

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В СЛОЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЧАСТИЦ И АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Н.Т. Лубченко^{1,2}, С.Е. Якуш¹

¹ *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1*

² *Московский физико-технический институт (ГУ)
Московская область, 141700, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9*

Аннотация

В работе рассматриваются факторы, вносящие неопределенность в величину критического теплового потока при охлаждении однородного тепловыделяющего пористого слоя, находящегося в объеме воды. Исследована глобальная чувствительность критического теплового потока к модельным и физическим параметрам задачи. Проведена калибровка модели путем оптимизации параметров, определяющих функциональные зависимости для относительных фазовых проницаемостей на имеющихся экспериментальных данных. Определены индексы чувствительности критического теплового потока к физическим параметрам (диаметр частиц, пористость, системное давление), построены функции распределения критического теплового потока и определены границы безопасной области, в которой возможно стационарное охлаждение пористого слоя без локального осушения среды. Показано, что граница безопасной области слабо зависит от выбора модели, особенно при высокой скорости подачи воды.

TWO-PHASE FLOW IN A HEAT-GENERATING PARTICLE LAYER MODELING AND UNCERTAINTY QUANTIFICATION OF THE CRITICAL HEAT FLUX

N.T. Lubchenko^{1,2}, S.E. Yakush¹

¹ *Institute for problems in mechanics RAS, Russia, Moscow, 119526*

² *Moscow Institute of Physics and Technology, Russia, Moscow Region, Dolgoprudny, 141700*

In this paper, the factors that contribute to the uncertainty of the critical heat flux for a uniform heat-generating porous debris bed being cooled in water are considered. Global sensitivity of the dryout heat flux to the model and physical parameters of the problem is studied. Model calibration by optimization of parameters in the dependencies of relative permeabilities and passabilities on the void fraction is carried out using the experimental data available. Sensitivity indices of the critical heat flux to the physical parameters (particle diameter, porosity, system pressure) are calculated, and the cumulative distribution function of the critical heat flux is presented. Boundaries of the region where long-term cooling of the debris bed is possible without local dryout are determined. It is shown that boundaries of the safe region depends weakly on the model chosen, especially at high water inflow.

1. ВВЕДЕНИЕ

Многофазные течения в пористых средах играют важную роль в различных областях науки и техники. Наиболее часто рассматривается совместное течение жидкой воды и водяного пара. Например, при анализе безопасности ядерного реактора в случае тяжелой аварии на АЭС представляет интерес охлаждение расплавленного материала активной зоны в большом объеме воды (см., например, обзор в [1]). Расплавленный материал (кориум) при взаимодействии с водяным теплоносителем фрагментируется на частицы диаметром 1÷5 мм, образуя пористый слой с пористостью около 40%. Остаточное тепловыделение вследствие продолжающихся реакций деления в кориуме вызывает испарение воды. Выделяющийся пар фильтруется через пористую среду, затрудняя поступление замещающей воды. При достижении некоторых критических условий в слое происходит блокирование воды потоком пара, что вызывает осушение пористой среды с возможностью ее вторичного плавления.

Критические условия при противонаправленном движении в одномерном приближении рассматривались в работах [2–4], в которых рассматривается жидкости (вниз) и пара (вверх) в плоском горизонтальном пористом слое. В более поздних работах [5, 6] учитывалось не только трение фаз о пористую структуру, но и межфазное трение. Параметры моделей трения определялись исходя из сравнения с экспериментами по измерению сил трения (падения давления) при двухфазной фильтрации, или по непосредственному измерению мощности тепловыделения, приводящей к локальному осушению пористого слоя. Кроме того, в настоящее время методами численного моделирования исследуются многомерные течения [7, 8].

С точки зрения безопасности одновременного удержания тепловыделяющего пористого слоя важно не только определить условия осушения, но и исследовать дисперсию этой величины, вызванную неопределенностью физических характеристик среды и модельных параметров, а также определить нижнюю границу безопасной области.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1. Уравнения фильтрации и модели трения

В простейшей формулировке закон сохранения импульса при однофазной фильтрации описывается обобщенным законом Дарси (уравнение Эргуна [9, 10]), который отличается от классического наличием квадратичного по скорости слагаемого в силе трения:

$$-\frac{dP}{dz} - \rho g = \frac{\mu}{K} j + \frac{\rho}{\eta} |j| j. \quad (1)$$

