

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Луценко Николая Анатольевича «Нестационарные течения газа через пористые объекты с очагами тепловыделения», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Основными объектами научного исследования в представленной диссертации являются пористые среды с источниками энерговыделения или очагами гетерогенного горения при естественной и вынужденной фильтрации газа. Несомненно, изучение физико-химических процессов и внутренних течений в пористых объектах является актуальным в научном плане, но также имеет большое прикладное значение. Такие явления существуют в природе и могут быть нежелательны, тогда необходимо их предотвращение или подавление, например, при горении или тлении торфяников. Кроме того, аналогичные процессы происходят в технологических устройствах или энергетических установках, например, в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов, где требуется находить способы управления ими.

Изучение физических явлений, происходящих внутри пористых крупномасштабных или радиационно-опасных объектов, сопряжено с определенными трудностями экспериментального наблюдения и измерения параметров во внутренних областях, недоступных для размещения приборов или опасных для человека. Поэтому решающее значение в изучении газодинамических и термохимических явлений в таких системах имеет развитие подходов для многомасштабного физико-математического и численного моделирования и параметрического анализа. Наиболее продуктивным и распространенным подходом для теоретического изучения подобных процессов является раздел механики реагирующих многофазных сред. Этот подход и использовался автором диссертационной работы.

Проблемы внутренних течений и горения пористых сред не являются новыми и изучались ранее, однако основное внимание уделялось медленным фильтрационным процессам в нефтяных пластах. Это отражено автором в обширном обзоре литературы во Введении. Из анализа известных научных данных автором сделано убедительное заключение, что проблема описания и получения характеристик течений газа через открытую пористую среду с локальными источниками саморазогрева практически не изучена, так как систематических исследований в этом направлении не проводилось. Кроме того, слабо исследованы нестационарные процессы в условиях свободной конвекции, когда расход газа определяется из решения задачи при граничных условиях с заданным давлением. Описание и анализ указанных процессов порождает совершенно новые математические постановки начально-краевых задач в рамках механики многофазных реагирующих сред и требует развития оригинальных численных технологий для их решения.

Таким образом, исходя из анализа современного состояния науки в данной области, автором установлены цели и задачи исследования. Цели исследования включают как методические разработки, включающие развитие математических моделей и численных методов, так и анализ совокупности

гидродинамических, термодинамических и химических процессов в пористых объектах с источниками энерговыделения или очагами горения и выявление закономерностей и особенностей этих процессов. Соответственно целям сформулированы основные задачи и указаны способы достижения их решений.

Основной материал диссертации изложен в шести главах.

В Главе 1 излагаются основные предположения и допущения модели и представлены согласованные уравнения, вытекающие из законов сохранения массы, импульса и энергии каждой из фаз с учетом уравнений состояния и условия неподвижности твердого скелета. Итоговое уравнение движения представляет собой обобщенный закон Дарси. Особое внимание в первом параграфе (для сред с внутренними источниками тепловыделения) уделено описанию тепловой динамики взаимодействующих компонентов и фаз, учета эффектов теплопроводности, конвективного теплообмена и энергетического вклада тепловыделяющих источников. Обезразмеривание входящих величин привело к появлению нескольких характерных безразмерных параметров, влияние которых обсуждается на основе предварительных оценок. Особенностью системы является присутствие в правой части временной производной от давления, что делает ее отличной от стандартных систем, приводимых к дивергентной форме. Еще одним существенным отличием от большинства задач механики гетерогенных сред является постановка граничных условий. Автором рассматривается класс задач, связанных с течениями в пористых средах с открытой внешней границей, что требует согласования давления на границе рассматриваемой области с давлением внешней среды. Соответствующие граничные условия сформулированы с учетом обезразмеривания и выделения характерных параметров процесса, в частности, числа Био. Во втором параграфе аналогичные уравнения и преобразования представлены для сред с очагами гетерогенного горения, где описание усложнено учетом изменения масс компонент за счет химических реакций с образованием как газообразных окислов, так и твердых продуктов. Система, таким образом, включает дополнительное уравнение для концентрации окислителя. Принимается стандартная форма приведенной аррениусовской кинетики. Также сформулированы граничные условия для свободной и вынужденной конвекции газа через пористую среду.

