

Н.А. ЛУЦЕНКО, С.В. СМИРНОВ, С.С. ФЕЦОВ

Численное моделирование в задачах механики многофазных сред и динамики океана

Представлен краткий обзор некоторых результатов исследований в области механики многофазных сред и динамики океана, полученных в лаборатории механики жидкости и газа ИАПУ ДВО РАН в последние несколько лет. Работы связаны с моделированием процессов в тепловых аккумуляторах на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами, с разработкой теоретических основ новой технологии извлечения ценных металлов из металлосодержащих сред методом фильтрационного горения, с моделированием резонансных колебаний в природных водоемах.

Ключевые слова: пористые среды, накопители тепловой энергии, материалы с фазовыми переходами, фильтрационное горение, метеоцунами, сейши, резонансные колебания.

Numerical modeling in problems of mechanics of multiphase media and ocean dynamics. N.A. LUTSENKO, S.V. SMIRNOV, S.S. FETSOV (Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok).

A brief review of some results obtained in the Laboratory of fluid and gas mechanics of IACP FEB RAS in the last few years in the field of mechanics of multiphase media and ocean dynamics is presented. Research deals with modeling processes in heat accumulators based on granular phase change materials, with the development of theoretical foundations of a new technology for extracting valuable metals from metal-containing media by means of filtration combustion, with modeling of resonant oscillations in natural reservoirs.

Key words: porous media, thermal energy storages, phase change materials, filtration combustion, meteotsunami, seiches, resonant oscillations.

Введение

Лаборатория механики жидкости и газа ИАПУ ДВО РАН имеет более чем 30-летнюю историю. При образовании в 1989 г. она получила название «Лаборатория математического моделирования океанских процессов», при этом тематика ее исследований была связана главным образом с изучением океана. Работы в этом направлении продолжают и сейчас, но еще много лет назад тематика исследований начала расширяться, и в 2008 г. лаборатория получила свое нынешнее название.

Сейчас работа лаборатории сконцентрирована в двух глобальных направлениях: численное моделирование волновых процессов в морях и иных природных водоемах, исследование газодинамических и теплофизических процессов в различных пористых объектах

ЛУЦЕНКО Николай Анатольевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, *СМИРНОВ Сергей Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФЕЦОВ Сергей Сергеевич – младший научный сотрудник (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: smirnoff@iacp.dvo.ru

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 18-29-24029-мк). Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН.

природного и техногенного происхождения с учетом выделения и поглощения энергии, химических превращений и фазовых переходов. Практические приложения этих исследований разнообразны: цунамибезопасность прибрежных акваторий, развитие технологий предотвращения и ликвидации последствий торфяных и иных природных и техногенных пожаров, применение фильтрационного горения для извлечения редких и ценных металлов из отходов угле- и нефтедобычи, оптимизация накопителей энергии на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами, оптимизация газификации твердого топлива в низкотемпературных газогенераторах перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов. Таким образом, спектр решаемых задач в лаборатории механики жидкости и газа ИАПУ ДВО РАН довольно широк.

В настоящей работе представлен краткий обзор полученных в лаборатории в последние несколько лет избранных результатов, которые связаны с моделированием процессов в тепловых аккумуляторах на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами; разработкой теоретических основ новой технологии извлечения ценных металлов из металлосодержащих сред методом фильтрационного горения; исследованиями резонансных колебаний в природных водоемах.

Моделирование накопителей тепловой энергии на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами

Растущие объемы энергопотребления в мире требуют рационализации использования энергоресурсов, повышения экологичности и устойчивости энергосистем. В связи с этим активно развиваются возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и технологии энергоаккумулирования. Последние позволяют сгладить неравномерности энергопотребления и оптимизировать выработку энергии на электростанциях путем организации режима работы с постоянной мощностью [8], а также снизить зависимость ВИЭ от природных условий – наличия ветра, количества солнечных дней [9]. Широкое распространение получают аккумуляторы тепловой энергии на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами (МФП или РСМ – Phase Change Material) [20]. Основа устройств этого типа – сыпучий материал в форме гранул или капсул, в каждой из которых могут происходить плавление и кристаллизация вещества без нарушения их целостности. Задача этого материала – поглотить тепло либо отдать его протекающему теплоносителю (жидкости или газу). Оптимизация тепловых аккумуляторов для различных приложений остается актуальной задачей.