Соответственно, наряду с проницаемостью вязкой жидкости K , описываемой уравнением Козени–Кармана, в (1) входит коэффициент проницаемости несжимаемой жидкости η :

$$K = \frac{\varepsilon^3 d^2}{150(1-\varepsilon)^2}, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon^3 d}{1.75(1-\varepsilon)}. \quad (3)$$

Для двухфазных течений в уравнение (1) вводятся относительные фазовые проницаемости K_{ri} и η_{ri} , $i = L, G$, а также объемная сила межфазного трения F_{LG} . Это дает

$$-\frac{dP}{dz} - \rho_L g = \frac{\mu_L}{KK_{rL}} j_L + \frac{\rho_L}{\eta\eta_{rL}} |j_L| j_L - \frac{F_{LG}}{1-\alpha}, \quad (4)$$

$$-\frac{dP}{dz} - \rho_G g = \frac{\mu_G}{KK_{rG}} j_G + \frac{\rho_G}{\eta\eta_{rG}} |j_G| j_G + \frac{F_{LG}}{\alpha}. \quad (5)$$

Для относительных фазовых проницаемостей в литературе предложены различные модели. Наиболее распространены степенные зависимости от паросодержания (см., например, [2–4]):

$$K_{rL} = (1-\alpha)^{nL}, \quad \eta_{rL} = (1-\alpha)^{mL}, \quad (6)$$

$$K_{rG} = \alpha^{nG}, \quad \eta_{rG} = \alpha^{mG}.$$

Более простые модели [2–4] не учитывают межфазное трение. Также в данной работе рассматривается модель с учетом межфазного трения, предложенная Шуленбергом и Мюллером [5] (далее – SM), которая использует для него следующее выражение:

$$F_{LG} = 350(1-\alpha)^7 \alpha \frac{\rho_L K}{\eta \sigma} g (\rho_L - \rho_G) \cdot |j_{LG}| j_{LG}, \quad (7)$$

где j_{LG} — относительная межфазная скорость, определяемая как

$$j_{LG} = \frac{j_G}{\alpha} - \frac{j_L}{1-\alpha}. \quad (8)$$

Предполагается, что система находится в состоянии насыщения при некотором системном (внешнем) давлении P_{sys} и температуре $T_{sys} = T_{sat}(P_{sys})$. В качестве теплоносителя используется вода, плотности и вязкости жидкой воды и пара $\rho_L, \rho_G, \mu_L, \mu_G$ в урав-

нениях (4), (5) на линии насыщения определяются полиномиальной аппроксимацией табличных данных.

2.2. Критический тепловой поток

Рассмотрим охлаждение однородного тепловыделяющего пористого слоя высотой H , погруженного в объем воды при температуре насыщения. Слой может покоиться как на непроницаемом основании, так что поступление воды возможно только сверху, так и на проницаемом с заданной скоростью фильтрации на нижней границе j_{LB} (рис. 1). В силу однородности слоя задача рассматривается в одномерном приближении в системе координат, начало которой совпадает с нижней границей слоя, а ось z направлена вертикально вверх. Выделяющееся в среде тепло идет на испарение воды, так что в пористом слое образуются противоположно направленные потоки пара и воды.

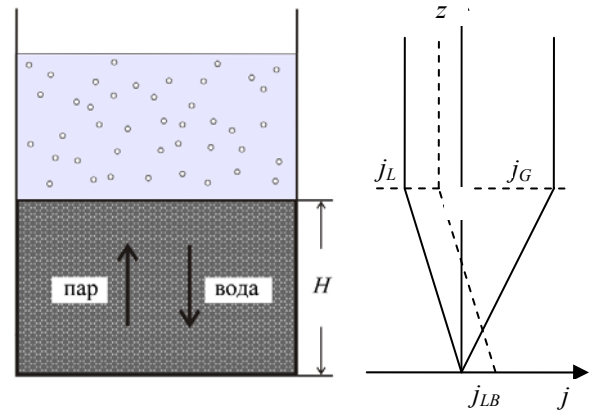


Рис. 1. Одномерная модель

В системе возможно стационарное охлаждение, при котором на любой высоте z от дна выполняется условие равенства массовых потоков воды и пара:

$$j_G \rho_G = (j_{LB} - j_L) \rho_L = \frac{W \rho_p (1-\varepsilon) z}{\Delta H_v}. \quad (9)$$

При стационарном охлаждении в системе устанавливается стационарное распределение паросодержания от высоты. При приближении к верхней границе слоя паросодержание растет. Существует критическая мощность тепловыделения, при превышении которой восходящий поток пара блокирует поступление воды, так что стационарное решение становится невозможно.

