

В диссертационный совет Д 004.012.01
на базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
механики сплошных сред Уральского
отделения Российской академии наук.
614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора
Демёхина Евгения Афанасьевича
на диссертационную работу **Перминова Анатолия Викторовича**
«Движение жидкостей с различной реологией во внешних силовых полях», представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Большая часть диссертации Перминова А.В. посвящена разработке теоретических положений, описывающих поведение нелинейно-вязких и вязкопластических жидкостей в вибрационном поле. Расширение вибрационной теории на класс неильтоновских жидкостей определяет **актуальность и новизну работы**, а также является наиболее важным вкладом автора диссертации в науку. Исследование адвективных течений проводящих и бинарных жидкостей и их устойчивости **актуально** в связи с возможными приложениями результатов, например, для описания процессов связанных с получением монокристаллов методом Бриджмена. **Новыми** являются результаты решения задачи о влиянии постоянного однородного магнитного поля на устойчивость адвективного течения проводящей жидкости в бесконечном горизонтальном канале прямоугольного сечения. Диссидентом **впервые** изучено влияние термодиффузии на устойчивость адвективного течения бинарной смеси в плоском горизонтальном слое. Требования к энергоэффективности технологий индукционной плавки определяют **актуальность** созданной диссидентом адекватной математической модели, описывающей осредненный и пульсационный тепломассоперенос и распределение магнитного поля в проводящем расплаве при нестационарном электромагнитном воздействии.

Исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, были поддержаны пятнадцатью грантами и программами финансирования научных

исследований, что подчеркивает **теоретическую и практическую значимость работы**.

Результаты диссертации докладывались на ряде международных и всероссийских конференций, научных школ, конгрессов и семинаров. Основные результаты диссертации опубликованы в 25 статьях, 15 из которых представлены в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий установленный Министерством образования и науки Российской Федерации, 11 статей проиндексировано в международных системах цитирования Web of Science и SCOPUS.

Достоверность, полученных результатов, обеспечивается применением известных теоретических подходов и численных методов. Результаты численных расчетов в предельных случаях согласуются с численными и аналитическими результатами известными из литературы.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 374 страницы; работа содержит 92 рисунка и 9 таблиц. Список литературы насчитывает 372 наименования.

Во введении обсуждается актуальность проблем, затронутых в диссертации, и степень их разработанности, определены цели и задачи исследования, отмечены научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы. Кроме того во введении обсуждаются методология и методы диссертационного исследования, перечисляются положения, выносимые на защиту и определяется личный вклад автора.

В первой главе приводится краткая характеристика структурно-механических свойств жидкостей и достаточно обширный обзор литературы. В частности обсуждается возможность применения модели Уильямсона для описания реологических свойств вязкопластичных жидкостей.

Во второй главе исследуются изотермические пульсационные и осредненные течения дилатантных, псевдо- и вязкопластических жидкостей возникающие при обтекании твердых тел. На основании метода многих масштабов получены уравнения, описывающие течение степенной жидкости в пределах вязкого стокового пограничного слоя, возникающего вблизи твердой поверхности. Показано, что усиление нелинейно-вязких свойств жидкости приводит к увеличению амплитуды пульсационного течения и уменьшению интенсивности осредненного течения в пограничном слое. Для случая обтекания пульсационным потоком дилатантной жидкости бесконечно-длинного твердого цилиндра получено эффективное граничное условие на внешней границе пограничного слоя, которое возможно использовать для описания осредненного течения в ядре потока. Показано, что при пульсациях вязкопластичной жидкости около бесконечно-длинного твердого цилиндра вблизи него образуются жидкие и жесткие зоны, взаимное расположение которых изменяется в течение периода пульсаций. Осредненное течение вязкопластичной жидкости качественно отличается от течения ньютоновской жидкости тем, что в нем присутствуют жесткие зоны.

С увеличением частоты пульсаций вблизи цилиндра генерируется характерное вихревое погранслойное течение.