Когда размеры частиц МФП малы относительно размеров теплоаккумулятора, такой объект можно рассматривать как пористую среду, что позволяет использовать для моделирования протекающих в аккумуляторе процессов методы механики сплошных многокомпонентных сред [7]. На основе этих допущений в работах [3, 15] была предложена математическая модель для анализа процессов в тепловых аккумуляторах гранулированного типа с газовым теплоносителем. Основные особенности модели состоят в описании МФП и теплоносителя как совокупности взаимодействующих взаимопроникающих континуумов и в описании фазового перехода в МФП посредством энтальпийного метода, при этом полная энтальпия МФП разделяется на «температурную» часть, обусловленную только изменением температуры МФП, и скрытую теплоту, обусловленную только выделением и поглощением тепла при фазовом переходе.

В работах [3, 15] также предложен и верифицирован оригинальный численный метод для расчета одномерных процессов, описываемых указанной выше моделью. Особенности численного метода состоят в комбинации явных и неявных конечно-разностных схем при расчете динамики газа, а также в расчете зон протекания фазового перехода в процессе сквозного счета. Сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными данными показало их хорошее соответствие. В частности, средняя относительная

погрешность в определении температуры, времени протекания фазового перехода, а также времени зарядки и разрядки аккумулятора составила порядка 1 %. Достоинством разработанной численной модели является то, что она, во-первых, позволяет описывать процессы при заранее не известной скорости фазового превращения и не требует наличия четкой границы фазовых переходов, как в классической задаче Стефана, а во-вторых, позволяет исследовать процессы как при заданном расходе теплоносителя, так и при заданном перепаде его давления на открытых границах теплового аккумулятора, что дает возможность использовать модель для решения широкого спектра практических задач.

С использованием указанной численной модели в работе [14] исследовано влияние сжимаемости газа на процессы, происходящие в гранулированных теплоаккумулирующих МФП. Показано, что широко распространенное пренебрежение сжимаемостью теплоносителя при моделировании таких процессов может в определенной области параметров приводить к значительным погрешностям при расчетах, а соответственно, к существенным неточностям при вычислении полного времени нагрева и полного времени плавления гранулированного МФП. В частности, отклонения рассчитанных при пренебрежении сжимаемостью газа характерных времен процесса от тех, которые получены с учетом сжимаемости теплоносителя, могут достигать нескольких десятков процентов. Более того, пренебрежение сжимаемостью газа не позволяет обеспечить гарантированную оценку верхней или нижней границы значений для реального времени процесса накопления или отдачи энергии тепловым аккумулятором.

Описанная выше численная модель была модифицирована и адаптирована для расчетов двумерных течений газа в тепловых аккумуляторах гранулированного типа [6]. В работах [12, 13] исследовано влияние формы тепловых аккумуляторов на эффективность их зарядки и разрядки для накопителей тепловой энергии на основе гранулированных МФП. Показано, что форма накопителя энергии влияет на динамику газового теплоносителя, и это оказывает влияние на процессы теплообмена, накопления и отдачи тепла. Численно исследовано влияние сужения и расширения боковых стенок на процессы зарядки и разрядки тепловых аккумуляторов при двух типах граничных условий: известном массовом расходе газа на входе в объект и известном перепаде давления газа на его открытых границах для разных температур плавления теплоаккумулирующего материала. Для оценки оптимальности формы теплового аккумулятора использованы различные критерии эффективности: при зарядке критериями являлись максимальный коэффициент мгновенной эффективности накопления, максимальный коэффициент суммарной эффективности накопления и минимальное время полной зарядки устройства; при разрядке критериями служили максимальные значения коэффициента эффективности извлечения энергии, общего коэффициента утилизации и времени поддержания температуры теплоносителя на выходе не ниже заданной. Показано, что оптимальная форма накопителя энергии как в процессах зарядки, так и в процессах разрядки зависит от выбора критерия эффективности и конкретных условий процесса, таких как граничные условия, температура фазового перехода гранулированного материала и т.д. Сужающиеся или расширяющиеся накопители тепловой энергии имеют преимущества в редких случаях, чаще наиболее предпочтительны накопители энергии с прямыми стенками.

Моделирование процесса извлечения ценных металлов из металлосодержащих сред методом фильтрационного горения

Фильтрационное горение, представляющее собой распространение волны экзотермической химической реакции в пористой среде при фильтрации газа [1], имеет место в различных природных и технологических процессах. Пожары торфяников, угольных отвалов, элеваторов – все это примеры негативного действия фильтрационного горения. Однако фильтрационное горение может приносить огромную пользу, так как за счет

присущего ему эффекта сверхадиабатического разогрева [10] позволяет сжигать в самоподдерживающемся режиме низкокалорийное и высоковлажное топливо, которое не горит в обычных топках. Кроме того, принципы фильтрационного горения используются в ряде других технологических процессов: при обжиге и агломерации руд, интенсификации добычи нефти с помощью внутрислоевого горения, регенерации катализаторов и т.д.

