

ВЛИЯНИЕ ЛУЧИСТЫХ ТЕПЛОПОТЕРЬ НА УСЛОВИЯ ПЛАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА С ВНУТРЕННИМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ

Донской И.Г.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия
ORCID: 0000-0003-2309-8461 donskey.chem@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в получении приближенных аналитических и численных решений для задачи определения теплового состояния элементов теплоэнергетического оборудования, например, перспективных устройств для хранения тепловой энергии и химических реакторов. ЦЕЛЬ. Рассмотреть поведение стационарных решений системы уравнений теплопроводности в области с внутренним тепловыделением. Определить условия начала и окончания плавления, а также зависимость этих условий от интенсивности лучистых теплопотерь на внешней границе. Исследовать влияние отдельных факторов на положение границы раздела фаз. МЕТОДЫ. При решении используются численные методы: для известного вида решения определяются коэффициенты таким образом, чтобы выполнялись граничные условия (в общем случае, нелинейные). Для нахождения коэффициентов используется метод Ньютона. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе получены зависимости между параметрами теплообмена (коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи) и положением границы фазового перехода в цилиндрическом образце. Полученные зависимости позволяют определить критические значения интенсивности тепловыделения, отвечающие началу плавления образца (появление жидкой фазы) и полному расплавлению образца (достижение температуры плавления на внешней границе). Эти зависимости сравниваются с приближенными формулами для оценки области применимости последних. ВЫВОДЫ. Проведенные расчеты позволяют определить условия начала и окончания плавления тепловыделяющего материала. Условия полного расплавления образца можно определить точно. Условия начала плавления получены в виде нелинейного уравнения, единственный физический (т.е. действительный и положительный) корень которого дает критическое значение интенсивности тепловыделения. В линейном приближении можно получить упрощенную формулу, связывающую критическое значение интенсивности тепловыделения с лучистыми теплопотерями.

Ключевые слова: задача Стефана; теплопроводность; фазовые переходы; радиационный теплообмен; критические условия

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур".

Для цитирования: Донской И.Г. Влияние лучистых теплопотерь на условия плавления материала с внутренним тепловыделением // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 173-183. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-173-183.

THE INFLUENCE OF RADIANT HEAT LOSS ON THE MELTING CONDITIONS OF A MATERIAL WITH INTERNAL HEAT RELEASE

Donskoy IG.

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia
ORCID: 0000-0003-2309-8461 donskey.chem@mail.ru

Abstract: The RELEVANCE of the study lies in obtaining approximate analytical and numerical solutions for the problem of estimating the thermal state of thermal power

equipment elements, such as thermal storage units and promising chemical reactors. The **PURPOSE** is to investigate the behavior of stationary solutions of heat conduction equations system in a space domain with internal heat release; to determine the conditions for the start and completion of melting, as well as the dependence of these conditions on the intensity of radiant heat loss at the outer boundary; to study the influence of individual factors on the phase boundary position. **METHODS**. Numerical methods are used: for a known type of solution, the coefficients are determined in such a way that the boundary conditions (in the general case, nonlinear) are satisfied. Newton's method is used to find the coefficients. **RESULTS**. The relationships between heat transfer parameters (convective and radiant heat transfer coefficients) and the phase transition boundary position in a cylindrical sample are obtained. These dependences allow to determine the critical values of the heat release intensity corresponding to the beginning of the sample melting (appearance of the liquid phase) and the complete sample melting (reaching the melting temperature at the outer boundary). These dependencies are compared with approximate formulas to assess the range of applicability of the latter. **CONCLUSION**. The presented calculations give the conditions for the beginning and end of melting of the heat-generating material. The conditions for complete melting of the sample can be determined accurately. The conditions for the onset of melting are obtained in the form of a nonlinear equation, the only physical (i.e., real and positive) root of which gives the critical value of the heat release intensity. In a linear approximation, a simplified formula can be obtained that relates the critical value of heat release intensity to radiant heat loss.

Keywords: Stefan problem; heat conduction; phase transitions; radiative heat transfer; critical conditions.

Acknowledgments: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0005) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center.

For citation: Donskoy IG. The influence of radiant heat loss on the melting conditions of a material with internal heat release. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (3): 173-173. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-173-183.

Введение (Introduction)

Процессы плавления часто встречаются в теплоэнергетике [1, 2] и технологии материалов [3, 4]. В зависимости от приложений, плавление может быть целевым (например, при запасании энергии [5]) или неблагоприятным (при разрушении оболочек [6]) процессом. Тогда условия плавления (предельные значения тепловых потоков) дают естественные ограничения на диапазон допустимых значений управляющих параметров.

Источником нагрева может быть химическая реакция, джоулева теплота или высокочастотный нагрев. В зависимости от конкретного механизма нагрева задача Стефана будет формулироваться по-разному. Самый простой случай – однородный нагрев области с постоянной интенсивностью. Такое приближение, однако, уже представляет практический интерес для оценки границ безопасных режимов, например, устройств для аккумулирования тепловой и электрической энергии [7, 8].

