

Моделирование внутреннего тепловыделения в замкнутом объеме жидкости

Н. Ю. Пятницкая^{1,2}, Д. А. Бердюгин², И. А. Беляев¹ и Е. А. Белавина^{2,1}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Московский энергетический институт (технический университет), Красноказарменная ул., 14, Москва 111250, Россия

E-mail: PyatnitskayaNYu@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2023 г.

Аннотация. В работе представлено численное моделирование свободной конвекции имитатора расплава соли в замкнутом объеме под действием внутренних источников тепловыделения. Свободная конвекция реализуется в кубической ячейке со стороной 0.3 м в системе Comsol Multiphysics, верхняя сторона которой находится при постоянной температуре. Безразмерные коэффициенты теплоотдачи после стабилизации процесса тепловыделения сравниваются с зависимостями, полученными на основе экспериментальных данных для разных режимов свободной конвекции: ламинарной и турбулентной. В качестве рабочей среды используется 10-процентный водный раствор КОН как удобный имитатор расплава соли для экспериментальных работ, запланированных на следующие этапы исследования. <https://doi.org/10.33849/2023304>

1. ВВЕДЕНИЕ

Концепции энергетического реактора на расплавах солей и твердотопливного теплового реактора возникли практически в течение одного десятилетия: 1942 год — твердотопливный реактор CP-1, проработавший около 2 месяцев; 1954 год — первый жидкосольевой реактор ARE, который проработал 9 дней [1]. Экономическая целесообразность, оформленные решения из военной сферы и практически неисчерпаемые ресурсы на тот момент привели к тому, что развивать твердотопливное направление оказалось намного проще.

Однако, не все оставили жидкосольевые разработки, и в 1960-х годах Окриджская национальная лаборатория продолжила развивать свое направление и после ARE ввела в эксплуатацию реактор MSRE тепловой мощностью 7.4 МВт. Топливом служил раствор фторидов урана и тория (UF_4 и ThF_4) в расплаве соли $2LiF-BeF_4$ с тепловым спектром нейтронов [2]. В качестве основы для топлива использовался изотоп урана U-233, которого в природе нет — его получают из Th-232 при облучении нейтронами. Реактор отработал пять лет, затем его остановили в 1976 в пользу гораздо более успешных (и в чем-то более простых) быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. Считается, что основная причина такого решения вызвана невозможностью развивать такой тип реакторов из-за проблем с коррозией, т.к. расплавы солей (фториды Li, Be, Na, K, F и т.д.) являются достаточно химически активной и токсичной средой [3]. Работа не была проделана впустую: реактор проработал без изменения конструкции и подтвердил возможность корректировки состава ядерного топлива без остановки реактора с непрерывным удалением продуктов деления, т.е. ядерный топливный цикл возможно замкнуть в самом реакторе.

С развитием технологий проблемы коррозии отходят на второй план и интерес к реакторам такого типа сейчас активно возрастает. Соответственно, возрастает и интерес к теплофизическим аспектам течения расплава соли в условиях активной зоны. Влияние объемного тепловыделения в таких задачах оценивается даже

выше в сравнении с бланкетом ИТЭР (Международный экспериментальный термоядерный реактор).

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При наличии источников объемного тепловыделения, которые встречаются в ядерных, химических и других видах энергетических установок, возникает градиент температуры, порождающий вторичные течения в ламинарных и турбулентных потоках. Этим обосновывается необходимость изучения свободной и смешанной конвекции с внутренними источниками тепла.

Численному исследованию свободной конвекции в замкнутом объеме при влиянии внутренних источников посвящено уже немало работ, внимание которым будет уделено дальше.

На рисунке 1 представлена геометрия решаемой задачи. Изучается свободная конвекция с равномерным объемным тепловыделением в кубической ячейке с характерным размером $H = 0.3$ м. Рабочая жидкость — это водный раствор гидроксида калия, который, в том числе, является имитатором расплава соли.