Суммарную мощность тепловыделения в плоском слое удобно характеризовать величиной теплового потока через единицу площади его верхней границы, соответственно, максимальная мощность, при которой возможно стационарное охлаждение, характеризуется критическим тепловым потоком (dryout heat flux, DHF).

Критический тепловой поток может быть вычислен из используемой модели фильтрации (2)–(6) (см. [6]). Вычтем уравнение (4) из (5), чтобы избавиться от градиента давления, а затем выразим скорость фильтрации j_L через j_G из (7):

$$(\rho_L - \rho_G)g + \frac{\mu_L}{KK_{rL}} j_{LB} + \frac{\rho_L}{\eta\eta_{rL}} j_{LB}^2 = \left(\frac{\mu_G}{KK_{rG}} + \frac{\mu_L \rho_G}{KK_{rL} \rho_L} \right) j_G + \left(\frac{\rho_G}{\eta\eta_{rG}} + \frac{\rho_G^2}{\eta\eta_{rL} \rho_L} \right) j_G^2. \quad (10)$$

Полученное уравнение является квадратным относительно j_G с коэффициентами, зависящими от α . Оно имеет единственное положительное решение при $0 \leq \alpha \leq 1$. Максимальное значение j_G при всех возможных α определяет наибольшую возможную скорость фильтрации, при которой выполняется условие (9). Тогда максимальный тепловой поток, отводимый с единицы площади верхней границы слоя, равен

$$DNF = \rho_G j_{G,max} \Delta H_v. \quad (11)$$

2.3. Параметры модели

Решение уравнений (10)–(11) позволяет определить зависимость критического теплового потока от физических и модельных параметров задачи.

Физические параметры. Важной характеристикой пористого слоя является средний диаметр частиц. Обычно для количественного описания течения в формулах (2)–(3) используют средний диаметр по Заутеру:

$$d_{Sauter} = \frac{\sum_i d_i^3}{\sum_i d_i^2} = \frac{\sum_i m_i}{\sum_i \frac{m_i}{d_i}} = \frac{\int f(d') d(d')}{\int \frac{f(d')}{d'} d(d')}, \quad (12)$$

где $f(d')$ – массовая функция распределения частиц по диаметру.

Эксперименты по взаимодействию высокотемпературных расплавов с водой показывают, что в результате могут образовываться частицы, размеры которых находятся в диапазоне от 0.2 до 20 мкм [11]. Для среднего по Заутеру диаметра представительный диапазон изменения составляет от 1 до 5 мкм.

Пористость слоя частиц зависит от материала, условий взаимодействия расплава с теплоносителем и других факторов. Например, в [12] приводятся данные по пористости в различных экспериментах от 26% до 41%, хотя в некоторых экспериментах была зафиксирована пористость до 70%. Типичным значением при исследовании осушения пористого слоя является $\varepsilon = 40\%$, поэтому в данной работе принимается диапазон изменения пористости от 35% до 50%.

Важным «скрытым» параметром модели, непосредственно влияющим на объем выделяющегося пара, является системное давление P_{sys} . Обычно при анализе аварий на АЭС рассматривается системное давление 3 атм, что обусловлено наличием контайнмента, задерживающего выход пара в атмосферу. Для анализа неопределенности рассмотрим диапазон от 1 до 4 атм.

Также важным параметром является скорость подачи воды снизу j_{LB} . Рассматривается как случай заливки водой сверху, при котором $j_{LB} = 0$, т.е. пористый слой лежит на непроницаемом основании, так и случай с подачей воды снизу. Анализ неопределенности проводился для значений $j_{LB} = 0.5$ мм/с и 1 мм/с.

Модельные параметры. Выражения для относительных фазовых проницаемостей (6) содержат показатели степени, которые представляют собой параметры математической модели. В работе [2] были предложены значения показателей степени для относительной фазовой проницаемости вязкой жидкости $nG = nL = 3$, и такие же показатели степени для относительной фазовой проницаемости несжимаемой жидкости $mG = mL = 3$. На основании экспериментов [3] были предложены значения $mG = mL = 5$. Позже в работе [4] подвергли критике метод измерения критического теплового потока, и предложили значение $mG = mL = 6$.