Целью данной работы является определение критических значений интенсивности тепловыделения в цилиндрическом образце. С помощью численных методов и линейных приближенных определяется зависимость критических значений интенсивности тепловыделения от интенсивности смешанной (конвективной и лучистой) теплоотдачи. Оценивается точность приближенных формул.

Научная значимость исследования состоит в получении новых решений задачи Стефана с объемным тепловыделением при наличии лучистых теплопотерь. Задача теплопроводности с подвижной границе раздела в конечной области имеет особенности, обуславливающие существование критического параметра. Исследование этих особенностей позволит рассматривать более сложные системы, например, двух- и трехмерные (несимметричные) постановки, оценивать влияние формы области и т.д.

Практическая значимость исследования заключается в получении формул для расчета критического тепловыделения, которые могут применяться при оценке теплового состояния элементов теплоэнергетического оборудования.

Результаты работы соответствуют п. 4 паспорта специальности 2.4.6 (Процессы переноса при фазовых превращениях, радиационный теплообмен в прозрачных и

поглощающих средах).

Литературный обзор (Literature Review)

В настоящей работе рассматривается случай с объемным тепловыделением. Такое тепловыделение может быть связано, например, с микроволновым нагревом влажных материалов [9], химической реакцией [10], электронагревом [11], использованием концентрированного излучения [12]. Большое значение подобные процессы играют в химической технологии, где активность катализаторов часто очень чувствительна к температуре [13]. Интенсивность тепловыделения и геометрия образа определяют допустимый уровень теплоотдачи, при котором возможно стационарное протекание процесса. Условие начала плавления для образцов с простейшей геометрией дается в работах [14, 15]. Условие расплавления при конвективном охлаждении (для конечной скорости теплообмена) дается в работе [16].

Влияние лучистого переноса рассматривалось ранее в работах по фазовым переходам в проницаемых средах [17]. Если считать среду непроницаемой, то лучистый перенос влияет только на условия на внешней границе. Для целей настоящей работы можно считать, что окружающая среда однородна и изотропна. Испарение и закипание капель в высокотемпературных средах (с существенным вкладом лучистого теплообмена) теоретически исследовалось в работах [18, 19]. Условия тепловой устойчивости материалов с протекающей в объеме экзотермической химической реакцией при лучистых теплопотерях рассматривались в работах [20, 21]. Моделирование воздействия теплового излучения на горючие материалы проводилось в работах [22, 23]. Приближенные методы решения задачи теплопроводности в цилиндре предложены в работах [24, 25].

Из-за сложностей, возникающих при решении таких задач, большая часть исследований связана с применением численных кодов для расчета конкретных тепловыделяющих элементов. Немногие работы содержат более общие постановки, которые, однако, неизбежно оказываются очень упрощенными. Тем не менее, качественные закономерности (а иногда и аналитические решения), которые позволяют провести исследования упрощенных моделей, оказываются полезными при анализе более сложных систем. Поэтому в настоящей работе мы рассматриваем упрощенную постановку задачи Стефана и ищем решение этой задачи в виде явных формул, дающих, по крайней мере, качественные закономерности.

Материалы и методы (Materials and methods)

Система уравнений теплопереноса в плавящемся образце

Рассмотрим одномерную стационарную задачу Стефана в цилиндрическом образце:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \lambda_s \frac{dT}{dr} \right) + W = 0, \quad r > r_m, \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \lambda_l \frac{dT}{dr} \right) + W = 0, \quad r < r_m. \quad (2)$$

Здесь r – пространственная координата (расстояние от оси симметрии), T – температура, λ – коэффициент теплопроводности, W – интенсивность тепловыделения (предполагается, что тепловыделение равномерно распределено по образцу), r_m – координата раздела фаз, индексы s и l относятся соответственно к твердой фазе и к жидкой фазе (расплаву).

Граничные условия на оси симметрии и на внешней границе записываются следующим образом:

$$\frac{dT}{dr}(0) = 0, \quad -\lambda \frac{dT}{dr}(R) = \alpha [T(R) - T_0] + \varepsilon \sigma [T^4(R) - T_0^4]. \quad (3)$$

Здесь R – радиус цилиндра, α – коэффициент теплоотдачи, ε – степень черноты, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_0 – температура окружающей среды.

Принятое приближение существенным образом зависит от симметрии образца и возможности представления его спектральных характеристик параметрами черного тела. Поэтому для более точных расчетов радиационных потерь, вообще говоря, нужно детальнее рассматривать условия на излучающей границе (в том числе, учитывать геометрию полости, в которой находится излучающий образец). В настоящей работе эти детали для упрощения не учитываются.

Помимо условий (3) задачу необходимо дополнить условием на границе фазового перехода. Для стационарных условий это равенство температур и тепловых потоков:

$$\lambda_l \frac{dT}{dr}(r_m^-) = \lambda_s \frac{dT}{dr}(r_m^+), \quad T(r_m) = T_m, \quad (4)$$

где T_m – температура плавления материала.

