

На правах рукописи



Луценко Николай Анатольевич

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ
ОБЪЕКТЫ С ОЧАГАМИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Владивосток

2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный консультант:

Левин Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, академик

Официальные оппоненты:

Губайдуллин Дамир Анварович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,

Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», руководитель

Исаев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», заведующий лабораторией фундаментальных исследований

Хмель Татьяна Алексеевна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории № 12 «Волновых процессов в ультрадисперсных средах»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук

Защита состоится « 25 » декабря 2018 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 003.054.04 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <http://www.hydro.nsc.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Рудой Евгений Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Настоящая работа обязана своим появлением аварии на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года. С самого момента этой катастрофы встал вопрос о стратегии борьбы с ее последствиями. Раскаленные обломки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) оставались в аварийном энергоблоке, и для локализации и ликвидации катастрофы требовалось понимание процессов, происходящих в активной зоне этого энергоблока. При разработке математической модели процесса эволюции активной зоны аварийного блока Чернобыльской АЭС были проанализированы несколько различных механизмов, и адекватной реальной ситуации оказалась модель фильтрационного охлаждения. С общей точки зрения это математическая модель течения газа в поле силы тяжести через саморазогревающуюся пористую среду, открытую в атмосферу сверху и снизу. Условие открытости пористой среды в атмосферу приводит к самосогласованному расходу газа через объект – расход газа заранее не известен и зависит не только от давления на открытых границах и свойств твердого пористого скелета, но и от разогрева объекта. И хотя уравнения математической модели являются классическими и использованы в той или иной модификации во многих работах по теории фильтрации, новый тип краевой задачи для них, возникший при анализе конкретных условий охлаждения аварийного блока Чернобыльской АЭС, привел к открытию новых физических эффектов, которые позволили последовательно объяснить важные особенности в поведении аварийного реактора.

Результаты исследований большой группы ученых в области математического моделирования охлаждения разрушенного энергоблока Чернобыльской АЭС легли в основу монографии¹. В этой работе основное внимание уделено исследованию стационарного режима охлаждения аварийного реактора, который установился на четвертом энергоблоке ЧАЭС после произошедших в период с 3 по 5 мая 1986 года выбросов. Однако оставалось много вопросов об эволюции активной зоны аварийного энергоблока при нарушении условий стационарности. Несмотря на множество существующих работ по различным областям теории фильтрации, течения газа через пористые саморазогревающиеся среды, а в особенности нестационарные процессы в таких объектах, остаются недостаточно изученными.

Энерговыделение в пористой среде может происходить в результате экзотермических химических реакций между содержащимся в твердой фазе горючим веществом и окислителем из газовой фазы. Такие процессы являются одним из видов фильтрационного горения. Под фильтрационным горением понимается распространение волн экзотермического превращения в пористой среде при фильтрации газа, когда горючим может служить как твердая пористая среда, так и фильтрующиеся через нее жидкость или газ. Принципы

¹Маслов В.П., Мясников В.П., Данилов В.Г. Математическое моделирование аварийного блока Чернобыльской АЭС. – М.: Наука, 1987. – 144 с.

фильтрационного горения используются в различных технологических процессах (обжиг и агломерация руд, интенсификация добычи нефти с помощью внутрислоевого горения, регенерация катализаторов, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, фильтрационное горение газов, фильтрационное горение твердого топлива, подземная газификация угля). Фильтрационное горение имеет место при некоторых природных и техногенных пожарах (самовозгорание торфяников, угольных отвалов, полигонов твердых бытовых отходов, элеваторов).

Из всех видов фильтрационного горения наиболее близким к процессам течения газа через пористые объекты с очагами энерговыделения радиоактивного типа (как в аварийном энергоблоке ЧАЭС) является гетерогенное горение твердых пористых сред. При гетерогенном горении пористых сред реакция между кислородом и твердым топливом происходит непосредственно на поверхности пор, то есть топливо и окислитель находятся в разных фазах. Распространенным видом гетерогенного горения в пористых средах является тление, которое характеризуется беспламенной экзотермической поверхностной реакцией, движущейся с малой скоростью. Тление торфяников приводит к крупнейшим пожарам на Земле. Обширные пожары в Индонезии в 1997 году и в России в 2010 году показали, что тление торфяников может в значительной степени увеличивать глобальную эмиссию парниковых газов и приводит к разрушению экосистем, непоправимому экологическому ущербу и огромным экономическим потерям. Наблюдавшееся в октябре 1997 года облако задымленности протяженностью около 10 тысяч километров, возникшее из-за тлеющих торфяных пожаров в Индонезии, продемонстрировало гигантские масштабы катастроф, связанных с гетерогенным горением пористых сред. Для предотвращения и ликвидации пожаров в пористых объектах необходимо изучить динамику протекающего через них газа, так как это позволит понять, каким образом можно ограничить поступление окислителя (воздуха) в очаги горения и, таким образом, затушить возгорание. Главной проблемой при моделировании газодинамических процессов в таких объектах является то, что на открытых границах исследуемого объекта неизвестен не только расход газа, но даже и направления потоков газа.

Таким образом, актуальность темы исследования настоящей диссертационной работы определяется следующими обстоятельствами: во-первых, слабой изученностью нестационарных процессов в пористых объектах с очагами гетерогенного горения и иного энерговыделения, недостатком знаний о детальной динамике газа в таких объектах; во-вторых, необходимостью исследований указанных процессов с целью предотвращения и ликвидации катастроф, связанных с авариями на АЭС, природными и техногенными пожарами.

Цель диссертационной работы заключается в:

1. разработке и развитии математических моделей и численных методов для исследования совокупности гидродинамических,

термодинамических и химических процессов в пористых объектах с источниками энерговыделения различного типа, в том числе с очагами гетерогенного горения, при естественной и вынужденной фильтрации газа;

2. использовании данных моделей и методов для исследования динамических процессов в пористых объектах с источниками саморазогрева и с очагами гетерогенного горения при естественной и вынужденной фильтрации газа, выявлении основных закономерностей и важных особенностей изучаемых процессов.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе ставились и решались следующие **задачи**:

1. Разработка адекватной математической модели, эффективных вычислительных алгоритмов и программных комплексов для исследования нестационарных одномерных, двумерных и трехмерных течений газа через пористые объекты с источниками саморазогрева при заданном давлении на границах объекта и неизвестном расходе входящего газа.

2. Проведение численных исследований газового охлаждения пористых саморазогревающихся объектов и выявление влияния на процесс охлаждения различных факторов: геометрии границ объектов, интенсивности и пространственной неоднородности внутренних источников энерговыделения, изменения давления газа на открытых границах объектов, некоторых свойств твердой среды и газа.

3. Разработка адекватной математической модели, эффективных вычислительных алгоритмов и программных комплексов для исследования динамических процессов гетерогенного горения пористых одномерных и двумерных объектов с очагами воспламенения в твердой фазе в условиях как принудительной фильтрации, так и естественной конвекции.

4. Проведение численных исследований распространения одномерных и двумерных волн гетерогенного горения пористых объектов при естественной и вынужденной фильтрации газа, изучение динамики газа в таких объектах, выявление влияния на процесс горения различных факторов: расположения зоны зажигания, перепада давления на открытых границах и поля силы тяжести.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что в ней:

1. Предложена усовершенствованная математическая модель, построены оригинальные конечно-разностные схемы и разработаны программные комплексы для исследования нестационарных одномерных, двумерных и трехмерных течений газа через пористые объекты с источниками саморазогрева при естественной и вынужденной фильтрации, которые учитывают некоторые качественно важные эффекты (в частности, зависимость вязкости газа от температуры) и специфические граничные условия (на открытых границах моделируемого объекта неизвестен не только расход газа, но и направления потоков газа, а известно только давление).

2. Обнаружены режимы газового охлаждения пористых саморазогревающихся объектов, при которых, несмотря на выполнение

условий, удовлетворяющих критерию стационарности, не устанавливается устойчивый режим охлаждения, а происходит неограниченный разогрев объекта, приводящий к его перегреву и разрушению.

3. Обнаружены режимы течения газа через пористые объекты с внутренними источниками энерговыделения, при которых с ростом коэффициента теплопроводности твердой среды происходит аномальное повышение её общего разогрева и увеличение максимальной температуры. Этим опровергнуто устойчивое мнение, что при пренебрежении теплопроводностью твердой фазы всегда можно получить оценку сверху для реальных температур.

4. Обнаружен эффект уменьшения разогрева пористого объекта при удалении расположенного внутри него очага энерговыделения от входной части объекта, в которую подается холодный воздух. Выявлена неоднозначная зависимость разогрева пористого объекта от ширины очага энерговыделения: при росте ширины очага тепловыделения разогрев объекта может как увеличиваться, так и уменьшаться, в зависимости от удаленности очага выделения тепла от входа в объект. Проведенные исследования позволяют определять наиболее эффективное направление обдува очага энерговыделения в пористом объекте при газовом охлаждении в случае, если направления вдувания воздуха могут быть различны.

5. Исследована динамика газа в пористых объектах с внутренними источниками энерговыделения и показано, что при принудительной фильтрации газ, двигаясь по объекту, стремится огибать нагретые зоны и течь по более холодным областям, а при свободной конвекции в очаге выделения тепла и в его окрестности могут возникать вихревые течения газа, которые ухудшают теплоотвод из пористого объекта.

6. Исследовано газовое охлаждение пористых саморазогревающихся объектов различной конфигурации и с различной геометрией границ, в том числе ступенчато или плавно сужающихся, с частичным перекрытием выходного отверстия верхней крышкой, с застойными зонами, с боковым вдувом газа, и показано влияние конфигурации границ на процесс охлаждения.

7. Предложена усовершенствованная математическая модель, построены оригинальные конечно-разностные схемы и разработаны программные комплексы для исследования совокупности гидродинамических, термодинамических и химических процессов в пористых одномерных и двумерных объектах с очагами гетерогенного горения в твердой фазе при естественной и вынужденной фильтрации газа, которые позволяют детально моделировать динамику газа в таких объектах.

8. Исследовано распространение одномерных спутных и встречных волн гетерогенного горения пористых сред при свободной конвекции и численно рассчитано отражение от границы объекта встречной волны горения, не полностью выжигающей твердое горючее вещество, и ее переход в спутную волну горения.

9. Обнаружено, что при гетерогенном горении пористых сред гравитационное поле внутри объекта и перепад давления на его границах, вызванный действием силы тяжести на окружающий воздух, приводят к противоположным конкурирующим эффектам: направления или режимы распространения вызванных ими волн горения различаются. При одновременном воздействии этих факторов, которое происходит в реальном вертикальном пористом объекте, определяющим при нормальных условиях является перепад давления на границах объекта, а влияние гравитационного поля внутри пористой среды приводит к снижению скорости волны горения.