Качественные особенности течений выявляются в первую очередь на простых задачах. Соответственно, Глава 2 посвящена изучению одномерных течений через пористую среду с внутренними источниками разогрева, в которой все параметры зависят от одной переменной - высоты. В первом параграфе, который является методическим, отмечено, что приведенная система уравнений является нелинейной смешанной гиперболически-параболической системой, решение которой проводится методом конечных разностей. Поскольку система и граничные условия отличаются от стандартных, возникла необходимость развития оригинальной численной методики расчетов. В параграфе 2.1 изложены особенности методики, включающей явно-неявные конечно-разностные аппроксимации уравнений с учетом направленности течения, численную реализацию граничных условий, включение демпфирующих членов (не нарушающих порядок точности). Представлен пошаговый полный алгоритм расчета всех параметров на каждом временном слое. Обсуждаются вопросы устойчивости и сходимости метода,

определены параметры сетки, обеспечивающие достаточную точность. В последующих параграфах рассмотрен ряд задач об одномерном течении через пористую среду, граничные условия которой характеризуются наличием перепада давления на входе и выходе. Проанализировано влияние коэффициента охлаждения и его зависимости от времени. Рассмотрены возможные сценарии процесса, зависящие от внешних условий и параметров среды. Выделены различные режимы течения и тепловой динамики от установления стационарного протекания охлаждающего газа через объект до неограниченного разогрева среды, приводящего к плавлению и катастрофическому разрушению объекта. Принципиально новым результатом является доказательство возможности реализации нестационарного сценария неограниченного разогрева при докритических стационарных условиях. Исследуется влияние теплопроводности твердой среды, установлена возможность аномального разогрева при увеличении коэффициента теплопроводности, что приводит к необходимости учитывать этот фактор.

Глава 3 посвящена обобщению результатов Главы 2 на двумерные течения с учетом сужения или расширения объема ограничивающими стенками. Здесь рассматриваются объекты, обладающие как плоской симметрией, так и осесимметричные. В параграфе 3.1 представлены уравнения, граничные условия и обобщение конечно-разностного метода на двумерный случай. Уделяется внимание проблеме предотвращения неустойчивости и реализации граничных условий на открытых границах. Условие устойчивости и сходимость метода определены на основе численных расчетов модельных задач. Установлены оптимальные параметры сетки для общих двумерных расчетов. Далее решены задачи фильтрации газа через саморазогревающиеся объекты с линейным и ступенчатым сужением. Исследовано влияние местоположения и размера неравномерно распределенного источника разогрева, проанализировано влияние частичного перекрытия выходной границы, в том числе и поверхностью сложной формы. Все особенности полученных решений детально описаны, и дана их физическая интерпретация. Рассмотрена задача, моделирующая течения в полигонах твердых бытовых отходов при их саморазогреве. Решения показали наличие внутренних вихревых зон и возможности существования как стационарных режимов со сбалансированным теплоотводом, так и нестационарных режимов либо с уменьшением очага разогрева и затухания процесса, либо с увеличением очага и неограниченным разогревом объекта.

В Главе 4 рассмотрены аналогичные пространственные течения в пористых объектах с неоднородным по всем координатам саморазогревом. Так же, как и в предыдущих Главах, в первом разделе приведены уравнения, конечно-разностная схема решения, обсуждаются особенности численного алгоритма и краевые условия. Изучены трехмерные течения при наличии источников саморазогрева в форме нескольких расположенных отдельно или соприкасающихся параллелепипедов. Рассмотрено множество случаев различного расположения очагов. Из анализа тепловой картины установлено, что на общий разогрев пористого объекта влияют как геометрические размеры очагов, так и их расположение в пространстве относительно входной поверхности и относительно друг друга. Для случая, когда входная и выходная

поверхности перпендикулярны, также установлены возможности нарушения стационарного режима и перехода к катастрофическому разогреву.

В целом результаты по анализу течений в пористых объектах с саморазогревом, представленные в Главах 2 – 4, содержат ряд новых результатов, основной из которых состоит в классификации режимов течения, которые могут быть как стационарными, так и нестационарными, как с затуханием, так и с неограниченным саморазогревом. Определены условия и параметры, позволяющие управлять процессами. Некоторым недостатком данного исследования является преимущественно качественный характер результатов и отсутствие обобщающих выводов, в частности, карт режимов в пространстве определяющих параметров.