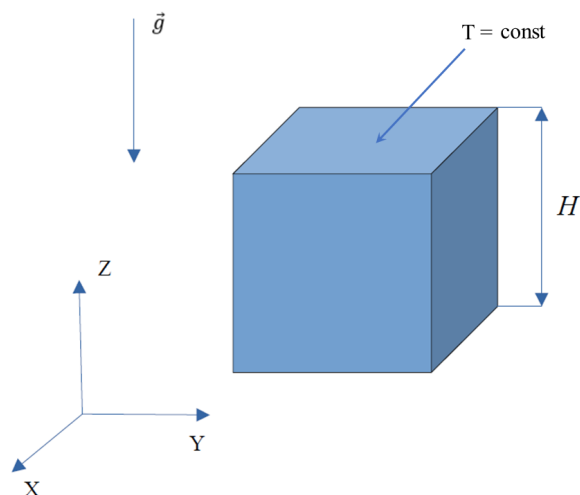


Рисунок 1. Геометрия расчетной области.

COMSOL Multiphysics [4] — это интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE). В основе программного обеспечения лежит метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод решения уравнений сохранения. В нашей задаче решается система уравнений для нестационарного случая конвективного теплообмена с внутренним тепловыделением без учета вязкой диссипации в уравнении энергии.

Уравнение неразрывности:

$$\nabla u = 0. \quad (1)$$

Уравнения сохранения импульса:

$$\rho_0 \left(\frac{\delta u}{\delta t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) - (\rho - \rho_0)g. \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_v. \quad (3)$$

Уравнения решаются с учетом следующих граничных условий: одна стенка охлаждается (при $Z = H, T_c = const$), остальные стенки теплоизолированы $q_c = -\lambda \frac{\delta T}{\delta n} = 0$. Математическое описание учитывает несколько допущений: используется приближение Буссинеска, не учитывается вязкая диссипация. В вышеприведенных формулах q_c — тепловой поток от стенки (Вт/м²), q_v — тепловыделение в объеме (Вт/м³), ρ — плотность (кг/м³), λ — теплопроводность Вт/м·К, C_p — теплоемкость (Дж/кг·К), μ — динамическая вязкость (Па·с). Переменность свойств учитывается в зависимости вышеприведенных величин от температуры, которые можно подобрать из библиотеки свойств Comsol. В нашем случае использовались свойства из работы [5].

Для определения режима свободной конвекции с наличием объемного тепловыделения был введен определяющий параметр число Рэлея в виде:

$$Ra = \frac{g\beta\Phi H^5}{2a^2\nu} = \frac{g\beta q_v H^5}{2\lambda}, \quad (4)$$

где $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}$ — ускорение свободного падения; β — коэффициент объемного расширения, 1/К; $\Phi = \frac{q_v}{\rho C_p}$ — объемная теплопроизводительность; H — характерный размер области, м; a — коэффициент температуропроводности, м²/с; ν — кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

При ламинарном режиме значения данного параметра ограничены числами Рэлея $Ra \leq 10^{12}$. Дабы убедиться в этом, были проведены расчеты в ячейке со значениями q_v такими, которые соответствуют ламинарному режиму, используя модули Laminar Flow и Turbulent Flow [4] с использованием Realizable $k - \epsilon$ [6] модели турбулентности.

Для того чтобы убедиться в том, что теплообмен стабилизировался, был проведен расчет безразмерной температуры для разных промежутков времени в сечении $Y = 0.15 \text{ м}$. В расчете была использована формула (5), аналогичная формуле из диссертации

Генина Л.Г. [7] на соискание степени кандидата технических наук:

$$\Theta = \frac{1}{\Delta T} = \frac{q_v(H/2)^2}{\lambda(\bar{T}_l - T_c)} \quad (5)$$

где T_c — температура стенки верхней грани в ячейке, К; \bar{T}_l — среднемассовая температура жидкости в ячейке, К.