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

11. Обнаружено, что при горении твердых пористых сред в условиях естественной конвекции в окрестности очага горения возникают вихревые течения газа, которые могут существовать достаточно долго и сильно влияют на приток окислителя в зону реакции. При этом направления газовых потоков на проницаемых поверхностях пористого объекта могут изменяться с течением времени, из-за чего воздух попадает в очаг горения через различные участки открытых границ объекта. Выявлено, что при свободной конвекции волна горения может проходить через все части объекта независимо от того, где расположена зона зажигания.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы определяется тем, что ее результаты вносят вклад в теорию фильтрации газа и позволяют лучше понимать нестационарные процессы, происходящие в пористых средах с различными очагами энерговыделения, в том числе с очагами горения. Предложенные математические модели и разработанные оригинальные вычислительные алгоритмы могут эффективно применяться для решения большого числа прикладных задач, возникающих в экологии, энергетике, металлургии, химической и добывающей промышленности. Проведенные исследования позволяют выработать рекомендации по оптимизации процесса газового охлаждения пористых саморазогревающихся объектов и могут стать научной основой новых технологий ликвидации последствий катастроф, связанных с возникновением очагов энерговыделения в пористых средах. Результаты исследований могут оказаться полезными для развития технологий прогнозирования, предотвращения и ликвидации последствий торфяных и иных природных и техногенных пожаров, а также для проектирования невоспламеняющихся пожароопасных пористых объектов (в частности, полигонов твердых бытовых отходов).

Значимость диссертационной работы подтверждается также тем, что разработанные в ней математические модели и вычислительные алгоритмы в настоящее время модифицируются для исследования иных процессов в пористых средах. В частности, 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.

Методология и методы исследования настоящей диссертационной работы основываются на методах механики сплошных гетерогенных сред, теории фильтрационного горения и вычислительной математики. Математическая модель нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками саморазогрева базируется на классических подходах механики сплошных гетерогенных сред. Математическая модель, описывающая динамические процессы гетерогенного горения пористых объектов, базируется на классических подходах механики сплошных гетерогенных сред и теории фильтрационного горения. Эти модели основаны на идее взаимодействующих взаимопроникающих континуумов и включают в себя уравнения неразрывности, движения и энергии для каждого компонента (твердого и газообразного). При этом для описания динамики газа используется уравнение сохранения импульса для пористых сред, которое можно считать обобщением классического уравнения Дарси. Разработанные вычислительные алгоритмы основаны на методе конечных разностей. При их создании используется оригинальная идея комбинирования явных и неявных конечно-разностных схем. При этом для уменьшения дисперсионной ошибки используются демпфирующие члены, не уменьшающие формальную точность метода.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель и конечно-разностные методы для исследования нестационарных одномерных, двумерных и трехмерных течений газа через пористые объекты с источниками саморазогрева при естественной и вынужденной фильтрации, которые учитывают некоторые качественно важные эффекты (в частности, зависимость вязкости газа от температуры) и специфические граничные условия (на открытых границах моделируемого объекта неизвестен не только расход газа, но и направления потоков газа, а известно только давление).

2. Результаты численного исследования газового охлаждения одномерных пористых саморазогревающихся объектов при переменном давлении газа на их входе; результаты анализа влияния на процесс охлаждения некоторых свойств твердой среды и газа.

3. Результаты численного исследования газового охлаждения двумерных и трехмерных пористых саморазогревающихся объектов; результаты моделирования динамики газа в таких объектах; результаты анализа влияния на процесс охлаждения различных факторов: конфигурации объектов, геометрии их границ, интенсивности и пространственной неоднородности внутренних источников энерговыделения.

4. Математическая модель и конечно-разностные методы для исследования нестационарных процессов гетерогенного горения пористых

одномерных и двумерных объектов с очагами воспламенения в твердой фазе при естественной и вынужденной фильтрации газа, которые позволяют детально моделировать динамику газа в таких объектах.

5. Результаты численного исследования распространения одномерных спутных и встречных волн гетерогенного горения пористых сред при свободной конвекции; результаты моделирования отражения встречных волн горения; результаты анализа влияния на горение перепада давления на открытых границах и поля силы тяжести.

6. Результаты численного исследования распространения двумерных волн гетерогенного горения пористых объектов при естественной и вынужденной фильтрации газа; результаты моделирования динамики газа в таких объектах; результаты анализа влияния на процесс горения расположения зоны зажигания.

Достоверность результатов диссертационной работы обусловлена:

1. использованием классических подходов механики сплошных гетерогенных сред и теории фильтрационного горения при построении математических моделей;

2. проверкой корректности результатов численных расчетов различными способами: тестированием сходимости численных решений на последовательности сгущающихся сеток, сравнением численных решений для частных случаев с существующими известными решениями и известными экспериментальными данными;

3. опубликованием результатов исследований в ведущих зарубежных и отечественных журналах и обсуждением результатов на многочисленных международных и всероссийских конференциях.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах, конференциях, симпозиумах и конгрессах:

Зарубежных международных:

- 23rd, 24th International Congresses of Theoretical and Applied Mechanics ICTAM (Beijing, China, 2012; Montreal, Canada, 2016);
- 34th International Symposium on Combustion (Warsaw, Poland, 2012);
- 24th, 25th International Colloquiums on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems ICDERS (Taipei, Taiwan, 2013; Leeds, UK, 2015);
- 9th, 10th Asia-Pacific Conferences on Combustion ASPACC (Gyeongju, Korea, 2013; Beijing, China, 2015);
- Минские международные форумы по тепло- и массообмену MIF (Минск, Беларусь, 2008, 2016);
- 6th, 8th Asian Computational Fluid Dynamics Conferences ACFD (Taipei, Taiwan, 2005; Hong Kong, China, 2010);
- 4th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow ASCHT'13 (Hong Kong, China, 2013);
- 6th, 7th, 9th, 10th, 11th, 12th International Conferences on Flow Dynamics ICFD (Sendai, Japan, 2009, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015);

Отечественных международных:

- XIII, XIV, XVIII International Conferences on the Methods of Aerophysical Research ICMAR (Новосибирск, 2007, 2008; Пермь, 2016);
- VI, VII, VIII Международные конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (Новосибирск, 2005, 2010, 2015);
- XXXII, XXXIII, XL, XLI Summer School–Conferences «Advanced Problems in Mechanics» (Санкт-Петербург, 2004, 2005, 2012, 2013);
- Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам ВМСППС (Алушта, 2009);
- International scientific conference «Science of the Future» (Санкт-Петербург, 2014);
- 1st Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications RPC2010 (Владивосток, 2010);
- 2nd International Conference «Dynamics and Structure of Combustion Waves» (Владивосток, 2014);

Отечественных всероссийских:

- IX, X, XI Всероссийские съезды по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006, 2011; Казань, 2015);
- Первая, третья конференции по фильтрационному горению (Черноголовка, 2007, 2013);
- Всероссийская конференция «Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва» (Новосибирск, 2007);
- Российская конференция, посвященная 50-летию ИМ СО РАН «Математика в современном мире» (Новосибирск, 2007);
- Всероссийские конференции «Новые математические модели механики сплошных сред: построение и изучение» (Новосибирск, 2009, 2014);
- IX Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015);
- Всероссийская конференция «XXXII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2015);
- Всероссийская конференция с международным участием «Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва» (Новосибирск, 2017);
- Всероссийская молодежная конференция «Успехи химической физики» (Черноголовка, 2011);
- Конференция-семинар «Актуальные направления в механике сплошных сред» (Санкт-Петербург, 2012);
- Всероссийская конференции, посвященная 70-летию акад. В.П. Мясникова «Фундаментальные и прикладные вопросы механики» (Владивосток, 2006);
- Всероссийские конференции «Успехи механики сплошных сред», приуроченные к 70-летию акад. В.А. Левина (Владивосток, 2009) и 75-летию акад. В.А. Левина (Владивосток, 2014);

- Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления», посвященная 75-летию акад. В.П. Мясникова (Владивосток, 2011);

Отечественных региональных:

- XXVI, XXVIII, XXIX, XXX, XXXI, XXXII, XXXIII, XXXV Дальневосточные математические школы-семинары имени акад. Е.В. Золотова (Владивосток, 2001, 2003, 2004, 2006, 2007, 2008, 2010; Хабаровск, 2005);

- Дальневосточная междисциплинарная молодежная научная конференция «Современные методы научных исследований» (Владивосток, 2011).

Проведенные в настоящей диссертационной работе исследования были частично поддержаны грантами Президента Российской Федерации (№ МК-6493.2006.1, 2006-2007 гг.; № МК-3651.2008.1, 2008-2009 гг.; № МК-2198.2011.1, 2011-2012 гг.), РФФИ (№ 12-01-31064-мол_а, 2012-2013 гг.; № 16-01-00103-а, 2016-2018 гг.), ДВО РАН (№ 05-III-Г-03-072, 2005 г.; № 06-III-B-03-079, 2006-2008 гг.; № 09-III-B-01-015, 2009 г.; № 10-III-B-01И-011, 2010 г.; № 11-III-B-01И-011, 2011 г.; № 12-III-A-03-036, 2012-2014 гг., № 15-I-4-021, 2015-2017 гг.), Фонда содействия отечественной науке (2008-2009 гг.). В перечисленных здесь грантах их руководителем являлся автор настоящей диссертационной работы.

Некоторые результаты диссертационной работы были отмечены присуждением автору Премии РАН и РАО «ЕЭС России» в области энергетики и смежных наук «Новая генерация» (2006 г.) и Премии ДВО РАН им. академика В.П. Мясникова за работы в области математики и механики (2007 г.).

Публикации. Всего автором настоящей диссертационной работы опубликовано 130 научных трудов, из них: 76 публикаций без учета тезисов, 27 индексируемых в WoS и/или Scopus статей. По теме диссертации опубликовано 102 научные работы, из них: 19 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК [1–19], 6 статей в рецензируемых научных изданиях, не входящих в перечень ВАК, но индексируемых в WoS и/или Scopus [20–25], 7 статей в сборниках научных трудов и иных журналах [26–32]. Кроме этого, по теме диссертации зарегистрировано 6 программ для ЭВМ [33–38].

Личный вклад автора. Все включенные в диссертацию результаты исследований получены автором лично, либо при участии научного консультанта в постановке задач и обсуждении полученных результатов. Из работ в соавторстве на защиту выносятся результаты, которые получены непосредственно автором. Все положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 298 страниц, в работе содержится 157 рисунков и 207 библиографических ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, аргументирована ее новизна, показана теоретическая и практическая значимость, описаны методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность и описана апробация результатов, приведен краткий обзор литературы по теме исследования.