Используя характерную разность температур $\Delta T = T_m - T_0$, можно привести уравнения и условия (1)-(4) к безразмерной форме:

$$\frac{1}{\xi} \frac{d}{d\xi} \left(\xi \frac{d\theta}{d\xi} \right) + Q = 0, \quad \xi > \xi_m, \quad (1a)$$

$$\frac{\kappa}{\xi} \frac{d}{d\xi} \left(\xi \frac{d\theta}{d\xi} \right) + Q = 0, \quad \xi < \xi_m, \quad (2a)$$

$$\frac{d\theta}{d\xi}(0) = 0, \quad -\frac{d\theta}{d\xi}(1) = Bi\theta(1) + \frac{Bo}{\varphi} \{ [1 + \varphi\theta(1)]^4 - 1 \}, \quad (3a)$$

$$\kappa \frac{d\theta}{d\xi}(\xi_m^-) = \frac{d\theta}{d\xi}(\xi_m^+), \quad \theta(\xi_m) = 1. \quad (4a)$$

В уравнениях (1a)-(4a) используются следующие безразмерные параметры:

$$\xi = \frac{r}{R}, \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, \quad Q = \frac{WR^2}{\lambda_s(T_m - T_0)},$$

$$\kappa = \frac{\lambda_l}{\lambda_s}, \quad Bi = \frac{\alpha R}{\lambda_s}, \quad Bo = \frac{\varepsilon \sigma T_0^3 R}{\lambda}, \quad \varphi = \frac{T_m - T_0}{T_0}.$$

Особенностью задачи является существование критических условий: при фиксированных внешних условиях и меняющейся интенсивности тепловыделения существуют два критических значения Q , соответствующие началу плавления образца Q_{min} (т.е. достижению в его центре температуры плавления) и полному расплавлению образца Q_{max} (т.е. достижению температуры плавления на его внешней границе). При фиксированной интенсивности тепловыделения роль критического параметра играет интенсивность теплоотдачи. Задача (1a)-(4a) для случая $Bo = 0$ изучалась в работах [12, 13], в частности, были получены условия начала плавления и зависимость координаты раздела фаз от интенсивности тепловыделения. В настоящей работы эти результаты обобщаются на случай лучистых теплопотерь. Как видно из (3a), по сравнению с задачей конвективного охлаждения, рассмотренной в работе [15], появляются два новых параметра – число Больцмана Bo и абсолютный ноль температуры в выбранных масштабах $-\varphi^{-1}$. Параметр φ пропорционален числу Стефана, при $\varphi = 0$ температура среды равна температуре фазового перехода, поэтому условия расплавления заведомо достигаются.

В указанных работах приводится обобщенное решение уравнения (1a), которое является основой всего анализа:

$$\theta = -\frac{Q}{4} \xi^2 + b \ln \xi + c. \quad (5)$$

Здесь постоянные b и c зависят от граничных условий. Градиент температуры равен:

$$\frac{d\theta}{d\xi} = -\frac{Q}{2} \xi + \frac{b}{\xi}. \quad (6)$$

В стационарном случае отношение теплопроводностей κ и число Стефана St не влияют на критические условия, хотя существенно влияют на скорость плавления. Динамические особенности задачи в данной работе не рассматриваются, хотя они часто оказываются наиболее важными для практических приложений [16, 26-28].

Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

Определение критических значений интенсивности тепловыделения

Условие расплавления образца – это достижение температурой поверхности температуры плавления, $\theta(1) = 1$. Этот факт позволяет наиболее простым образом определить критическое значение интенсивности тепловыделения Q_{max} , соответствующее расплавлению образца. Условие на внешней границе из (3a) запишется следующим образом:

$$\frac{Q_{max}}{2} + b = Bi + \frac{Bo}{\varphi} [(1 + \varphi)^4 - 1]. \quad (7)$$

Можно видеть, что при полном расплавлении весь образец от центра до внешней

границы занят жидкой фазой, т.е. $\xi_m = 1$, и градиент (6) должен быть равен нулю на оси по первому условию из (3а), а значит, $b = 0$. Тогда критическое значение интенсивности тепловыделения равно:

$$Q_{max} = 2Bi + 2Bo \frac{(1+\varphi)^4 - 1}{\varphi}. \quad (7a)$$

При $Bo = 0$ это выражение дает результат работы [15]. Второе слагаемое в правой части (7а) имеет резкую степенную от φ , но в области малых значений дробь примерно равна 4. С ростом φ ($\varphi > 0$) значение Q_{max} возрастает.