В настоящей работе для анализа неопределенности были выбраны следующие диапазоны для модельных параметров (Таблица 1):

Таблица 1

Модельные параметры

	nG	mG	nL	mL
Липински [1]	3	3	3	3
Рид [2]	3	5	3	5
Ху и Теофанус [3]	3	6	3	6
Диапазон для анализа чувствительности	2–4	3–7	2–4	3–7

3. МЕТОД АНАЛИЗА

Решение уравнений (1)–(11) осуществлялось численно при помощи программы Cool1D, которая позволяет рассчитывать характеристики многофазного течения j_G и j_L в зависимости от паросодержания α , либо определять значение критического теплового потока. В качестве входных параметров задаются диаметр частиц, пористость и системное давление, а также параметры модели фильтрации (6).

Анализ чувствительности и неопределенности проводился путем совместного использования Cool1D со специализированным пакетом DAKOTA [13]. Взаимодействие программ проиллюстрировано на рис. 2: комплекс DAKOTA в автоматическом режиме генерировал наборы исходных данных, для каждого из которых Cool1D вычисляла целевую функцию (критический тепловой поток). Результаты расчетов передавались обратно в пакет DAKOTA для статистической обработки.



Рис.2. Схема взаимодействия программ

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Анализ чувствительности по Моррису

Перед проведением оптимизации и анализа чувствительности системы по отношению к физическим параметрам, необходимо выявить, какие параметры наиболее существенно влияют на критический тепловой поток [13, 14]. Для этого рассмотрим описанную выше модель как «черный ящик», входными параметрами

рами которой являются физические и модельные параметры, а выходным параметром — значение

$$DHF = f(d, \varepsilon, P_{sys}, nL, mL, nG, mG). \quad (13)$$

Ранжирование параметров по степени значимости проводится с помощью метода Морриса. Метод позволяет выделить параметры модели, которые являются незначительными, линейными и аддитивными, и нелинейными или взаимодействующими с другими параметрами.

Рассмотрим функцию $f(\mathbf{x})$, где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ — вектор входных параметров, приведенных к интервалу $[0, 1]$. Метод состоит в разбиении каждого параметра на k равноудаленных уровней. Затем генерируется случайная последовательность наборов входных параметров $(x_1, \dots, x_n)_j$, причем любые два последовательных набора различаются в одном параметре. Элементарным эффектом i -го параметра называется следующая разность вперед:

$$d_i = \frac{y(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) - y(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\Delta x_i}, \quad (14)$$

где $y(\mathbf{x})$ — целевая функция. После генерирования выборки из r разностей, вычисляется среднее μ , модифицированное среднее μ^* и дисперсия σ для d_i :

$$\begin{aligned} \mu_i &= \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r d_i^{(j)}, \\ \mu_i^* &= \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |d_i^{(j)}|, \\ \sigma_i &= \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{j=1}^r (d_i^{(j)} - \mu_i)^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Среднее μ_i и модифицированное среднее μ_i^* показывают общий эффект параметра на целевую функцию, в то время как среднеквадратичное отклонение σ_i показывает эффект взаимодействия и нелинейности.

Результаты анализа чувствительности по Моррису критического теплового потока приведены на рис. 3. Из графика следует, что два модельных параметра (показатели степени в фазовой проницаемости вязкой жидкости nL и nG) слабо влияют на целевую функцию. Поэтому они могут зафиксированы на исследуемом интервале (см. [14]) и в дальнейшем не рассматриваться как неопределенные. В соответствии с моделями [2–4] были выбраны значения $nL = 3$, $nG = 3$.

Влияние показателей степени в фазовых проницаемостях весоной жидкости mL и mG сравнимо с влиянием физических параметров, поэтому их значения необходимо выбрать оптимальным образом.

4.2. Калибровка модели

Существенные модельные параметры могут быть оптимизированы в соответствии с имеющимися экспериментальными данными. Существуют эксперименты следующих типов:

1. по определению критического теплового потока в зависимости от диаметра частиц (см. [6]).
2. по определению объемного паросодержания при фильтрации сквозь пористую среду в зависимости от скоростей фильтрации фаз ([15], см. также [6]).

