – предоставление фиксированного диапазона длин волн («лямбда»).

б) **FrameNet-услуга** – представление двухточечного или многоточечного Ethernet канала связи между Ethernet портами DWDM магистрали.

в) **PacketNet-услуга** – присоединение к Public Интернет.

**λ-услуга** обеспечивает соединение точка-точка на физическом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем (L1 OSIRM).

**FrameNet-услуга** предполагает использование доступных EthernetGE (LX или на ZX) интерфейсов, таких как 1–10 GE порты оконечного оборудования магистрали. Обеспечиваются точка-точка и многоточечная доставка данных на Ethernet (канальном) уровне (L2 OSIRM). Доступны два базовых типа услуг FrameNet:

– специализированная FrameNet – Ethernet-услуга, гарантирующая заказанную пропускную способность;

– неспециализированная FrameNet – Ethernet-услуга, не гарантирующая постоянную пропускную способность.

**PacketNet-услуга** предоставляет базовую услугу IP маршрутизации для доступа к public Интернет, обеспечивая соединения на сетевом уровне (L3 OSI RM). Прием анонсов IP-сетей, как и анонсирование IP-сетей, выполняется согласно политикам маршрутизации, отраженным в RIPENCC.

Практическим результатом этих работ явилась разработка технического задания, которое было использовано при заключении Государственного контракта № 59/11 от 27 мая 2011 года «На поставку оборудования для построения инфраструктуры опорной высокоскоростной сети для проведения научно-технических расчетов и экспериментов на участке «Пермь – Екатеринбург». Технические решения основаны на использовании двух свободных («темных») волокон в существующем кабеле с известными характеристиками и технологии спектрального уплотнения каналов (DWDM).

В мировой практике системы связи с длинными пролетами обычно применяются при создании соединений между островами / городами и OADM ответвлений к транснациональным сетям. В нашем случае применение технически самых совершенных, но дорогостоящих решений неоправданно. На рис. 2 показано размещение трех регенерационных пунктов, равноудаленно охватывающих точками присутствия территорию и обеспечивающих длину между пунктами регенерации не более 130 км.

Общая оптическая длина тракта Пермь – Екатеринбург равна 456 км. Используется стандартное одномодовое волокно с дисперсией, соответствующей Рек. ITU-T G.652. Вышеперечисленные классы услуг сети со спектральным уплотнением каналов (DWDM) реализованы на оборудовании компании ECI-Telecom. При расчете регенерационного участка DWDM системы связи учитывалась величина требуемого OSNR, которая является ключевым параметром транспондера и от которого напрямую зависит максимальная длина однопролетной линии связи (и стоимость). OpticalSignal-to-NoiseRatio (OSNR) – *отношение сигнал/шум для оптического сигнала*.

Оконечные узлы DWDM тракта Пермь-Екатеринбург на платформах XDM-2000 установлены на площадках Президиум ПНЦ УрО РАН (Пермь, Ленина, 13а) и суперкомпьютерном центре ИММ УрО РАН (Екатеринбург, Софьи Ковалевской, 16). Оптические мультиплексоры (MUX) на 16 λ-каналов обеспечивают возможность использования транспондеров со скоростью передачи 10–40 Гбит/с в каждой λ.

Регенерационное оборудование XDM-40 промежуточных узлов размещено в необслуживаемых регенерационных пунктах (НРП). Спецификация промежуточных узлов обеспечивает только оптическое усиление сигнала, однако закладываемое DWDM оборудование предполагает возможность установки ROADM мультиплексо-

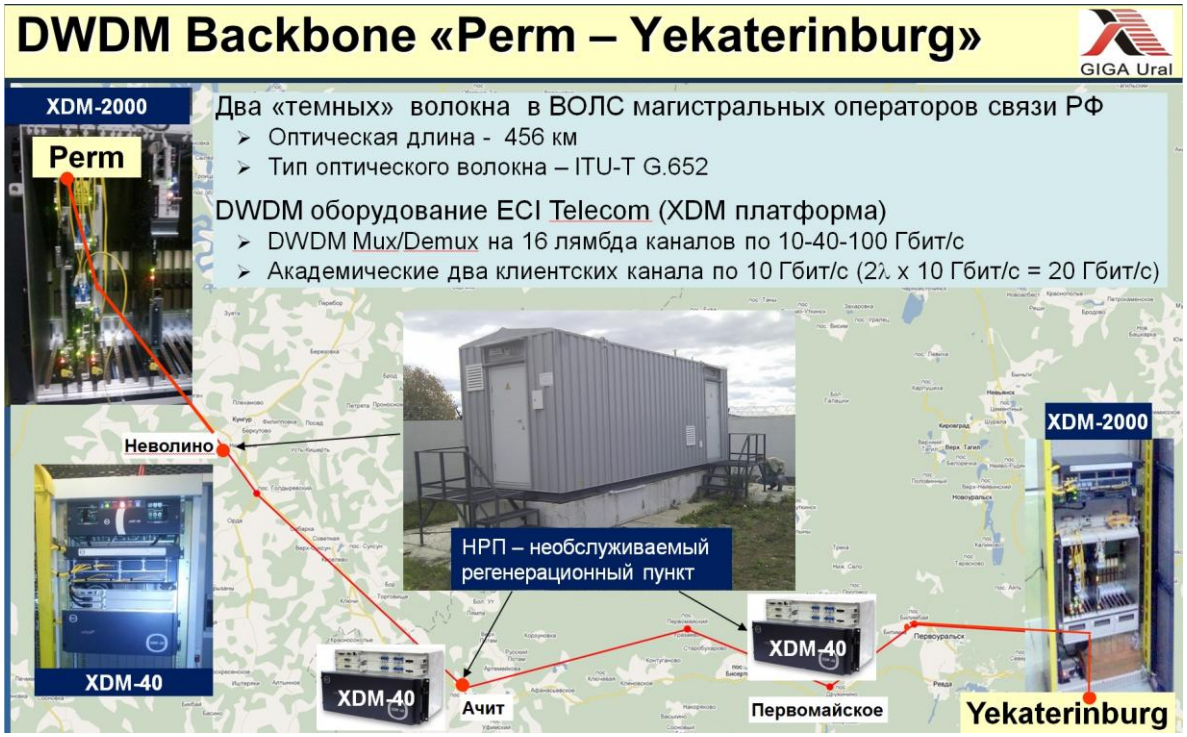



*Рис. 2. DWDM тракт Пермь – Екатеринбург (2012)*

ров для выделения и маршрутизации λ-каналов не только на оконечных, но и на промежуточных узлах. Система мониторинга и управления магистральной ВОЛС (SunFire V245 и программное обеспечение LightSoft) располагается в центре управления сетью в ИМСС УрО РАН (Пермь).

## 2. Структура каналов связи (рис. 3).

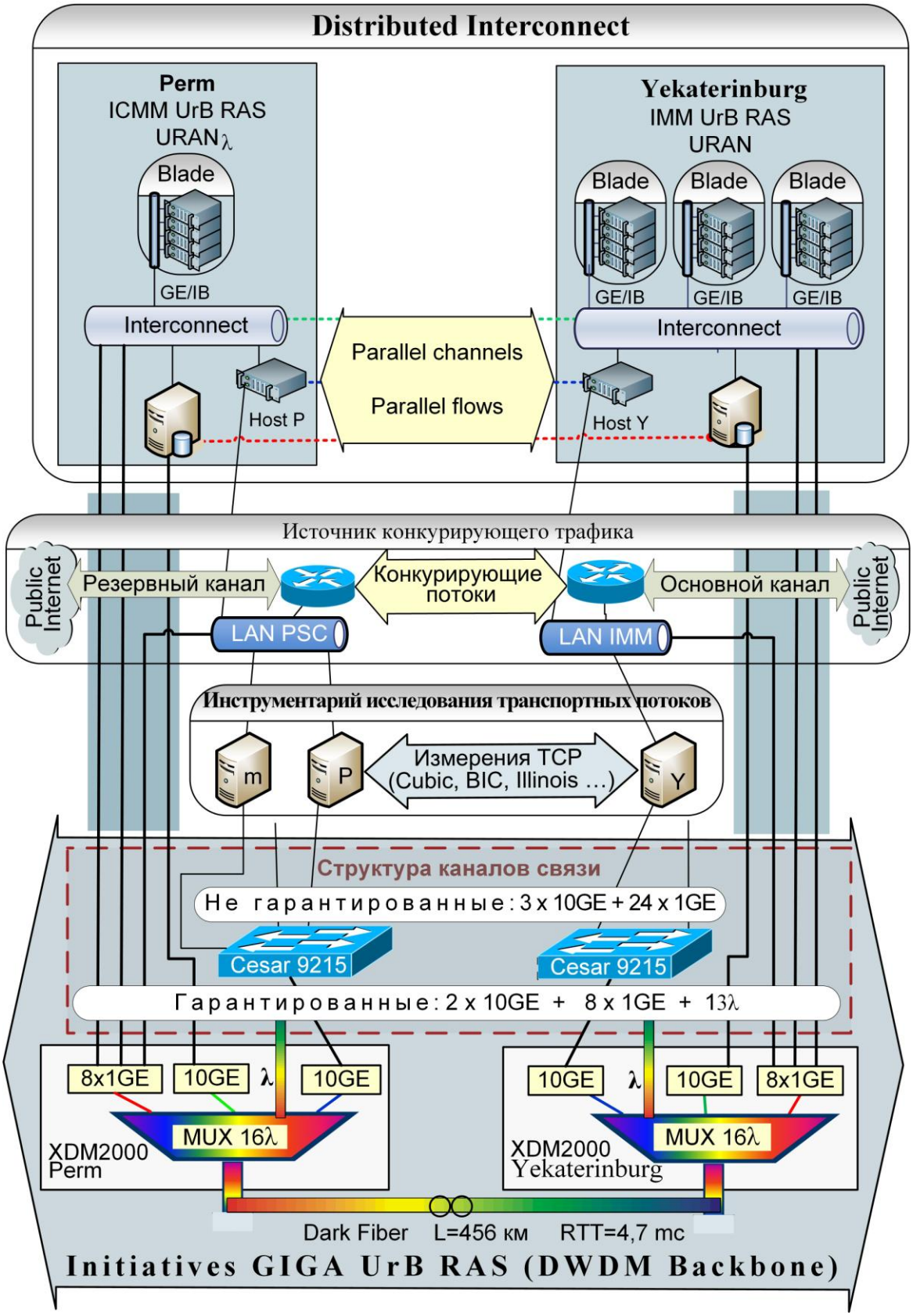



*Рис. 3. Структура каналов связи*

Установленные транспондеры используют три λ-канала (каналы C21, C22 и C23 ITU-T-частотного плана) со скоростью потоков по 10,7 Гбит/с (ITU-TG.709) в каждой λ, поддерживают механизм упреждающего исправления ошибок (FEC – Forward Error Correction) и имеют следующие характеристики портов ввода/вывода для подключения оконечного оборудования: два Ethernet-порта по 10 Гбит/с (2 × 10GE), выделенных из λ-каналов C21 и C23, и 8 Ethernet-портов по 1 Гбит/с (8 × 1GE), сформированному из λ-канала C22 [21, 22]. Такая совокупность портов образует слой гарантированных каналов связи по схеме точка-точка, позволяет использовать распространенные в оконечных системах 1GE порты и осуществить постепенный переход на скорость 10 Гбит/с.

Оставшиеся 13 λ-каналов – потенциал масштабирования по 10–40 Гбит/с или когерентной DWDM 100 Гбит/с. Для большей гибкости проводимых исследований на площадках установлены L2 коммутаторы Cesar, имеющие по 24 порта 1GE и 4 порта 10GE, один из которых подключен к 10GE порту XDM2000. Эта совокупность портов образует слой негарантированных каналов связи при нагрузке больше 10 Гбит/с.

Аналогичные по производительности и сетевым сервисам региональные научно-образовательные сети в Российской Федерации отсутствуют.