Более сложной задачей является оценка интенсивности тепловыделения, соответствующего началу плавления образца. В этом случае задача теплопроводности снова является однофазной, и $b = 0$. Условие начала плавления $\theta(0) = 1$ дает условие $c = 1$. Тогда для внешней границы должно выполняться условие:

$$\frac{Q_{min}}{2} = Bi \left(1 - \frac{Q_{min}}{4} \right) + \frac{Bo}{\varphi} \left\{ \left[1 + \varphi \left(1 - \frac{Q_{min}}{4} \right) \right]^4 - 1 \right\}. \quad (8)$$

Представленное уравнение четвертой степени при дополнительном условии положительности Q_{min} дает зависимость критической интенсивности тепловыделения от параметров Bi , Bo и φ . Можно, однако, упростить формулу, если использовать предположение о том, что температура поверхности в начале плавления мало отличается от температуры окружающей среды. Тогда, разлагая второе слагаемое правой части (8) в ряд по температуре, можно получить приближенное выражение:

$$Q_{min} \approx 4 \frac{Bi + 4Bo}{2 + Bi + 4Bo}. \quad (9)$$

При $Bo = 0$ формула (9) переходит в точный результат для случая конвективной теплоотдачи [15]. Принятое приближение приводит к тому, что Q_{min} не зависит от φ , хотя, как показывают расчеты, эта зависимость может быть существенной, особенно при малых Bi .

На рис. 1 показана зависимость Q_{min} от Bo для трех разных значений Bi при $\varphi = 10$. Данные получены при решении уравнения (8) методом Ньютона (как указывалось выше, при $\varphi > 0$ лучистое слагаемое имеет строго положительную производную, поэтому численные методы быстро сходятся). Видно, что при малых Bo величина Q_{min} имеет постоянное значение, зависящее от Bi [15]; при больших Bo переходит к предельному значению $Q_{min} = 4$; в области промежуточных значений наблюдается довольно резкий переход между этими двумя значениями.

На рис. 2 показана зависимость Q_{min} от φ при $Bi = 10$: видно, что с уменьшением φ кривые ожидаемо сходятся к линейному приближению (9). Уже при $\varphi = 1$ отличие точного значения Q_{min} от рассчитанного по приближенной формуле не превышает 1%.

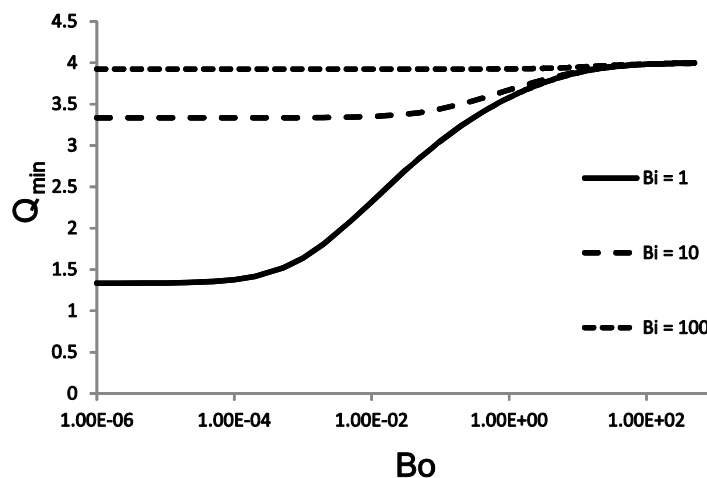


Рис. 1. Зависимость критической интенсивности тепловыделения от числа Больцмана при разных числах Био ($\varphi = 10$)

Fig. 1. Dependence of critical heat source intensity on Boltzmann number under different Biot numbers ($\varphi = 10$)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

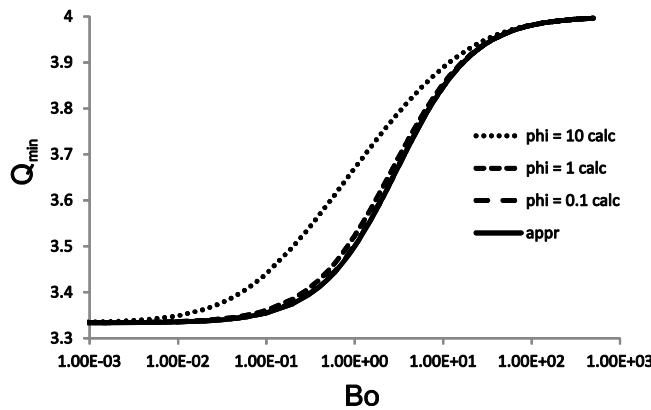


Рис. 2. Зависимость критической интенсивности тепловыделения от параметра φ (число Био равно 10)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Положение границы фазового перехода

Последний вопрос, который необходимо решить, это определение зависимости положения границы фазового перехода от условий теплообмена. Нелинейное граничное условие приводит к сложным формулам для ξ_m , поэтому в настоящей работе используется численно-аналитический подход.