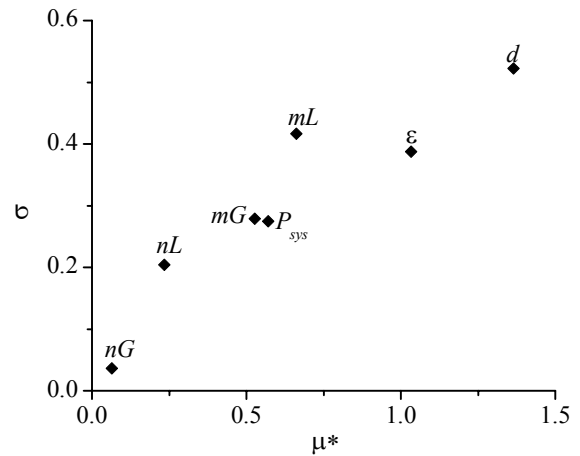


Рис. 3. Эффекты параметров по методу Морриса

Для определения оптимальных параметров mL и mG проводилась минимизация среднеквадратичного отклонения между рассчитанной зависимостью критического теплового потока DHF от диаметра частиц d и экспериментальной зависимостью [6].

Эта оптимизация не дала однозначного результата, что обусловлено следующими особенностями задачи. На рис. 4 приведена зависимость невязки между экспериментальными и теоретическими данными. Можно видеть, что у функции нет четко выраженного минимума во всей рассматриваемой области. Вместо этого, на плоскости mL – mG наблюдается «коридор», в котором невязка минимальна. Таким образом, для оптимизации необходимо привлечь некоторое дополнительное условие.

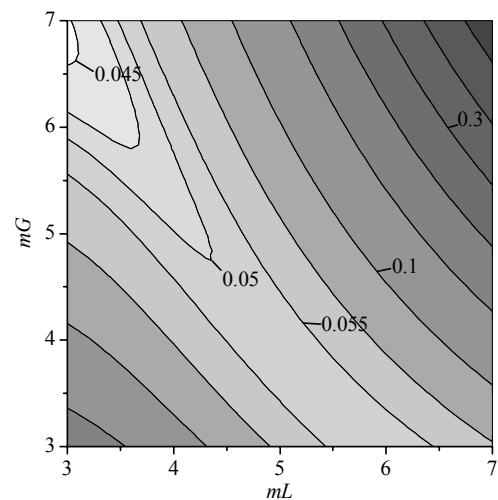


Рис. 4. Зависимость невязки экспериментальных и теоретических данных критического теплового потока от модельных параметров

В качестве такого условия можно принять равенство показателей степени для жидкости и газа $mL = mG$,

как в классических моделях [2–4]. При этом предположении оптимальное значение, полученное в расчетах, составило $mL = mG = 4.5$.

Другой подход состоит в определении модельных параметров с использованием дополнительных экспериментов по фильтрации сквозь пористую среду при неподвижной жидкой фазе (рис. 5). Для определения оптимального параметра mG проводилась минимизация среднеквадратичного отклонения между рассчитанной зависимостью объемной доли пара α от скорости фильтрации j_G и экспериментальной зависимостью [15]. На рис. 5 представлены экспериментальные данные (точки) и результаты расчетов при различных параметрах mG (кривые), включая классические модели [2–4]. Оптимальное значение показателя степени для газа оказалось равным $mG = 5.9$ (сплошная кривая на рис. 5). Отметим, что в качестве целевой функции при оптимизации использовалась сумма дисперсий, вычисленных для обоих диаметров $d = 3.18$ мм и $d = 6.35$ мм, т.е. полученное значение mG является наилучшим для всей совокупности экспериментальных данных [15].