## Соединения

Соединения между оконечными системами (соединения end-to-end) реализуются посредством транспортных протоколов, расположенных на 4-м уровне OSIRM. Транспортными протоколами являются TCP (надежный), UDP (ненадежный) и UDT (надежный).

Несоответствие между вычислительной производительностью и компонентами ввода/вывода высокопроизводительных систем текущего поколения сделал ввод/вывод наиболее узким местом. Одним из основных источников ухудшения совокупной производительности территориально распределенных высокоскоростных приложений является плохая end-to-end производительность протокола TCP [22]. В RFC5681 (M. Allman, 2009) определены 4 связанных между собой алгоритма управления перегрузкой (congestion control algorithms) для протокола TCP: медленный старт (SS – slow start), предотвращения перегрузки (CA – congestion avoidance), быстрой повторной передачи (FR – fast retransmit) и быстрого восстановления (fast recovery).

Произведение полосы пропускания на время ретрансмиссии (BW·RTT) называется в англоязычной литературе параметром BDP (bandwidth-delay product), большая величина которой характерна для скоростных сетей большой протяженности. Для участка DWDM магистрали Пермь-Екатеринбург с оптической длиной 456 км и временем распространения сигнала по оптическому волокну 5 мкс/км параметр RTT равен 4,7 мс. С учетом задержек обработки сегментов в оконечных системах примем RTT = 5 мс. Тогда для скорости передачи 1 Гбит/с значение BDP = 625 000 байт, а для скорости 10 Гбит/с BDP = 6 250 000 байт, или 4 130 пакетов длиной 1 514 байтов.

Для TCP в фазе медленного старта чтобы увеличить окно от 1 до 4 130 пакетов потребуется приблизительно 16 RTTs (12 + 3 на троекратное рукопожатие) ~ 90 мс. И если TCP-соединение завершится раньше или будут одиночные ошибки с вероятностью $p > 5{,}8 \times 10^{-7}$, полоса пропускания канала будет существенным образом недоиспользована. Это делает передачу данных в рамках протокола TCP, используемого в большинстве операционных систем, включая Windows и Linux, достаточно вялой, не использующей всю имеющуюся полосу пропускания. На рис. 4 иллюстрируется фаза медленного старта протокола TCP и темп увеличения скорости передачи.

Классический способ использования доступной физической скорости в канале связи – тонкая настройка параметров управления соединением и организация параллелизма соединений. Версии TCP (RENO, Cubic, BIC и т.д.) направлены на увеличе-

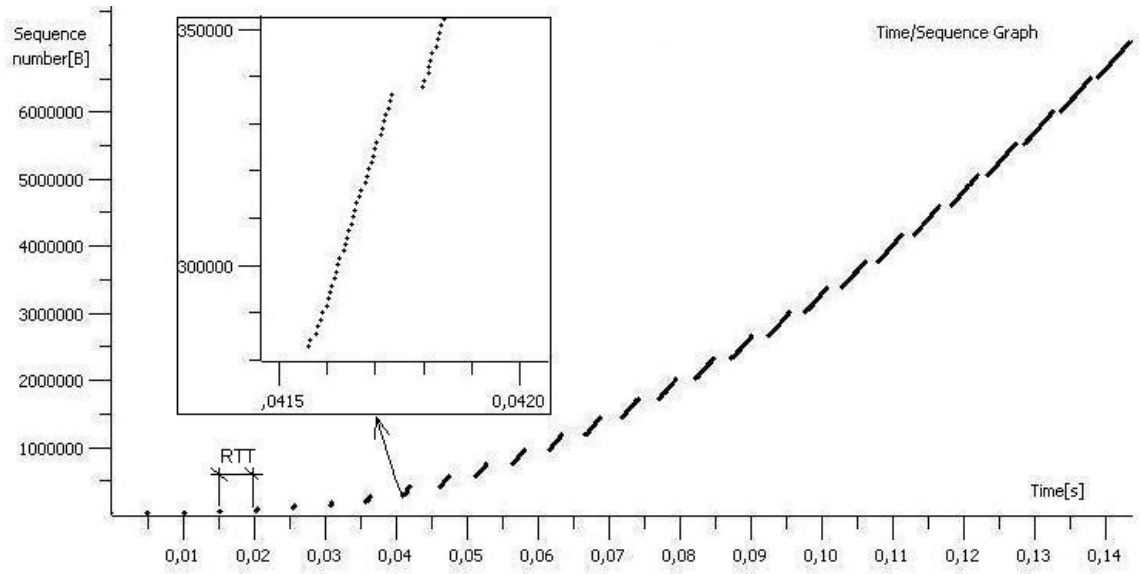



*Рис. 4. Медленный старт TCP, RTT = 5 мс, скорость канала 1 Гбит/с*

ние пропускной способности в различных условиях функционирования: наличие или отсутствие конкурирующих потоков, сетевая конфигурация, протяженность и скорость линий связи. По индикации перегрузки различные варианты TCP-протокола делятся на три группы: по сигналу потери (loss-based), по задержке (delay-based) и использующие оба показателя (hibrid). Поэтому требуется выполнять измерения и производить тонкую настройку TCP при построении алгоритмов и программного обеспечения для организации end-to-end соединений.

## 1. Инструментарий измерения.

Наиболее удачным подходом к решению проблемы тонкой настройки TCP является проект Web10G, разработанный и поддерживаемый командой Питтсбургского Центра Супервычислений.Web10G предоставляет доступ к расположенным в ядре ОС переменным протокола TCP, позволяя считывать (и изменять) их. Знание динамики изменения параметров, таких как CurCwnd (текущее окно перегрузки), NonRecovDA (количество дубликатов подтверждений), RTTVar (значение RTT) и многих других, позволяет выявить первопричину недостаточной производительности и скорректировать стратегию управления перегрузкой. Измерения проводились между серверами P (Perm) и Y (Yekaterinburg) с зеркалированием трафика на компьютер m (mirror), изображенных на рис. 3. Сетевое конфигурирование позволяет добавлять или отключать существующий фоновый (конкурирующий) Интернет-трафик, интенсивность которого оценена по MRTG и имеет величину не более 100 Мбит/с по причине его ограничения. Доступная на момент измерения скорость канала связи – 1 Гбит/с.

На рис. 5 приведен импульсный трафик, характерный для структурированного потока экспериментальных данных. Цель измерений – определение возможной потери темпа передачи при переходе от одного кванта времени передачи к другому. Наглядно видно уменьшение средней скорости передачи последовательности одинаковых порций данных, которое может быть объяснено хорошим дружелюбием Cubic к фоновому Интернет-трафику. Проиллюстрировано сохранение темпа передачи в конце текущего и начале следующего интервалов передачи (макроанализ на графике не показан).

На рис. 6 показана измеренная зависимость производительности RENO и Cubic от числа параллельных TCP-соединений. Для измерения пропускной способности использована утилита Iperf.

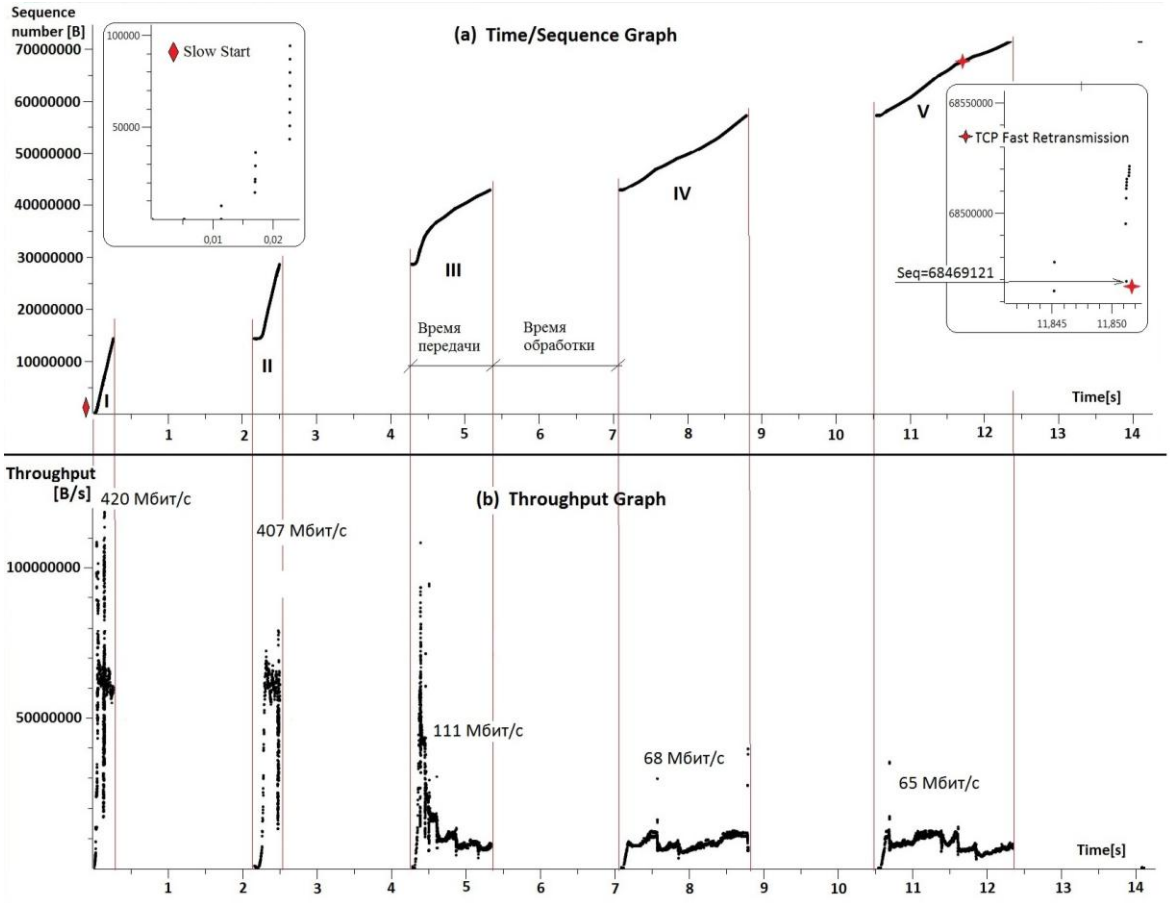



*Рис. 5. Wireshark, импульсный трафик (Sequence number – порядковый номер байта в потоке)*

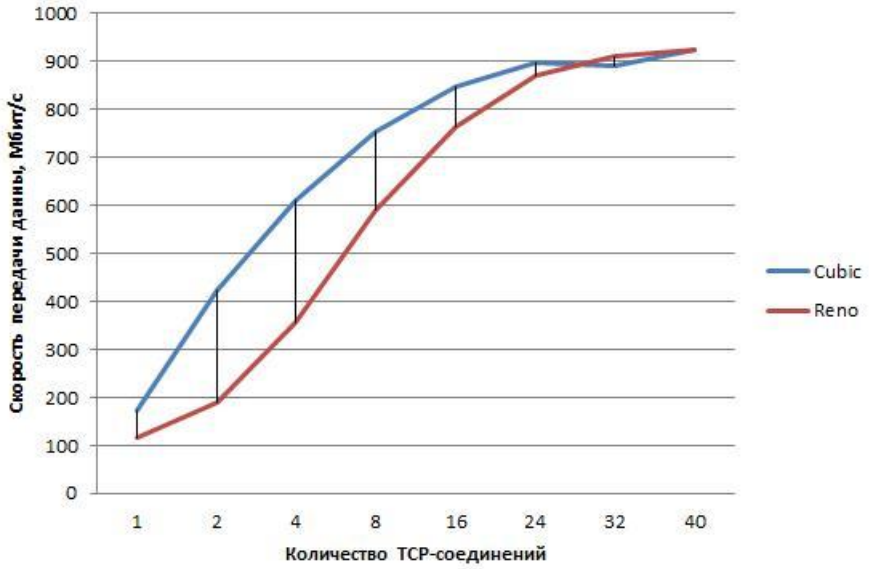



*Рис. 6. Зависимость скорости передачи данных от количества соединений*

Видно, что Cubic эффективнее использует канал, нежели Reno, в диапазоне 2–16 параллельных потока. Количество параллельных потоков для Cubic рекомендуется делать не более 8, оставив полосу пропускания ~ 100 Мбит/с для Интернет-трафика.