Первая глава посвящена построению математических моделей динамических процессов в пористых объектах с источниками энергоснабжения различного типа при саморегуляции проходящего через объект газа, то есть когда 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. В первом параграфе этой главы на основе классических подходов механики сплошных гетерогенных сред² формулируется математическая модель движения газа через пористые объекты с источниками саморазогрева (без учета химических превращений). Полагая, что твердая фаза – жесткая и неподвижная, систему уравнений, описывающую рассматриваемый процесс, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 (1 - a_g) \rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial t} &= -\alpha (T_c - T_g) + Q(1 - a_g) C + (1 - a_g) \lambda_c \Delta T_c, \\
 a_g \rho_g c_g \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) T_g \right) &= \alpha (T_c - T_g) + a_g \left(\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) p \right) + a_g^2 \frac{\mu}{k_1} \mathbf{v}_g^2 + a_g \lambda_g \Delta T_g, \\
 \rho_g (1 + \chi(1 - a_g)) \left(\frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) \mathbf{v}_g \right) &= -\nabla p + \rho_g \mathbf{g} - a_g \frac{\mu}{k_1} \mathbf{v}_g, \\
 \frac{\partial (a_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla (a_g \rho_g \mathbf{v}_g) &= 0, \quad p = \frac{\rho_g R T_g}{M}, \\
 \frac{\partial C}{\partial t} &= -k_2 C, \quad \mu = c_{s1} \frac{T_g^{1,5}}{c_{s2} + T_g}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь a – объемная концентрация (относительный объем фазы), c – удельная теплоемкость, c_{s1} и c_{s2} – константы в формуле Сазерленда, C – концентрация реагирующего вещества, $\mathbf{g}$ – ускорение силы тяжести, k_1 – коэффициент проницаемости конденсированной фазы, k_2 – коэффициент, определяющий уменьшение тепловыделения, M – молярная масса газа, p – давление газа, Q – константа, определяющая интенсивность тепловыделения, R – универсальная газовая постоянная, t – время, T – температура, $\mathbf{v}$ – скорость среды, α – константа, определяющая интенсивность межфазового теплообмена, λ – теплопроводность, μ – динамическая вязкость газа, ρ – истинная плотность, χ – коэффициент, учитывающий инерционное взаимодействие фаз

²Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1978. – 336 с.

при их ускоренном относительном движении. ∇ – оператор набла, Δ – оператор Лапласа. Индексы в обозначениях указывают на следующее: 0 – начальный момент, c – конденсированная фаза, g – газ.

Исследуемые пористые объекты с очагами энергосвечения имеют как непроницаемые границы, так и открытые, через которые может проходить газ. Настоящая работа посвящена исследованию течения газа через пористые объекты при саморегуляции расхода проходящего через объект газа, то есть когда расход и скорость фильтрации газа на входе в пористый объект неизвестны и должны определяться при решении задачи. В этом случае можно считать, что на открытых границах объекта, через которые газ втекает в объект, известны давление и температура газа, а также условия теплообмена. На открытых границах объекта, через которые газ вытекает из объекта, известны давление газа, условия теплообмена и условия для температуры газа. Известны также условия теплообмена на непроницаемых границах пористого объекта. Таким образом, краевые условия для системы (1) в общем виде можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} p|_{x \in G_1} &= p_0(x, t), \quad \lambda_c \partial T_c / \partial n|_{x \in G_1} = \beta \left(T_g|_{x \in G_1} - T_c|_{x \in G_1} \right), \\ T_g|_{x \in G_1} &= T_{g0}, \quad \text{если} \quad \mathbf{v}_g|_{x \in G_1} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_1} \leq 0, \\ \partial T_g / \partial n|_{x \in G_1} &= 0, \quad \text{если} \quad \mathbf{v}_g|_{x \in G_1} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_1} > 0, \\ \partial T_c / \partial n|_{x \in G_2} &= 0, \quad \partial T_g / \partial n|_{x \in G_2} = 0, \quad \mathbf{v}_g|_{x \in G_2} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_2} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

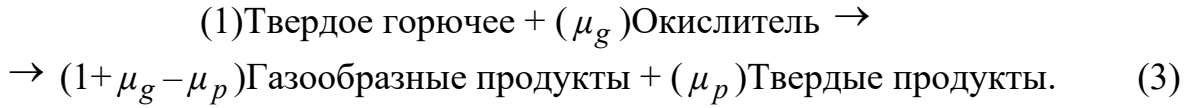
Здесь G_1 – поверхности объекта, открытые в атмосферу, G_2 – непроницаемые поверхности объекта, $\mathbf{n}$ – нормаль к поверхности G_1 или G_2 , β – коэффициент теплоотдачи, p_0 и T_{g0} – соответственно давление и температура газа в окрестности объекта.

Граничные условия (2) могут соответствовать как принудительной (вынужденной) фильтрации, когда газ нагнетается в объект, так и свободной (естественной) конвекции, когда принудительное нагнетание газа отсутствует. Заметим, что адиабатичность непроницаемых стенок не является обязательным условием, и при необходимости можно легко учесть теплопередачу через эти стенки. Далее в первом параграфе производится обезразмеривание уравнений, и построенная модель выписывается в безразмерном виде.

Во втором параграфе первой главы на основе классических подходов механики сплошных гетерогенных сред² и теории фильтрационного горения³ строится математическая модель движения газа через пористые объекты с очагами гетерогенного горения. Полагаем, что твердое пористое вещество – жесткое и неподвижное, состоит из горючего компонента, инертного

³Алдушин А.П., Мержанов А.Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 9-52.

компонента и твердых продуктов реакции, при этом твердый горючий материал превращается в газозобразные и твердые продукты реакции в результате взаимодействия с газозобразным окислителем. Этот процесс можно описать следующим образом:



Здесь и далее μ_g и μ_p – массовые стехиометрические коэффициенты для окислителя и твердых продуктов реакции соответственно. Систему уравнений, описывающую процесс гетерогенного горения пористых сред, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} (\rho_{cf}c_{cf} + \rho_{ci}c_{ci} + \rho_{cp}c_{cp}) \frac{\partial T_c}{\partial t} &= -\alpha(T_c - T_g) + Q\rho_{cf0}W + (1 - a_g)\lambda_c\Delta T_c, \\ \rho_g c_g \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) T_g \right) &= \alpha(T_c - T_g) + a_g \lambda_g \Delta T_g, \\ \rho_g (1 + \chi(1 - a_g)) \left(\frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) \mathbf{v}_g \right) &= -a_g \nabla p + \rho_g \mathbf{g} - a_g^2 \frac{\mu}{k_1} \mathbf{v}_g - (1 - \mu_p) \rho_{cf0} W \mathbf{v}_g, \\ \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{v}_g) &= (1 - \mu_p) \rho_{cf0} W, \quad p = \frac{\rho_g R T_g}{a_g M}, \\ \rho_g \left(\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) C \right) &= \nabla \cdot (\rho_g D_g \nabla C) - \mu_g \rho_{cf0} W - (1 - \mu_p) \rho_{cf0} W C, \\ W &= (1 - \eta) C k \exp(-E/(R T_c)), \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = W, \\ \rho_{cf} &= (1 - \eta) \rho_{cf0}, \quad \rho_{cp} = \mu_p \rho_{cf0} \eta, \quad a_g = a_{g0} + (a_{cf0} - a_{cpEnd}) \eta, \\ D_g &= D_{g0} (T_g/273)^b, \quad \mu = c_{s1} \frac{T_g^{1.5}}{c_{s2} + T_g}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь, в отличие от предыдущей модели (1), C – массовая концентрация окислителя, ρ – эффективная плотность (произведение истинной плотности и объемной концентрации); также используются следующие параметры: D_g – коэффициент диффузии газа, E – энергия активации, W – скорость химической реакции, η – степень превращения твердого горючего компонента; индексы в обозначениях: "End" – конечный момент времени, "i" – инертный компонент, "f" – горючий компонент (топливо), "p" – продукт реакции. Остальные обозначения и индексы совпадают с таковыми в (1).

Краевые условия для системы (4) выписываются по аналогии с (2):

$$\begin{aligned} p|_{x \in G_1} &= p_0(x, t), \quad \lambda_c \partial T_c / \partial n|_{x \in G_1} = \beta \left(T_g|_{x \in G_1} - T_c|_{x \in G_1} \right), \\ T_g|_{x \in G_1} &= T_{g0} \quad \text{и} \quad C|_{x \in G_1} = C_0, \quad \text{если} \quad \mathbf{v}_g|_{x \in G_1} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_1} \leq 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial T_g / \partial n|_{x \in G_1} = 0 \quad \text{и} \quad \partial C / \partial n|_{x \in G_1} = 0, \quad \text{если} \quad \mathbf{v}_g|_{x \in G_1} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_1} > 0, \\ \partial T_c / \partial n|_{x \in G_2} = 0, \quad \partial T_g / \partial n|_{x \in G_2} = 0, \quad \mathbf{v}_g|_{x \in G_2} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_2} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь C_0 – массовая концентрация окислителя в окрестности объекта, остальные обозначения и индексы совпадают с таковыми в (2) и (4). Граничные условия (5) могут соответствовать как принудительной фильтрации, так и свободной конвекции. Адиабатичность непроницаемых стенок здесь также не является обязательным условием. Далее во втором параграфе производится обезразмеривание уравнений, и модель выписывается в безразмерном виде.

Вторая глава посвящена исследованию влияния изменения давления газа на входе в пористые саморазогревающиеся объекты на процесс их охлаждения. В главе рассматриваются одномерные течения газа через пористые объекты с источниками энерговыделения без учета химических превращений при саморегуляции проходящего через объект газа. В первом параграфе этой главы подробно описывается предложенный численный метод для исследования рассматриваемых процессов. Метод основан на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем, его особенности изложены в [1, 26, 27]. Согласно методу, уравнения энергии и сохранения импульса преобразовываются в явные конечно-разностные уравнения, из которых определяются температура газа, температура твердой среды и скорость фильтрации газа. Уравнение неразрывности преобразовывается в неявное конечно-разностное уравнение, из которого с учетом уравнения состояния совершенного газа методом прогонки определяется давление газа. Плотность газа определяется из уравнения состояния совершенного газа.

Во втором параграфе рассматриваются задача о включении принудительной фильтрации в момент начала тепловыделения в твердой фазе [2] и задача о нарушении установившегося режима охлаждения пористого тепловыделяющего объекта посредством резкого сброса давления газа на входе в объект [1]. Показано, что как при нарушении стационарного режима охлаждения пористого саморазогревающегося объекта, произошедшего из-за падения давления нагнетаемого воздуха на входе в объект, так и при включении принудительной фильтрации в пористом объекте в момент начала тепловыделения в твердой фазе, в зависимости от установившегося на входе в объект давления воздуха либо устанавливается новый стационарный режим охлаждения, либо происходит неограниченный разогрев объекта, ведущий к плавлению твердой фазы и нарушению процесса охлаждения. Нагрев объекта до температуры плавления твердой фазы (то есть переход к катастрофическому режиму) требует определенного времени, поэтому если реальный объект имеет параметры, при которых технически возможно осуществление стационарного режима охлаждения, то можно избежать катастрофы, если успеть поднять давление воздуха на входе в объект до значения, при котором установится стационарный режим охлаждения.