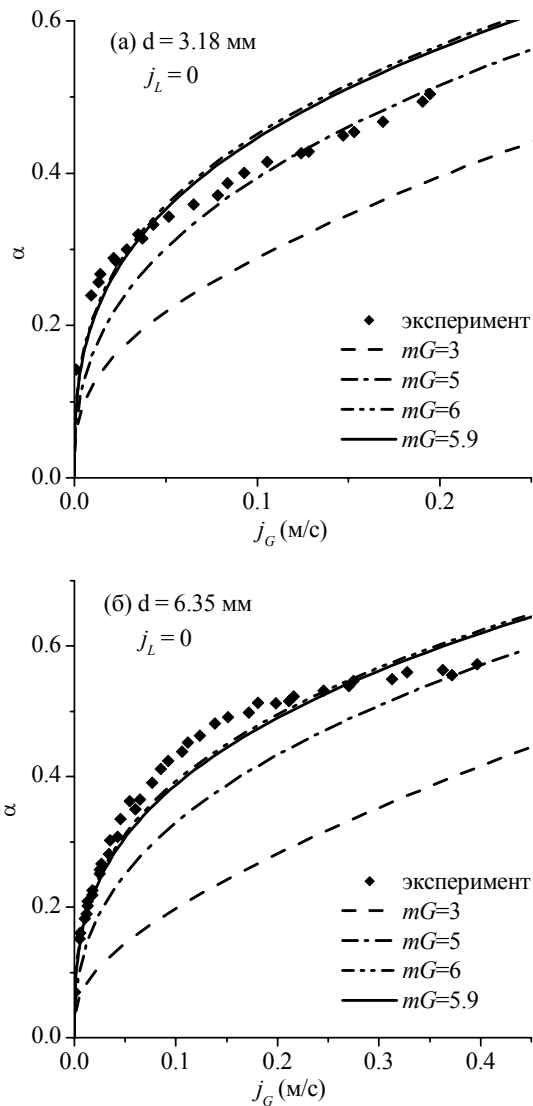


Рис. 5. Зависимость паросодержания от скорости фильтрации газа для различных диаметров частиц

Далее, зафиксировав показатель степени для газа, повторим оптимизационную процедуру на основе данных для критического теплового потока, в результате чего найдем показатель степени для воды $mL = 3.5$.

Полученные оптимальные значения позволяют построить зависимости критического теплового потока от диаметра (рис. 6). Видно, что оба набора оптимальных параметров дают близкие зависимости для критического теплового потока, хотя сами значения показателей степени отличаются весьма существенно.

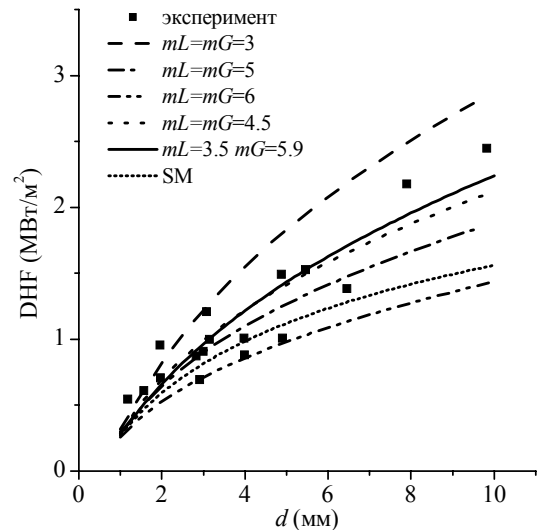


Рис. 6. Зависимость критического теплового потока от диаметра частиц

4.3. Анализ чувствительности к физическим параметрам и анализ неопределенности

Неопределенности в физических характеристиках (d, ϵ, P_{sys}) приводят к тому, что критический тепловой поток также является неопределенным. На рис. 7 приведены распределения плотности вероятности значений критического теплового потока при оптимальных модельных параметрах. Распределение неопределенных параметров было выбрано равномерным в диапазоне, описанном в разделе 2.3.

Проведем анализ вклада различных физических параметров в эту неопределенность на основе метода Соболя. Рассмотрим функцию $f(x)$, где $x = (x_1, \dots, x_n)$, определенную на единичном n -мерном кубе. Метод разложения дисперсии состоит в разложении функции в ряд следующего вида [16]:

$$f = f_0 + \sum_i f_i(x_i) + \sum_{i < j} f_{i,j}(x_i, x_j) + \dots + f_{1,2,\dots,n}(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (16)$$

где

$$f_0 = \int f(x) dx, \quad \int_0^1 f_{i_1, \dots, i_s} dx_{i_p} = 0. \quad (17)$$

Такое разложение единственно (см. доказательство в [17]). Введем определение полной дисперсии

$$D = \int f^2(x) dx - f_0^2, \quad (18)$$

и дисперсий

$$D_{i_1, \dots, i_s} = \int f_{i_1, \dots, i_s}^2 dx_{i_1} \dots dx_{i_s}. \quad (19)$$

Из разложения (14)–(15) следует равенство

$$D = \sum_{s=1}^n \sum_{i_1 < \dots < i_s} D_{i_1, \dots, i_s}. \quad (20)$$

Таким образом, метод позволяет разложить полную дисперсию исследуемой целевой функции на отдельные аддитивные эффекты входных параметров. Слагаемые D_i определяют эффект i -го параметра, D_{ij} определяют эффект взаимодействия параметров i и j , и т.д.

