

На правах рукописи

Краузин Павел Васильевич

**ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА
В ПРИРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук».

Научный руководитель: **Райхер Юрий Львович**, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Пелиновский Ефим Наумович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН»

Файзрахманова Ирина Сергеевна, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Защита состоится **«20» октября 2016 г.** в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» по адресу: 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; тел: (342) 2378314; факс: (342) 2378487; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук».

Автореферат разослан «___» сентября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент



/ А.Л. Зуев

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Согласно заключению экспертов Межправительственной группы по изменению климата, глобальное потепление вызвано повышением концентрации парниковых газов. Углекислый газ — основной газ, влияющий на стабильность климата, его доля среди всех парниковых газов составляет 62.5%. Одним из способов уменьшения выбросов CO₂ является его геологическое захоронение. Исследования геологического хранения CO₂ все еще находятся на относительно ранней стадии, хотя уже сегодня существуют применяемые технологии по утилизации в нефтегазовой отрасли. В связи с этим возникает потребность в изучении транспортных процессов газов в природных системах.

Другая проблема касается накопления газового метана в пористых средах, насыщенных водой, под действием температурной волны. В таких системах, как торфяные болота и затопленные почвы, анаэробное разложение органических осадков вызывает выделение метана. Часть метана растворяется в воде (до насыщения); часть формирует неподвижные газовые пузыри, удерживаемые силами поверхностного натяжения. Годовая температурная волна, проникающая в почву, существенно изменяет профиль растворимости, влияя на диффузионный транспорт насыщенного раствора. Влияние достаточно сильно, чтобы приводить либо к «запиранию» части выделяемого метана в пузырьковые слои, либо, наоборот, к усиленной диффузионной «вентиляции» системы.

Аналогичные процессы диффузионного транспорта в пористой среде происходят с пузырьками воздуха (кислорода и азота). Низкие температуры позволяют насытить приповерхностные слои вод газом, а повышение температуры приводит к переходу избыточной части газа из раствора в газовую фазу и формированию пузырьков. Таким образом, тепловая волна может не только насыщать воду кислородом и азотом, но и приводить к «накачке» этих газов в пузырьковые слои. Это существенно для флоры и фауны почв, насыщенных водой.

Важно, что выделение метана — наряду с углекислым газом одного из главных парниковых газов — связано в основном с торфяными болотами и затопленными почвами. Причем практика показала неожиданные негативные последствия осушения заболоченных почв — довольно часто среднегодовой выход метана увеличивался после ликвидации заболачивания. Кроме того, знание состояния системы (есть газовые слои или их нет) важно для предсказания ее реакции на изменение климата.

Примечательно, что эволюция торфяных болот зависит от транспорта как органических газов (метан), так и атмосферных (кислород, который окисля-

ет органические вещества). Только на территории Пермского края торфяные залежи более 800 болот имеют промышленное значение. Таким образом, исследования процессов переноса в таких системах непосредственно связаны с проблемами эффективного и безопасного освоения природных ресурсов Западного Урала.

Также представляют интерес ряд задач о процессах переноса заряда в гранулированных средах. Важность таких исследований для практических приложений обусловлена установлением свойств массивов по их электропроводности, одной из наиболее легко измеримых характеристик (измеряемой на практике при бурении скважин). Среди прочего, этим задачам нехарактерна регулярность структур — даже для упаковки идентичных сфер, структура оказывается непериодической (и сама математическая задача о плотнейшей упаковке сфер не решена для трехмерного случая). Для описания таких сред не всегда приемлемы методы, предполагающие средние поля и строящие разложения по их флуктуациям. Такой подход, например, непригоден для исследования распределения механических напряжений в гранулированной среде, поскольку распределения имеют «древовидную» структуру и силы, действующие на гранулы в цепочке напряжений, на порядок и более превышают средние силы, действующие на контактах гранул. Эти обстоятельства становятся значимыми при рассмотрении поверхностного механизма проводимости, поскольку в таком случае макроскопическая проводимость массива зависит от геометрических контактов гранул, а значит и распределения напряжений.