Формула по структуре похожа на коэффициент теплоотдачи — безразмерный перепад температуры, однако она скорее является неким оценочным критерием, отражающим стабилизацию процесса, и непосредственно влияющим на время расчета. Со временем ее можно будет модифицировать и на ее основе получить зависимость максимального перегрева с ростом внутренней мощности. Также стоит отметить, что обычно характерным геометрическим масштабом в таких задачах служит половина высоты рассматриваемой области. Графическая интерпретация для расчетов, где использовались расчетные модули Turbulent Flow и Laminar Flow, представлена на рисунке 2. Нестационарная задача ре-

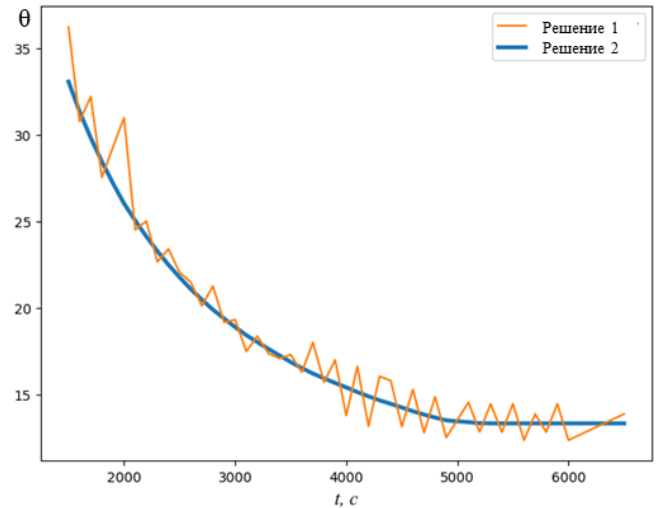


Рисунок 2. Зависимости безразмерной температуры от времени для $Ra = 10^{12}$, оценка применимости модуля Laminar Flow (решение 2) и Turbulent Flow (решение 1).

шалась в течение 6000 секунд, для каждого временного шага проводилась оценка по формуле 5. Решение 1, проведенное с использованием модели турбулентности и ламинарное решение 2 совпали между собой с точностью до 5%. Таким образом, для чисел $Ra \leq 10^{12}$ можно использовать ламинарный модуль Comsol.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Для визуализации процесса объемного тепловыделения в неподвижном объеме жидкости представлен турбулентный режим для числа Рэлея $Ra = 10^{13}$. Решается нестационарная задача в течение 5000 секунд. На рисунке 3 представлены поля скорости и температуры для разных моментов времени.

Множество построенных графиков демонстрирует появление локальных вихревых потоков, а также наличие неоднородностей температуры в различных об-