Решение для распределения температуры в области расплава с фиксированной границей можно записать в следующем виде:

$$\theta = -\frac{Q}{4\kappa} \xi^2 + 1 + \frac{Q}{4\kappa} \xi_m^2, \quad \xi < \xi_m. \quad (10)$$

Тепловой поток на границе фазового перехода со стороны расплава равен:

$$-\kappa \frac{d\theta}{d\xi}(\xi_m^-) = \frac{Q}{2} \xi_m. \quad (11)$$

Тогда из первого условия (4а) следует, что для области, занятой твердой фазой, коэффициент b в (5) снова равен 0. Определяя коэффициент c из второго условия (4а), получаем итоговое выражение:

$$\frac{Q}{2} = Bi \left[1 + \frac{Q}{4} (\xi_m^2 - 1) \right] + \frac{Bo}{\varphi} \left(\left\{ 1 + \varphi \left[1 + \frac{Q}{4} (\xi_m^2 - 1) \right] \right\}^4 - 1 \right). \quad (12)$$

Видно, что уравнение (12) обобщает формулы (7) и (8), которые являются ее частными случаями при крайних значениях ξ_m . Применяя, как и в прошлый раз, линейное приближение, получим приближенное выражение для ξ_m :

$$\xi_m \approx \sqrt{1 - \frac{4}{Q} + \frac{2}{Bi + 4Bo}}. \quad (13)$$

Можно показать, что для случаев плоской и шаровой симметрии выражение (13) может быть обобщено следующим образом:

$$\xi_m \approx \sqrt{1 - \frac{2(n+1)}{Q} + \frac{2}{Bi + 4Bo}}, \quad (13a)$$

где новый параметр n определяется порядком зависимости поверхности образца от линейного размера. Из уравнения (13а) можно получить приближенные формулы для Q_{min} и Q_{max} с плоской и шаровой симметрией.

Зависимость положения границы фазового перехода от параметров лучистого теплообмена для $Q = 20$ и $Bi = 10$ (критические условия расплавления образца при $Bo = 0$) показана на рис. 3 (данные получены численным решением уравнения (12)). При малых φ , как и в предыдущем случае, зависимость (12) стремится к приближенному решению (13). В пределе больших Bo координата ξ_m стремится к предельному значению для граничных условий первого рода [14], которое для выбранных условий равно 0.894.

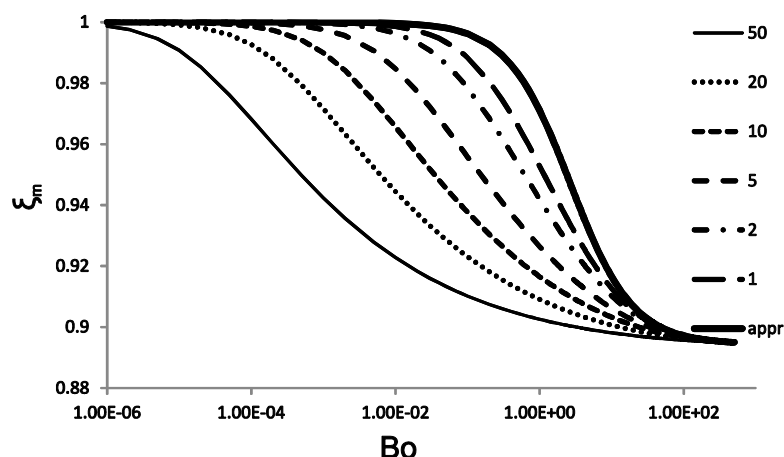


Рис. 3. Зависимость положения границы раздела фаз от числа Больцмана и параметра φ (числа на легенде) Fig. 3. Dependence of phase boundary position on Boltzmann number and parameter φ (numbers on the legend)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные результаты позволяют рассчитывать положение границы раздела фаз в тепловыделяющих элементах. Возмущение, вносимое лучистым теплопереносом, исчезает в предельных случаях, когда граничное условие превращается в условие первого рода (постоянная температура на границе) или условие чисто конвективной теплоотдачи. Расчетные зависимости могут быть использованы для расчета тепловыделяющих элементов, например, размеров тепловых аккумуляторов и нужной тепловой мощности [29, 30], а также для упрощенной оценки радиационных поправок на границы устойчивых режимов использования электрохимических аккумуляторов [31].

Необходимо отметить ограничения применимости результатов. Во-первых, все зависимости получены для постоянных значений теплофизических свойств материала. Во-вторых, жидкая фаза при неоднородном распределении температуры может стать конвективно неустойчивой [32]. В-третьих, для практики большое значение играют нестационарные режимы прогрева и расплавления, которые в работе не рассматриваются (некоторые особенности обсуждаются в работах [2, 33]). Наконец, тепловыделение может быть неоднородным или чувствительным к температуре. В этих случаях результаты настоящей работы могут быть лишь приближением, точность которого зависит от условий протекания процессов теплопереноса.

Выводы (Conclusions)

В работе исследованы особенности решений стационарной задачи Стефана в тепловыделяющем цилиндрическом образце с конвективными и лучистыми теплопотерями на внешней границе. Получены уравнения для расчета критических значений интенсивности тепловыделения. Показано, что приближенные методы достаточно хорошо описывают зависимости между параметрами задачи при малой относительной разности между температурой фазового перехода и температурой окружающей среды.