Целью диссертационной работы является исследование процессов переноса в природных пористых системах, таких как заболоченные почвы, торфяные болота, донные отложения и т. п. Достижение поставленной цели обеспечивается решением задач о влиянии тепловой волны на диффузионный транспорт одно- и двухкомпонентных слаборастворимых веществ в насыщенных жидкостью пористых средах, а также установлении зависимости между макроскопической удельной электропроводностью гранулированных сред, размером частиц и механическими напряжениями в них.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые

- исследовано влияние температурных волн на транспорт и аккумуляцию слаборастворимых веществ (газов и твердых веществ: «нерастворимых» солей, газовых гидратов и т. д.) в пористых средах, насыщенных жидкостью;
- изучен процесс генерации пузырьковой фазы двухкомпонентных газов;
- теоретически исследована зависимость электропроводности песчаных массивов от размера зерен и механических нагрузок.

Практическая значимость. Результаты, полученные в первых двух главах, могут быть востребованы как в технике, где исследуемые эффекты предоставляют возможность контролировать распределение массы нерастворенной фазы рассматриваемого слабо растворимого вещества внутри пористого образца без нарушения его целостности, так и при изучении природных систем. В частности, при изучении выделения метана (одного из главных парниковых газов) торфяными болотами или формирования пузырьковых горизонтов атмосферных газов, что существенно для флоры и фауны затопленных почв.

Материал третьей главы может оказаться востребованным для ряда задач геологоразведки, например восстановления характерного размера зерен песка по данным электропроводности песчаных массивов, информация о котором далее используется для прогнозирования состава породы.

Положения, выносимые на защиту:

1. аналитические выражения для среднего по времени диффузионного потока слабо растворимых веществ в пористых массивах, всюду насыщенных этими веществами, при наличии температурных колебаний поверхности;
2. численные и приближенные аналитические решения, определяющие распределения концентраций слабо растворимых веществ в пористых массивах с областями, ненасыщенными этими веществами, при наличии температурных колебаний поверхности;
3. аналитические выражения относительной скорости генерации пузырьковой фазы двухкомпонентных газов во всюду насыщенных этими газами растворах в изотермическом случае;
4. вывод об однородном долевым составе двухкомпонентных газов в растворах с областями, ненасыщенными этими газами, при наличии температурных колебаний поверхности;
5. скейлинг-соотношение макроскопической удельной электропроводности градуированных сред при поверхностном механизме переноса заряда.

Достоверность результатов обеспечивается анализом границ применимости предлагаемых моделей; согласием результатов, полученных численно, а также с помощью аналитического приближения; тестированием численной схемы на устойчивость и сходимостью.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: V Краевая научно-практическая конференция «Физика для Пермского края» (Пермь, 2012); IX Всероссийская научная конферен-

ция им. Ю. И. Неймарка «Нелинейные колебания механических систем» (Нижний Новгород, 2012); XXI Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2012); Конференции молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, 2012); XVII Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2013); I Всероссийская научно-техническая интернет-конференция студентов и молодых ученых «Прикладная математика, механика и процессы управления» (Пермь, 2013).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах: 4 статьи в журналах, являющихся рецензируемыми научными изданиями, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук [1–4]; 2 статьи в журнале, индексируемом системой РИНЦ [5,6]; 2 статьи в сборниках трудов конференций [7,8] и 6 тезисов докладов [9–14].

Личный вклад автора. Постановка задач, выбор теоретических моделей и методов решения, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем. Аналитические и численные расчеты выполнены автором лично.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы, обзора литературы, трех глав, заключения, библиографии и двух приложений. Общий объем диссертации 130 страниц, включая 68 рисунков и 4 таблицы. Библиография включает 123 наименования на 12 страницах.

Основное содержание работы

Введение содержит общую характеристику работы. Актуальность и новизна исследований по теме диссертации обосновываются во *Введении* каждой из глав в отдельности.

В **обзоре литературы** приведены основные результаты экспериментальных и теоретических работ, объединенные в параграфы: *Растворимость газов в воде*, *Диффузионные процессы в природных пористых средах* и *Распределение механических напряжений в гранулированных средах*.

Первая глава посвящена численному и аналитическому исследованию диффузионного транспорта однокомпонентных слабо растворимых веществ в пористых средах, насыщенных жидкостью. В случае однокомпонентного газа, пузырьковая фаза полагается неподвижной, что имеет место для ряда геологических систем: богатые органическими углеводородами донные отложения, водоносные слои, торфяные болота и затопленные почвы.