Если в фильтрационном режиме сжигать пористые углеродсодержащие вещества с примесями металлов, то некоторые металлы под воздействием высокой температуры в волне горения могут переходить в газовую летучую фазу. Таким образом, возможно использование фильтрационного горения для извлечения редких металлов из пористых горючих металлосодержащих сред. В тяжелых нефтях, битумах и углях может содержаться значительное количество различных ценных металлов, которые сегодня, как правило, не используются, а остаются в отходах нефтепереработки и углеотходах. Эксперименты по сжиганию содержащих металлы нефтеотходов в фильтрационном режиме проводятся в Институте проблем химической физики РАН [17]. Большое количество цветных и редких металлов содержится в «матричной нефти» – тяжелом углеводородном сырье, связанном с плотной и пористой частью породообразующей матрицы, которое состоит в основном из высокомолекулярных соединений (асфальтенов, смол, твердых парафинов, масел). Заметим, что нефтяной кокс, получаемый в больших количествах в нефтепереработке, может являться более ценным сырьем для промышленного получения редких и ценных металлов, чем руда. Но известные способы извлечения металлов из минерального и техногенного сырья не обеспечивают должной эффективности при переработке нефтяных и угольных отходов. Поэтому возникает потребность в разработке новой технологии извлечения ценных металлов из металлосодержащих сред, основанной на принципах фильтрационного горения, которая позволит резко увеличить эффективность процесса извлечения металлов из отходов нефтепереработки и углеотходов, при этом утилизируя их и получая дополнительно тепловую энергию.

С точки зрения механики фильтрационное горение пористых металлосодержащих сред можно представить как совокупность фильтрации газа, распространения экзотермической химической реакции и фазовых превращений в конденсированной и газовой средах. В работе [5] предложены оригинальная математическая модель и численный метод для описания фильтрационного горения пористых металлосодержащих сред с учетом происходящих в них фазовых превращений металла (плавление/кристаллизация и испарение/конденсация), которые базируются на методах механики сплошных многокомпонентных сред [7] и используют разработки авторов в области описания процессов в пористых средах с фазовыми переходами [3, 15] и фильтрационного горения в условиях принудительной фильтрации и естественной конвекции [16]. С помощью разработанной численной модели было исследовано [5, 18] распространение нестационарной одномерной спутной волны горения в объекте, состоящем из пористой металлосодержащей смеси шамота и древесного угля, при инициировании зажигания в нижней части объекта и при постоянных скорости или давлении газа на его входе. Расчеты показали, что в волне горения происходит расплавление и испарение содержащегося в пористой среде металла, после чего испарившийся металл сносится газом вперед по потоку в более холодную область перед фронтом горения, где газовая фаза охлаждается и испарившийся металл конденсируется. В результате этого идет накопление металла (повышение его концентрации) в области перед фронтом горения. При этом при распространении фронта горения область с повышенным содержанием металла также продвигается по объекту, а концентрация металла в ней увеличивается. При достижении волной фильтрационного горения границы пористого реактора весь испарившийся металл выносится наружу. Поэтому чтобы получить максимально возможную концентрацию металла в конденсированной среде, необходимо затушить волну горения при ее приближении к выходной границе реактора.

Таким образом, показано, что посредством фильтрационного горения можно эффективно обогащать металлосодержащие среды, в десятки раз повышая в них концентрацию

редких металлов и этим многократно увеличивая рентабельность дальнейшего извлечения данных металлов традиционными способами. Расчеты также показали, что, меняя условия горения, можно управлять процессом накопления металлов, а именно ускорять процесс или увеличивать максимальную концентрацию металла.

Моделирование резонансных колебаний в зал. Петра Великого Японского моря

Обеспечение безопасности населения и инженерных сооружений в прибрежных районах требует знания волновых режимов и резонансных свойств прибрежных акваторий. Резонансное усиление приходящих из открытого моря волн, вызванных, например, землетрясением или атмосферными воздействиями, может приводить к локальным цунами и метеоцунами. В данной работе рассматриваются основные особенности ряда резонансных колебаний, которые проявляются на акватории зал. Петра Великого – самого большого залива Японского моря. Он простирается на 185 км от российско-китайской границы в устье р. Туманная на западе до мыса Поворотный на востоке, а его бухты вдаются вглубь материка на расстояние до 90 км. В берег зал. Петра Великого непосредственно вдаются заливы Посъета, Амурский, Уссурийский, Стрелок, Восток и Находка, в которых расположены причалы крупных морских портов Владивосток, Восточный, Посъет, Зарубино.