Литература

1. Rocha T.T.M., Trevizoli P.V., de Oliveira R.N. A timeline of the phase-change problem for latent thermal energy storage systems: A review of theoretical approaches from the 1970-s to 2022 // Solar Energy. 2023. V. 250. P. 248-284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.035>
2. Tang J., Huang M., Zhao Y., Maqsood S., Ouyang X. Numerical investigations on the melting process of the nuclear fuel rod in RIAs and LOCAs // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 124. P. 990-1002. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.001>
3. Aldushin A.P., Matkowsky B.J., Shkadinsky K.G., Shkadinskaya G.V., Volpert V.A. Combustion of Porous Samples with Melting and Flow of Reactants // Combustion Science and Technology. 1994. V. 99. P. 313-343. <https://doi.org/10.1080/00102209408935439>
4. Chen Y., Lee S., Tahmasebi A., Bai J., Mahoney M., Yu J. A review of the state-of-the-art research on carbon structure evolution during the coking process: From plastic layer chemistry to 3D carbon structure establishment // Fuel. 2020. V. 271. P. 117657. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117657>
5. Фецов С.С., Луценко Н.А. Численный анализ влияния геометрии боковых стенок на эффективность тепловых аккумуляторов на основе гранулированных материалов с фазовыми

- переходами // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13 № 2. С. 189-204. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.2.15>
6. Гальбурт В.А., Иванов М.Ф., Минеев В.Н. и др. Воздействие взрыва водорода на защитную оболочку реакторного газа АЭС // Математическое моделирование. 2002. Т. 14. № 1. С. 73-86.
7. Mallick S., Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – A critical review // Journal of Energy Storage. 2023. V. 62. P. 106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>
8. Antonov D.V., Nizovtsev M.I., Shchepakina E.A., et al. Heat transfer through a three-layer wall considering the contribution of phase change: A novel approach to the modelling of the process // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. V. 226. P. 125500. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125500>
9. Kulkarni A., Mishra G., Palla S., et al. Advances in Computational Fluid Dynamics Modeling for Biomass Pyrolysis: A Review // Energies. 2023. V. 16. P. 7839. <https://doi.org/10.3390/en16237839>
10. Diaconu B., Cruceru M., Anghelescu L. Fire Retardance Methods and Materials for Phase Change Materials: Performance, Integration Methods, and Applications—A Literature Review // Fire. 2023. V. 6. P. 175. <https://doi.org/10.3390/fire6050175>
11. Ledakowicz S., Piddubniak O. The Non-Stationary Heat Transport inside a Shafted Screw Conveyor Filled with Homogeneous Biomass Heated Electrically // Energies. 2022. V. 15. P. 6164. <https://doi.org/10.3390/en15176164>
12. Углов А.А., Саггединов О.Г. О решении задачи Стефана при объемном тепловыделении // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. № 1. С. 28-31.
13. Argyle M.D., Bartholomew C.H. Heterogeneous Catalyst Deactivation and Regeneration: A Review // Catalysts. 2019. V. 5. P. 145-269. <https://doi.org/10.3390/catal5010145>
14. Crepeau J.C., Siahpush A., Spotten B. On the Stefan problem with volumetric energy generation // Heat and Mass Transfer. 2009. V. 46. P. 119. <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0550-5>
15. Alsulami R.A., Zope T.M., Premnath K., Aljaghtham M. Convectively cooled solidification in phase change materials in different configurations subject to internal heat generation: Quasi-steady analysis // Applied Thermal Engineering. 2023. V. 221. P. 119849. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119849>
16. Fornarelli F., Camporeale S.M., Fortunato B. Simplified theoretical model to predict the melting time of a shell-and-tube LHTES // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 153. P. 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.130>
17. Рубцов Н.А., Слепцов С.Д., Саввинова Н.А. Численное моделирование однофазной задачи Стефана в слое с прозрачными и полупрозрачными границами // ПМТФ. 2006. Т. 47. № 3. С. 84-91.
18. Sazhin S.S. Droplets and sprays: simple models of complex processes. Springer, 2022. 600 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99746-5>
19. Kuznetsov G.V., Syrodoev S.V., Kostoreva Zh.A., et al. Analysis of the influence of the type of heat transfer on the dynamics of the ignition processes of wood biomass particles under complex heating conditions // Combustion and Flame. 2024. V. 262. P. 113353. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113353>
20. Калинчук В.В., Черненко А.С., Сафронков А.Н., Калугин В.В. Два предела по диаметру частицы катализатора, определяющих высокотемпературный тепломассообмен с активной газовой смесью // Физика аэродисперсных систем. 2010. № 47. С. 5-15.
21. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю., Журавский А.В. Условия теплового взрыва в пластине при конвективно-радиационном теплообмене // Вестник МГТУ. Сер. Естественные науки. 2020. № 6. С. 48-59.
22. Baranovskiy N., Demikhova A. Mathematical modeling of heat transfer in an element of combustible material when exposed to radiation from a forest fire // Safety. 2019. V. 5. No. 56. doi: 10.3390/safety5030056
23. Parot R., Rivera J.I., Reszka P., et al. A simplified analytical model for radiation dominated ignition of solid fuels exposed to multiple non-steady heat fluxes // Combustion and Flame. 2022. V. 237. P. 111866. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111866>
24. Видин Ю.В., Казаков Р.В., Злобин В.С. Процесс переноса тепла в двухслойном цилиндрическом теле // Известия ВУЗов. Проблем энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 93-98. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-93-98>
25. Котова Е.В., Клеблеев Р.М., Кудинов В.А. Об одном методе определения собственных чисел в задачах теплопроводности для цилиндра // Известия ВУЗов. Проблем энергетики. 2023. Т. 25 № 4. С. 71-82. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-4-71-82>
26. Neri M. Numerical simulation of PCM-based storage units to be integrated into commercial hot water storage tank. Master thesis. Politecnico di Torino, 2019. 97 p.