На поверхности массива задается гармоническое изменение температуры

(в частности, естественный годовой цикл), которое порождает температурное распределение¹ вида $T = T_0 + \Theta_0 e^{-kz} \cos(\omega t - kz)$, где $k \equiv \sqrt{\omega/(2\chi)}$, T_0 — средняя температура, Θ_0 — амплитуда колебаний температуры, χ — теплопроводность массива, $2\pi/\omega$ — период колебаний, t — время², вертикальная координата z отсчитывается от поверхности вниз. Поле давления является гидростатическим: $P = P_0 + \rho g z$ (P_0 — атмосферное давление; ρ — плотность жидкости, заполняющей массив; g — ускорение свободного падения). Согласно [Pierotti R.A. Chem. Rev. 1976. Vol. 76. P. 717–726], зависимость растворимости газа в жидкости от температуры и давления имеет вид

$$X = X_0 \frac{T_0 P}{T P_0} \exp \left[q \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right],$$

где молярная растворимость X — это количество молей растворенного вещества в одном моле насыщенного раствора, $X_0 \equiv X(T_0, P_0)$, $q \equiv -G/k_B$, G — энергия внедрения молекулы газа между молекулами растворителя; k_B — постоянная Больцмана.

Постановка задачи также включает зависимость коэффициента молекулярной диффузии от температуры (Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. Transport Phenomena. New York: John Wiley & Sons, 2002. 897 p.):

$$D = \frac{k_B T}{2\pi\mu R} \cdot \frac{\mu + \nu}{2\mu + 3\nu}.$$

Здесь μ — динамическая вязкость жидкости, в которой диффундируют молекулы размером R с «коэффициентом трения скольжения» β , причем $R\beta = 3\nu$. Температурная зависимость $\mu(T)$ определяется по модифицированной формуле Френкеля (Фогельсон Р.Л., Лихачев Е.Р. ЖТФ. 2001. Т. 71. С. 128–131).

Сперва рассматривается случай, когда раствор газа является всюду насыщенным. Такая постановка задачи, актуальна как для метана, процесс генерации которого в торфяных болотах, вследствие анаэробного разложения органических осадений, достаточно интенсивен, чтобы поддерживать насыщение, так и для атмосферных газов.

Малость отношения Θ_0/T_0 позволила получить аналитическое выражение для среднего по времени диффузионного потока растворенного газа с точностью до слагаемых $\sim (\Theta_0/T_0)^4$:

¹ В работе показано, что для характерных параметров задачи конвективное движение в системе отсутствует. Предполагается, что температура в массиве всегда превышает точку замерзания раствора.

² В такой записи температурного распределения время отсчитывается от самого «теплого» момента с температурой $T = T_0 + \Theta_0$.

$$\frac{\langle J \rangle}{D_0 X_0} = -\frac{\rho g}{P_0} + \frac{e^{-2kz}}{2} \left\{ \left(1 + \frac{\rho g z}{P_0} \right) k A_1 - \frac{\rho g}{P_0} A_2 \right\} \left(\frac{\Theta_0}{T_0} \right)^2, \quad (1)$$

где α — константа термодиффузии, а также введены обозначения

$$\begin{aligned} A_1 &= \left(2 + \frac{q}{T_0} - \frac{D_1}{D_0} \right) \left(1 + \frac{q}{T_0} - \alpha \right) + \frac{q}{T_0}, \\ A_2 &= \left(1 + \frac{q}{T_0} - \frac{D_1}{D_0} \right) \left(1 + \frac{q}{T_0} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{D_2}{D_0} - \left(\frac{q}{T_0} \right)^2 \right), \\ D_0 &\equiv D(T_0), D_1 \equiv T_0 \left. \frac{dD}{dT} \right|_{T=T_0}, D_2 \equiv T_0^2 \left. \frac{d^2 D}{dT^2} \right|_{T=T_0}. \end{aligned}$$