Главы 5 – 6 посвящены анализу волн гетерогенного горения в пористых средах при естественной конвекции и принудительной фильтрации.

В 5 Главе рассматриваются одномерные нестационарные течения в пористых средах при наличии гетерогенного горения. В разделе 5.1 изложены основные физические предположения и упрощения модели горения твердого вещества при наличии фильтрационного течения газа. Приведены уравнения и граничные условия одномерных течений. Описан численный метод, который построен на тех же принципах и является обобщением метода расчета течений внутри пористых сред с саморазогревом при свободной и вынужденной конвекции, представлены аналогичные реализации граничных условий. Имеются утверждения о том, что проводилось тестирование на последовательности сгущающихся сеток и сравнение с некоторыми данными экспериментов и расчетными данными других авторов, однако этих сравнений в данном разделе диссертации не приведено. Далее исследуется распространение спутных и встречных волн горения при естественной конвекции для различных случаев расположения и протяженности очага зажигания. Описаны характерные особенности каждого из режимов распространения волн горения (спутных, встречных), определены степени выгорания вещества, выявлены режимы с отражением встречной волны горения от свободной поверхности и формированием спутной волны горения. Проведено исследование влияния изменения коэффициента проницаемости в процессе горения, которое показало необходимость учета этого фактора в расчетах температур и положения фронта. На примере тления полиуретана проведено сравнение с известными данными экспериментов. Расчеты проводились с варьированием некоторых параметров (ввиду отсутствия полной информации о входных данных в экспериментах), однако значения температур и скоростей встречной или спутной волн тления коррелируют с указанными в экспериментах интервалами измерений. На основе сравнения горизонтального и вертикального расположения объекта анализируется влияние гравитации на распространение волн горения. Установлено, что самоподдерживающиеся волны горения возникают только в вертикальном объекте. Проведен сравнительный анализ обоих факторов – перепада давления и силы тяжести. Показано, что они влияют на процесс противоположным образом, но перепад давления играет определяющую роль при формировании свободной конвекции в горящей пористой среде.

В Главе 6 исследуются аналогичные процессы в двумерной постановке при ограниченных размерах источников зажигания. Также в первом разделе

приведены уравнения и аналогичное описание граничных условий, конечно-разностного метода и особенностей его реализации. Далее исследуется распространение волн горения от конечных зон зажигания при принудительной фильтрации. Рассмотрены различные случаи расположения и размеров зон зажигания. Установлены возможности возникновения двух волн горения, а также спутных самоподдерживающихся расширяющихся волн горения. Обсуждаются вопросы возникновения и развития вихревых зон в горящих пористых средах при различных расположениях и размерах источников зажигания в условиях естественной конвекции. Показано, что хотя скорость вихревых течений мала, из-за длительного существования они оказывают значительное влияние на поступление свежего окислителя в зону горения через различные участки открытых границ.

В Заключении сформулированы основные результаты работы и вытекающие из результатов практические рекомендации. Отмечены перспективы дальнейших исследований.

Отметим положительные стороны диссертации.

1. Проведенные исследования представляют достаточно полную и детальную картину гидродинамических и физико-химических процессов, происходящих в пористых средах с внутренними источниками тепловыделения или очагами гетерогенного горения при свободной и вынужденной конвекции.

2. Принятые предположения и допущения моделей физически обоснованы. Системы решаемых уравнений получены из законов сохранения, являются замкнутыми. Постановки граничных условий корректны. Численные технологии разработаны грамотно и протестированы. Все перечисленное, а также имеющиеся сопоставления с экспериментальными данными и результатами других авторов позволяет считать результаты диссертации достоверными.

3. Новизна и оригинальность обусловлена, во-первых, развитием новых адекватных физико-математических моделей, приводящих к формулировке нового класса начально-краевых задач. Эти задачи связаны с постановкой заданных граничных условий для давления при свободной конвекции или задании перепада давления при вынужденной конвекции. Во-вторых, для этого класса задач возникает необходимость развития численных методов их решения, что выполнено автором на современном уровне. И в-третьих, на основе собственных методических разработок автором проведено численное исследование и детальный анализ гидродинамических процессов (включая моделирование пространственных течений в трехмерной постановке) с учетом физических особенностей и физико-химических превращений. Выявлены возможности существования различных режимов, описаны их свойства и условия реализации, обнаружены новые эффекты, например, эффект неограниченного разогрева, приводящий к катастрофическому сценарию.