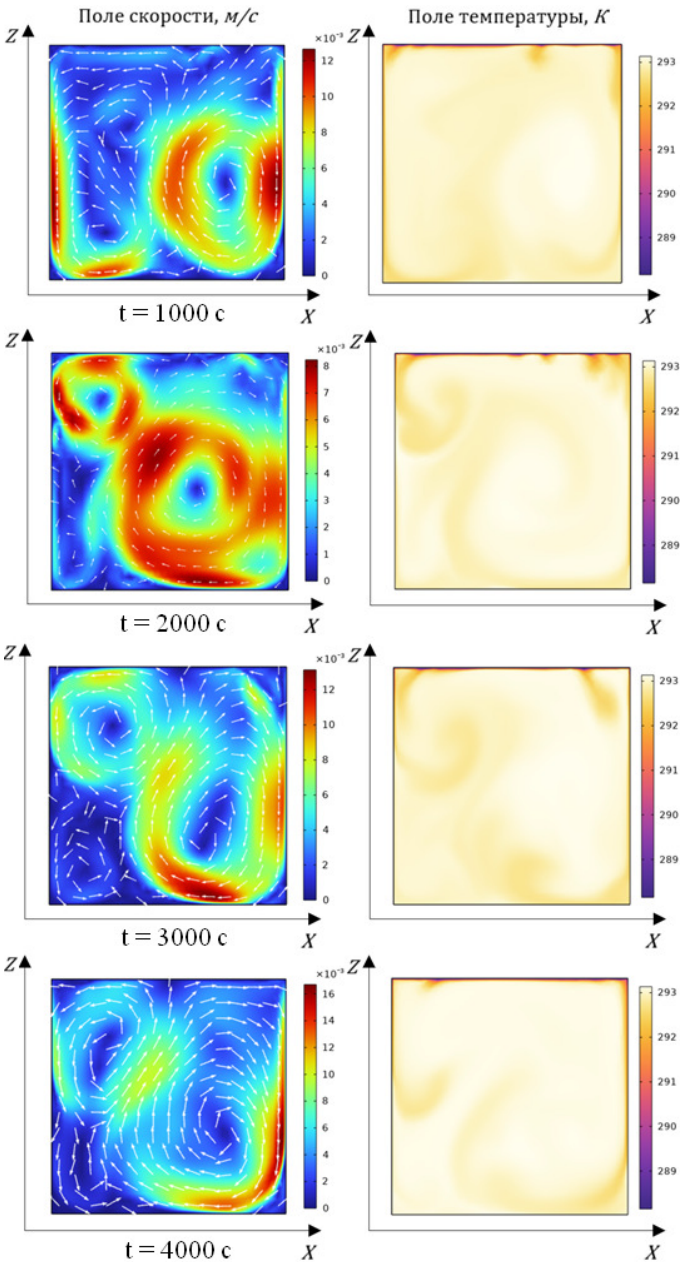


Рисунок 3. Поля скорости и температуры для разных моментов времени в центральном сечении куба $Y = 0.15$ м.

ластях ячейки, что характерно для задач с неустойчивой стратификацией поля плотности. Поскольку режим свободной конвекции является турбулентным, явной закономерности вихревых структур не наблюдается.

Реализованная расчетная модель является базисом для численного исследования с разными граничными условиями и для валидации будущего экспериментального исследования в более сложных постановках (в присутствии магнитного поля, внешнего теплового потока, с вынужденной конвекцией и т.д.). В подобных задачах могут образовываться различные вторичные течения, которые при взаимодействии сил различной природы создают периодические структуры в потоке.

4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИЗВЕСТНЫМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ЗАВИСИМОСТЯМИ

В качестве подтверждения корректности работы численной модели и, в частности, выбранной модели турбулентности для режимов с высокими числами Рэлея, был проведен краткий обзор литературы в области экспериментальных исследований. Далее приведены наиболее интересные для нас, с точки зрения сравнения, работы.

В статье 1975 года Kulacki F. и Nagle M. [8] описали теплообмен для задачи о свободной конвекции с объемным тепловыделением в квадратной камере и ввели расчетную формулу критерия Нуссельта (6), которая была использована для обработки данных, полученных в ходе расчета:

$$Nu = \frac{\Phi H^2}{a\Delta T} = \frac{q_v H^2}{\lambda\Delta T}. \quad (6)$$

Kulacki F. и Emara A. [9] на основе теоретических и экспериментальных исследований определили зависимость Nu как функции Ra 7 для ламинарного режима при $Ra \leq 10^{12}$:

$$Nu = 0,34Ra^{0,226}. \quad (7)$$

В статье [10] Zhang Lee с соавторами в 2015 году на основе экспериментальных данных вывели зависимость для турбулентного режима как функцию $Nu = f(Ra, Pr)$ в пределах чисел Рэлея $10^{11} \leq Ra \leq 10^{14}$. На рисунке 4 представлен график, на котором построена экспериментальная зависимость, а также нанесены точки численного исследования.