27. Донской И.Г. Математическое моделирование образования агломератов в реагирующей пористой среде с меняющейся проницаемостью // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 2. С. 22-35.
28. Карташов Э.М., Соловьев И.А. Стохастическая постановка задачи Стефана в гиперболическом представлении // Известия ВУЗов. Проблем энергетики. 2019. Т. 21. № 3-4. С. 116-126. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-116-126>
29. Mohammed H.I., Talebizadehsardari P., Mahdi J.M., Arshad A., Sciacovelli A., Giddings D. Improved melting of latent heat storage via porous medium and uniform Joule heat generation // Journal of Energy Storage. 2020. V. 31. P. 101747. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101747>
30. Shrivastava A., Williams B., Siahpush A.S., Savage B., Crepeau J. Numerical and experimental investigation of melting with internal heat generation within cylindrical enclosures // Applied Thermal Engineering. 2014. V. 67. P. 587-596. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.039>
31. Mallick S., Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – A critical review // Journal of Energy Storage. 2023. V. 62. P. 106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>
32. Crepeau J., Siahpush A.S. Solid–liquid phase change driven by internal heat generation // Comptes Rendus Mecanique. 2012. V. 340. P. 471-476. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.03.004>
33. An C., Moreira F.C., Su J. Thermal analysis of the melting process in a nuclear fuel rod // Applied Thermal Engineering. 2014. V. 68. P. 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.005>

Авторы публикации

Донской Игорь Геннадьевич – канд. техн. наук (05.14.01), старший научный сотрудник лаборатории термодинамики ИСЭМ СО РАН. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2309-8461>. Email: donskoy.chem@mail.ru

References

1. Rocha TTM, Trevizoli PV, de Oliveira RN. A timeline of the phase-change problem for latent thermal energy storage systems: A review of theoretical approaches from the 1970-s to 2022. *Solar Energy*. 2023; 250:248-284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.035>
2. Tang J, Huang M, Zhao Y, Maqsood S, Ouyang X. Numerical investigations on the melting process of the nuclear fuel rod in RIAs and LOCAs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018; 124:990-1002. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.001>
3. Aldushin AP, Matkowsky BJ, Shkadinsky KG, Shkadinskaya GV, Volpert VA. Combustion of Porous Samples with Melting and Flow of Reactants. *Combustion Science and Technology*. 1994; 99:313-343. <https://doi.org/10.1080/00102209408935439>
4. Chen Y, Lee S, Tahmasebi A, Bai J, Mahoney M, Yu J. A review of the state-of-the-art research on carbon structure evolution during the coking process: From plastic layer chemistry to 3D carbon structure establishment. *Fuel*. 2020; 271:117657. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117657>
5. Fetsov SS, Lutsenko NA. Numerical analysis of the influence of side wall shape on the efficiency of thermal energy storages based on granular phase change materials. *Computational Continuum Mechanics*. 2020; 13(2):189-204. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.2.15>
6. Gal'burt VA, Ivanov MF, Mineev VN, et al. Action of hydrogen explosion on reactor hall safety containment. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2002; 14(1):73-86.
7. Mallick S, Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – A critical review. *Journal of Energy Storage*. 2023; 62:106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>
8. Antonov DV, Nizovtsev MI, Shchepakina EA, et al. Heat transfer through a three-layer wall considering the contribution of phase change: A novel approach to the modelling of the process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024; 226:125500. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125500>
9. Kulkarni A, Mishra G, Palla S, et al. Advances in Computational Fluid Dynamics Modeling for Biomass Pyrolysis: A Review. *Energies*. 2023; 16:7839. <https://doi.org/10.3390/en16237839>
10. Diaconu B, Cruceru M, Anghelescu L. Fire Retardance Methods and Materials for Phase Change Materials: Performance, Integration Methods, and Applications—A Literature Review. *Fire*. 2023; 6:175. <https://doi.org/10.3390/fire6050175>
11. Ledakowicz S, Piddubniak O. The Non-Stationary Heat Transport inside a Shafted Screw Conveyor Filled with Homogeneous Biomass Heated Electrically. *Energies*. 2022; 15:6164. <https://doi.org/10.3390/en15176164>
12. Uglov AA, Sagdedinov OG. On the solution of Stefan problem under volumetric heat generation. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 1992; 18(1):28–31

