

ОТЗЫВ

официального оппонента Губайдуллина Дамира Анваровича

на диссертацию Луценко Николая Анатольевича

«Нестационарные течения газа через пористые объекты с очагами энерговыведения»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Н.А. Луценко посвящена исследованию нестационарных процессов в пористых средах с источниками энерговыведения различного типа при свободной и вынужденной фильтрации газа. Очаги выделения энергии в пористых средах могут возникать в результате природных или техногенных катастроф. Энерговыведение в пористой среде может происходить как в результате химических реакций окисления, так и иметь другую природу. Типичным примером пористого саморазогревающегося объекта, в котором выделение теплоты не сопровождается химическими превращениями, является аварийный энергоблок Чернобыльской АЭС. Несмотря на значительное число исследований в этой области, нестационарные процессы в подобных пористых объектах продолжают вызывать много вопросов. Когда энерговыведение в пористой среде происходит в результате реакций окисления между горючим веществом, содержащимся в твердой фазе, и кислородом, содержащимся в протекающем через среду воздухе, мы имеем дело с одним из видов фильтрационного горения. Фильтрационное горение давно и активно разрабатывается и имеет много различных практических приложений. Вместе с тем открытыми остаются вопросы ликвидации и предотвращения возгораний в некоторых пористых средах природного и техногенного происхождения (торфяники, угольные отвалы, полигоны ТБО и т.д.), при которых фильтрационное горение происходит при естественной конвекции. Крупные торфяные пожары, произошедшие в последние десятилетия в различных странах, и в том числе в России, показывают недостаточную изученность процессов горения пористых сред и, таким образом, привлекают исследователей. Поэтому **актуальность и важность** избранной темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. *Во введении* обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертации, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описываются методы исследования, а также формулируются положения, выносимые на защиту. Кроме этого, приводится достаточно обширный обзор литературы по тематике исследования. *В первой главе* диссертационной работы с использованием классических подходов механики

сплошных многокомпонентных сред формулируются математические модели, описывающие нестационарные течения газа через пористые среды как с источниками саморазогрева без химических превращений, так и с очагами горения в твердой фазе. Особенностью рассматриваемых моделей является то, что расход и скорость фильтрации газа на входе в пористый объект неизвестны и должны определяться при решении задачи, а известно давление газа на открытых границах объекта. *Вторая глава* диссертации посвящена одномерным течениям газа через пористые саморазогревающиеся среды, в ней изучаются процессы в пористых объектах при изменении давления газа на их входе. Интересным здесь является обнаруженная неоднозначность стационарного процесса, из-за которой возникает возможность перегрева пористого объекта при краевых условиях, удовлетворяющих критерию стационарности. Это демонстрирует недостаточность выполнения критерия стационарности для установления безопасного устойчивого режима в таких объектах. Также представляют интерес обнаруженные режимы охлаждения пористых сред, при которых рост коэффициента теплопроводности приводит к аномальному увеличению максимальной температуры пористого саморазогревающегося объекта. *В третьей главе* диссертационной работы рассматриваются течения газа через двумерные (плоские и осесимметричные) пористые саморазогревающиеся объекты, а *в четвертой главе* исследуются аналогичные, но трехмерные процессы. В этих главах изучается влияние геометрии границ пористых объектов и конфигурации расположенных в них внутренних источников саморазогрева на протекающие процессы. Показано, что в пористых объектах как двумерной, так и трехмерной конфигурации с различным распределением очагов тепловыделения при принудительной фильтрации интенсивный разогрев происходит только в областях энерговыведения и выше их по потоку. При этом газ, двигаясь вверх по пористому объекту, стремится огибать нагретые зоны и течь по более холодным областям. Проведенные исследования позволяют определять направление вдувания газа в пористый саморазогревающийся объект для его наиболее эффективного охлаждения в случае, когда подача газа может осуществляться через различные границы пористого объекта. *Пятая глава* диссертации посвящена нестационарным одномерным течениям газа через пористые среды с очагами гетерогенного горения при естественной и вынужденной фильтрации. Разработанная и реализованная численная модель позволяет рассчитывать не только спутные и встречные волны горения, но также способна описывать отражение встречных волн от границы объекта и переход их в спутные волны. *В шестой главе* диссертационной работы рассматриваются процессы гетерогенного горения в двумерных пористых объектах. Показано, что при принудительной фильтрации потоки газа стремятся огибать горячие