Получены аналитические выражения вида (1) для твердых слабо растворимых веществ; случая постоянного давления; систем с преобладающим механизмом гидродинамической дисперсии³. Также определена средняя скорость роста нерастворенной фазы $\partial \langle X_b \rangle / \partial t$ для всех вариантов перечисленных условий. Полученные выражения проанализированы, построены профили $\langle J \rangle$, $\partial \langle X_b \rangle / \partial t$ для различных значений T_0 и Θ_0 , в частности характерные профили представлены на рис. 1. Сплошные линии использованы для графиков, построенных по аналитическим формулам, штриховые — для графиков, полученных в результате численного усреднения с использованием точных исходных выражений. Из рис. видно, что в области, куда тепловая волна практически не проникает из-за затухания, $kz > 2$, поток постоянен по координате; в то же время, вблизи поверхности, где волна существенна, дивергенция потока не равна нулю и мы имеем рост (либо растворение) пузырьковой фазы.

Примечательно, что при наличии молекулярной диффузии метана можно наблюдать как растворение пузырьков метана (для «низких» средних температур), так и их рост (для «высоких» средних температур). В этом случае отношения D_1/D_0 , D_2/D_0 вносят принципиальный вклад в константы A_1 и A_2 и играют решающую роль в эволюции системы. Как показали расчеты, эффект термодиффузии пренебрежимо мал по сравнению с молекулярной диффузией, поэтому неопределенность значения α для растворов газов в воде не является принципиальным вопросом для рассматриваемой задачи. Построена карта знакопостоянства $\partial \langle X_b \rangle / \partial t$ в координатах $D_1/D_0(T_0/q)$.

Показано, что в случае гидростатического давления для систем с преобладанием гидродинамической дисперсии возможен только рост нерастворенной

³ Присутствие потока горизонтальной фильтрации подземных вод вследствие микроскопической нерегулярности геометрии пор перемешивает жидкость, что эквивалентно существованию дополнительного диффузионного механизма — «гидродинамической дисперсии», причем коэффициент молекулярной диффузии на несколько порядков меньше аналогичного коэффициента гидродинамической дисперсии

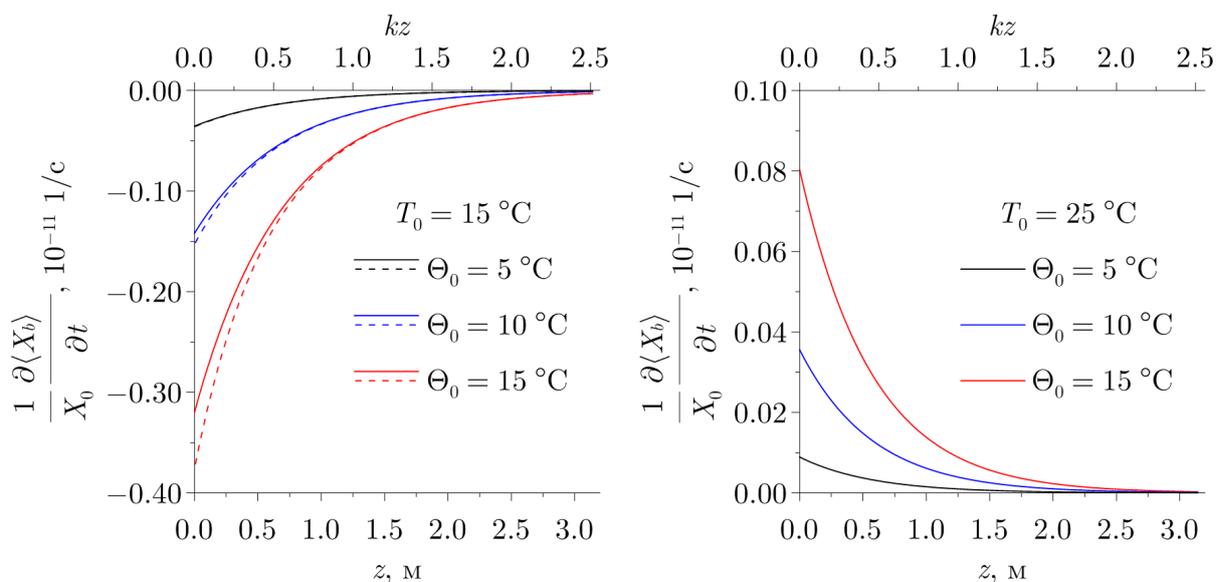


Рис. 1. Скорость роста пузырьковой фазы метана в системе с преобладанием молекулярной диффузии и наличием гидростатического градиента давления

фазы X_b .