4. Материал диссертации изложен достаточно обстоятельно. Приводятся полные математические постановки, граничные условия, конечно-разностные схемы, входные параметры численных расчетов. Результаты являются достаточно общими, так как представлены в безразмерных величинах. Приведено детальное описание всех особенностей для каждого из большого числа рассмотренных случаев геометрии и расположения источников саморазогрева или зажигания.

5. Полученные автором диссертации результаты представляют не только научную, но и практическую ценность как для поиска способов локализации очагов горения, замедления или разворота движения фронта пламени, так и для организации наиболее эффективного и экологичного сжигания биотоплив или мусорных отходов.

6. Результаты диссертации опубликованы в 19 статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, а также большом числе трудов российских и международных конференций, где настоящая работа проходила апробацию.

Замечания и недостатки диссертации.

1. Изложение материала содержит несколько аналогичных блоков, которые нельзя назвать прямыми повторами, однако выполнены по одной схеме. Первые параграфы каждой Главы представляют уравнения, граничные условия и конечно-разностные схемы для одномерного, двумерного или трехмерного течений. Можно сократить объем диссертации, если представить в общем виде и далее указывать на упрощение или исключение каких-либо членов.
2. По изложению моделей, в параграфе 1 и 2 Главы 1 одними и теми же буквами обозначены различные величины, что затрудняет сопоставление моделей друг с другом. Также следует отметить, что в Главе 1 уравнения для среды с саморазогревом и для среды с горением не соотносятся. Если исключить химические реакции из уравнений (1.43), то они не сводятся к уравнениям (1.25), содержащим дополнительные члены с давлением. Подробных объяснений и обоснований этого различия в диссертации не приведено.
3. Не совсем ясным представляется обоснование выбора явно-неявных конечно-разностных методов. Каким образом неявные аппроксимации улучшают схему или повышают ее эффективность?
4. Вопрос о единственности решений не исследован. Различные стационарные режимы получены в результате численного решения эволюционного уравнения с заданными начальными данными. Можно ли получить эти решения из стационарных уравнений? Возможен ли эффект гистерезиса (т.е. выхода на разные режимы при одинаковых граничных условиях) в этих процессах?
5. Общим недостатком исследований, представленных во всех разделах диссертации, является отсутствие обобщающих карт режимов в пространстве определяющих параметров. Такие карты позволили бы наглядно оценить возможности реализации того или иного режима и могли служить основой для разработки практических рекомендаций при проектировании и эксплуатации объектов с источниками саморазогрева или прогнозировании поведения объектов с очагами горения.
6. Мелкие замечания по тексту: На стр. 15 написано «одномерных и двумерных объектов». Объекты в нашем пространстве могут быть только трехмерными, но подходы к их изучению могут предполагать рассмотрения одномерных и двумерных течений в предположениях различного рода симметрии. В пункте 1 обоснования достоверности результатов на стр. 21 пропущено «и физически обоснованных допущений».

Указанные замечания, однако, не снижают общей положительной оценки, которую заслуживает диссертационная работа Луценко Н.А. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

С учетом всего вышесказанного, считаю, что работа Луценко Николая Анатольевича «Нестационарные течения газа через пористые объекты с очагами тепловыделения» соответствует всем критериям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Автор работы Луценко Николай Анатольевич, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Хмель

Хмель Татьяна Алексеевна

« 21 » ноября 2018 г.

Организация – место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория 12

Должность: Ведущий научный сотрудник

Почтовый адрес: 630060, г. Новосибирск, ул. Лесосечная, д. 5, кв. 144.

Телефон: 8(923)158-93-45

Адрес электронной почты: khmel@itam.nsc.ru

Web-сайт организации: <http://www.itam.nsc.ru>

Подпись и сведения заверяю
Ученый секретарь ИТПМ СО РАН

К.ф.-м.н.

Ю.Кратова



Кратова Юлия Владимировна