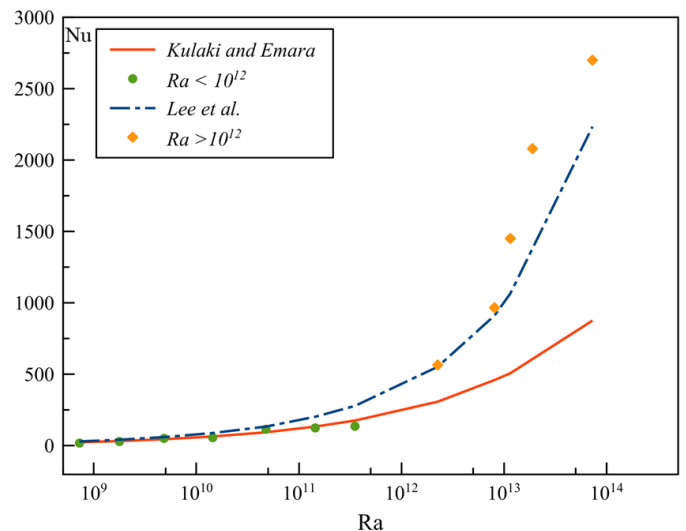


Рисунок 4. Сравнение численных результатов для разных диапазонов чисел Ra с экспериментальными зависимостями.

В результате сравнения данных можно отметить, что оба рассмотренных диапазона чисел Ra качественно повторяют экспериментальные зависимости других авторов. В случае ламинарного режима свободной конвекции можно говорить о количественном совпадении.

Различия в турбулентном решении можно объяснить идеализированными условиями расчета и реальными условиями эксперимента. Во всех представленных расчетах шаг по времени варьируется для разных режимов мощности тепловыделения и составляет от 0.01 с до 0.1 с. Кроме того, разные значения мощности влияют на время стабилизации процессов теплообмена и, соответственно, на время расчета.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Грамотный подход к экспериментальному и численному исследованию объемного тепловыделения состоит из применения нескольких методов в контролируемых условиях. Моделирование тепловыделения с помощью электрического тока, пропускаемого через раствор электролита, не всегда может привести к положительным результатам, т.к. такой способ требует тщательного подбора используемых материалов, не образующих гальванические пары и т.д. В случае, если экспериментальный метод не вызывает существенных противоречий, он должен быть обоснован численным моделированием.

На базе сравнения результатов численного и натурного экспериментов можно делать выводы и строить закономерности, характеризующие теплообмен при свободной конвекции с объемным тепловыделением. Апробированные методики исследования свободной конвекции в базовых, классических задачах можно распространить на более сложные условия: включение вынужденной конвекции, дополнение обтекаемых препятствий в потоке, наложение магнитных полей разной ориентации и т.д.

Результаты данного численного исследования и их сопоставление с экспериментальными работами продемонстрировали работоспособность расчетной модели как для турбулентного, так и для ламинарного режимов свободной конвекции. Эти результаты станут основой для изучения более сложных задач, в которых будут происходить взаимодействия сил различной природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bettis E, Schroeder R, Cristy G, Savage H, Affel R and Hemphill L 1957 *Nucl. Sci. Eng* **2** 804–825
2. Thoma R E 1971 Chemical aspects of MSRE operations. *Preprint* (Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States))
3. Sridharan K and Allen T 2013 Corrosion in molten salts *Molten Salts Chemistry: From Lab to Applications* ed Lantelme F and Groult H (Elsevier) pp 241–267
4. [https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOL Multiphysics.pdf](https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf)
5. Gilliam R, Graydon J, Kirk D and Thorpe S 2007 *International Journal of Hydrogen Energy* **32** 359–364
6. Shaheed R, Mohammadian A and Kheirkhah Gildeh H 2019 *Environmental Fluid Mechanics* **19** 543–568
7. Петухов Б С и Генин Л Г 1963 *Инженерно-физический журнал* **6**(4) 3–8
8. Kulacki F A and Nagle M 1975 *Journal of Heat Transfer* **97** 204–211
9. Emara A and Kulacki F 1980 *Journal of Heat Transfer* **102** 531–537
10. Zhang L, Zhou Y, Zhang Y, Tian W, Qiu S and Su G 2015 *Progress in Nuclear Energy* **79** 167–181