На рис. 7 показана скорость одного потока на фоне Интернет-трафика. Для генерации трафика и измерения средней пропускной способности использована утилита Iperf. Параметр CurCwnd снимался с помощью Web10G. Результаты измерений: Cubic – 143 Мбит/с; Reno – 97,2 Мбит/с. Видно, что стратегия управления перегрузкой Reno ведет себя более «осторожно» и не имеет большого числа перегрузок по сравнению с

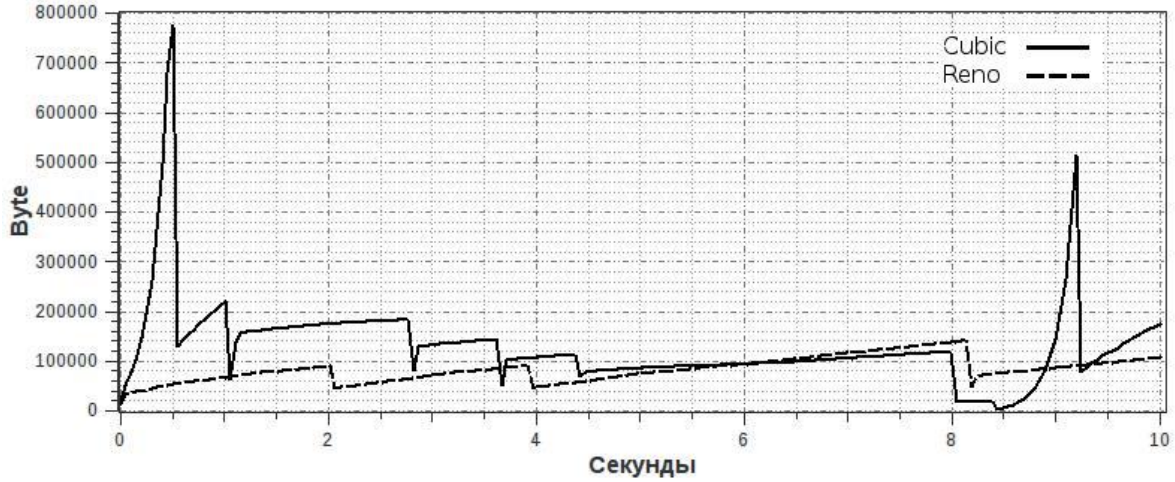



*Рис. 7. Сравнение динамики изменения параметра CurCwnd для Cubic и Reno*

Cubic. Однако Cubic лучше Reno по скорости передачи данных. При этом один поток Cubic не доиспользует доступную полосу пропускания канала: 143 Мбит/с (Cubic) + 100 Мбит/с (Internet) < 1 Гбит/с (канал связи).

На рис. 8 представлено сравнение работы алгоритмов управления перегрузкой BIC, Cubic и Illinois для непрерывного трафика по гарантированному каналу связи 1 Гбит/с. Используемый инструментарий: утилита Iperf для генерации трафика и Web10G для анализа и интерпретации. Условия: одно TCP-соединение, гарантированный канал связи 1 Гбит/с с RTT = 5 мс (BDP 625 000 байт), фоновый интернет-трафик отсутствует, периодичность снятия параметров 1 мс, время измерения 1 с, (на графике отображено 0,12 с). *Описание параметров*. CurCwnd – текущее значение окна перегрузки. SegsOut – общее количество переданных сегментов, наклон этой кривой является текущей скоростью передачи. *Интерпретация*. Как видно из графиков, все стратегии достигают максимальной скорости передачи

после достижения CurCwnd ≥ BDP, что соответствует теории протоколов с обратной связью. Однако для BIC и Illinois это происходит в фазе SS в точке A на 40 мс, а для Cubic – в фазе CA в точке B на 110 мс, поскольку MaxSsCwnd у Cubic на 35 мс завершил фазу SS и перешел в фазу CA, в которой темп увеличения CurCwnd происходит медленнее.

Подтверждается негативное влияние фазы SS, которое лучше преодолевается в BIC и Illinous. Размер передаваемых данных при коротких TCP-сессиях должен быть существенно больше BDP.

***Основные выводы по измерениям.*** Принципиальным решением проблемы медленного старта при изначально известной гарантированной скорости в end-to-end канале связи и отсутствии фонового трафика в нем является установка начального значения параметра cwnd в оконечных системах равным BDP. Верхнюю границу числа параллельных конкурирующих потоков на фоне интернет-трафика в канале 1 Гбит/с с RTT = 5 мс для Cubic нецелесообразно делать более 8. Как и ожидалось, в L2-каналах связи порядок следования пакетов не нарушается и не приводит к появлению ложных SACK. При передаче импульсного трафика в TCP-соединении темп передачи в конце текущего и начале следующего интервалов передачи сохранятся.

***Методология оценки эффективности параллелизма*** потоков данных должна содержать следующие компоненты: (1) список и описание системных параметров оконечных систем; (2) описание сетевой инфраструктуры, связывающей оконечные системы; (3) перечень и параметры нагрузки; (4) оцениваемые метрики параллельных потоков; (5) измерительные средства; (6) метод анализа и интерпретации данных; (7) способы представления результатов.

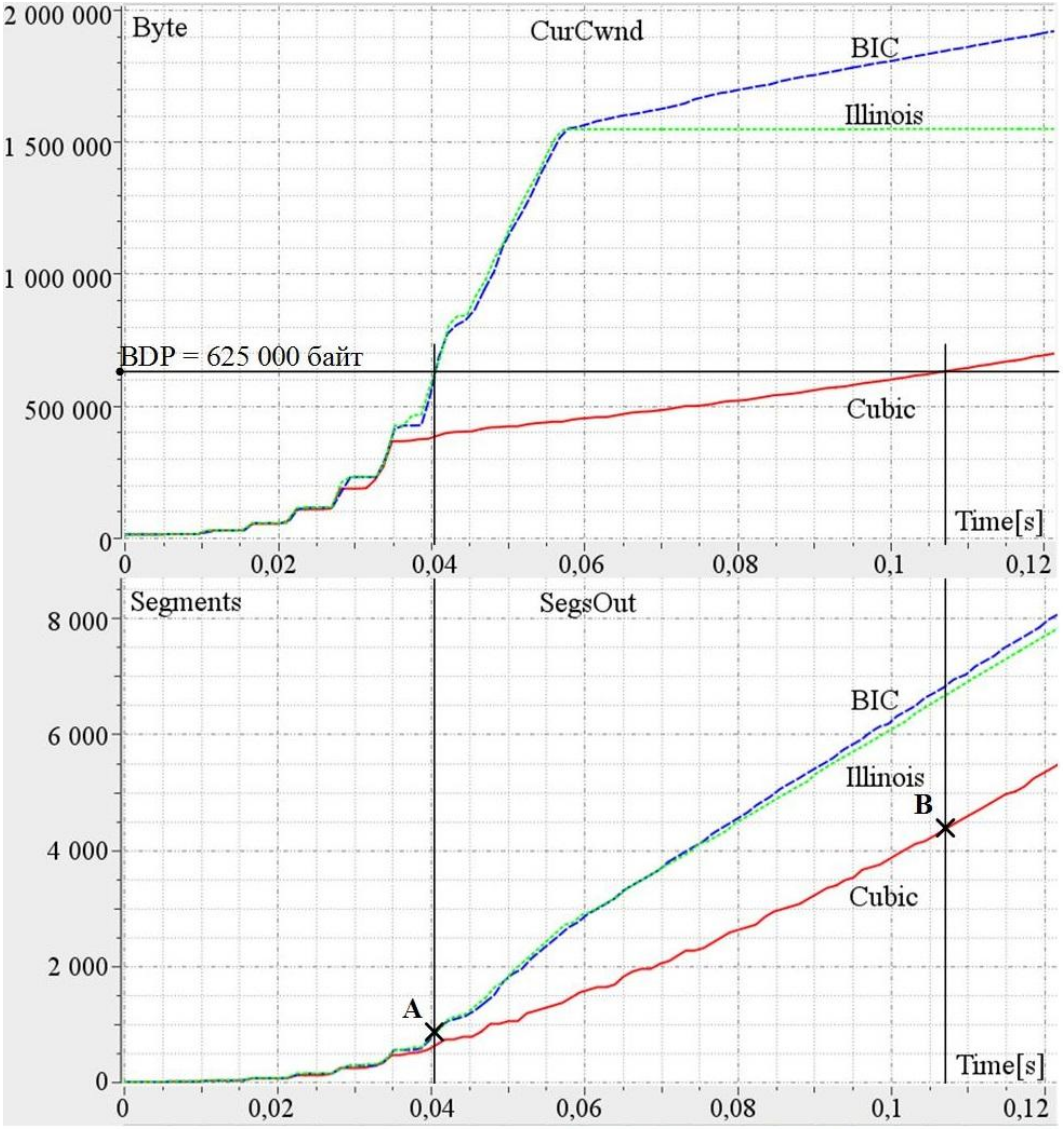



*Рис. 8. Сравнение динамики изменения параметров TCP в области медленного старта*

## 2. Модель потоковой обработки структурированного потока данных.

Структурированным называется поток, компоненты которого допускают независимую обработку. Таковым, например, является поток экспериментальных данных, получаемых по методу PIV (Particle Image Velocimetry) – оптическому методу измерения полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока. Метод основан на обработке пар фотографий трассеров – мелких частиц, взвешенных в потоке, в моменты, когда они подсвечиваются импульсным лазером, создающим тонкий световой нож. Скорость потока определяется расчетом перемещения трассеров за время между вспышками лазера. Интенсивность порождаемого потока данных зависит от числа, разрешения и частоты работы камер и может достигать нескольких гигабит в секунду [1, 6, 12]. Обработка таких потоков данных с использованием только локального компьютера экспериментальной установки (ЭУ) чрезвычайно затруднена. В то же время развитие математического аппарата и появление новых высокоточных алгоритмов расчетов увеличивают требования к необходимой вычислительной мощности. Поэтому перенос вычислений на удаленные суперкомпьютеры достаточной производительности позволит применять новые высокоточные алгоритмы, обрабатывать данные в реальном времени, уменьшить объемы сохраняемых на ЭУ данных. Сопутствующей задачей является 4 К-визуализация в 24 кадра в секунду

(FPS) в формате RGBA (32 бит на пиксель: с красными, зелеными, синими и альфа-каналами по 8 бит в каждом), которая требует 6,4 Гбит/с сетевой полосы пропускания к потоку от источника рендеринга до панелей отображения. Идеальная модель обработки структурированного потока экспериментальных данных на удаленном суперкомпьютере в реальном времени представлена на рис. 9 [9].

Суть модели – прямой ввод потока данных в оперативную память вычислительных узлов суперкомпьютера без предварительного сохранения на внешних носителях ЭУ или СХД суперкомпьютера [2, 9, 15]. Такой способ передачи данных позволит минимизировать задержки на двойную запись/чтение данных и отказаться от копирования данных между хранилищами с использованием классических протоколов SCP, FTP, NFS или CIFS.

Благодаря тому, что каждое измерение в эксперименте PIV может обрабатываться независимо от других [4] и существует один источник данных на ЭУ, было предложено отказаться от однозначного отображения измерений на вычислительные узлы. ***Новый принцип передачи и распределения данных*** по вычислительным узлам суперкомпьютера базируется на трех идеях:

– прямой ввод данных в вычислительные узлы, минуя промежуточное хранение на дисках;

– отказ от однозначного отображения сообщений на вычислительные узлы;

– представление потока данных в виде единой очереди, распределяемой по вычислительным узлам по запросам.