В третьем параграфе демонстрируется, что учет температурной зависимости динамической вязкости при моделировании движения газа через пористую тепловыделяющую среду приводит к неоднозначности стационарного решения [2]: одному и тому же значению давления газа на входе в объект соответствует два значения расхода газа. При этом критическое значение давления газа на входе в объект, ниже которого не существует стационарного решения, достигается при расходе газа существенно отличном от нуля, в отличие от случая постоянной динамической вязкости. Показано, что стационарный режим охлаждения, соответствующий меньшему расходу газа при заданном давлении на входе в объект, является неустойчивым, а стационарный режим, соответствующий большему расходу газа при заданном давлении на входе в объект, является устойчивым. Далее рассмотрен процесс, при котором после установления стационарного режима охлаждения пористого объекта давление газа на входе в объект падает до закритического, при котором не существует стационарного решения, и через некоторое время поднимается выше критического [26]. Показано, что по окончании этого процесса, несмотря на выполнение условий, удовлетворяющих критерию стационарности, не всегда устанавливается устойчивый режим охлаждения, а при определенных условиях может происходить неограниченный разогрев объекта, приводящий к его перегреву и разрушению. На рис. 1 показано изменение со временем коэффициента охлаждения θ – отношения количества теплоты, покидающей объект в единицу времени, к количеству теплоты, выделяемой в объекте в результате реакции в единицу времени – для обоих случаев рассмотренной задачи: случая установления стационарности (сплошная линия) и случая неограниченного разогрева (штриховая линия).

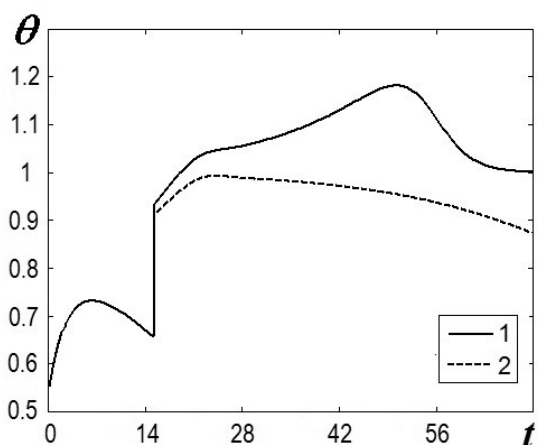


Рис. 1. Коэффициент охлаждения (1 – установление стационарности, 2 – неограниченного разогрев)

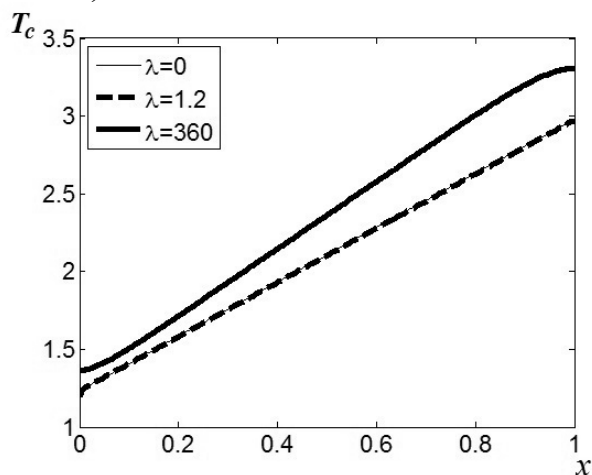


Рис. 2. Распределение температуры твердой среды по высоте объекта (графики при $\lambda = 0$ и 1.2 сливаются)

В четвертом параграфе описываются режимы охлаждения пористых саморазогревающихся сред, при которых с ростом коэффициента теплопроводности твердой среды происходит аномальный общий разогрев пористого объекта, проявляющийся в увеличении его максимальной

температуры [12]. На рис. 2 показано распределение температуры твердой среды по высоте объекта при различных коэффициентах теплопроводности конденсированной фазы при таком аномальном режиме, когда рост коэффициента теплопроводности приводит к дополнительному разогреву объекта. В этом параграфе также показано, что обнаруженный эффект дополнительного разогрева объекта при росте коэффициента теплопроводности наблюдается в пористых саморазогревающихся объектах с саморегуляцией расхода газа при давлениях на входе близких к критическому.

Третья глава посвящена исследованию влияния геометрии пористых объектов и внутренних очагов саморазогрева на процесс их охлаждения. В главе рассматриваются двумерные течения газа через пористые объекты с источниками энерговыделения без учета химических превращений при саморегуляции проходящего через объект газа. В первом параграфе этой главы подробно описывается предложенный численный метод для исследования рассматриваемых процессов в плоском и осесимметричном случае. Метод основан на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем, его особенности изложены в [3, 5, 27].

Во втором параграфе рассматривается охлаждение плавно сужающихся и ступенчато сужающихся плоских и осесимметричных пористых саморазогревающихся объектов [3, 5]. Показано, что по сравнению с плавно сужающимися объектами, ступенчато сужающиеся объекты охлаждаются хуже, что обусловлено гидродинамикой течений газа в пристеночных областях. Общее охлаждение осесимметричных ступенчато или плавно сужающихся объектов хуже, чем охлаждение плоских объектов с аналогичным сужением, что приводит к заметному увеличению температур и к уменьшению расхода газа. Возможны случаи, когда при одинаковых начально-краевых условиях и параметрах задачи процесс охлаждения плоского объекта стабилизируется, а аналогичный осесимметричный объект разогревается неограниченно.

В третьем параграфе исследуется движение газа через пористые объекты с неравномерным распределением источников энерговыделения и анализируется влияние различных параметров тепловыделяющей зоны (высоты, ширины, удаленности от входа в объект) на процесс охлаждения таких объектов [4, 28, 29]. На рис. 3 представлен пример распределения искомых величин по плоскому пористому объекту с расположенной в центре объекта зоной энерговыделения. В нижнюю часть ($x_2 = 0$) объекта, ограниченного боковыми непроницаемыми стенками, принудительно нагнетается газ, который проходит через пористую среду и вытекает в атмосферу через верхнюю поверхность объекта ($x_2 = 1$). Для лучшей визуализации графики давления и плотности газа развернуты на 180° . Из рисунка видно, что интенсивный нагрев как твердой среды, так и газа происходит только в областях энерговыделения и выше их по потоку. Газ, двигаясь вверх по объекту, стремится обогнуть нагретые зоны и течь по более холодным областям.

Далее в этом параграфе показано, что при удалении очага выделения тепла от входа в пористый объект разогрев твердой среды уменьшается, а

изменение ширины (диаметра) тепловыделяющей зоны неоднозначно влияет на разогрев пористого объекта: при росте ширины (диаметра) тепловыделяющей зоны разогрев объекта может как увеличиваться, так и уменьшаться, в зависимости от удаленности очага энергоснабжения от входа в объект. При этом влияние ширины (диаметра) тепловыделяющей зоны на разогрев достаточно мало, в отличие от влияния высоты очага выделения тепла, с увеличением которой температура твердой среды растет нелинейно. Увеличение интенсивности энергоснабжения очага приводит к нелинейному росту разогрева твердой среды; с уменьшением давления газа на входе в пористый объект разогрев очага нелинейно возрастает.

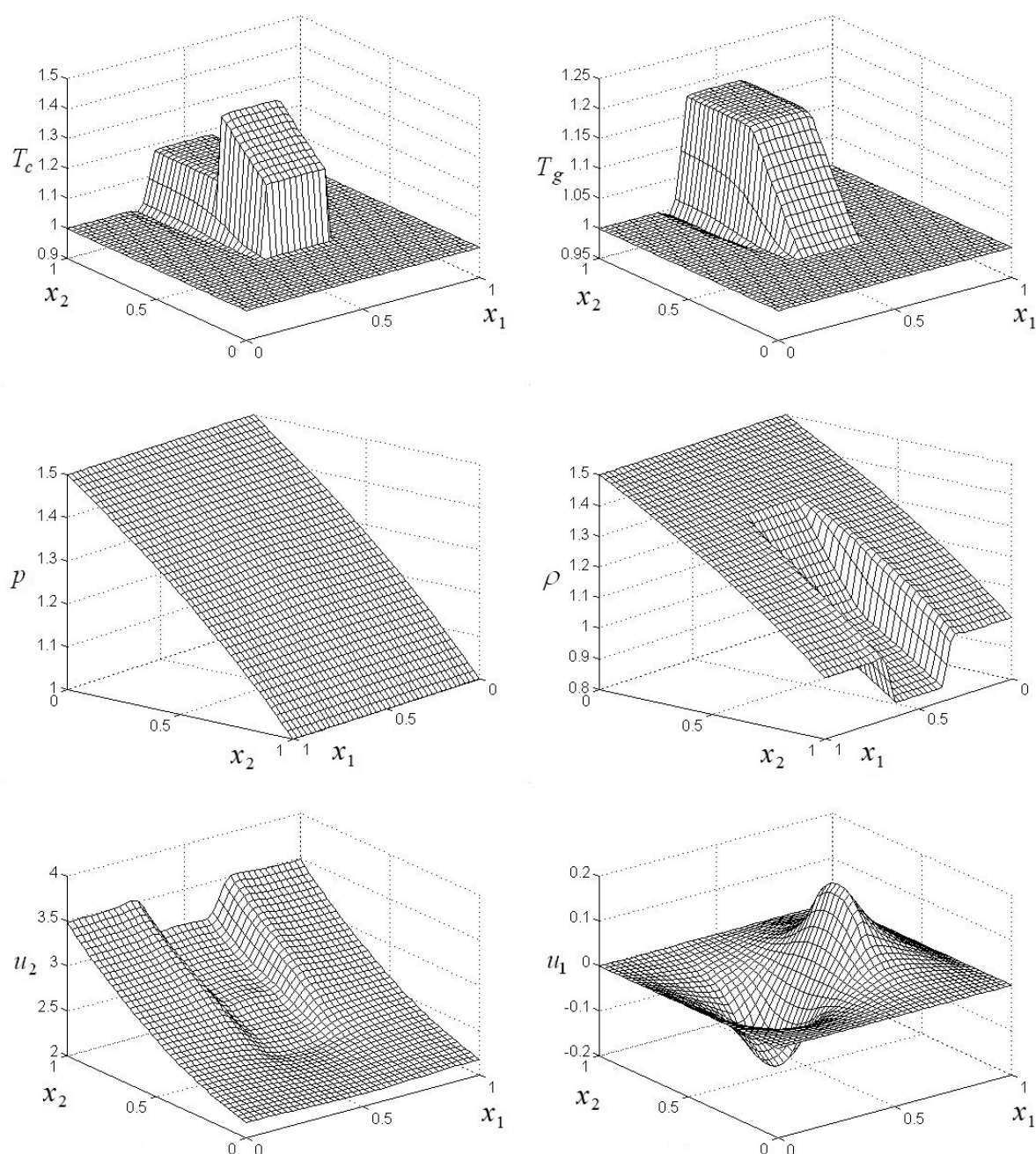


Рис. 3. Распределение температуры твердой среды, температуры газа, давления, плотности газа, вертикальной и горизонтальной компонент скорости фильтрации газа по пористому объекту

Проведенные в настоящем параграфе исследования позволяют определять наиболее эффективное направление обдува очага энергосыделения в пористом объекте при газовом охлаждении в случае, если направления вдувания воздуха могут быть различные.