Непрерывные измерения уровня в зал. Петра Великого производятся на трех автоматизированных постах сети наблюдения за уровнем моря российской службы предупреждения о цунами. С них поступают осредненные данные измерений с дискретностью 1 мин. Значения уровня в сантиметрах округлены до целых чисел. Посты расположены в зал. Посъета, бухте Золотой Рог и зал. Находка. Таким образом, только по одному посту размещено в восточной, центральной и западной частях зал. Петра Великого, каждая из которых представляет собой сложную систему бухт. Следовательно, при изучении проявления колебаний в каждой бухте могут потребоваться дополнительные измерительные системы. Этим объясняется недостаточная изученность волновых режимов акваторий зал. Петра Великого. В данной работе рассматриваются результаты исследований, полученные с применением пространственно-распределенного измерительного комплекса для мониторинга гидрофизических процессов на океаническом шельфе [4]. В работе [2] изложены результаты гидрофизического эксперимента по изучению пространственно-временной изменчивости уровня поверхности северной части Амурского залива, выполненного с помощью 11 автономных регистраторов гидростатического давления. На основе полученных экспериментальных данных для акватории северной части Амурского залива выделены характерные приливные гармоники.

По данным инструментальных измерений можно получить представление о свойствах некоторого колебания только в ограниченном числе точек, что может оказаться недостаточным по крайней мере для качественного описания мелкомасштабной пространственной структуры, характерной для высокочастотных колебаний. Чтобы получить распределение амплитуды и фазы колебания по всей акватории, необходимо привлечение численного моделирования. Для расчетов применялись численные модели, основанные на системе уравнений мелкой воды в сферической системе координат. На открытых границах ставились условия излучения. Пространственная дискретизация производилась на нерегулярной треугольной сетке, позволяющей описывать разномасштабные волновые движения, что имеет место при наличии больших перепадов глубин между шельфовой зоной и глубоководной частью моря.

В работе [11] измерения производились на трех станциях: две были расположены в бухте Троицы, одна – в бухте Витязь. Применялась модель, описывающая установившиеся колебания в модельном бассейне с волнопродуктором на акватории зал. Посъета,

расположенного в западной части зал. Петра Великого. Численно исследовались свойства вынужденных сейшевых колебаний под влиянием периодических ветровых воздействий. Для точек, соответствующих расположению датчиков давления, были получены резонансные кривые, описывающие зависимость амплитуды колебаний от частоты внешнего воздействия. Получено хорошее соответствие расположения пиков на модельных резонансных кривых с расположением спектральных пиков по данным натуральных измерений. Для частот, соответствующих спектральным пикам, были построены пространственные распределения амплитуды колебаний.

В работе [19] три измерительные станции были расположены у входа в зал. Посыета. Численная модель применялась для расчета процесса установления свободных колебаний в модельном бассейне с начальными данными в виде возмущения уровня, локализованного в районе материкового склона, примыкающем к шельфу у входа в зал. Петра Великого. Вычислительная область включала акваторию Японского моря и примыкающие к проливам части акваторий Охотского, Восточно-Китайского морей и Тихого океана. Зафиксировано хорошее соответствие расположения спектральных пиков, полученных по модельным данным и данным натуральных измерений. Для резонансных частот были построены пространственные распределения фазы и спектральной плотности. Расположение максимумов спектральной плотности соответствует расположению максимумов амплитуды в работе [11]. Полученные результаты показывают, для каких входящих в залив волн происходит увеличение амплитуды за счет резонансных свойств акваторий залива и какие прибрежные территории могут быть затоплены, если в залив придут волны с большой амплитудой.