На экспериментальной установке организуется очередь измерений, которые раздаются вычислительным узлам по принципу First-In-First-Out (FIFO) [14, 15], как показано на рис. 10. Подсистема программного обеспечения, решающая задачу распределения данных по вычислительным узлам, названа диспетчером. Несмотря на то что извлечение элемента из очереди является блокирующей операцией, после из-

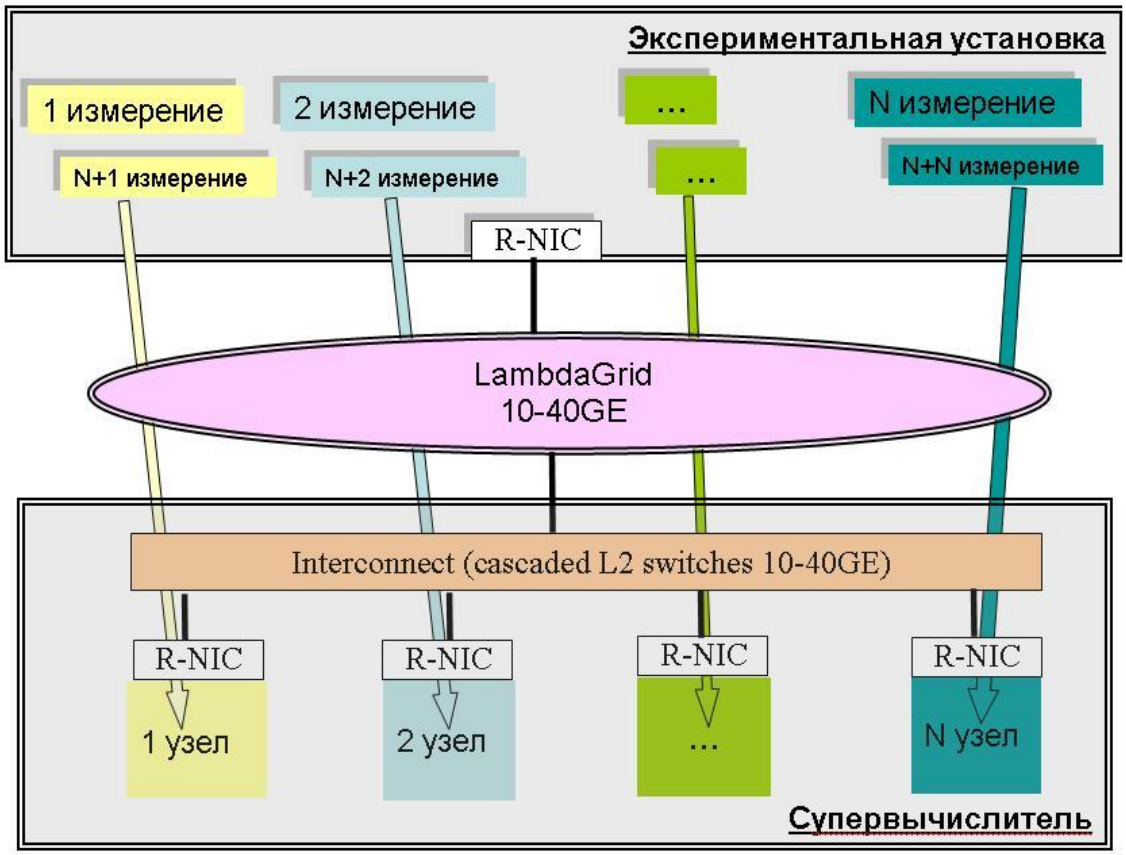



*Рис. 9. Идеальная модель обработки структурированного потока данных*

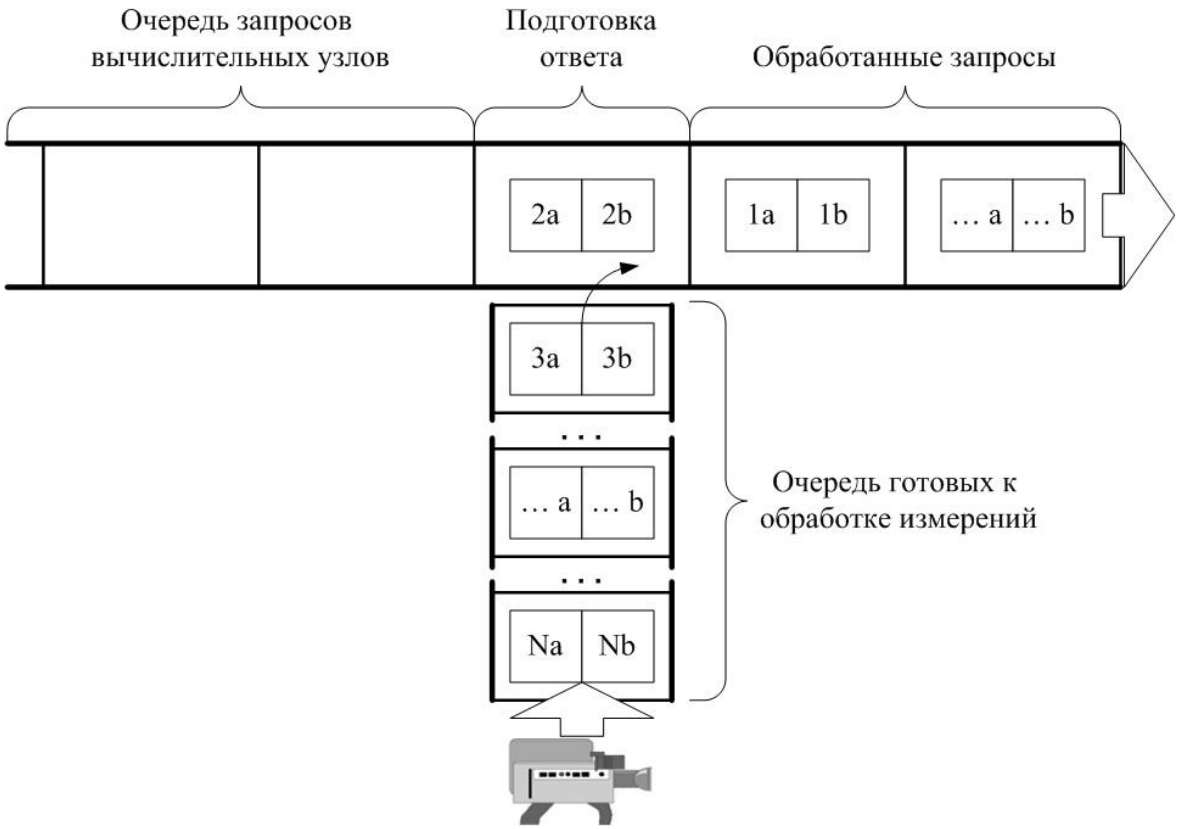



*Рис. 10. Распределение данных в ответ на запросы вычислительных узлов*

влечения измерений из очереди они могут передаваться клиентам параллельно. В случае наличия большого количества конкурентных запросов число параллельных передач определяется доступными ресурсами на компьютере ЭУ, при этом остальные вычислительные узлы будут простаивать в ожидании появления доступных ресурсов. Это позволяет использовать канал связи максимально эффективным образом. В настоящий момент реализован подход, когда при наличии данных в очереди они будут отдаваться сервером в ответ на все поступающие запросы при наличии доступных ресурсов на компьютере ЭУ.

Для взаимодействия ЭУ и вычислительных узлов разработан «Протокол PIV». При этом ЭУ является сервером, а на вычислительных узлах работают клиенты.

***Применение предложенной модели дает следующие преимущества:***

– Отсутствует необходимость в синхронизации между вычислителями на стороне суперкомпьютера.

– Автоматическая балансировка нагрузки по вычислительным узлам.

– Возможность изменять число используемых вычислительных узлов во время проведения процесса обработки данных.

– Возможность использовать вычислительную мощность нескольких суперкомпьютеров.

– Минимизация потери данных в случае выхода из строя одного или нескольких вычислительных узлов (в худшем случае будет потеряно только текущее обрабатываемое измерение сбойного узла). В ситуации, когда потеря данных недопустима, на время расчета сообщение необходимо сохранять в памяти сервера и в случае выявления сбоя повторно добавлять эти сообщения в очередь готовых к обработке сообщений.

Необходимо отметить, что предлагаемый подход не ограничивает нас в выборе транспорта для передачи данных. Текущая реализация использует для передачи данных протокол PIV. Однако возможно применение общей СХД, подключенной и к ЭУ, и к супервычислителю. В этом случае задачей диспетчера будет распределение

по вычислительным узлам не самих данных, а путей к файлам с данными на СХД, при этом вычислительные узлы будут считывать данные непосредственно из файлов на СХД. Это позволит анализировать и сравнивать поведение как классической схемы с общим дисковым пространством, так и предлагаемой схемы без промежуточного хранения данных на дисковых массивах.

## 3. Протокол взаимодействия оконечных систем [3, 7].

Протокол PIV является протоколом прикладного уровня, реализующим идею модели RPC. Протокол работает по схеме запрос-ответ и может использовать в качестве протокола транспортного уровня любой надежный потоковый протокол передачи данных.

Протокол PIV рассчитан на передачу нескольких блоков бинарных данных. В одном пакете протокола можно передать от нуля до 65 535 блоков, каждый из которых может иметь размер до 4 Гбайт. Формат пакета протокола PIV приведен на рис. 11. Поля заголовка пакета протокола кодируются в сетевом порядке байт.

Текущая реализация протокола PIV поддерживает транспортные протоколы TCP и UDT [2]. Положение протокола PIV в стеке сетевых протоколов показано на рис. 12. Протокол UDT – это основанный на UDP протокол передачи данных для высокоскоростных сетей. Он был разработан в Университете штата Иллинойс в Чикаго. Функциональные возможности протокола UDT аналогичны протоколу TCP. UDT является дуплексным протоколом передачи потока данных с предварительной установкой соединения. Особенностью протокола UDT является оригинальная архитектура и реализация, а также оригинальный алгоритм управления перегрузкой. При этом протокол UDT позволяет программисту реализовать и использовать свой алгоритм управления перегрузкой.

Программное обеспечение [20], реализующее передачу данных с помощью предложенной модели, разработано с использованием языка программирования C++ и библиотек Boost. Язык C++ был выбран по причине удобства разработки и его распространенности на суперкомпьютерах. Использование библиотек Boost позволило упростить кроссплатформенную реализацию асинхронной работы с сетевыми соединениями. Программное обеспечение состоит из трех логических компонентов: подсистема загрузки данных; диспетчер (менеджер очередей); клиентская библиотека. Клиентская библиотека предоставляет API для написания расчетных приложений, запускаемых на суперкомпьютере, и приложений загрузки данных для экспериментальной установки. В дополнение к этому реализовано расчетное приложение с использованием клиентской библиотеки, реализующее кросскорреляционный алгоритм расчета PIV-данных.