Рассмотренные явления обобщены на ряд систем с произвольным законом изменения температуры поверхности массива. Обсуждается возможность контролируемого пространственно распределенного роста нерастворенной фазы в пористой матрице в случае твердых включений в массиве. Проявление такого эффекта возможно, например, в промышленных системах: фильтры, пористые элементы ядерных или химических реакторов и т. д.

Далее, изучены аналогичные процессы диффузионного транспорта газа в пористой среде при наличии в массиве областей раствора, недонасыщенных данным газом. Источником газа теперь является атмосфера в однокомпонентном приближении — в качестве газа, образующего атмосферу выбран азот (преобладающий газ в составе воздуха). В данном случае диффузионные потоки становятся нестационарными⁴ и для исследования такой системы было проведено прямое численное моделирование эволюции концентрации газа в массиве.

Использовался метод сеток с классической явной схемой, вторым порядком аппроксимации по z и первым по t . На поверхности массива $z = 0$ ставилось условие равенства концентрации растворенного газа его растворимости при данной температуре — $X_s = X$. Граничное условие на «глубине» массива⁵ $z = H$ для потока и концентрации пузырьковой фазы имеет вид: $J = 0$, $X_b = 0$. Для доказательства сходимости решения проведены расчеты на сетках различного

⁴ При наличии пузырьковой фазы возможен как ее рост (при превышении концентрации растворенного газа над растворимостью $X_s > X$), так и уменьшение (в обратном случае, $X_s < X$). Если пузырьковой фазы нет, то она может лишь образоваться из перенасыщенного газом раствора.

⁵ Нижняя граница выбиралась на глубине $H \approx 2.5/k$; увеличение расчетной границы не приводило к изменениям результатов.

размера. Выполнена оценка, показывающая, что тепловым эффектом растворения можно пренебречь.

