

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **Луценко Николая Анатольевича** “Нестационарные течения газа через пористые объекты с очагами энерговыведения”, представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Луценко Н.А. посвящена развитию и применению математических моделей нестационарных процессов в пористых объектах с очагами энерговыведения. Работа охватывает широкий круг многомерных фундаментальных задач нестационарной газодинамики и теплообмена в пористых средах, в том числе с фильтрационным горением. Проведенное исследование имеет отношение к анализу явлений в объектах с очагами энерговыведения радиоактивного типа (как в аварийном энергоблоке ЧАЭС), а также к пожарам в торфяниках. Проблематика диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ (6. Рациональное природопользование.) и связана с разработкой критических технологий РФ (21. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера). Несомненно, данная диссертационная работа является актуальной.

Научная новизна работы представляется вполне обоснованной. Оппонент согласен с заявленными в диссертации пунктами.

1. Предложена математическая модель, разработаны конечно-разностная методология и пакет программ для расчета нестационарных одномерных, двумерных и трехмерных течений газа через пористые объекты с источниками саморазогрева при естественной и вынужденной фильтрации.

2. Выявлены режимы газового охлаждения пористых саморазогревающихся объектов, при которых не устанавливается устойчивый режим охлаждения, а происходит неограниченный разогрев объекта, приводящий к его перегреву и разрушению. При этом выполнены условия, удовлетворяющие критерию стационарности.

3. Анализ динамики газа в пористых объектах с внутренними источниками энерговыведения показал, что при принудительной фильтрации газ стремится огибать нагретые зоны и двигаться по более холодным областям, а при свободной конвекции в очаге выделения тепла и в его окрестности наблюдаются вихревые течения газа, ухудшающие теплоотвод из пористого объекта.

4. Предложена математическая модель, разработаны конечно-разностная методология и пакет программ для расчета гидродинамических, термодинамических и химических процессов в пористых одномерных и двумерных объектах с очагами гетерогенного горения в твердой фазе при естественной и вынужденной фильтрации газа.

5. Дан анализ одномерных спутных и встречных волн гетерогенного горения пористых сред при свободной конвекции и продемонстрировано отражение от границы объекта встречной волны горения, не полностью выжигающей твердое горючее вещество, и ее переход в спутную волну горения.

6. Обнаружено, что при горении твердых пористых сред в условиях принудительной фильтрации газ стремится обойти нагретую часть и двигаться по холодным областям, а размер выгоревшей части зависит от расположения и размеров зоны зажигания и от давления газа на входе в объект.

7. Обнаружено, что при горении твердых пористых сред в условиях естественной конвекции в окрестности очага горения возникают долгоживущие вихревые течения газа, которые сильно влияют на приток окислителя в зону реакции. Показано, что при свободной конвекции волна горения может проходить через все части объекта независимо от того, где расположена зона зажигания.

Практическая значимость работы скорее выражена в ее направленности, чем в полученных конкретных прикладных результатах. Тем не менее, на основе результатов настоящей работы разработана и верифицирована численная модель для описания нестационарных течений газа через гранулированные теплоаккумулирующие материалы с фазовыми переходами, разработана и проходит апробацию численная модель газификации твердого горючего в комбинированном заряде низкотемпературного газогенератора летательного аппарата.

Апробация работы вполне приемлемая. 19 статей из Перечня ВАК, включая статьи из журналов Математическое моделирование, Теплофизика и аэромеханика, Инженерно-физический журнал, Доклады академии наук. Есть статьи в высокорейтинговых журналах, таких как International Journal of Heat and Mass Transfer, Combustion Theory and Modelling.

Структура диссертации состоит из оглавления, введения, шести глав, заключения, списка литературы из 207 наименования (всего 298 стр. текста). **Во введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи, обозначены практическая значимость и научная новизна. Указаны методология и методы исследования, степень достоверности работы, приведены положения, выносимые на защиту. В **главе 1** рассматриваются математические модели течения газа через пористые объекты с очагами энерговыделения (стр.29-48) с учетом и без учета химических превращений. **Глава 2** посвящена нестационарным режимам охлаждения пористых саморазогревающихся объектов при переменном давлении газа на их входе (стр.49-81). В **главе 3** рассмотрено движение газа через пористые среды с различной геометрией границ и внутренних источников саморазогрева (стр.82-144). В **главе 4** анализируются особенности нестационарных пространственных течений газа через пористые саморазогревающиеся объекты (стр.145-190). **Глава 5** посвящена расчету распространения спутных и встречных волн гетерогенного горения пористых сред (стр.190-237). Это центральная глава в контексте верификации разработанной методологии. Прогнозы, сделанные на основе одномерной модели, успешно сравниваются с данными имеющихся экспериментов. В **главе 6** рассматривается динамика двумерных волн гетерогенного горения пористых сред при естественной конвекции и принудительной фильтрации (стр.238-269). Заключение на восьми страницах суммирует выводы по работе.

Следует отметить, что во всех главах, начиная со второй, первый параграф посвящен разработке расчетной методологии.

Представленная диссертационная работа, судя по перечисленным фрагментам, неплохо выстроена. Общее впечатление от ее прочтения сугубо положительное. Работа написана ясно, четко, не без некоторого изящества. Диссертация хороша, однако, “пища” для ее обсуждения имеется.