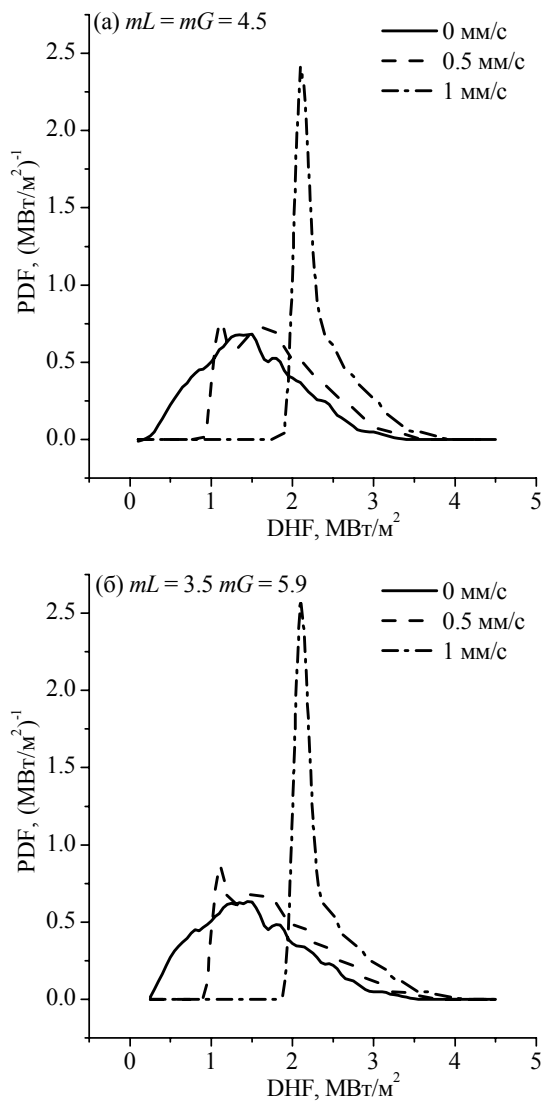


Рис. 7. Плотность вероятности критического теплового потока при (а) $mL = mG = 4.5$; (б) $mL = 3.5, mG = 5.9$

Введенные определения позволяют ввести глобальные индексы чувствительности:

$$S_i = D_i / D, \quad (21)$$

$$S_{i_1, \dots, i_s} = D_{i_1, \dots, i_s} / D,$$

а также полный индекс чувствительности

$$S_{Ti} = \sum S_{i_1, \dots, i_s}, \quad (22)$$

где сумма берется по всем группам i_1, \dots, i_s , содержащим i . Разложение (16) выполнялось в пакете DAKOTA методом стохастической коллокации [13].

Полные индексы чувствительности модели к физическим параметрам при оптимальных модельных параметрах $mL = mG = 4.5$ приведены на рис. 8.

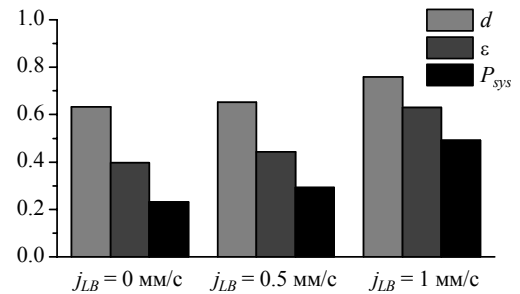


Рис. 8. Индексы чувствительности по Соболю

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при заливке водой сверху наибольшее влияние (более 60% дисперсии) на критический тепловой поток имеет диаметр частиц. Около 40% вносит неопределенность пористости слоя. Вклад неопределенности системного давления минимален (около 20%). При подаче воды снизу влияние всех параметров возрастает, что связано с эффектами взаимодействия параметров. Также стоит отметить существенный рост влияния системного давления. Это вызвано тем, что при высоких скоростях подачи блокируется поступление воды сверху и теплоотвод зависит только от подачи воды снизу. В таком случае существенным оказывается только влияние системного давления на плотность воды.

Наряду с распределением плотности вероятности (рис. 7, 8) представляет интерес кумулятивная (интегральная) функция распределения CDF. На рис. 9 приведены функции распределения при различных значениях модельных параметров. Они позволяют оценить верхнюю границу безопасной области, т.е. тепловой поток, не превышающий критический в 95% случаев — см. Табл. 2.