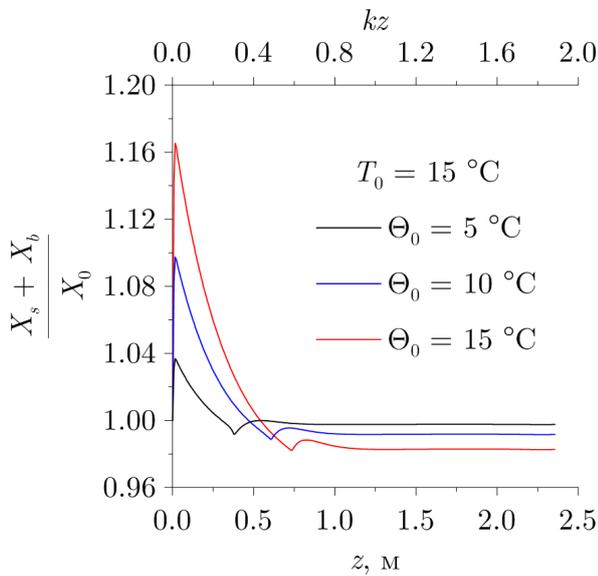


Рис. 2. Суммарная молярная доля азота

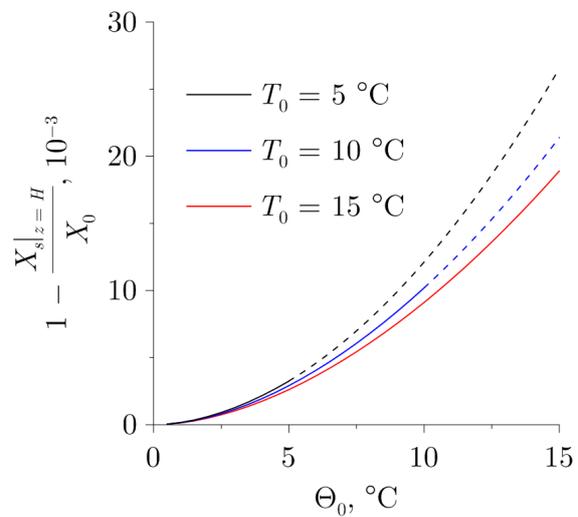


Рис. 3. Величина «вентиляционного» эффекта для азота

На рис. 2 приведены профили относительной концентрации азота в установившемся режиме при различных амплитудах годовой волны температуры в моменты времени $t = 2\pi n/\omega$, где n — натуральное число. Показано, что годовая температурная волна, проникающая в почву, существенно изменяет профиль растворимости атмосферных газов. Низкие температуры позволяют насытить приповерхностные слои вод газом, а повышение температуры приводит к переходу избыточной части газа из раствора в газовую фазу, формированию пузырьков. Тепловая волна может не только насыщать воду азотом (а также кислородом), но и приводить к «накачке» этих газов в пузырьковые слои. Сделан вывод о причине возникновения «излома» вблизи границы между пузырьковым горизонтом и зоной ненасыщенного раствора вследствие конечности отношения D/χ .

Второй обнаруженный эффект — это понижение количества растворенного азота на глубине массива, или, другими словами, «вентиляция» массива, причем величина отклонения от значения при среднегодовой температуре оказывается квадратичной по амплитуде температурных колебаний. Эту особенность режима демонстрирует рис. 3. Показано, что величина отклонения от значения при среднегодовой температуре оказывается квадратичной по амплитуде температурных колебаний.

Также построены отдельно профили концентраций растворенного азота и азота, находящегося в пузырьковой фазе в установившемся режиме в различные моменты времени, проанализирована динамика системы. Получено ка-

чественное аналитическое описание исследуемого установившегося режима и переходного процесса. Проанализирован предельный переход, дающий совпадение с численными результатами.

Во **второй главе** постановка предыдущей задачи усложняется наличием двухкомпонентного газа, растворенного в жидкости, заполняющей пористый массив. Рассматривается случай насыщенного смесью газов раствора (в пористом массиве всюду имеются пузырьки газовой фазы), в случае гидродинамической дисперсии и при изотермическом условии. Получены аналитические выражения для относительных скоростей формирования пузырьковых фаз газов в предельных случаях малых и больших пространственных масштабов, определяемых из соотношения толщины слоя неоднородного формирования пузырькового слоя и величиной $P_0/(\rho g)$.

Обнаружено, что, хотя в глубине массива отношение массовых долей компонентов газа равно отношению скоростей генерации их массы, в приповерхностном слое возможно отклонение состава формирующегося пузырькового горизонта от такового на глубине. Полученные профили долевого состава формирующихся пузырьков свидетельствуют о том, что толщина приповерхностного переходного слоя тем больше, чем сильнее отличаются растворимости газов в жидкости (минимальная толщина наблюдается при одинаковой растворимости).

Система в исходной постановке (преобладание механизма молекулярной диффузии, гармоническое изменение температуры поверхности массива) для раствора с областями, ненасыщенными газами, исследовалась численно. Численные расчеты выполнялись для смеси азот–кислород, что составляет 99% массового состава воздуха. Было обнаружено, что несмотря на различие растворимости рассматриваемых газов практически вдвое, долевым составом пузырьковой фазы оказывается однороден, а его величина определяется отношением парциальных давлений газов. Расчеты, выполненные для модельных пар газов с сильно различающимися материальными параметрами R , q , X_0 показали общность этого эффекта: долевым составом пузырьковой фазы практически не меняется с глубиной (максимальное отклонение наблюдается в окрестности максимумов концентраций).

В **третьей главе** проведено теоретическое исследование зависимости электропроводности песчаных массивов от размера зерен и механических нагрузок. Гранулы являются диэлектриками, обосновывается поверхностный характер проводимости системы. Получено выражение для сопротивления контакта двух гранул в рамках задачи Герца с точностью до слагаемых $\sim (a/R)^3$, где a — радиус области соприкосновения, R — радиус кривизны гранулы в окрестности контакта.

Преобразование изменения пространственного масштаба системы $R_n \rightarrow k_R R_n$ (n — номер гранулы) с сохранением формы⁶ и статистических свойств упаковки приводит к следующему скейлинг-закону для макроскопической удельной проводимости гранулированной среды:

$$\sigma \rightarrow k_R^{-1} \sigma. \quad (2)$$

Показано, что такого рода соотношение обусловлено «герцевским» характером контактов гранул и поверхностным механизмом проводимости. Так, например, скейлинг нарушается в случае проводящих электрический ток зерен массива.