Сервер работает непосредственно на экспериментальной установке и отвечает за загрузку данных и их распределение по вычислительным узлам. Для минимизации затрат ресурсов сетевое взаимодействие реализовано по асинхронной модели, что

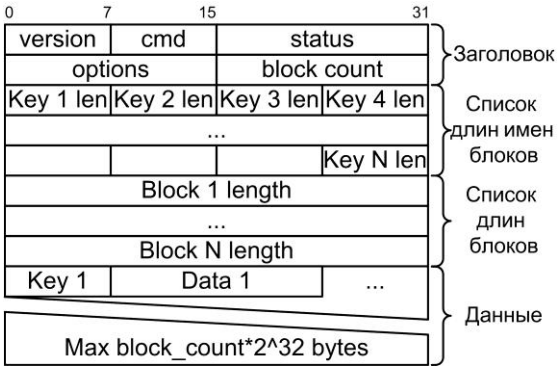



*Рис. 11. Формат пакета протокола SciMP*

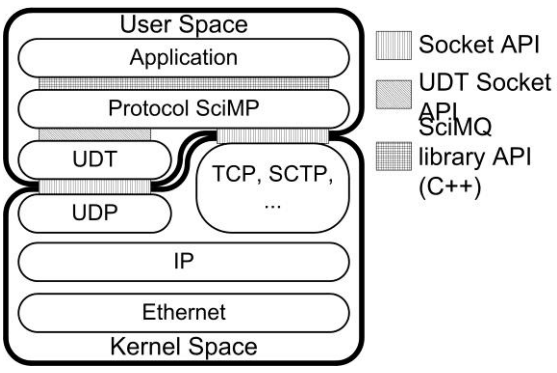



*Рис. 12. Положение протокола SciMP в стеке сетевых протоколов*

позволяет эффективно обрабатывать большое количество параллельных соединений в небольшом числе процессов. Клиентская библиотека предоставляет API, которое позволяет запрашивать у сервера новый блок исходных данных и отправлять на сервер результаты расчетов (или подтверждение об успешном расчете, если отправка полных результатов на ЭУ не требуется).

## 4. Оценка эффективности применения предложенной модели.

Оценка эффективности проводилась с использованием управляющего компьютера PIV-системы (ИМСС УрО РАН, Пермь) и суперкомпьютера «URAN» (ИММ УрО РАН, Екатеринбург), соединенных по выделенному каналу пропускной способностью 1 Gbps. Вычислительные узлы получали доступ к PIV-системе через головной узел суперкомпьютера с использованием технологии PAT.

В качестве тестового набора данных использовались 1 000 ранее полученных измерений размером 13,6 Мбайт каждое. На рис. 13 приведен график зависимости суммарного времени расчета всего множества данных от числа задействованных вычислительных узлов для двух алгоритмов: «A» и «B». Исследуется ситуация, когда m = n, т.е. число параллельных потоков равно числу вычислительных узлов. Рассматриваемым отличием алгоритмов является время расчета, при этом детальное описание алгоритмов выходит за рамки этой статьи. Алгоритм «A» производит расчет одного измерения за время порядка 1,4 с, а алгоритм «B» – 2,5 с.

На графике (см. рис. 13) можно выделить три области:

I – уменьшение времени расчета пропорционально числу узлов;

II – уменьшение времени расчета изменяется медленнее, чем число узлов;

III – время расчета не зависит от числа узлов.

На участке «I» пропускная способность системы ограничивается только доступными вычислительными ресурсами. Такая ситуация возникает, когда выполняется соотношение $\boldsymbol{\lambda << v}$ или когда параллельные потоки протокола PIV, из-за характеристик транспортных протоколов TCP (UDT), не могут занять всю пропускную способность канала передачи данных и поэтому не конкурируют между собой. Это значит, что $\partial v = 1$.

На участке «II» пропускная способность системы ограничивается и доступными вычислительными ресурсами, и пропускной способностью сети ($\partial v < 1$). Активные параллельные потоки начинают подходить к пределу пропускной способности сети и оказывают негативное влияние друг на друга. Уменьшение времени обработки массива данных еще наблюдается, но оно меньше, чем на участке «I».

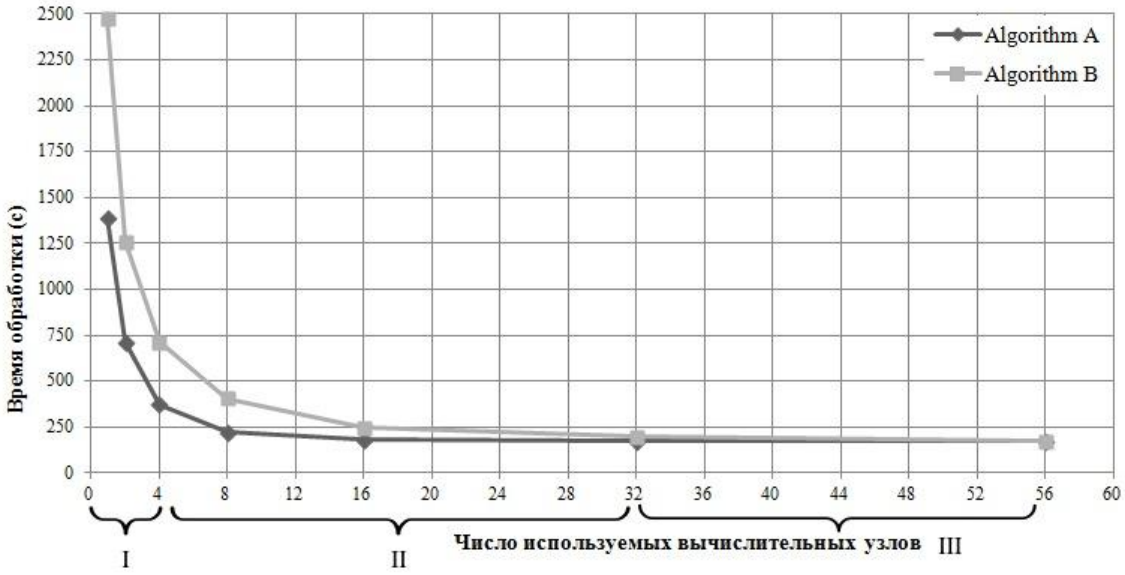



*Рис. 13. Суммарное время расчета множества данных*

На участке «III» пропускная способность системы ограничивается только пропускной способностью сети, а ее эффективный параллелизм для алгоритма «A» равен, как будет показано далее, $\partial v = 0{,}65$. Нахождение системы в этой области приводит к частичному простою вычислительных узлов.

Из графика следует, что границы областей зависят от времени расчета одного измерения t и пропускной способности сети. Для скорости сети 1 Гбит/с теоретическая пропускная способность тракта передачи данных v = 8,75 измерений в секунду. Тогда в идеальном случае число вычислительных узлов должно быть не менее $n = v \times t = 8{,}75 \times 1{,}4 \sim 13$. Однако, как видно из рис. 5 для графика «A», уменьшение времени счета происходит при увеличении числа узлов до 16. Время расчета одного измерения получается равным 2,8 с (Увеличение вызвано тем, что часть времени вычислительные узлы простаивают). Реальная пропускная способность системы составляет $v = n/t = 16/2{,}8 = 5{,}71$ измерений в секунду. Эффективность параллельной передачи данных $\partial v = 5{,}71/8{,}75 = 0{,}65$. Это обстоятельство объясняется механизмами управления перегрузками TCP-протокола в каналах связи с большим BDP и наличием конкурирующих потоков.

Эмпирически можно установить следующие закономерности. Для расчета уже существующего набора данных число вычислительных узлов лучше выбирать из области «II». Эта область даст разумный баланс между используемыми вычислительными ресурсами и временем расчета. В случае расчета экспериментальных данных в реальном времени число вычислительных узлов должно находиться на участке «III». В этом случае часть вычислительных ресурсов будет простаивать, но так как лимитирующим фактором будет являться сеть передачи данных, то общая пропускная способность системы будет близка к пропускной способности самого медленного элемента системы – сети. При этом чем ближе выбранное число узлов будет к границе области «II», тем больше будет чувствительность системы к флуктуациям времени расчета одного измерения. Дополнительные узлы повысят вероятность нахождения системы в области «III» в случае аварийного отказа части вычислительных узлов (например, потери связи) и тем самым повысят ее надежность.

## Приложения

В качестве научной задачи [10, 17, 18, 23], требующей сочетания больших скоростей передачи данных и высокопроизводительных систем обработки данных, сформулирована задача обработки интенсивного потока экспериментальных данных на удаленном суперкомпьютере в реальном времени. Одной из таких задач является обработка экспериментальных данных, получаемых по ранее описанному методу PIV (Particle Image Velocimetry) – оптическому методу измерения полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока.

### 1. Экспериментальная установка.

Измерительная часть установка PIV состоит из следующих компонент [1, 2]. Мощный импульсный лазер Quantel используется для освещения измерительной области лазерным ножом регулируемой толщины. Две цифровые камеры ВИДЕОСКАН-11002-2001 на базе CCD матрицы разрешением 4004 × 2671 (пикселей) и разрядностью АЦП 12 бит/пиксель регистрируют мгновенные изображения с кадровой частотой от 1,2 до 5,8 Гц. Синхронизатор и персональный компьютер с программным обеспечением Actual Flow управляют экспериментом и сохраняют полученные с камер данные.

Камеры подключены к компьютеру через карту видеозахвата (PCI-контроллер VS2001). Компьютер работает под управлением операционной системы Windows XP, оснащен четырехъядерным процессором (Phenom 2X4) с тактовой частотой 3,2 ГГц, имеет объем оперативной памяти 4 ГБ и дисковой памяти 1 ТВ, подключен двумя

портами 1 GE к коммутирующему оборудованию ИМСС УрО РАН. ПО Actual Flow возможна также последующая обработка данных и визуализация результатов обработки, однако большой объем получаемых данных, а также ресурсоемкость расчетных программ не позволяют проводить обработку в реальном времени.

Экспериментальная установка (рис. 14) представляет собой прямоугольную кювету (70 × 70 см$^2$) с цилиндрической вставкой. Такая конфигурация позволяет обеспечить осевую симметрию и избежать оптических искажений в вертикальных сечениях. Конвективное течение создается набором распределенных нагревателей, что позволяет задавать структуру течения. Кювета располагается на вращающемся столе, который обеспечивает стабильное вращение в широком диапазоне угловых скоростей Ω. В качестве рабочих жидкостей используются силиконовые масла с различным значением кинематической вязкости. Трассерами являются стандартные PIV-частицы диаметром 20 мкм.

## 2. Алгоритм обработки структурированного потока данных.

Алгоритм параллельного расчета мгновенных полей скорости по изображениям, поступающих с измерительной установки, реализуется в двух вариантах. Первый вариант состоит в распределении непрерывного потока данных по процессорам. При этом каждый процессор выполняет последовательный алгоритм определения поля скорости по одной паре изображений во всей расчетной области. Второй вариант заключается в параллельном расчете на нескольких процессорах поля скорости для одной пары изображений. В этом случае целесообразна передача одной пары изображений от удаленной экспериментальной установки до внутренней сети кластера и последующее дублирова-