области, а при естественной конвекции могут возникать вихревые течения газа. Указанные вихри существенно влияют на приток окислителя в зону горения и могут играть важную роль при распространении природных пожаров. *В заключении* формулируются основные результаты диссертационной работы и перспективы дальнейшего развития проведенных исследований.

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы и не вызывают сомнений. Все основные **результаты** диссертации **являются новыми** и опубликованы в работах автора, среди которых 20 статей в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и/или Scopus. **Достоверность результатов** диссертационной работы обусловлена использованием классических подходов механики сплошных многокомпонентных сред и теории фильтрационного горения при построении математических моделей. Для проверки корректности предложенных численных схем использовались тестовые задачи, сравнение с экспериментальными данными, а также тестирование сходимости численных решений на последовательности сгущающихся сеток.

Текст диссертации логично структурирован, написан ясным и понятным языком, хорошо иллюстрирован. Оформление диссертации и автореферата соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

По работе можно отметить следующие замечания и дискуссионные моменты:

1. В модели, описывающей процессы в пористых саморазогревающихся объектах без учета химических реакций, в уравнении энергии для газа учитывается работа внутренних сил, которая определяется обратимой работой сжатия газа и работой вязкой межфазной силы. А в модели, описывающей гетерогенное горение пористых сред, в уравнении энергии для газа работа внутренних сил опущена. Такой избирательный учет требует пояснения.

2. При исследовании процессов в пористых саморазогревающихся объектах без учета химических реакций в диссертации приводятся графические результаты, демонстрирующие поведение всех искомых величин. А при исследовании процессов гетерогенного горения пористых сред приводятся, как правило, только рисунки распределений температуры твердой среды, степени выгорания твердого горючего материала и, в двумерном случае, поля скорости газа. Хотелось бы видеть иллюстративный материал и для остальных искомых величин.

3. Известно, что при распространении волн фильтрационного горения может возникать неустойчивость, приводящая к разрушению плоской волны горения и к структурированию фронта горения в виде пальцев, или фингеров (Саффман-Тейлоровская неустойчивость). В диссертации это не рассматривается. Хотелось бы узнать, наблюдались ли подобные

неустойчивые режимы распространения двумерных волн горения при решении задач диссертационной работы.

4. Предположение о диатермичности верно только для не сильно задымленных газов. При горении же сильная задымленность присутствует априори и вопрос о применимости гипотезы диатермичности зависит от отношения глубины проникания радиационного излучения к размеру полости внутри пористой среды.

5. Предположение о том, что теплопроводность конденсированной фазы постоянна, верно лишь в пределах невысоких температур, когда можно пренебречь радиационным теплообменом в поре. При температурах горения теплопроводность можно считать пропорциональной кубу абсолютной температуры твердой фазы, т.е. нельзя считать постоянной величиной.

Сделанные замечания не отражаются на общей положительной оценке диссертационной работы. Диссертация Луценко Николая Анатольевича «Нестационарные течения газа через пористые объекты с очагами энерговыведения» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основе выполненных автором исследований сформулированы и обоснованы научные положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в механике многофазных сред. **Диссертационная работа полностью соответствует всем критериям**, установленным для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор – Николай Анатольевич Луценко – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

Д.А. Губайдуллин

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, руководитель Института механики и машиностроения – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук». Адрес: 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31. Телефон: +7 917 269 92 59. E-mail: damirgubaidullin@gmail.com

Подпись чл.-корр. РАН Д.А. Губайдуллина заверяю