Для ряда регулярных упаковок одинаковых шаров (ПК — примитивная кубическая, ОЦК — объемно-центрированная кубическая, ГПУ — гексагональная плотнейшая упаковка) получены точные выражения σ , в явном виде содержащие закон (2).

Проанализированы возможные границы применимости полученных результатов и определены предельные значения давления в гранулированной среде.

Основные результаты и выводы

1. Изучена задача о влиянии колебаний температуры поверхности (и как следствие — температурной волны) на транспорт газа сквозь пористую среду, насыщенную жидкостью. Рассмотрен случай насыщенного газом раствора, т. е. когда пузырьки распределены всюду в среде. Обнаружено, что сильная экспоненциальная зависимость растворимости и коэффициента молекулярной диффузии от температуры приводит к мгновенным диффузионным потокам, которыми нельзя пренебречь, хотя амплитуда относительного изменения абсолютной температуры не превышает 5%. Вследствие нелинейности этих потоков они имеют ненулевое среднее значение, создающее средний перенос массы.

Также показано, что температурная волна может привести как к насыщению, так и к обеднению приповерхностной пузырьковой зоны в системах с преобладанием молекулярной диффузии; и только к насыщению в системах с гидродинамической дисперсией.

Рассмотренное явление имеет значение не только для газов, но и для любых слабо растворимых веществ, для которых растворимость чувствитель-

⁶ Механические напряжения в гранулированной среде имеют сложное, «древовидное» распределение (Liu C.-h et al. Science. 1995. Vol. 269. P. 513–515). Причем характерная неоднородность напряжений очень велика: напряжения вдоль «цепочек напряжений» (*force chain*) превосходят средние напряжения на порядок и более.

на к температуре. Кроме того, показан принципиальный способ контролируемого создания структур роста нерастворенной фазы.

2. Исследована эволюция концентрации газа в пористой среде, насыщенной жидкостью, при наличии колебаний температуры поверхности. Выявлено значительное влияние температурной волны на диффузионное перераспределение вещества в массиве: возникает пузырьковая фаза в приповерхностной области среды; на глубине массива концентрация растворенного газа уменьшается по сравнению с значением растворимости при средней температуре — эффект «вентиляции». Рассмотрены зависимости обнаруженных эффектов от величин средней температуры и амплитуды температурной волны. Построено аналитическое приближение процесса, качественно описывающее насыщение газом среды.

3. В работе теоретически исследована проблема формирования пузырькового газового горизонта в насыщенном жидкостью пористом массиве, занимающем полупространство. Рассматриваются изотермические условия и случай преобладания гидродинамической дисперсии над молекулярной диффузией; учитывается возможный гидростатический градиент давления. Обсуждается пара газов, скорости генерирования которых полагаются постоянными и однородными в пространстве.

Показано, что хотя в глубине массива отношение массовых долей компонент газа равно отношению скоростей генерации их массы, в приповерхностном слое возможно отклонение состава формирующегося пузырькового горизонта от такового на глубине. В работе получены профили долевого состава формирующихся пузырьков. Примечательно, что толщина приповерхностного переходного слоя тем больше, чем сильнее отличаются растворимости газов в жидкости (минимальная толщина наблюдается при одинаковой растворимости).

4. Рассмотрен случай диффузионного транспорта в пористой среде, насыщенной жидкостью, двухкомпонентной смеси газов при наличии температурной волны. Изучалась как пара газов азот–кислород, так и модельная пара газов с сильно различными свойствами (коэффициент диффузии и растворимость). Помимо общих свойств профилей концентраций растворенного газа, присущих однокомпонентному случаю, показано, что относительное содержание компоненты газовой смеси в пузырьковом горизонте зависит лишь от ее парциального давления на поверхности массива и однородно в пространстве.

5. В работе установлен характер зависимости макроскопической удельной электропроводности σ гранулированных массивов, подверженных механическим нагрузкам, с поверхностным механизмом проводимости от характерного размера зерен R : $\sigma \sim 1/R$. Показано, что результат не является тривиальным: при объемной проводимости зерен σ нечувствительно к характерному размеру зерен, а при нарушении «герцевости» механических контактов и поверхностном механизме проводимости никаких свойств скейлинга не возникает.