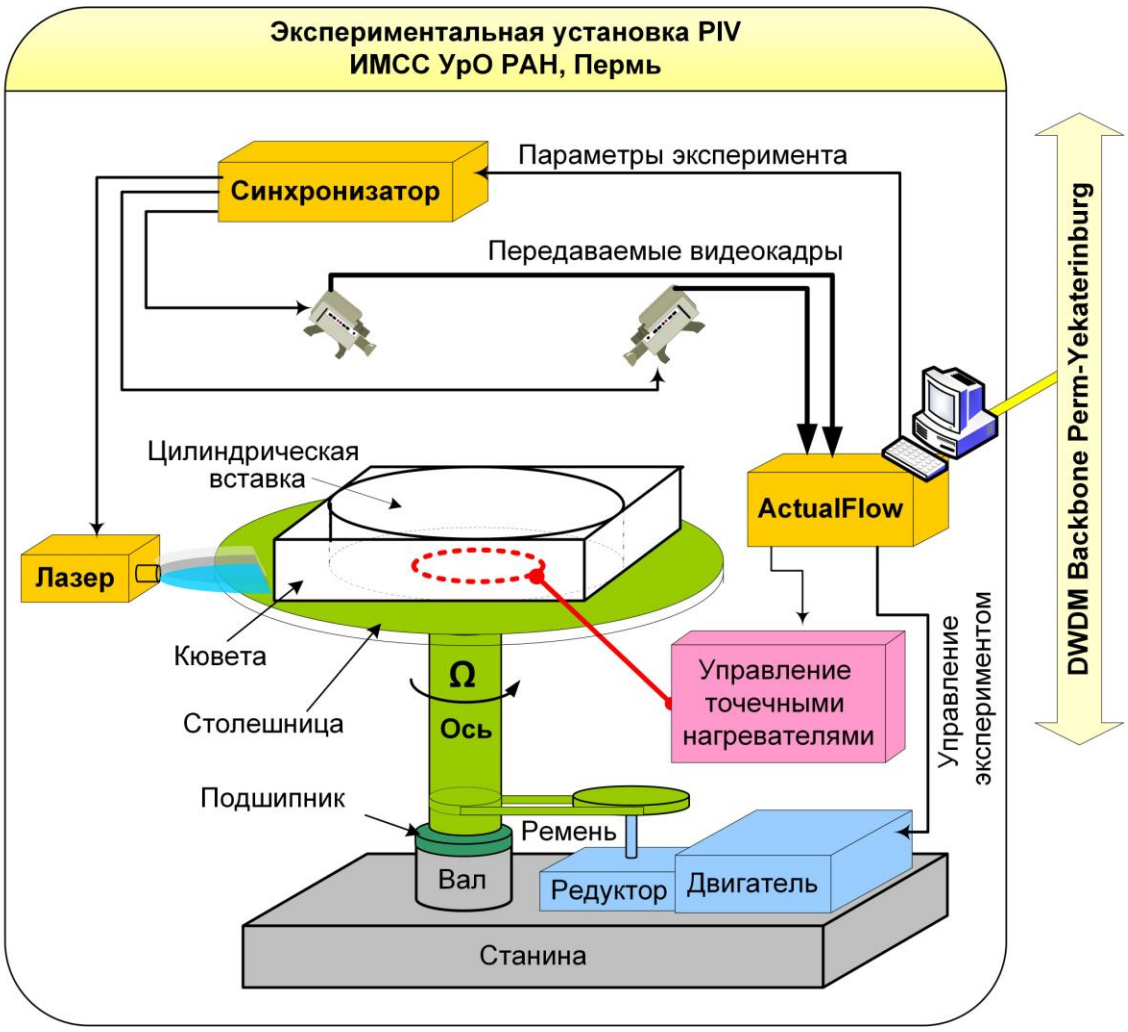



*Рис. 14. PIV-экспериментальная установка*

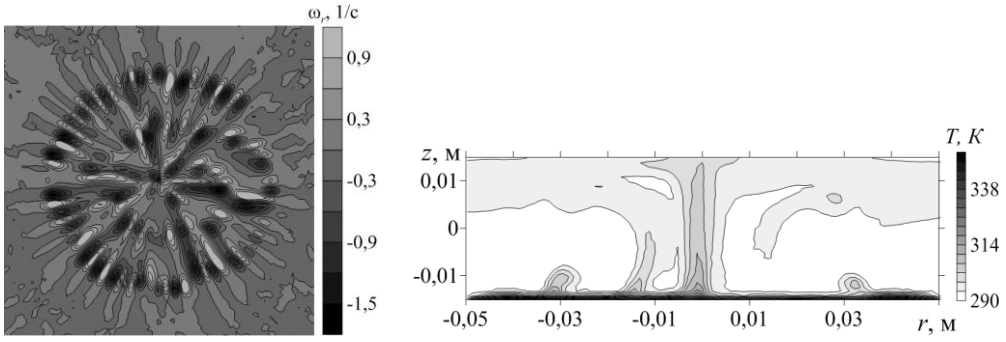
ние этой пары в оперативную память каждого процессора средствами межузловой сети кластера. Непосредственное распараллеливание расчетного алгоритма делается стандартным способом деления расчетной области на подобласти. Итерации циклов кросскорреляционного алгоритма являются информационно независимыми. Минимальный межпроцессорный обмен необходим лишь на стадии адаптационного уточнения.

Оба подхода параллельной обработки данных имеют свои преимущества и недостатки. Основное удобство использования первого подхода состоит в непосредственном применении любого последовательного: стандартного, адаптивного или вейвлет кросскорреляционного алгоритма. Межпроцессорный обмен отсутствует. Недостатком является ограничение минимального времени обработки одной пары изображений временем работы последовательного алгоритма. Это может быть критично при использовании высокоточных и ресурсозатратных алгоритмов, а также при обработке данных с высоким разрешением. Второй способ требует доработки в плане организации межпроцессорного обмена, но обладает практически неограниченными возможностями по минимизации времени обработки одной пары изображений. Окончательный выбор метода имеет смысл делать при всех известных условия проведения эксперимента.

## 3. Экспериментальное и численное исследование формирования вихревых течений различных масштабов в цилиндрическом слое.

В предлагаемой вниманию работе исследуются гидродинамические процессы в цилиндрическом слое с локализованным нагревом в центральной части. Локализованный нагрев приводит к появлению крупномасштабного течения в виде тороидальной конвективной ячейки. В пограничном температурном слое в области нагрева формируются мелкомасштабные вторичные течения, подобные тем, что подробно описаны в [24]. В результате возникает очень интересная для изучения гидродинамическая система с локализованными вертикальными струями, вихревыми структурами различных масштабов и крупномасштабной циркуляцией. Данная работа является первым этапом детального анализа распределения завихренности в описываемой системе, в ходе которого будут рассматриваться: структура полей завихренности при взаимодействии сдвигового течения с вертикальными струями; формирование и эволюция вихревых структур в пограничном слое адвективного течения в неподвижном цилиндрическом слое с локализованным нагревом.

В пограничном слое основного потока формируются вторичные течения в виде горизонтальных валов (рис. 15, *а*) и всплывающих конвективных струй (рис. 15, *б*), являющиеся основным источником пульсаций поля скорости. В результате проведенной работы было показано, что радиальная завихренность возникает вследствие образования радиально ориентированных конвективных валов. Распределение азимутальной компоненты завихренности носит более сложный характер. Имеется ее переменная составляющая, обусловленная поперечными валами, которые сносятся к центру основным течением.




*а* *б*

*Рис. 15. Поле радиальной компоненты завихренности на высоте h = 3 мм (а), всплывающие конвективные струи в центральном вертикальном сечении (б)*

На среднем поле эти структуры не видны, и распределение завихренности определяется сдвигом основного радиального течения, а знак завихренности – вертикальным градиентом радиальной компоненты скорости. Вертикальная компонента завихренности имеет значения, заметно меньшие значений горизонтальных компонент. Источники генерации вертикальной завихренности также находятся в местах образования и всплытия вторичных структур. Подробное описание результатов данного раздела можно найти в статье [25].

## 4. Экспериментальное исследование характеристик двухфазного потока в факеле форсунки.

Разработан уникальный алгоритм с использованием вейвлет-функций для экспериментального исследования структуры двухфазного потока в факеле форсунки при помощи системы PIV «Полис», реализация которого ориентирована для параллельного счета на суперкомпьютере.

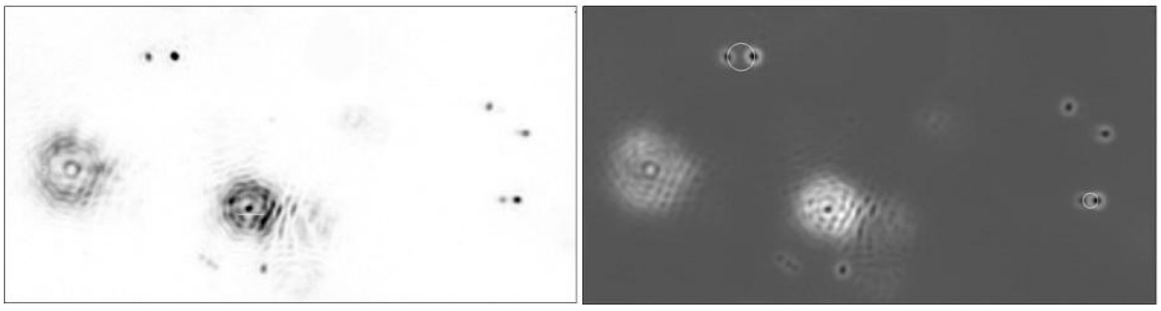
Один из простейших вариантов обработки изображений состоит в следующем. Исходя из средней засветки выбирается порог интенсивности, что позволяет бинаризовать изображения. Далее соседние ненулевые пиксели объединяются в группы, которые при превышении определенного числа пикселей в группе рассматриваются как блик. После это осуществляется поиск парных бликов, ближайших друг к другу. Такой алгоритм позволяет находить пары бликов («двойные блики») и восстанавливать размеры капель.

Задача становится более сложной, если изображение характеризуется высоким уровнем шума, связанного с наличием крупных засвеченных объектов. Блики могут иметь неправильную форму, а интенсивность света в области блика может быть сильно неоднородна. Поэтому в случае изображений с высоким уровнем контраста и низким уровнем шумов удается получить хорошие результаты, однако в случае наличия заметных оптических дефектов нельзя использовать предложенную выше методику поиска пар бликов без предварительной фильтрации изображения от шумов и крупных оптических дефектов. Оптимальным способом оказалось применение вейвлет-преобразования с использованием вейвлет-функции

$$\psi(x,y)=\left(2-(x^2+y^2)\right)e^{\frac{-(x^2+y^2)}{2}}$$

(«мексиканской шляпы»). Масштаб вейвлет-функции подбирался по среднему размеру бликов.

После вейвлет-преобразования изображения получаем плоскость вейвлет-коэффициентов (рис. 16, *б*), на которой блики имеют ряд отличительных признаков. В центре блика – максимум интенсивности (темное пятно), а на периферии – область отрицательных значений вейвлет-коэффициентов (светлое кольцо). Объекты такой структуры достаточно надежно определяются по величине коэффициента кросс-корреляции с



*а* *б*

*Рис. 16. Применение вейвлет-обработки для анализа изображений: а – исходное изображение; б – результат обработки (распределение вейвлет-коэффициентов). Окружности показывают пары бликов, по которым производится восстановление размеров капель*

шаблоном. Затем по парам соседних бликов определяется размер капли (рис. 16, *б*).

Ключевой особенностью предложенной методики является процедура валидации, то есть отбора только тех парных бликов, которые действительно сформированы на одной капле. В условиях достаточно плотных потоков или при высоком уровне шума корректная валидация является необходимым условием для применения того или иного метода измерений. Для процедуры валидации предлагается использовать два изображения потока, полученных с малой (заданной) задержкой по времени. Подобным образом производится съемка изображений для восстановления поля скорости методом PIV. Затем анализируется смещение пар бликов на втором изображении относительно первого. Если оба блика смещаются синхронно, то предполагается, что данная пара бликов валидна и может быть использована для измерения размеров капли, в противном случае данные пары бликов не валидны и исключаются из рассмотрения. Пример использования процедуры валидации показан на рис. 17. Валидные капли соединены прямыми линиями.

Другие капли, обнаруженные на первом этапе валидации и отмеченные окружностями, но для которых не нашлось пары на втором кадре, не используются в дальнейшем. Надо подчеркнуть, что в результате использования процедуры валидации помимо получения достоверной информации о размерах капель, восстанавливается также и скорость капель. Таким образом, появляется возможность исследовать зависимость скорости капель от их размера, восстанавливать пространственное распределение расхода (в плоскости лазерного ножа). Детальное описание разработанной методики можно найти в [26]. Распределение размеров, восстановленное при помощи предлагаемой методики, показано на рис. 18.

Измерения производились в факеле распыла пневматической форсунки, в области размерами 14 × 9 мм$^2$, для двух режимов распыливания – режима «холостого хода» (рис. 18, *а*) и рабочего режима (рис. 18, *б*).