В третьей главе рассмотрен тонкий слой вязкопластичной жидкости, ограниченный сверху свободной поверхностью, а снизу – твердой плоскостью. В начале главы исследуется стационарное течение слоя вязкопластичной жидкости в поле тяжести, описываемой реологическими моделями Шведова-Бингама и Уильямсона. Показано, что тип реологической модели не влияет на форму и интенсивность такого течения. Далее изучается влияние на течение симметричных и несимметричных касательных вибраций. Реологические свойства жидкости задавались неразрывной моделью Уильямсона. Показано, что вибрации порождают течение даже при слабом гравитационном воздействии, когда в отсутствие вибраций слой, находясь в жестком состоянии, поконится на твердой поверхности. При несимметричных вибрациях возможно движение слоя против поля тяжести. Получены немонотонные зависимости расхода жидкости от периода вибраций наклонной плоскости. Определены значения пороговых амплитуд скорости вибраций твердой поверхности, при достижении которых в слое возможна генерация осредненного движения. В конце третьей главы исследуется устойчивость стационарного плоскопараллельного течения слоя жидкости Уильямсона по наклонной твердой поверхности в поле тяжести в отсутствие вибраций. Показано, что наибольшую опасность представляют длинноволновые возмущения свободной поверхности жидкости. Анализ результатов показал, что в предельных случаях сильных и слабых гравитационных воздействий, критическое число Рейнольдса, определяющее устойчивость течения в слое, пропорционально тангенсу угла наклона слоя.

В четвертой главе выполнено обобщение осредненных уравнений термовибрационной конвекции и условия существования квазиравновесных состояний на класс неоднородно-нагретых обобщенных ньютоновских жидкостей, находящихся в поле малоамплитудных высокочастотных неакустических вибраций. Показано, что наклонный бесконечный слой вязкопластичной жидкости, ограниченный твердыми границами, в поле высокочастотных вибраций может находиться в жестком состоянии при произвольных пространственных ориентациях вектора градиента температуры, но вибрации должны быть направлены вдоль него. Найдено, что жесткое состояние вязкопластичной жидкости может стать неустойчивым при ориентациях слоя, близких к вертикали или горизонтали. Высокочастотные вибрации стабилизируют жесткое состояние слоя. Исследована структура вибрационно-конвективного течения вязкопластичной жидкости в плоском вертикальном бесконечном слое при подогреве сбоку. Вибрации направлены вдоль слоя. Увеличение интенсивности вибраций ослабляет проявление вязкопластичных свойств жидкости.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию устойчивости стационарного конвективного течения жидкости Уильямсона в вертикальном

бесконечном слое, ограниченном твердыми идеально-теплопроводными плоскостями, на которых поддерживаются постоянные разные температуры. В главе приведены карты устойчивости стационарного плоскопараллельного конвективного течения псевдо- и вязкопластичных жидкостей относительно нормальных плоских возмущений. При числах Прандтля близких к единице неустойчивость стационарного течения определяется монотонными гидродинамическими возмущениями. При больших числах Прандтля за неустойчивость течения ответственны тепловые колебательные возмущения. Показано, что пороговое значение числа Прандтля, определяющее переход от монотонной неустойчивости течения жидкости к колебательной, уменьшается с увеличением её неньютоновских свойств. Анализ численных результатов позволил получить значения чисел Гразгофа, определяющих переход реологических свойств жидкости от псевдопластических к вязкопластическим. При вязкопластичном поведении усиление неньютоновских свойств приводит к стабилизации течения относительно обеих мод неустойчивости. В конце главы приведены численные данные о пространственно-периодических структурах, возникающих в вертикальном слое псевдопластичной жидкости после потери устойчивости стационарным плоскопараллельным течением.

В первой шестой главе решается задача об адвективном течении слабопроводящей жидкости в бесконечном горизонтальном канале прямоугольного сечения, которое находится под влиянием внешнего стационарного магнитного поля, ориентированного в плоскости сечения канала. Показано, что интенсивность течения и распределение скорости в поперечном сечении существенно зависят от величины и направления магнитного поля. Проанализировано влияние магнитного поля на устойчивость стационарного течения для малых чисел Прандтля, при которых наиболее опасными являются монотонные гидродинамические возмущения с конечной длиной волны. Магнитное поле в большинстве случаев подавляет такие возмущения, при этом стабилизирующее действие вертикального магнитного поля более сильное, чем горизонтального. В пределе нулевого числа Прандтля обнаружено дестабилизирующее действие горизонтального магнитного поля на течение жидкости. Эффект дестабилизации наиболее заметен, когда ширина канала меньше его высоты и исчезает в широких каналах. Во второй части главы сформулирована математическая модель конвекции металлического расплава в переменном высокочастотном неоднородном магнитном поле индукционной печи. Модель учитывает взаимодействия поля и индукционных токов в расплаве. Рассчитаны распределения индукционных магнитных полей и токов для различных частот магнитного поля. Определен оптимальный режим прогрева парамагнитного образца.