Заключение

В настоящей работе представлен краткий обзор некоторых новых результатов исследований в области механики многофазных сред и динамики океана, полученных в лаборатории механики жидкости и газа ИАПУ ДВО РАН в последние несколько лет. Предложены новая математическая модель и метод расчета процессов в тепловых аккумуляторах на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами, с использованием которых решен ряд актуальных задач. Разработаны оригинальная математическая модель и численный метод для исследования фильтрационного горения пористых сред с примесями металлов, которые могут стать научной основой новой технологии извлечения редких и ценных металлов методом фильтрационного горения. Разработана и реализована численная модель уравнений мелкой воды в сферической системе координат с пространственной дискретизацией на нерегулярной треугольной сетке; с применением модели исследованы резонансные свойства ряда акваторий зал. Петра Великого Японского моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алдушин 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.
2. Лазарюк А.Ю., Смирнов С.В., Самченко А.Н., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Швырев А.Н., Ярошук И.О. Колебания поверхности Амурского залива в зимний период // Вестн. Инженер. шк. ДВФУ. 2018. № 4 (37). С. 53–62. DOI:10.5281/zenodo.2008659
3. Левин В.А., Луценко Н.А., Фецов С.С. Моделирование движения газа через слой гранулированного теплоаккумулирующего материала с фазовым переходом // ДАН. 2018. Т. 479, № 4. С. 386–389.
4. Леонтьев А.П., Ярошук И.О., Смирнов С.В., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н. Пространственно-распределенный измерительный комплекс для мониторинга гидрофизических процессов на океаническом шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 128–135. DOI:10.1134/S0020441216060191
5. Луценко Н.А. Моделирование процесса извлечения ценных металлов из металлосодержащих сред методом фильтрационного горения // Докл. Рос. акад. наук. Физика, техн. науки. 2020. Т. 491. С. 85–89. DOI:10.1134/S1028335820030106

6. Луценко Н.А., Фецов С.С. Численное моделирование двумерных течений газа через гранулированные материалы с фазовым переходом // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2021. Т. 61, № 3. С. 504–518.
7. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
8. Ольховский Г.А., Казарян В.А., Столяревский А.Я. Воздушно-аккумулирующие газотурбинные электростанции. Ижевск: ИКИ, 2011. 360 с.
9. Попель О.С., Фортвов В.Е. Возобновляемая энергетика в современном мире. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 450 с.
10. Салганский Е.А., Кислов В.М., Глазов С.В., Жолудев А.Ф., Манелис Г.Б. Фильтрационное горение смеси углерод – инертный материал в режиме со сверхadiaбатическим разогревом // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 3. С. 30–38.
11. Смирнов С.В., Ярошук И.О., Леонтьев А.П., Швырев А.Н., Пивоваров А.А., Самченко А.Н. Исследование резонансных колебаний в восточной части залива Посьета // Метеорол. и гидрология. 2018. № 2. С. 37–44. DOI:10.3103/S1068373918020048
12. Фецов С.С., Луценко Н.А. Численный анализ влияния геометрии боковых стенок на эффективность тепловых аккумуляторов на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами // Вычисл. механика сплошных сред. 2020. Т. 13, № 2. С. 189–204.
13. Lutsenko N.A., Fetsov S.S. Effect of side walls shape on charging and discharging performance of thermal energy storage based on granular phase change materials // Renew. Energy. 2020. Vol. 162. P. 466–477.
14. Lutsenko N.A., Fetsov S.S. Influence of gas compressibility on gas flow through bed of granular phase change material // Int. J. Heat Mass Tran. 2019. Vol. 130. P. 693–699.
15. Lutsenko N.A., Fetsov S.S. Numerical model of time-dependent gas flows through bed of granular phase change material // Int. J. Comput. Methods. 2020. Vol. 17. Article 1950010.
16. Lutsenko N.A. Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // Combust. Theory and Modelling. 2018. Vol. 22, iss. 2. P. 359–377. DOI:10.1080/13647830.2017.1406617
17. Manelis G.B., Glazov S.V., Salgansky E.A., Lempert D.B., Gudkova I.Yu., Domashnev I.A., Kolesnikova A.M., Kislov V.M., Kolesnikova Yu.Yu. Extraction of molybdenum-containing species from heavy oil residues using the filtration combustion method // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 92. P. 744–750. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.056
18. Salgansky E.A., Lutsenko N.A., Toledo M. The model of the extraction process of rare metals under condition of filtration combustion wave // Frontiers in Chemistry. 2020. Vol. 8, art. 511502. P. 1–10. DOI:10.3389/fchem.2020.511502
19. Smirnov S.V., Yaroshchuk I.O., Shvyrev A.N., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.N. Resonant oscillations in the western part of the Peter the Great Gulf in the Sea of Japan // Natural Hazards. 2021. Vol. 106, iss. 2. P. 1729–1745. DOI:10.1007/s11069-021-04561-8
20. Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications // Appl. Therm. Eng. 2003. Vol. 23. P. 251–283.