Хорошо видно, что с ростом расхода увеличивается размер капель, в режиме «холостого хода» заутеровский диаметр $d_{32}$ = 95 мкм, а средний диаметр d = 60 мкм, в

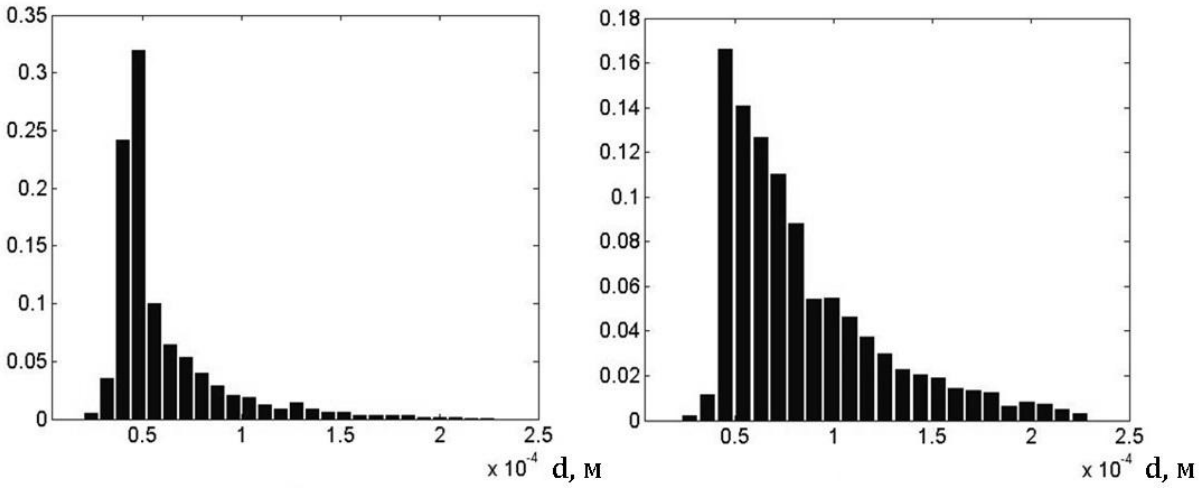
*Рис. 17. Пример использования процедуры валидации по смещению парных бликов. Показано наложение результатов обработки двух последовательных изображений. Линиями показано смещение капель*

рабочем режиме размер капель увеличивается: $d_{32}$ = 124 мкм, d = 84 мкм. Интересно, что с увеличением расхода заметно меняется структура распределения капель в плоскости скорость-диаметр (рис. 19), хорошо видно, что большая часть крупных капель движется с высокой скоростью.

Возможность распараллеливания созданных алгоритмов позволяет выполнять обработку потока измеряемых данных от установки PIV (ИМСС) на удаленном суперкомпьютере (ИММ) через скоростную сеть. Используется для оптимизации конструкций форсунок газотурбинных авиационных двигателей.

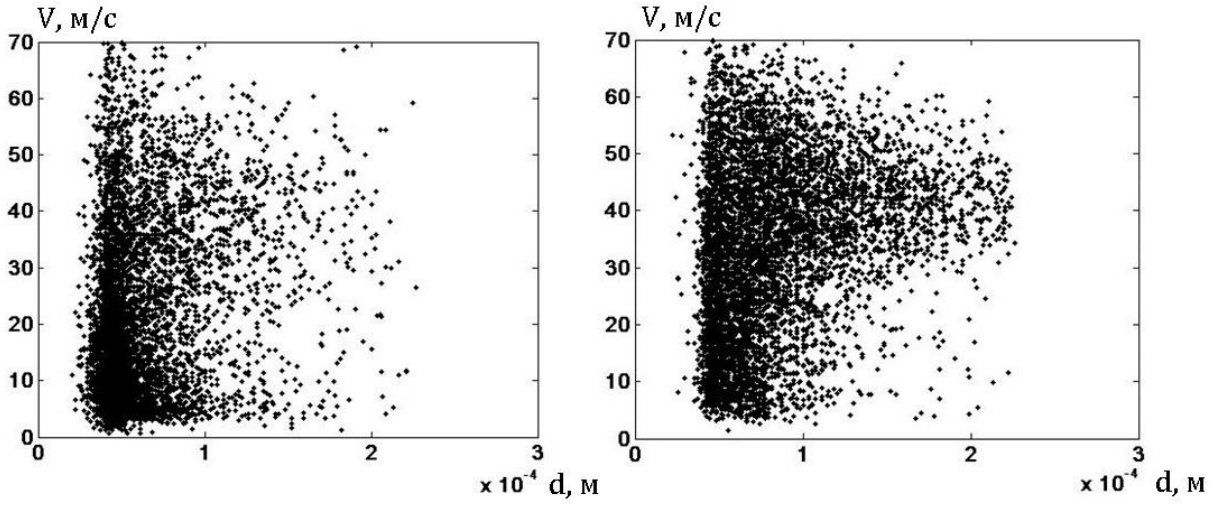
## 5. Экспериментальное исследование крупномасштабной циркуляции в кубической полости.

В настоящее время большой интерес представляют гидродинамические системы, которые, несмотря на достаточно простую геометрию, демонстрируют сложное динамическое поведение. Примером такой системы является турбулентная конвекция Рэлея–Бенара в прямоугольной полости. Показано, что в данной конвективной системе на фоне развитой турбулентности возникает крупномасштабный поток с нетривиальным характером эволюции. Для турбулентной конвекции в рассматриваемом классе прямоугольных полостей измерения динамики поля скорости показали, что в зависимости от значений числа Рэлея и аспектного отношения могут реализоваться три различных режима крупномасштабной циркуляции (КМЦ) (рис. 20).




*а* *б*

*Рис. 18. Распределение капель по размерам, а – для p = 0.1 атм., б – для p = 10 атм., по вертикали отложена относительная доля капель*




*а* *б*

*Рис. 19. Распределение капель в плоскости V-d: а – для p = 0,1 атм., б – для p = 10 атм*

*Первому режиму* свойственна устойчивая циркуляция, интенсивность которой демонстрирует стохастические колебания, но направление циркуляции остается неизменным. *Второй режим* – режим с инверсиями, имеет чередование интервалов времени с КМЦ в том или ином направлении. Длительность этих интервалов случайна, а в пределах каждого интервала КМЦ ведет себя подобно режиму 1. *В третьем* (смешанном) *режиме* наблюдаются многочисленные смены направления КМЦ, которые не разделяются интервалами с квазиустойчивой циркуляцией в одном направлении.

В ходе проведенной работы было показано, что задача о конвекции Рэлея–Бенара в прямоугольных полостях с различным аспектным отношением совмещает простоту постановки с широким диапазоном реализующихся в ней режимов конвекции при высоких значениях числа Рэлея. Задача может служить одним из бенчмарков для CFD-кодов, обеспечивающих, в том числе, расчеты турбулентного теплообмена в атомной энергетике. Благодаря канонической геометрии расчетной области можно надеяться на воспроизведение экспериментов различными исследовательскими группами с целью получения достоверной экспериментальной базы данных. Более подробно результаты работы изложены в [27].

Особенностью данных исследований является проведение длительных серий измерений (более суток). Время обработки данных на персональном компьютере, входящем в состав установки PIV, занимает на порядок большее время, чем реальное время эксперимента. Значительные временные затраты затрудняют проведение исследований. Применение предложенных в проекте решений позволяет существенно ускорить время обработки результатов и обеспечить полномасштабное исследование всех режимов КМЦ.

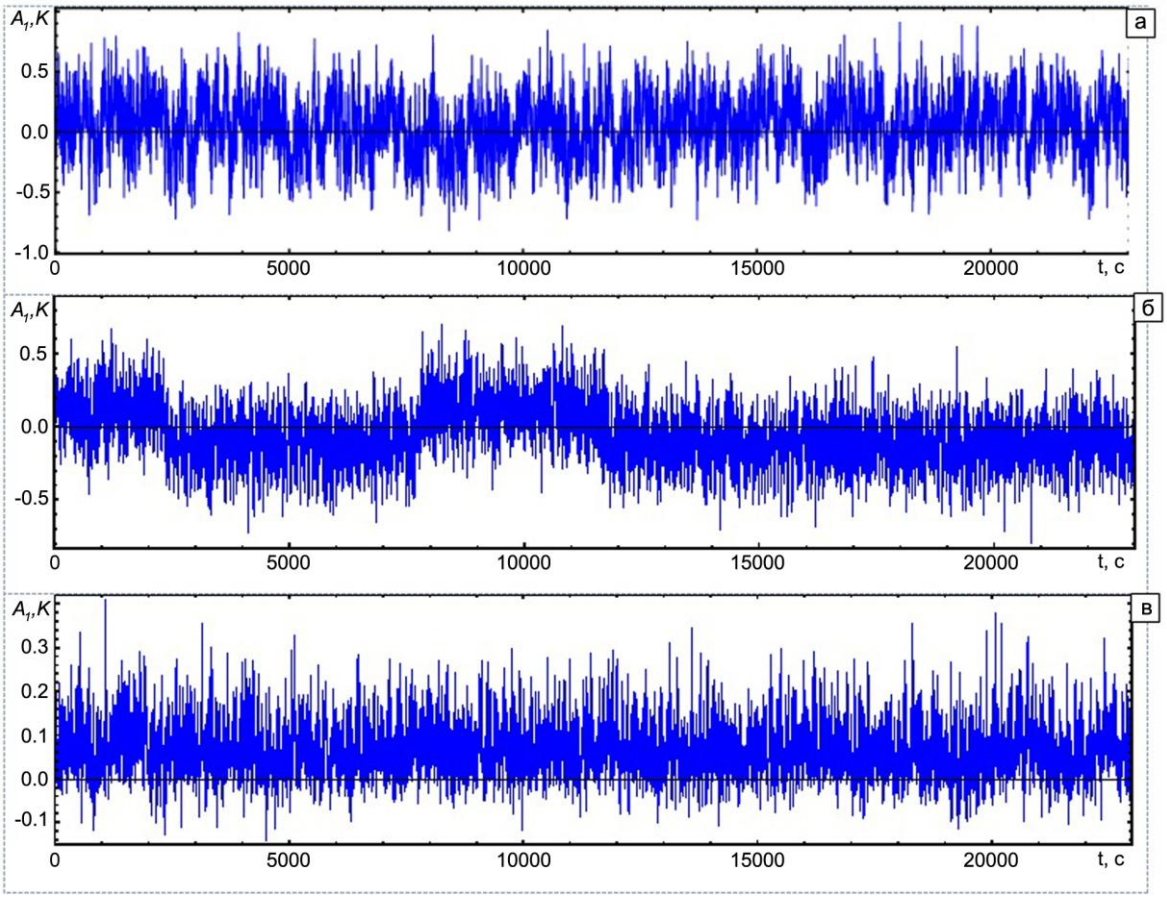



*Рис. 20. Вариации амплитуды крупномасштабных пульсаций температуры при Ra = 4,4 Ч10$^9$ в полостях с различной геометрией: Г = 0,1 (смешанный режим) (а), Г = 0,2 (режим с инверсиями) (б), Г = 1,0 (режим без инверсий) (в)*

## Заключение

Отличительной особенностью созданной Lambda Ggrid технологии является параллелизм передачи и обработки данных:

– прикладные задачи в оконечных системах – уникальные параллельные алгоритмы обработки данных;

– технологии передачи данных – темное оптоволокно и система спектрального уплотнения каналов;

– соединения между оконечными системами – эффективная диспетчеризация параллельных потоков данных.

*Область применения.* Создание интегрированной платформы измерительного комплекса (изображенный на рис. 21 Distributed PIV), включающего высокотехнологичное измерительное оборудование и производительную вычислительную технику, обеспечит условия для проведения уникальных физических экспериментов в исследовательских лабораториях, а на производстве – для организации диагностических стендов с возможностью real-time-мониторинга. Скоростные каналы передачи данных позволяют связать место проведения измерений с суперкомпьютерами, которые, как правило, находятся в центрах коллективного пользования. В результате отпадает необходимость наращивания локальных вычислительных ресурсов и тем самым снижаются финансовые затраты на проведение исследований.