13. Argyle MD, Bartholomew CH. Heterogeneous Catalyst Deactivation and Regeneration: A Review. *Catalysts*. 2019; 5:145-269. <https://doi.org/10.3390/catal5010145>
14. Crepeau JC, Siahpush A, Spotten B. On the Stefan problem with volumetric energy generation. *Heat and Mass Transfer*. 2009; 46:119. <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0550-5>
15. Alsulami RA, Zope TM, Premnath K., Aljaghtham M. Convectively cooled solidification in phase change materials in different configurations subject to internal heat generation: Quasi-steady analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 221:119849. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119849>
16. Fornarelli F, Camporeale SM, Fortunato B. Simplified theoretical model to predict the melting time of a shell-and-tube LHTES. *Applied Thermal Engineering* 2019; 153:51-57. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.130>
17. Rubtsov NA, Sleptsov SD, Savvinova, NA. Numerical modeling of the single-phase Stefan problem in a layer with transparent and semitransparent boundaries. *J Appl Mech Tech Phys* 2006; 47:377–383. <https://doi.org/10.1007/s10808-006-0065-5>
18. Sazhin SS. *Droplets and sprays: simple models of complex processes*. Springer, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99746-5>
19. Kuznetsov GV, Syrodoy SV, Kostoreva ZhA, et al. Analysis of the influence of the type of heat transfer on the dynamics of the ignition processes of wood biomass particles under complex heating conditions. *Combustion and Flame* 2024; 262:113353. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113353>
20. Kalinchak VV, Chernenko AS, Safronkov AN, Kalugin VV. Two limits of catalyst particle diameter that determine high-temperature heat and mass transfer with active gas mixture. *Fizika arrodispersnykh sistem* 2010; 47:5-15.
21. Zarubin VS, Kuvyrkin GN, Savelieva IYu, Zhuravskiy AV. Conditions of thermal explosion in a plate under convective-radiative heat transfer. *Vestnik MGTU. Ser. Estestvennye nauki* 2020; 6:48-59.
22. Baranovskiy N, Demikhova A. Mathematical modeling of heat transfer in an element of combustible material when exposed to radiation from a forest fire. *Safety* 2019; 5:56. DOI: 10.3390/safety5030056
23. Parot R, Rivera JI, Reszka P, et al. A simplified analytical model for radiation dominated ignition of solid fuels exposed to multiple non-steady heat fluxes. *Combustion and Flame* 2022; 237:111866. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111866>
24. Vidin UV, Kazakov RV, Zlobin VS. The process of heat transfer in two-layered cylindrical body. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018; 20(11-12):93-98. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-93-98>
25. Kotova EV, Klebleev RM, Kudinov VA. Method for determining eigen numbers in heat conduction problems for a cylinder. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(4):71-82. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-4-71-82>
26. Neri M. *Numerical simulation of PCM-based storage units to be integrated into commercial hot water storage tank*. Master thesis. Politecnico di Torino, 2019.
27. Donskoy .G. Mathematical modelling of the agglomeration in a reactive porous medium with variable permeability. *Computational Technologies*. 2020; 25(2):22-35. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.2.003
28. Kartashov EM, Soloviev IA. The stochastic formulation of the Stephan's roblem in hyperbolic representation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(3-4):116-126. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-116-126>
29. Mohammed HI, Talebizadehsardari P, Mahdi JM, Arshad A, Sciacovelli A, Giddings D. Improved melting of latent heat storage via porous medium and uniform Joule heat generationю *Journal of Energy Storage*. 2020; 31:101747. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101747>
30. Shrivastava A, Williams B, Siahpush AS, Savage B, Crepeau J. Numerical and experimental investigation of melting with internal heat generation within cylindrical enclosures. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 67:587-596. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.039>
31. Mallick S, Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – A critical review. *Journal of Energy Storage*. 2023; 62:106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>
32. Crepeau J, Siahpush AS. Solid–liquid phase change driven by internal heat generation. *Comptes Rendus Mecanique*. 2012; 340:471-476. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.03.004>
33. An C, Moreira FC, Su J. Thermal analysis of the melting process in a nuclear fuel rod. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 68:133-143. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.005>

Authors of the publication

Donskoy Igor Gennadyevich – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Thermodynamics in Melentiev Energy Systems Institute

© Донской И.Г.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2309-8461>. Email: donskoy.chem@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 27.03.2024 г.

Отредактировано 03.05.2024 г.

Принято 30.05.2024 г.