В четвертом параграфе рассматривается движение газа через пористые саморазогревающиеся объекты с частично закрытым выходным отверстием и анализируется влияние частичного перекрытия выхода из объекта на процесс охлаждения, в том числе при неравномерном распределении источников энергосыделения [9, 10, 24]. Показано, что препятствие (крышка) на выходе из пористого объекта значительно снижает его охлаждение, особенно если в окрестности этой крышки происходит энергосыделение. В этом случае наибольший нагрев происходит в непосредственной близости от крышки, так как в этом месте газ течет медленно. Нагрев пористого объекта нелинейно возрастает с увеличением диаметра верхней крышки как в случае равенства размеров крышки и тепловыделяющей зоны, так и при фиксированном размере зоны тепловыделения. При фиксированной верхней крышке разогрев пористого объекта слабо зависит от диаметра зоны тепловыделения. Когда в окрестности верхней крышки не происходит выделения тепла, общее охлаждение пористого объекта ухудшается из-за наличия крышки не столь значительно, поэтому закрытие тепловыделяющей зоны верхней крышкой допускается при относительно большом диаметре очага энергосыделения.

Далее в этом параграфе исследуется охлаждение пористых саморазогревающихся объектов со сложным частичным перекрытием верхнего выходного отверстия, приводящим к образованию застойных зон – локальных областей объекта, закрытых с верхней и боковых сторон непроницаемыми перегородками [7, 20]. Показано, что в случае возникновения в пористом саморазогревающемся объекте застойных зон, в них может возникать значительный локальный разогрев, приводящий к катастрофическим последствиям даже при малой интенсивности энергосыделения.

В пятом параграфе исследуются течения газа в саморазогревающихся полигонах твердых бытовых отходов (ТБО) без учета происходящих в них химических превращений в условиях естественной конвекции. Такой полигон ТБО моделируется пористым объектом цилиндрической формы с внутренними источниками саморазогрева, который открыт в атмосферу всюду, кроме нижнего основания, то есть в котором нижняя горизонтальная граница непроницаема, а все остальные границы – проницаемы [6]. Показано, что в таком объекте возможно как установление стационарного режима, так и неограниченный разогрев, в зависимости от начально-краевых условий и параметров задачи. В очаге тепловыделения и в его окрестности могут возникать вихревые течения газа, которые существенно ухудшают теплоотвод из пористого объекта, а с течением времени смещаются (рис. 4). В случае, когда геометрия очага энергосыделения не фиксирована, а изменяется в зависимости от температуры нагрева твердой среды, этот очаг может как затухать, так и значительно увеличиваться в размерах, в зависимости от параметров задачи.

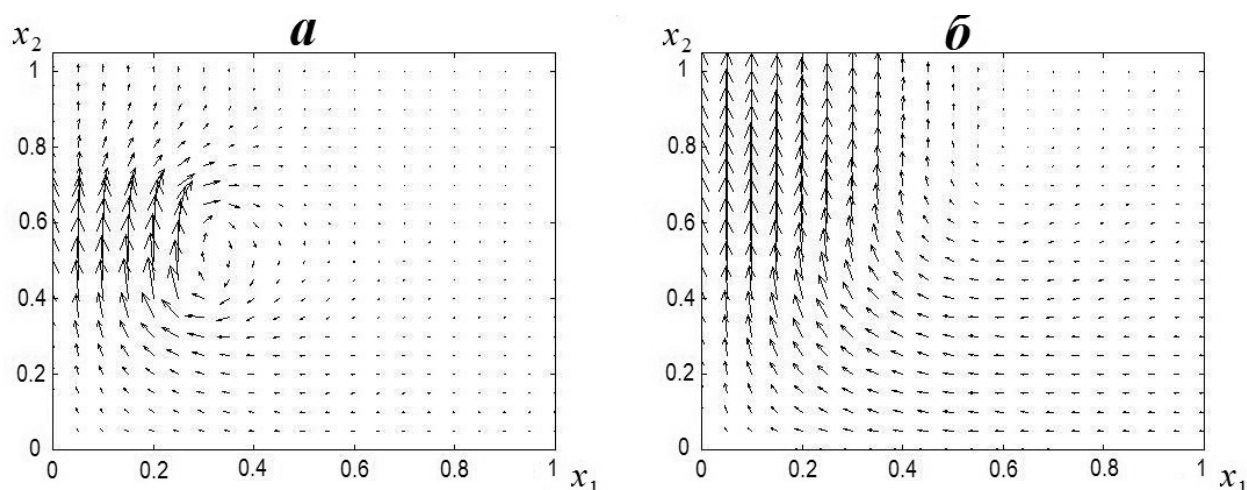


Рис. 4. Пример поля скорости фильтрации газа через 24 ч (а) и 1200 ч (б) после начала процесса саморазогрева

Четвертая глава посвящена исследованию особенностей пространственных (трехмерных) течений газа через пористые объекты с источниками энерговыделения без учета химических превращений при саморегуляции проходящего через объект газа. В первом параграфе этой главы описывается предложенный численный метод для исследования рассматриваемых процессов. Метод основан на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем, он подробно описан в [15].

Во втором параграфе рассматривается охлаждение пористых трехмерных объектов с различным распределением очагов тепловыделения при постоянном суммарном выделении энергии [15, 16]. На рис. 5–7 показана температура твердой среды, плотность газа и вертикальная компонента скорости фильтрации в пористом объекте кубической формы.

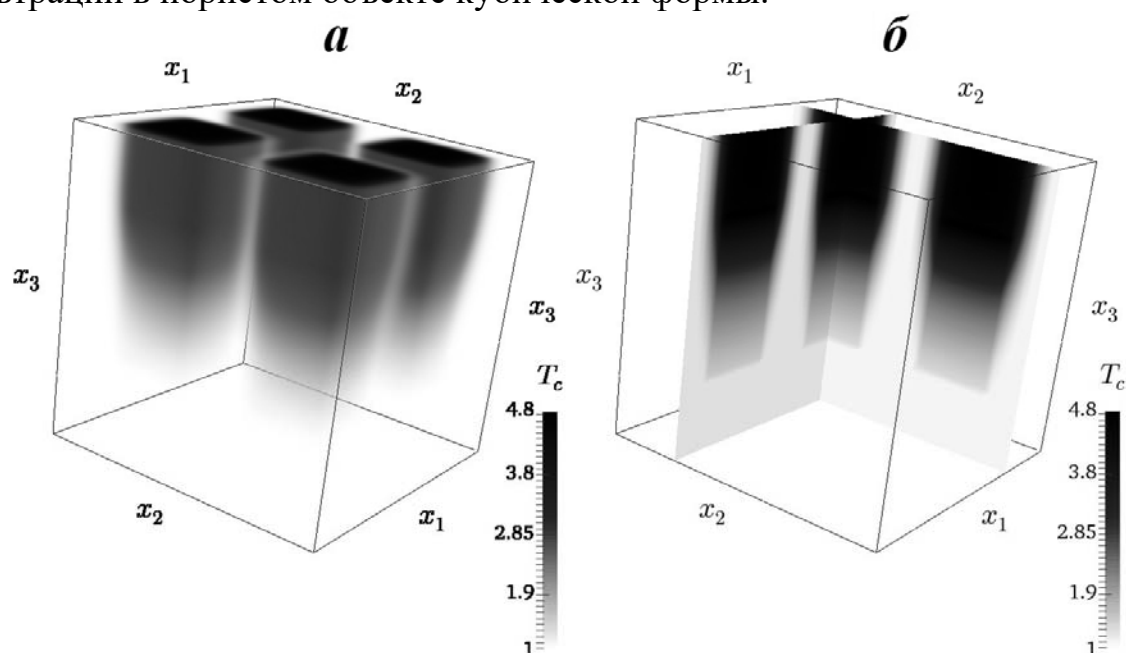


Рис. 5. Температура твердой среды в пористом объекте, изображаемая посредством объемного рендеринга (а) и двух плоскостей сечений (б)

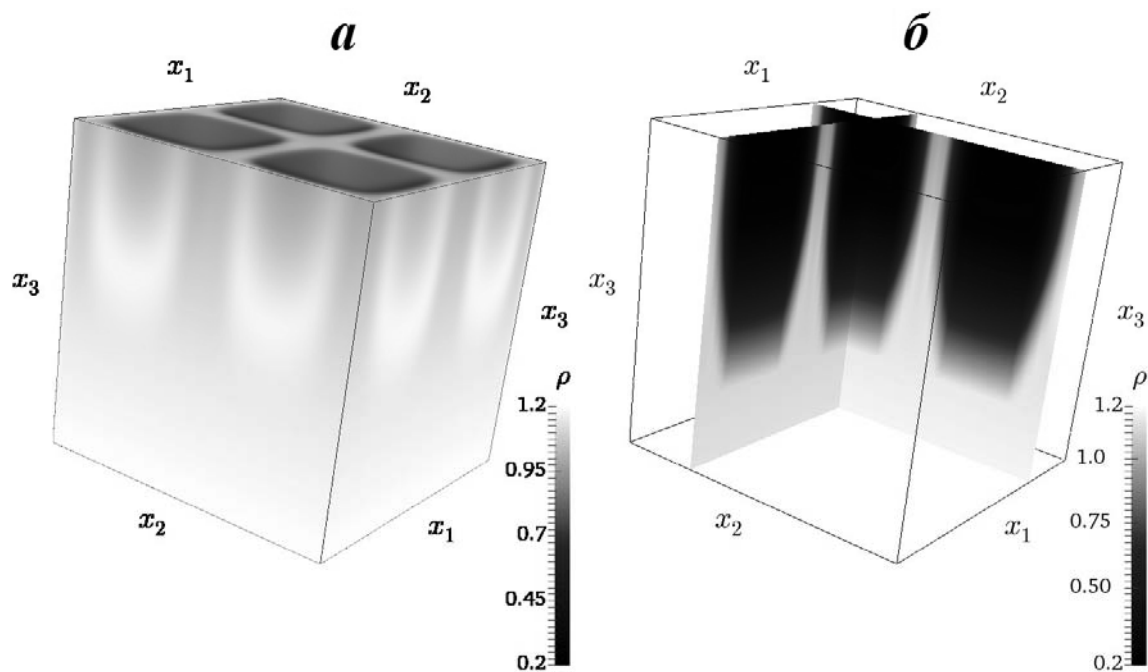


Рис. 6. Плотность газа в пористом объекте, изображаемая посредством объемного рендеринга (а) и двух плоскостей сечений (б)