Несколько слов о концептуальной обоснованности работы и ее месте в спектре работ данного профиля.

Тематика работы заслуживает одобрения. Прогнозирование нестационарных процессов в пористых объектах с энергетическими источниками радиационной природы имеет реальную значимость. С другой стороны, пожары в торфяниках, как стихийное бедствие, хорошо известны по событиям 2010 года (в частности, в окрестности Питера и Москвы). Несмотря на специфические отличительные особенности рассматриваемой проблематики все же целесообразно указать некоторые близкие разделы теплофизики, которые могли бы оказаться полезными, прежде всего при использовании накопленного опыта экспериментальной и расчетной диагностики. В первую очередь стоит обратить внимание на процессы в атомных реакторах. Не зря их иногда рассматривают с использованием моделей пористых сред (см., например, кандидатскую диссертацию Огнерубова Д.А. “Численное моделирование гидродинамики и теплообмена жидких металлов в горизонтальных каналах применительно к ядерным энергоустановкам нового поколения” по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника). Также полезно опереться на опыт диагностики тепловых потоков в теплозащитных покрытиях носовых частей летательных аппаратов при их аэродинамическом нагреве. Это научное направление является частью более общего раздела тепломассообмена, связанного с решением обратных задач теплопроводности и развиваемого в МАИ под руководством акад.РАН Алифанова О.М. Во многом интерес к смежным областям вызван тем, что хотелось бы удостовериться в адекватности разрабатываемой методической базы. Конечно, в диссертации есть попытки как-то справиться с этим насущным для численного моделирования вопросом, но первая половина работы, в которой не рассматриваются физико-химические превращения, могла найти достойное подтверждение на каких-то не очень сложных физических аналогах.

Также следует обсудить вычислительные аспекты диссертации. Они практически игнорируют как существующие пакетные технологии (Fluent/CFX, ANES и др.), так и современные многоядерные платформы, позволяющие осуществлять суперкомпьютинг. Также в работе не вполне задействованы технологии, включающих средства визуализации и обработки баз данных пространственных полей. Диссертация основывается на применении конечно-разностных методов решения уравнений на равномерных структурированных сетках, в то время как общеупотребительными в настоящее время являются конечно-объемные методы. Сейчас разработаны оригинальные многоблочные методы расчета разномасштабных

гидродинамических и теплофизических процессов на базе пересекающихся сеток и гибридных сеток с введением неструктурированных вставок в местах пересечения (см., например, монографии:

- Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 316с
- Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое моделирование / Под ред. С.А. Исаева. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2016. 215 с).
- Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб, Судостроение, 2005. 398с.
- Вихревые технологии для энергетики / А.И. Леонтьев, С.В. Алексеенко, Э.П. Волчков и др.; под общей редакцией академика А.И. Леонтьева. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 350с.

Замечания к работе Луценко Н.А. возникли в ходе размышлений о прочитанном материале.

1. Хотелось бы проанализировать бэкграунд диссертации, определить ее прототипы. Тогда проще было бы оценивать ее новизну, опираясь на отличительные особенности, которых нет в других работах. Кроме того целесообразно указать, что сделано в работе впервые.

2. Как уже отмечалось, метод решения исходных уравнений во всех главах работы конечно-разностный. Почему автор не применил конечно-объемный подход?

Также было бы полезно провести дискретизацию предварительно линеаризованных исходных уравнений (схема в приращениях), как это, например, сделано в монографии

- Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости // Л.: Судостроение, 1989. 256с.

Это позволяет повысить устойчивость вычислительного процесса.

Для конвективных членов уравнений применяется противопоточная схема. Следовало указать, откуда она взята.

Заявлено, что на последовательности сгущающихся, равномерных сеток показывается сеточная независимость прогнозов и устанавливается приемлемая сетка с шагом 0.025, а конкретные данные сравнений не приводятся. Не ясно, что такое «достаточно малая погрешность»?

Чему равняются константы в демпфирующих членах? Каковы сетки, времена счета на конкретных компьютерах?

Насколько эффективен разработанный метод? Не хватает сравнений.

3. Решенные задачки впечатляют (во всяком случае выводы из их решения крайне интересные). Однако зоны горения и энерговыделения прямоугольные. Как

изменяться выводы, если задать зону круглую, эллиптическую, а также допустить ее изменение со временем?

4. Каковы пределы применимости развитой методологии по безразмерным параметрам?

Автореферат соответствует диссертации и достаточно полно отражает ее содержание.

Диссертационная работа является законченным научным исследованием, представляющим крупный вклад в моделирование нестационарных процессов в пористых объектах с очагами энерговыделения. В диссертации изложены теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Содержание полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Выполненная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК России к докторским диссертациям, в том числе соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Луценко Н.А. достоин присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Заведующий лабораторией
фундаментальных исследований
Санкт-Петербургского государственного
университета гражданской авиации,
доктор физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы,
профессор
14.11.2018



С.А.Исаев

isaev3612@yandex.ru 812-7710311

Адрес организации: 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

Подпись профессора Исаева С.А. заверяю

Ученый секретарь Генерального Совета