*Планируемое направление дальнейших работ*: исследование различных аспектов параллельных, распределенных, сетевых и облачных вычислений, в том числе проект «Распределенный интерконнект» для создания территориально распределенных вычислительных сред и систем хранения данных [5, 16, 19].

Уместно также отметить, что успешность разработки новых парадигм распределенных вычислений возможна только при тесном взаимодействии архитекторов многопроцессорных систем и сетевых технологий, профессионалов по системному и параллельному программированию, ученых и экспериментаторов разных предметных областей.

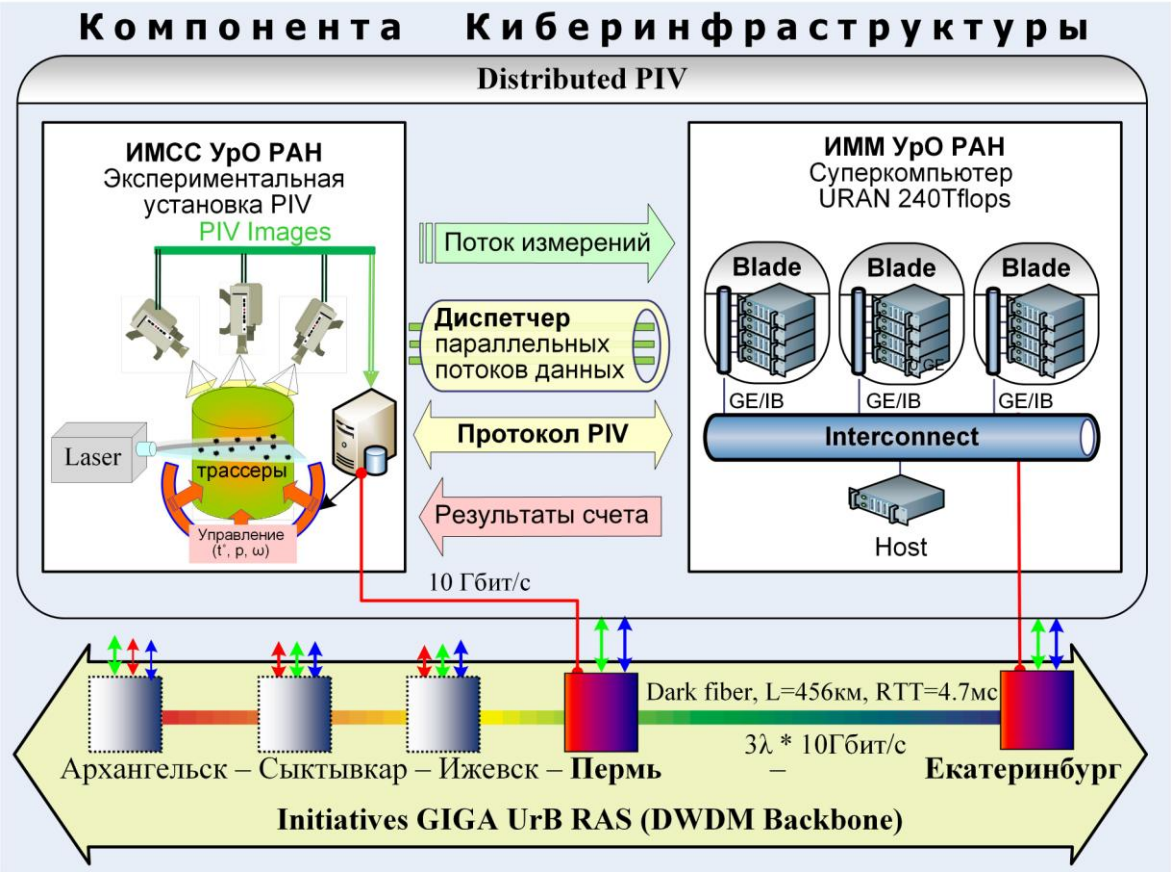



*Рис. 21. Прототип киберинфраструктуры «УРАЛ»*

## Библиографический список


1. *Андрейчиков Ю.С., Воронова Л.А., Токмакова Т.Н., Тендрякова С.П., Онорин А.А.* А.с. 529162 (СССР). Бюл. изобрет. – 1976. – № 35.
2. *Степанов Р.А., Масич А.Г., Сухановский А.Н., Щапов В.А., Игумнов А.С., Масич Г.Ф.* Обработка на супервычислителе потока экспериментальных данных // Вестник УГАТУ, Уфа, 2012. – Т. 16. – № 3 (48). – С. 126–133.
3. *Щапов В.А., Масич А.Г., Масич Г.Ф.* Модель потоковой обработки экспериментальных данных в распределенных системах // Вычислительные методы и программирование. – 2012. – Раздел 2. – С. 139–145. (http://num-meth.srcc.msu.ru/).
4. *Shchapov V., Masich A.* Protocol of High Speed Data Transfer from Particle Image Velocimetry System to Supercomputer // Proc. of The 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2012) September 18–21, 2012, Vol. 1. National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk. – P. 653–657.
5. *Большухин М.А., Васильев А.Ю., Будников А.В., Патрушев Д.Н., Романов Р.И., Свешников Д.Н., Сухановский А.Н., Фрик П.Г.* Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5. – № 4. – С. 469–480.
6. *Созыкин А.В., Гольдштейн М.Л., Масич Г.Ф., Масич А.Г.* Территориально-распределенная система хранения данных среды высокопроизводительных вычислений УрО РАН // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2013. – № 5. – С. 291–293.
7. *Степанов Р.А., Масич А.Г., Сухановский А.Н., Щапов В.А., Игумнов А.С., Масич Г.Ф.* Обработка на супервычислителе потока экспериментальных данных // Научный сервис в сети Интернет: экзафлопсное будущее: Труды междунар. Суперкомпьютерной конференции (19–24 сентября 2011 г., Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2011. – С. 168–174.
8. *Масич А.Г., Масич Г.Ф., Щапов В.А., Степанов Р.А.* Потоковая обработка больших массивов экспериментальных данных на удаленном суперкомпьютере // Тезисы Междунар. конференции «Математические и информационные технологии MIT-2011», (27.08.–31.08.2011, Врнячка Баня, Сербия, 31.08. – 5.09.2011, Будва, Черногория). – Белград, 2011. – С. 105.
9. *Масич А.Г., Масич Г.Ф. Тирон Г.Г.* Аспекты реализации первого этапа Инициативы GIGA UrB RAS // Сборник докладов XVIII конференции представителей региональных научно-образовательных сетей «RELARN-2011» (26 сентября – 2 октября 2011 г, Ростов-на-Дону – Казань). – М.: Изд-во Ассоциации РЕЛАРН, 2011. – С. 27–31.
10. *Масич А.Г.* Модель обмена интенсивными потоками данных в оптических сетях // Там же. – С. 31–34.
11. *Баталов В.Г., Колесниченко И.В., Степанов Р.А., Сухановский А.Н.* Применение полевых методов измерений для исследования двухфазных потоков // Вестник Пермского университета. Сер.: Математика. Механика. Информатика. – 2011. – № 5 (9). – С. 21–25.
12. *Масич А.Г., Масич Г.Ф., Матвеенко В.П., Тирон Г.Г.* Инициатива GIGA UrB RAS: методология построения и архитектура научно-образовательной оптической магистрали Уральского отделения РАН // Труды Межд. конференции Математические и информационные технологии, MIT-2011. – Белград, 2012. – С. 257–265.
13. *Масич А.Г., Масич Г.Ф., Щапов В.А., Степанов Р.А.* Потоковая обработка больших массивов экспериментальных данных на удаленном суперкомпьютере // Там же. – С. 266–270.
14. *Масич А.Г., Масич Г.Ф.* Аспекты реализации научно-образовательной оптической магистрали УрО РАН // Труды XIX Всерос. науч.-метод. конференции «Телематика'2012» (25–28 июля 2012 г., Санкт-Петербург). – СПб.: изд-во ИТМО, 2012. – С. 247–250.

15. *Щапов В.А., Масич А.Г., Масич Г.Ф., Хохлов И.А.* Алгоритм распределения потока экспериментальных данных по вычислительным узлам суперкомпьютера // Доклады Междунар. конференции «Интеллектуализация обработки информации» (16–22 сентября 2012 г., Черногория, г. Будва). – С. 699–702.
16. *Щапов В.А., Масич А.Г., Масич Г.Ф.* Модель потоковой обработки экспериментальных данных в распределенных системах // Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений: Труды Междунар. суперкомпьютерной конференции (17–22 сентября 2012 г., Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2012. – С. 227–232.
17. *Goldshtein M.L., Sozykin A.V., Masich G.F., Masich A.G.* Distributed High Performance Computing Environment of UrB RAS // Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education: Book of Abstr. of the 5th Intern. Conf. – Dubna: JINR, 2012. – P. 71.
18. *Евграфова А.В., Левина Г.В., Сухановский А.Н.* Исследование влияния вторичных структур на генерацию спиральности в адвективном потоке // Тезисы Всерос. науч. школы молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах». – Москва, 3–5 декабря, 2012 г. – С. 81.
19. *Sukhanovsky A., Batalov V., Stepanov R.* Measurements of the droplets size and velocity in two-phase flows // Abstracts of the 9th European Fluid Mechanics Conference. – Rome, 9–13 September, 2012.
20. Гольдштейн М.Л., Созыкин А.В., Масич Г.Ф., Масич А.Г. Вычислительные ресурсы УрО РАН. Состояние и перспективы // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2013): труды междунар. науч. конференции (1–5 апреля 2013 г., Челябинск). – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2013. – С. 330–337.
21. *Щапов В.А.* Программная архитектура системы передачи интенсивного потока данных в распределенных системах // Там же. – С. 566–576.
22. *Масич А.Г., Масич Г.Ф.* Методология построения территориальной киберинфраструктуры // Сб. докл. XX конференции представителей региональных научно-образовательных сетей «RELARN-2013» (1–6 июня 2013 г., Санкт-Петербург). – М.: Изд-во Ассоциации РЕЛАРН, 2013. – С. 58–67.
23. *Масич А.Г., Масич Г.Ф., Сидоров И.А.* Распределенный интерконнект: структура параллельных каналов и инструментарий исследования транспортных потоков в них // Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма: Труды Междунар. суперкомпьютерной конференции (23–28 сентября 2013 г., Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2013.
24. *Баталов В.Г., Колесниченко И.В., Степанов Р.А., Сухановский А.Н.* Два метода измерения размеров капель // Сборник тезисов XVIII Зимней школы по механике сплошных сред (18–22 февраля 2013 г., Пермь) – С. 40.
25. *Sukhanovsky A., Batalov V., Teymurazov A., Frick P.* Horizontal rolls in convective flow above a partially heated surface // Eur. Phys. J. B. – 2012. – Vol. 85. – № 1. – P. 1–12.
26. *Евграфова А.В., Левина Г.В., Сухановский А.Н.* Исследование распределения завихренности и спиральности при взаимодействии адвективного потока с вторичными структурами // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6. – № 4. – С. 451–459.
27. *Баталов В.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н.* Применение прямых оптических методов измерений для исследования характеристик двухфазного потока // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014. – № 76. – 20 с.
28. *Большухин М.А., Васильев А.Ю., Будников А.В., Патрушев Д.Н., Романов Р.И., Свешников Д.Н., Сухановский А.Н., Фрик П.Г.* Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5. – № 4. – С. 469–480.

Научное издание

**Этюды о механике**

Утверждено к печати ученым советом
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук

Редактор Юрлова Н.А.
Оригинал-макет – Бушуева К.А.

Лицензия №0047 от 10.01.99
Подписано в печать 06.03.2017. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. – 12. Тираж – 150 экз.
Заказ № 48/2017

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1
ИМСС УрО РАН

Отпечатано в типографии «Новопринт»
Адрес: 614025, г. Пермь, ул. Пихтовая, 37.

ISBN 978-5-7691-2477-8