В седьмой главе решается линейная задача устойчивости стационарного плоскопараллельного адвективного течения бинарной смеси в плоском горизонтальном слое, ограниченном сверху и снизу идеально-

теплопроводными твердыми границами. На границах слоя задается распределение температуры, соответствующее однородному продольному градиенту температуры. Задача решается с учетом эффекта термодиффузии (эффекта Соре). Расчеты выполнены для трех наборов характерных безразмерных критериев, один из которых соответствует металлическому расплаву. Расчеты показали, что при малых числах Прандтля нормальный термодиффузионный эффект оказывает слабое стабилизирующее действие на гидродинамические возмущения, возникающие в стационарном адвективном течении бинарной смеси. При достаточно больших числах Прандтля, когда наиболее опасными становятся тепловые релеевские моды неустойчивости, нормальный термодиффузионный эффект приводит к сильной дестабилизации течения. Для отрицательных значений параметра разделения в работе найдены новые термоконцентрационные моды неустойчивости.

К диссертации Перминова Анатолия Викторовича можно высказать ряд замечаний.

1. Большинство результатов получено численными методами, однако в работе уделено не достаточно внимания описанию численных процедур и оценке их точности.
2. В диссертации практически нет сравнений численных результатов с экспериментальными данными. Однако, даже при отсутствии экспериментов возможна постановка и аналитическое решение модельных задач, являющихся предельными случаями задач рассматриваемых в диссертации. Сравнение решения модельных задач с результатами численных расчетов подчеркнуло бы достоверность полученных результатов.
3. При исследовании влияния вибраций на движение нелинейно-вязких жидкостей автор, как правило, останавливает свой выбор на изучении воздействия касательных к потоку жидкости вибраций (см. глава 3 и п. 4.4). Чем обоснован выбор именно таких вибраций? Будут ли вибрации других направлений существенно влиять на структуру течения и его устойчивость?
4. В главе 4 получены уравнения термовибрационной конвекции обобщенной ньютоновской жидкости и приведены выражения для осредненных частей тензоров вязких напряжений для некоторых реологических моделей. В случае нелинейно-вязких систем, полученные в диссертации уравнения термовибрационной конвекции не носят общего характера. Автор ограничивается обсуждением пределов применимости, записанных уравнений, но не делает попытки распространить их на более широкий диапазон частот вибрационных воздействий и малые скорости конвективных течений.
5. В главе 5 обсуждение устойчивости стационарного конвективного течения жидкости Уильямсона ограничивается только рассмотрением плоских нормальных возмущений. В качестве обоснования выбора такого типа возмущений говорится, что для ньютоновских жидкостей в

данной конфигурации плоские возмущения являются наиболее опасными. Из результатов расчетов следует, что реологические свойства неニュтоновских жидкостей существенно влияют на форму и интенсивность основного течения. В этой ситуации вполне возможно появление пространственных мод возмущений, которые окажутся более опасными, чем плоские моды.

6. В шестой главе диссертации обнаружен эффект дестабилизации горизонтальным магнитным полем адвективного течения проводящей жидкости в бесконечном канале прямоугольного сечения. Однако, данный эффект изучен только для предельного случая нулевого числа Прандтля. Возникает вопрос, как проявляется данный эффект в узких каналах при числах Прандтля, характерных для реальных жидкостей?
7. Задача о конвекции расплава в индукционной печи, описанная в шестой главе, содержит только постановку и расчет структуры магнитного поля. Конвективные течения и их эволюция не обсуждаются. В связи с этим исследования, представленные в п. 6.2, выглядят не вполне законченными.
8. При определении структуры индукционного магнитного поля расчетная область распространяется за пределы рабочей камеры индукционной печи. В диссертации не даётся четкого обоснования выбора размеров расчетной области.
9. В предельном случае высоких частот магнитного поля индуктора представляется возможным построение асимптотической теории, позволяющей судить о распределении индукционного магнитного поля в пределах пограничного слоя, примыкающего к вертикальной границе рабочей камеры. Результаты таких аналитических исследований можно сравнить с результатами численных расчетов.

Диссертация Перминова А.В. написана хорошим научным языком. Автореферат диссертации полностью отражает её содержание. Приведенные замечания и присутствующие в работе в незначительном количестве, ошибки и опечатки не снижают **общего положительного впечатления** от работы. Диссертационная работа Перминова А.В. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» и всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертационным работам по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор заслуживает присуждения степени **доктора физико-математических наук**.

Я, Демёхин Евгений Афанасьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент: Профессор кафедры математики и информатики Краснодарского филиала ФГОБУ ВПО «Финансовый университет при

Правительстве Российской Федерации», 350051, г. Краснодар, ул. им. Федора Лузана, 34 / ул. Шоссе Нефтяников, 32, <http://www.krasnodar.fa.ru>, +7 (861) 215-63-60, edemekhi@gmail.com, доктор физико-математических наук, профессор

22.04.2016

✓
✓
✓

/Демёхин Евгений Афанасьевич/

Подпись профессора Демёхина Г.А. заверяю

Специалист по кадрам

Н.А. Пичугова