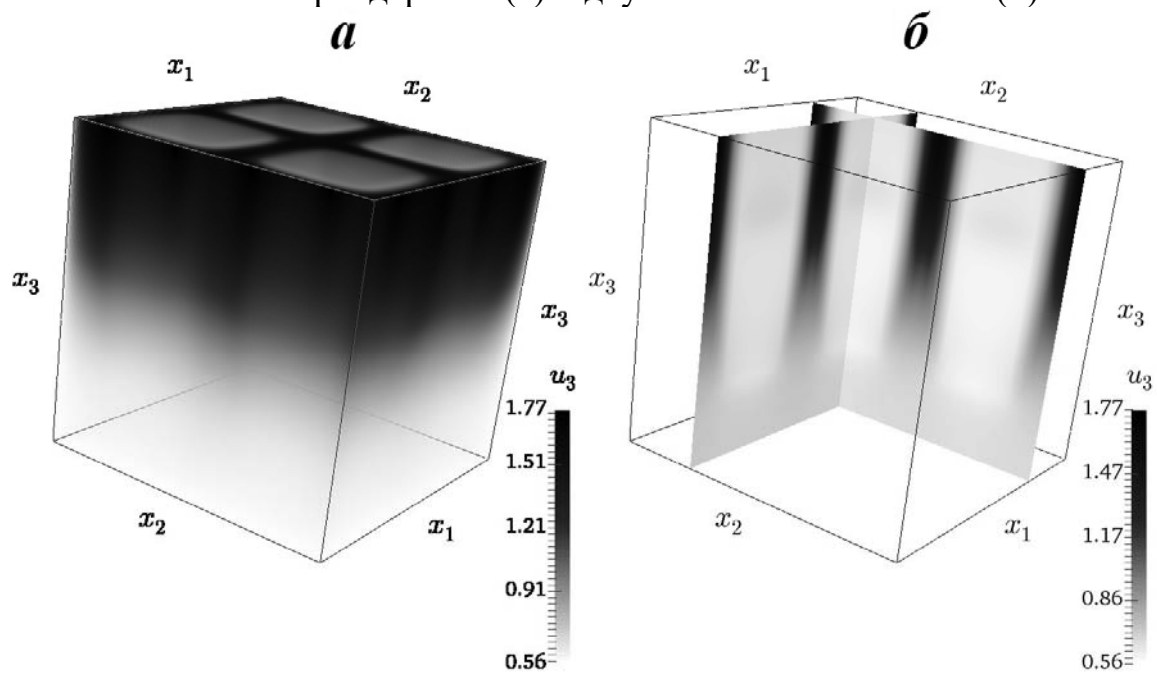


Рис. 7. Вертикальная компонента скорости фильтрации газа в пористом объекте, изображаемая посредством объемного рендеринга (а) и двух плоскостей сечений (б)

В средней части рассматриваемого пористого объекта расположено четыре источника энерговыведения в форме прямоугольных параллелепипедов. В нижнюю часть ($x_3 = 0$) объекта, ограниченного боковыми непроницаемыми стенками, принудительно нагнетается газ, который проходит через пористую среду и вытекает в атмосферу через верхнюю поверхность объекта ($x_3 = 1$).

Как видно из рисунков, в пористых трехмерных объектах с различным распределением очагов тепловыделения, как и в двумерных объектах, при принудительной фильтрации интенсивный нагрев происходит только в областях энерговыделения и выше их по потоку. В разогретых зонах наблюдается падение как плотности газа, так и скорости фильтрации – газ, двигаясь вверх по пористому объекту, стремится огибать нагретые зоны и течь по более холодным областям. Далее в этом параграфе показано, что в числе других факторов на общий разогрев объекта влияет также распределение в горизонтальном сечении источников энерговыделения заданной интенсивности.

В третьем параграфе исследуется охлаждение трехмерных пористых саморазогревающихся объектов при боковом вдуве газа, то есть когда принудительно нагнетаемый газ поступает через отверстие в боковой непроницаемой стенке объекта и выходит в атмосферу через верхнюю открытую поверхность объекта, а остальные поверхности объекта (нижняя и боковые) являются непроницаемыми. Показано, что положение и размер входного отверстия объекта существенно влияет на режим его охлаждения, вплоть до нарушения стационарного режима и перехода к катастрофическому разогреву.

Пятая глава посвящена исследованию распространения спутных и встречных волн гетерогенного горения пористых сред. В главе рассматриваются одномерные течения газа через пористые объекты с очагами гетерогенного горения при саморегуляции проходящего через объект газа. В первом параграфе этой главы описывается предложенный численный метод для исследования рассматриваемых процессов. Метод основан на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем, его особенности изложены в [23].

Во втором параграфе рассматривается распространение спутных и встречных волн гетерогенного горения в пористых объектах, состоящих из твердых бытовых отходов и подобных им материалов, в условиях свободной конвекции как с постоянной [8], так и с переменной проницаемостью [13]. Показано, что когда встречная волна гетерогенного горения, распространяющаяся по вертикальному пористому объекту при естественной конвекции и не полностью выжигающая твердое горючее вещество, достигает нижней границы объекта, может происходить её отражение и переход в спутную волну горения, которая движется вверх и полностью дожигает оставшееся твердое горючее вещество. Это демонстрирует рис. 8, на котором показано распределение температуры твердой среды в пористом объекте в различные моменты времени, когда зона поджигания расположена в верхней части объекта. Также показано, что учет зависимости проницаемости от пористости при горении может существенно изменять получаемое при моделировании решение. Рост проницаемости вследствие роста пористости приводит к увеличению скорости как спутной, так и встречной волн горения.

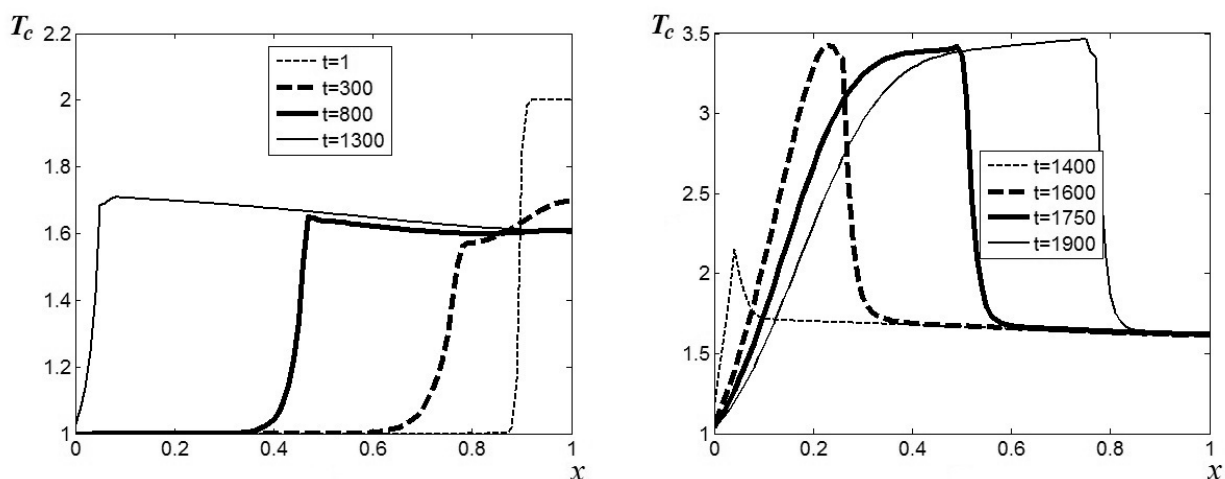


Рис. 8. Температура твердой среды в пористом объекте в различные моменты времени при расположении зоны зажигания в верхней части объекта

В третьем параграфе проводится подробное сравнение известных экспериментальных данных о тлении пенополиуретана в условиях естественной конвекции с результатами численных расчетов, проведенных с использованием разработанных моделей и метода [18]. Показано, что предложенные модель и численный метод для исследования гетерогенного горения пористых сред могут обеспечить хорошее количественное соответствие результатов расчета с экспериментом, если все задаваемые параметры задачи точно определены. При расчете встречных волн горения можно получить достаточно точные результаты, даже если не удастся точно задать некоторые параметры задачи. При расчете спутных волн горения погрешности в определении задаваемых параметров задачи могут давать ощутимые погрешности в результатах расчета.

В четвертом параграфе исследуется влияние гравитационного поля внутри объекта и перепада давления на его границах, вызванного действием силы тяжести на окружающий воздух, на распространение самоподдерживающихся волн гетерогенного горения твердых пористых сред [11]. При горении в условиях свободной конвекции, то есть, когда нет принудительного нагнетания воздуха, определяющим фактором для притока окислителя в зону реакции и распространения волны горения является гравитация [21, 22]. Численное моделирование позволяет исследовать по отдельности влияние каждого из двух факторов, посредством которых гравитация воздействует на процесс горения: гравитационного поля (поля силы тяжести) внутри пористого горючего объекта, и перепада давления на границах этого объекта, вызванного действием силы тяжести на окружающий воздух, когда открытые границы расположены на разных высотах. Показано, что гравитационное поле внутри объекта и перепад давления на его границах, вызванный действием силы тяжести на окружающий воздух, приводят к противоположным конкурирующим эффектам: направления или режимы распространения вызванных ими волн горения различаются. При одновременном воздействии этих факторов, которое происходит в реальном вертикальном пористом объекте, определяющим при нормальных условиях

является перепад давления на границах объекта, а влияние гравитационного поля внутри пористой среды приводит к снижению скорости волны горения.

Шестая глава посвящена исследованию динамики двумерных волн гетерогенного горения пористых сред. В главе рассматриваются двумерные течения газа через пористые объекты с очагами гетерогенного горения при саморегуляции проходящего через объект газа. В первом параграфе этой главы описывается предложенный численный метод для исследования рассматриваемых процессов. Метод основан на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем, его особенности кратко изложены в [19].

Во втором параграфе рассматривается распространение двумерных волн гетерогенного горения пористых сред при принудительном нагнетании воздуха в пористый объект [17, 19]. Показано, что в условиях принудительной фильтрации, когда перепад давления на открытых границах объекта существенно превышает перепад давления при естественной конвекции, могут возникать спутные самоподдерживающиеся расширяющиеся волны горения, полностью выжигающие твердое горючее вещество. Размер выгоревшей части пористого объекта зависит от расположения и размеров зоны зажигания и от давления газа на входе в объект. Газ, двигаясь через пористый объект, стремится огибать горячие зоны, в которых происходит или уже закончилось горение, предпочитая течь по более холодным областям. Это демонстрирует рис. 9, на котором показан пример распределения температуры твердой среды и поля скорости газа в пористом объекте, когда зона поджигания расположена в нижней части объекта.