Свойство скейлинга $\sigma \sim 1/R$ получено для нерегулярных упаковок зерен произвольной формы. Также вычислены электропроводности для регулярных упаковок шаровых гранул одинакового размера. Как и ожидалось, для них справедливы тот же закон скейлинга.

6. Установлены границы применимости теории: напряжения должны быть меньше напряжения разрушения гранул (для кварца $\sim 10^9$ Па), но превышать 10^3 Па (что соответствует давлению за счет собственного веса под слоем песка толщиной менее 10 см). Выполнение описанных условий вполне типично в практических ситуациях.

Список публикаций

1. Голдобин Д. С., Краузин П. В. Скейлинг свойств электропроводности гранулированных сред // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99, № 5. С. 314–318.
2. Krauzin P. V., Goldobin D. S. Effect of temperature wave on the gas transport in liquid-saturated porous media // The European Physical Journal Plus. 2014. Vol. 129, no. 10. P. 221–8.
3. Голдобин Д. С., Краузин П. В. Насыщение затопленных почв двухкомпонентной смесью газов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013. № 4. С. 33–41.
4. Goldobin D. S., Krauzin P. V. Formation of bubbly horizon in liquid-saturated porous medium by surface temperature oscillation // Physical Review E. 2015. Vol. 92, no. 6. P. 063032–8.
5. Голдобин Д. С., Краузин П. В. Теоретическое исследование электропроводности гранулированных сред // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2012. № 4(22). С. 44–47.
6. Голдобин Д. С., Краузин П. В. Влияние годовой волны температуры на диффузионный транспорт атмосферного азота в затопленных почвах // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2012. № 4(22). С. 48–51.

7. Голдобин Д. С., Краузин П. В. Насыщение затопленных почв атмосферным азотом под действием годовой температурной волны // Труды IX Всероссийской научной конференции им. Ю. И. Неймарка «Нелинейные колебания механических систем» / Нижегородский государственный национальный исследовательский университет им. Н. И. Лобачевского. Нижний Новгород: 2012. С. 267–271.
8. Краузин П. В., Голдобин Д. С. Влияние годовой волны температуры на диффузионную вентиляцию торфяных болот и затопленных почв // Материалы краевой научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Физика для Пермского края» / Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь: 2012. С. 8–11.
9. Голдобин Д. С., Краузин П. В. Насыщение затопленных почв двухкомпонентной смесью газов // Тезисы докладов всероссийской научно-технической интернет-конференции студентов и молодых ученых «Прикладная математика, механика и процессы управления» / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь: 2014. С. 112–112.
10. Краузин П. В., Голдобин Д. С. Формирование пузырькового горизонта в затопленных почвах под действием годовой волны температуры // Тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь: 2012. С. 40–41.
11. Голдобин Д. С., Краузин П. В. Влияние годовой волны температуры на диффузионный транспорт атмосферного азота в затопленных почвах // Тезисы конференции молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах» / Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь: 2012. С. 42.
12. Голдобин Д. С., Краузин П. В. Теоретическое исследование электропроводности гранулированных сред // Тезисы конференции молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах» / Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь: 2012. С. 43.
13. Голдобин Д. С., Краузин П. В. Теоретическое исследование электропроводности песчаных массивов // Тезисы докладов XVII Зимней школы по механике сплошных сред / Институт механики сплошных сред УрО РАН. Пермь: 2013. С. 97.
14. Голдобин Д. С., Краузин П. В. Формирование газовых горизонтов в пористых массивах, насыщенных жидкостью, при колебаниях температуры // Тезисы докладов XVII Зимней школы по механике сплошных сред / Институт механики сплошных сред УрО РАН. Пермь: 2013. С. 205.

Научное издание

Краузин Павел Васильевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук на тему:

Процессы переноса
в природных пористых средах

Подписано в печать *дата*. Формат 60 × 90 1/16.

Усл. печ. л. 0.93. Тираж 100 экз. Заказ *номер*.

Типография Пермского государственного университета.

614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.