

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию *Павла Васильевича Краузина*

«Процессы переноса в природных пористых средах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Павла Васильевича Краузина посвящена исследованию диффузионного транспорта слаборастворимых веществ в жидкости, заполняющей пористую среду, в условиях насыщения раствора и распространения в среде температурной волны. Знание и понимание особенностей диффузионного транспорта в пористых средах играют решающую роль для понимания процессов формирования горизонтов во многих геологических системах. Такими процессами могут быть процессы формирования слоев пузырьков атмосферных газов или метана в затопленных почвах или болотах, слоев известняка в водоносных пластах, газовых гидратов в морских донных отложениях, и т.п. Поэтому тема диссертации П.В. Краузина является несомненно **актуальной и практически важной**. В диссертации показывается, что протекание таких процессов в условиях насыщения раствора и формирования нерастворенной фазы имеет свои особенности, не встречаемые при иных обстоятельствах. Особенно нетривиально влияние бегущей волны растворимости в системе, возникающей при колебаниях температуры поверхности пористого массива. Поэтому проведенное исследование обладает необходимой для диссертации **новизной**.

Диссертация изложена на 125 страницах, состоит из введения, трех оригинальных глав и заключения. Во введении даются общая характеристика работы и обзор литературы. В первой главе исследуется диффузионный транспорт однокомпонентных слаборастворимых веществ в пористых средах, насыщенных жидкостью. Здесь рассмотрены две задачи. В разделе 1.3 изучается случай всюду насыщенного раствора, для которого нелинейное взаимодействие волн растворимости и коэффициента молекулярной диффузии, экспоненциально сильно зависящих от температуры, приводит к ненулевому среднему диффузионному потоку. В зависимости от средней температуры поверхности массива, дивергенция этого потока может приводить как к росту, так и истощению нерастворенной фазы. В разделе 1.4 рассматривается эволюция системы, в которой присутствуют зоны недонасыщения раствора. В численном счете выявляется эффект формирования приповерхностного пузырькового слоя, для которого затем строится аналитическая теория.

Во второй главе исследуется диффузионный транспорт для случая двухкомпонентных газов. Поскольку частичное растворение ограниченного количества газовой смеси изменяет ее состав, вопрос обобщения теории на случай двухкомпонентных газов оказывается очень сложным. В разделе 2.2 рассмотрена изотермическая задача о росте пузырьковой фазы при распределенном по объему генерировании газовых компонент с различными свойствами растворимости. Далее, в разделе 2.3, изучается эволюция системы, в которой присутствуют зоны недонасыщения раствора, но для случая контакта с двухкомпонентной атмосферой, состоящей из кислорода и азота. Эффект формирования приповерхностного слоя нерастворенных пузырьков рассматривается также для различных пар газов с существенно отличающимися свойствами растворимости.

В третьей главе устанавливаются свойства подобия для электропроводности неконсолидированных пористых (гранулированных) сред с преобладанием поверхностного механизма проводимости. Рассмотрение производится для случайной упаковки зерен, формирующих твердый скелет пористой среды, и опирается на теорию Герца для деформации в зоне контакта упругих выпуклых тел. Полученные результаты сопоставляются с результатами для случая регулярных плотных упаковок сфер. Проводится также аккуратный анализ границ применимости развитой теории.

Мне представляется обоснованными и новыми положения диссертации, выносимые на защиту, а именно:

1. аналитические выражения для среднего по времени диффузионного потока слабо растворимых веществ через жидкость, заполняющую пористое полупространство, при условии, что раствор всюду насыщен, и температура поверхности колеблется;
2. численные результаты и приближенные аналитические решения, определяющие распределение концентрации слабо растворимых веществ в пористом полупространстве, поверхность которого контактирует с атмосферой, а температура поверхности колеблется;
3. аналитические выражения для состава пузырьковой фазы двухкомпонентных газов в изотермическом пористом полупространстве с однородным по объему распределением источников;
4. скейлинг-соотношение для макроскопической удельной электропроводности гранулированных сред при преимущественно поверхностном механизме переноса заряда.

По содержанию диссертации можно сделать ряд замечаний:

1. **Стр. 82**, предложение, содержащее уравнение (2.13). Обоснование уравнений, хоть далее они и верны, представляется туманным и не вполне удачно сформулировано. Само уравнение (2.13) верно только при $P \ll P$.
2. **Раздел 2.3**. Приведенные результаты численных расчетов показывают, что состав газовой смеси оказывается слабо чувствителен к температурной волне. Складывается впечатление, что для системы применимо эффективное однокомпонентное описание. Однако, диссертант не предпринимает попытки построить такое описание, а то, каковы должны быть свойства такого эффективного газа, неочевидно.
3. **Стр. 94-95**: Формулы (3.6) и (3.7) и содержащий их абзац представляются избыточными, поскольку теория Герца построена в приближении малых деформаций и малой области деформации. В этом приближении формулы (3.6) и (3.7) принимают более простой предельный вид.
4. **Стр. 99**: Тот факт, что формула (3.18) дает постоянное значение потенциала на контакте, достаточно хорошо известен из теории интегральных уравнений, чтобы подтверждать его численным счетом, представленным на рис. 3.5 (стр. 101).
5. В тексте диссертации имеются отдельные неточности в формулировках, стилистические погрешности и опечатки, на которых мы не будем останавливаться.

Сделанные замечания не снижают ценности проведенных автором исследований и общей моей положительной оценки диссертации. Полученные результаты являются новыми и важными для приложений. Основные результаты диссертации опубликованы в 14 работах, в том числе в престижных журналах: *Physical Review E*, *European Physical Journal*, Письма в ЖЭТФ, входящих в мировые системы цитирования. Результаты проведенных исследований докладывались на конференциях, разного уровня. Автореферат правильно и точно отражает содержание диссертации.

Подведем итоги. Диссертационная работа П.В. Краузина является законченной научно-исследовательской работой, в которой изучены явления диффузионного транспорта в насыщенных растворах при неоднородном и нестационарном профиле растворимости. Отмечу следующие важные научные результаты диссертанта:

1. Показано, что сильная экспоненциальная зависимость растворимости и коэффициента молекулярной диффузии от температуры приводит к мгновенным диффузионным

потокам слаборастворимого вещества сквозь пористую среду, насыщенной жидкостью.

2. Эффекты диффузионного перераспределения вещества в массиве при контакте с атмосферой, когда возникает пузырьковая фаза в приповерхностной области среды.
3. Характер зависимости макроскопической удельной электропроводности гранулированных массивов, подверженных механическим нагрузкам, с поверхностным механизмом проводимости от характерного размера зерен
4. Границы применимости развитой теории: напряжения должны быть меньше напряжения разрушения гранул, но больше некоторого минимального значения.

Считаю, что диссертационная работа «Процессы переноса в природных пористых средах», имеющая важное научное и прикладное значение, удовлетворяет всем требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», а ее автор, **Павел Васильевич Краузин** заслуживает присуждения ему *ученой степени кандидата физико-математических наук* по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Я, Ефим Наумович Пелиновский, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,

Главный научный сотрудник,
доктор физ.-мат. наук, профессор
relinovsky@hydro.appl.sci-nnov.ru

20 сентября 2016 г.

Ефим Наумович Пелиновский

Подпись Ефима Наумовича Пелиновского заверяю
Ученый секретарь ФГБНУ Федерального научного центра
«Институт прикладной физики РАН»,
кандидат физико-математических наук

Игорь Валерьевич Корюкин

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»,
Нижний Новгород, ул. Ульянова 46.
E-mail: dir@appl.sci-nnov.ru <http://www.ipfran.ru>