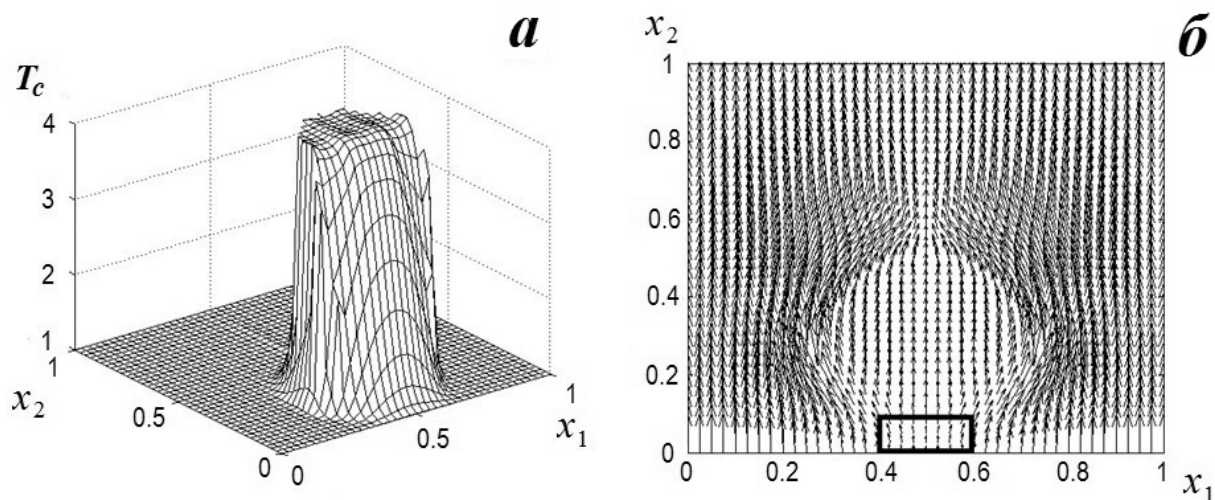


Рис. 9. Пример температуры твердой среды (а) и поля скорости газа (б) при принудительной фильтрации (зона зажигания выделена жирной линией)

В третьем параграфе исследуется распространение двумерных волн гетерогенного горения в пористых объектах при естественной конвекции, описывается динамика газа в таких объектах при различном расположении зоны зажигания [17, 19, 25]. Показано, что при гетерогенном горении пористых сред в условиях естественной конвекции в двумерном объекте, как и в одномерном, могут возникать спутные и встречные волны горения. На рис. 10–11 показаны примеры распределения температуры твердой среды и поля

скорости газа в пористом объекте, когда зона поджигания расположена в нижней и верхней части объекта соответственно. Из рисунков видно, что вне зависимости от расположения зоны зажигания, в начальный момент процесса в зоне горения и в её окрестностях возникают вихревые течения газа, которые могут существовать достаточно долго и сильно влиять на приток окислителя в зону реакции. На проницаемых поверхностях объекта могут наблюдаться изменяющиеся направления газовых потоков из-за возникающих вихревых течений газа, поэтому приток окислителя в зону реакции может происходить через различные участки открытых границ пористого объекта. В частности, когда зона зажигания расположена в верхней части пористого объекта, благодаря вихревым потокам окислитель попадает в зону реакции из атмосферы, расположенной над объектом, даже если газ может беспрепятственно поступать в объект через его нижнюю поверхность, где давление выше. Направление распространения волны горения хоть и зависит от расположения и размеров очага зажигания, но волна горения может проходить через все части объекта независимо от того, где находится зона зажигания, и все горючее вещество в каждой части объекта оказывается сгоревшим.

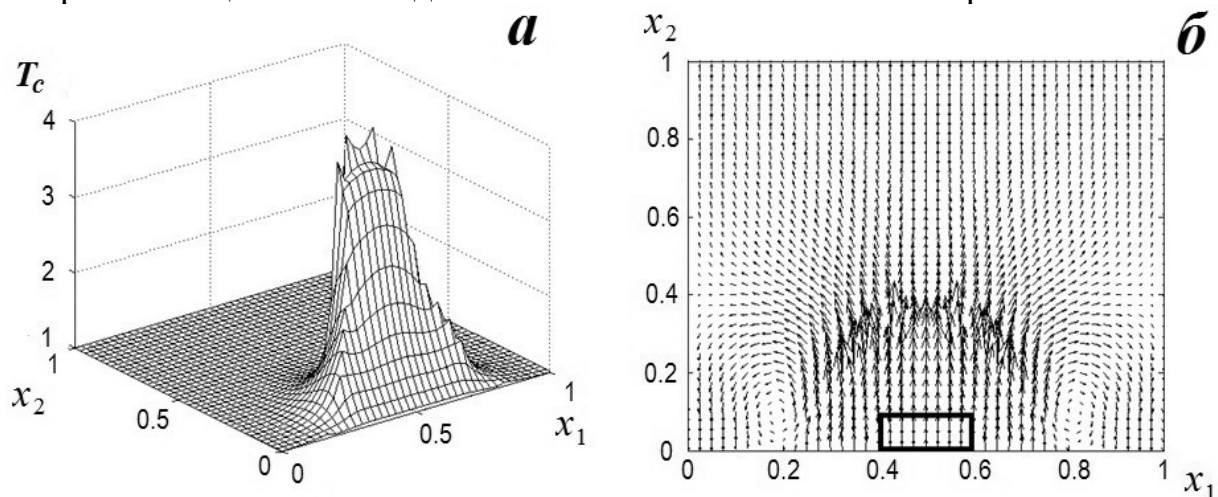


Рис. 10. Пример температуры твердой среды (а) и поля скорости газа (б) при свободной конвекции (зона зажигания выделена жирной линией)

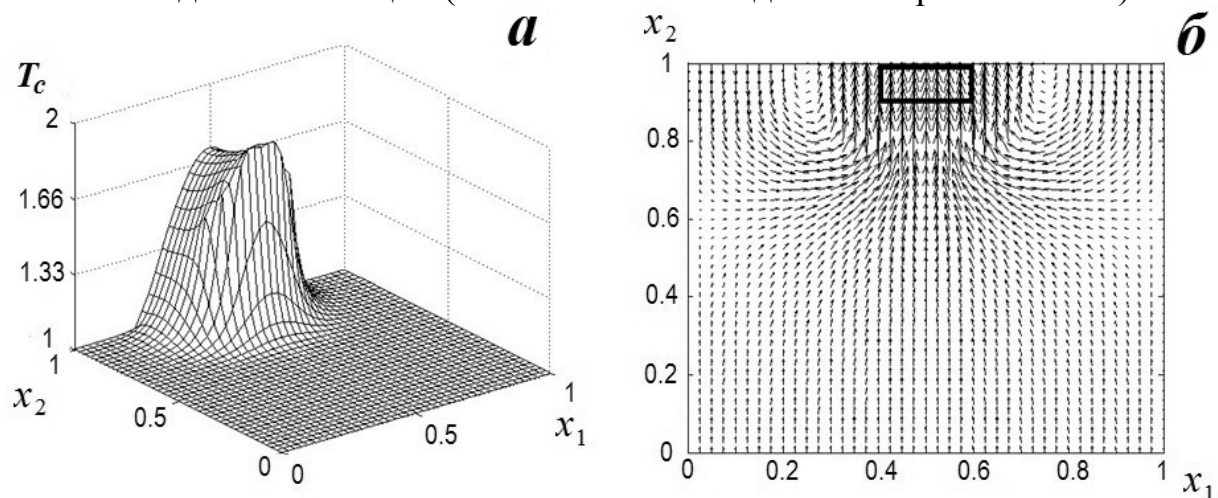


Рис. 11. Пример температуры твердой среды (а) и поля скорости газа (б) при свободной конвекции (зона зажигания выделена жирной линией)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе развиты модели и методы исследования совокупности гидродинамических, термодинамических и химических процессов в пористых объектах с источниками энерговыведения различного типа, в том числе с очагами гетерогенного горения, при естественной и вынужденной фильтрации газа. Новые модели и методы применены для выявления основных закономерностей и важных особенностей, во-первых, газового охлаждения пористых саморазогревающихся объектов, и во-вторых, распространения одномерных и двумерных волн гетерогенного горения пористых объектов при естественной и вынужденной фильтрации газа. Решены новые задачи, имеющие теоретическое и практическое значение.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Предложены математические модели и разработаны вычислительные алгоритмы, а именно:

1.1. Предложена усовершенствованная математическая модель, построены оригинальные конечно-разностные схемы и разработаны программные комплексы для исследования нестационарных одномерных, двумерных и трехмерных течений газа через пористые объекты с источниками саморазогрева при естественной и вынужденной фильтрации, которые учитывают некоторые качественно важные эффекты (в частности, зависимость вязкости газа от температуры) и специфические граничные условия (на открытых границах моделируемого объекта неизвестен не только расход газа, но и направления потоков газа, а известно только давление).

1.2. Предложена усовершенствованная математическая модель, построены оригинальные конечно-разностные схемы и разработаны программные комплексы для исследования совокупности гидродинамических, термодинамических и химических процессов в пористых одномерных и двумерных объектах с очагами гетерогенного горения в твердой фазе при естественной и вынужденной фильтрации газа, которые позволяют детально моделировать динамику газа в таких объектах.

2. Проведено численное исследование влияния на процесс газового охлаждения пористых саморазогревающихся объектов различных факторов, в результате чего обнаружено:

2.1. Существуют режимы газового охлаждения пористых саморазогревающихся объектов, при которых, несмотря на выполнение условий, удовлетворяющих критерию стационарности, не устанавливается устойчивый режим охлаждения, а происходит неограниченный разогрев объекта, приводящий к его перегреву и разрушению.

2.2. В пористых саморазогревающихся средах с саморегуляцией расхода проходящего через них газа при давлениях на входе в объект близких к критическому, ниже которого стационарного режима охлаждения не существует, с ростом коэффициента теплопроводности твердой среды происходит аномальный общий разогрев пористого объекта, проявляющийся в увеличении его максимальной температуры.

2.3. В пористых объектах как двумерной, так и трехмерной конфигурации с различным распределением очагов тепловыделения при принудительной фильтрации интенсивный нагрев как твердой среды, так и газа происходит только в областях энерговыведения и выше их по потоку. Газ стремится огибать нагретые зоны и течь по более холодным областям. При удалении очага выделения тепла от входа в пористый объект разогрев твердой среды уменьшается. Изменение ширины тепловыделяющей зоны неоднозначно влияет на разогрев пористого объекта.

2.4. Положение и размер как входного отверстия в пористый саморазогревающийся объект, через которое газ поступает, так и выходного отверстия, из которого газ выходит, существенно влияют на режим охлаждения объекта, вплоть до нарушения стационарного режима и перехода к катастрофическому разогреву.

2.5. В пористых саморазогревающихся объектах при естественной конвекции в очаге выделения тепла и в его окрестности могут возникать вихревые течения газа, которые существенно ухудшают теплоотвод из пористого объекта.

3. Проведено численное исследование распространения одномерных и двумерных волн гетерогенного горения пористых сред и обнаружено:

3.1. Когда встречная волна гетерогенного горения, распространяющаяся по вертикальному пористому объекту при естественной конвекции и не полностью выжигающая твердое горючее вещество, достигает нижней границы объекта, может происходить её отражение и переход в спутную волну горения, которая движется вверх и полностью дожигает оставшееся твердое горючее вещество.

3.2. При гетерогенном горении пористых сред гравитационное поле внутри объекта и перепад давления на его границах, вызванный действием силы тяжести на окружающий воздух, приводят к противоположным конкурирующим эффектам: направления или режимы распространения вызванных ими волн горения различаются.

3.3. При гетерогенном горении пористых сред в условиях принудительной фильтрации газ, двигаясь через пористый объект, стремится огибать горячие зоны, в которых происходит или уже закончилось горение и течь по более холодным областям. Размер выгоревшей части пористого объекта зависит от расположения и размеров зоны зажигания и от давления газа на входе в объект.

3.4. При гетерогенном горении пористых сред в условиях естественной конвекции в зоне горения и в её окрестностях возникают вихревые течения газа, которые могут существовать достаточно долго и сильно влияют на приток окислителя в зону реакции. На проницаемых поверхностях объекта могут наблюдаться изменяющиеся направления газовых потоков из-за возникающих вихревых течений газа, поэтому приток окислителя в зону реакции может происходить через различные участки открытых границ пористого объекта.

Перспективы дальнейшего развития проведенных исследований могут быть следующие:

1. Применение предложенных математических моделей и численных методов для решения различных актуальных прикладных задач, возникающих в экологии, энергетике, металлургии, химической и добывающей промышленности.

2. Развитие предложенных моделей и методов, направленное на уточнение моделей с учетом свойств некоторых реальных пористых объектов (например, использование усложненной химической кинетики) и на ускорение проводимых расчетов (в частности, создание параллельных программных реализаций разработанных алгоритмов с использованием технологии CUDA).

3. Развитие предложенных моделей и методов, направленное на их адаптацию к исследованию иных процессов в пористых средах (в частности, процессов с фазовыми переходами, процессов газификации твердого горючего).

4. Использование результатов исследования для развития технологий прогнозирования, предотвращения и ликвидации последствий катастроф, связанных с возникновением очагов энерговыделения в пористых средах, для проектирования невоспламеняющихся пожароопасных пористых объектов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. Луценко Н.А. Нестационарные режимы охлаждения пористого тепловыделяющего элемента // Математическое моделирование. – 2005. – Т. 17, № 3. – С. 120-128.
2. Левин В.А., Луценко Н.А. Течение газа через пористую тепловыделяющую среду при учете температурной зависимости вязкости газа // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79, № 1. – С. 35-40.
3. Левин В.А., Луценко Н.А. Численное моделирование двумерных нестационарных течений газа через пористые тепловыделяющие элементы // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, № 6. – С. 44-58.
4. Левин В.А., Луценко Н.А. Движение газа через пористые объекты с неравномерным локальным распределением источников тепловыделения // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15, № 3. – С. 407-417.
5. Левин В.А., Луценко Н.А. Нестационарные течения газа через осесимметричные пористые тепловыделяющие объекты // Математическое моделирование. – 2010. – Т. 22, № 3. – С. 26-44.
6. Левин В.А., Луценко Н.А. Моделирование двумерных нестационарных течений газа в саморазогревающихся полигонах твердых бытовых отходов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 55-64. (Перевод: Levin V.A., Lutsenko N.A. Modeling Unsteady Two-Dimensional Gas Flows in Self-Heating Solid Waste Dumps // Fluid Dynamics. – 2011. – Vol. 46, No. 5. – P. 826-834.)
7. Луценко Н.А., Мирошниченко Т.П., Одякова Д.С., Харитонов Д.И. Параллельная реализация алгоритма для расчета двумерных

- нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками тепловыделения // Вычислительные технологии. – 2011. – Т. 16, № 2. – С. 98-110.
8. Lutsenko N.A. Modeling of Heterogeneous Combustion in Porous Media under Free Convection // Proceedings of the Combustion Institute. – 2013. – Vol. 34, No. 2. – P. 2289-2294.
 9. Lutsenko N.A. Numerical modeling of unsteady gas flow through porous heat-evolutional objects with partial closure of the object's outlet // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 72. – P. 602-608.
 10. Луценко Н.А., Тарасов Г.В., Гырник К.А. OpenMP-версия параллельного алгоритма расчета нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками энерговыведения: анализ и применение // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2014. – Т. 17, № 3. – С. 229-244.
 11. Lutsenko N.A., Levin V.A. Effect of Gravity Field and Pressure Difference on Heterogeneous Combustion in Porous Media // Combustion Science and Technology. – 2014. – Vol. 186, Is. 10-11. – P. 1410-1421.
 12. Левин В.А., Луценко Н.А. Неоднозначное влияние теплопроводности при движении газа через пористые среды с очагами энерговыведения // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 462, № 4. – С. 418-421.
 13. Lutsenko N.A. Numerical modeling of 1D heterogeneous combustion in porous media under free convection taking into account dependence of permeability on porosity // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 722, 012025. P. 1-8.
 14. Левин В.А., Луценко Н.А., Надкриничный Л.В., Смирнов С.В. Математическое моделирование в задачах механики неоднородных сред и динамики природных процессов // Вестник ДВО РАН. – 2016. – № 4 (188). – С. 70-77.
 15. Луценко Н.А. Численное моделирование трехмерных нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками энерговыведения // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9, № 3. – С. 331-344.
 16. Lutsenko N.A. On numerical model of time-dependent processes in three-dimensional porous heat-releasing objects // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770, 030066. – P. 1-6.
 17. Левин В.А., Луценко Н.А. Двумерные течения газа при гетерогенном горении твердых пористых сред // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 476, № 1. – С. 30-34.
 18. Lutsenko N.A., Levin V.A. Smoldering of porous media: numerical model and comparison of calculations with experiment // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 894, 012054. – P. 1-7.
 19. Lutsenko N.A. Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // Combustion Theory and Modelling. – 2018. – Vol. 22, Is. 2. – P. 359-377.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, не входящих в перечень ВАК, но индексируемых в WoS и/или Scopus:

20. Lutsenko N.A., Miroshnichenko T.P., Odyakova D.S., Kharitonov D.I. Parallel Implementation of Algorithm for Calculation of Gas Flow through Porous Media with Heat Sources // Proceedings of the First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2010). – Vladivostok, Russia, 2010. – P. 198-201.
21. Lutsenko N.A. On Difference between Horizontal and Vertical Waves of Heterogeneous Combustion in Porous Objects under Free Convection // Proceedings of the 9th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2013). – Gyeongju, Korea, 2013. – Paper 33-4. – P. 1-4.
22. Lutsenko N.A., Sorokova S.N. Numerical Comparison of Heterogeneous Combustion Waves in Horizontal and Vertical Porous Objects under Free Convection // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 880. – P. 109-114.
23. Lutsenko N.A., Sorokova S.N. Numerical Method for Investigation of 1D Processes in Porous Media with Heterogeneous Reactions when Flow Rate of Oxidant Regulates Itself // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 880. – P. 115-120.
24. Lutsenko N.A. Numerical Comparison of Gas Flows through Plane Porous Heat-Evolutional Object with Axisymmetric One when Object's Outlet is Partially Closed // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 529-534.
25. Lutsenko N.A. On Numerical Modeling of Two-Dimensional Heterogeneous Combustion in Porous Media under Free Convection // Proceedings of 10th Asia-Pacific Conference on Combustion ASPACC 2015. – Beijing, China, 2015. – Paper 61. – P. 1-6.

Статьи в сборниках научных трудов и иных журналах:

26. Левин В.А., Луценко Н.А. Возникновение неустойчивых режимов охлаждения пористого тепловыделяющего элемента при докритических краевых условиях // Горение и плазмохимия. – 2005. – Т. 3, № 2. – С. 81-90.
27. Левин В.А., Луценко Н.А. Математическое моделирование газового охлаждения однородного пористого тепловыделяющего элемента // Математические модели и методы механики сплошных сред: Сборник научных трудов: к 60-летию А.А. Буренина. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2007. – С. 149-172.
28. Луценко Н.А., Левин В.А. О моделировании охлаждения пористых объектов с неравномерно распределенными очагами тепловыделения // Горный информационно- аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – Т. 17, № 12. – С. 59-62.
29. Луценко Н.А., Щебеньков Д.А. Влияние неравномерного распределения источников энерговыделения в пористых осесимметричных объектах на процесс их газового охлаждения // Успехи механики сплошных сред:

Сборник научных трудов к 70-летию академика В.А. Левина. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – С. 483-496.

30. Левин В.А., Луценко Н.А. Некоторые особенности течения газа через пористые среды с источниками тепловыделения // Проблемы и достижения прикладной математики и механики: Сборник научных трудов к 70-летию академика В.М. Фомина. – Новосибирск: Нонпарель, 2010. – С. 480-490.
31. Луценко Н.А. О течении газа через пористые объекты с источниками энергоснабжения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (3). – С. 940-942.
32. Lutsenko N.A., Levin V.A. On Features of One-Dimensional Unsteady Waves of Heterogeneous Combustion in Porous Media under Natural Convection // Zel'dovich Memorial: Accomplishments in the combustion science in the last decade. Vol. 2. – Moscow: Torus press, 2015. – P. 110-115.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

33. Луценко Н.А., Тарасов Г.В., Гырник К.А. Моделирование процессов газового охлаждения пористых тепловыделяющих двумерных объектов с частично закрытой верхней частью. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617773 от 01.08.2014.
34. Луценко Н.А., Тарасов Г.В., Леонтьев Д.В. Моделирование процессов гетерогенного горения одномерных пористых объектов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612296 от 17.02.2015.
35. Луценко Н.А., Тарасов Г.В. Параллельная программа моделирования динамических процессов в двумерных пористых тепловыделяющих объектах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660078 от 21.09.2015.
36. Луценко Н.А., Тарасов Г.В. Моделирование двумерных процессов гетерогенного горения в пористых объектах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660129 от 22.09.2015.
37. Луценко Н.А., Тарасов Г.В. Параллельная программа моделирования динамических процессов в трехмерных пористых тепловыделяющих объектах при саморегуляции проходящего через них газа. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619289 от 17.08.2016.
38. Луценко Н.А., Тарасов Г.В. Моделирование охлаждения трехмерных пористых тепловыделяющих объектов в условиях саморегуляции проходящего через них газа. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619346 от 18.08.2016.

Подписано в печать 04.09.2018
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 2.0,
Тираж 150 экз., Заказ № 5

Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5