Таблица 2

Критический тепловой поток при CDF = 5 %

Модель	Критический тепловой поток, MBT/M ²		
	$j_{LB}=0$ мм/с	$j_{LB}=0.5$ мм/с	$j_{LB}=1$ мм/с
$mL = mG = 3$	0.670	1.087	2.033
$mL = mG = 5$	0.567	1.070	2.023
$mL = mG = 6$	0.461	1.054	1.993
$mL = mG = 4.5$	0.583	1.073	2.028
$mL = 3.5, mG = 5.9$	0.547	1.067	2.025
SM	0.508	1.064	2.017

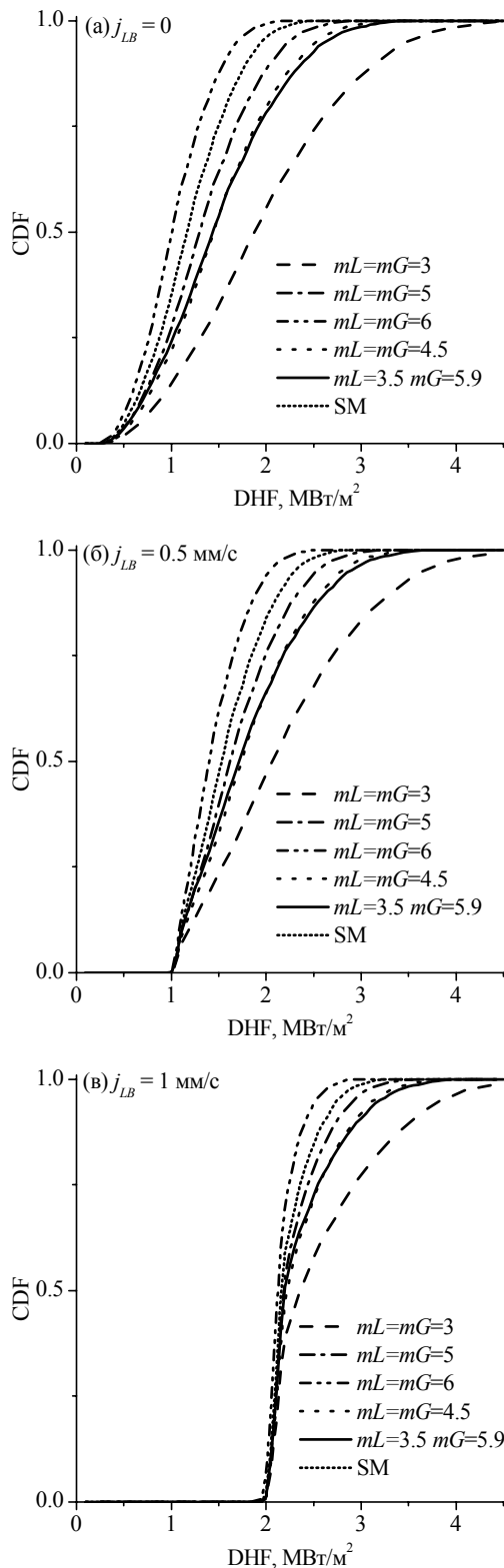


Рис. 9. Функция распределения критического теплового потока при различных скоростях подачи воды снизу: (а) $j_{LB} = 0$ мм/с; (б) $j_{LB} = 0.5$ мм/с; (в) $j_{LB} = 1$ мм/с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В модели критического теплового потока существуют параметры, чувствительность к которым сравнима с чувствительностью к физическим параметрам (mL , mG), и параметры, чувствительность к которым намного меньше чувствительности к физическим па-

раметрам (nL , nG). Для существенных параметров должна быть проведена оптимизация в соответствии с имеющимися экспериментальными данными. Незначительные параметры могут быть зафиксированы в соответствии с теоретическими моделями.

2. Оптимизация параметров mL и mG на экспериментах по зависимости критического теплового потока от диаметра частиц не дала однозначного результата, поскольку целевая функция не имеет четко выраженного глобального минимума.

3. Оптимальные параметры получены двумя способами — в предположении о равенстве показателей степени $mL = mG$, и путем привлечения экспериментов по фильтрации в пористой среде при неподвижной жидкой фазе.

4. Для оптимальных параметров получены значения индексов чувствительности. Более 60% дисперсии критического теплового потока вносит неопределенность диаметра частиц. Около 40% вносит неопределенность пористости слоя. Вклад неопределенности системного давления минимален (около 20%).

5. При заливке водой сверху граница безопасной области соответствует тепловым потокам 0.45–0.67 MW/m^2 .

6. При подаче воды снизу безопасный тепловой поток существенно возрастает. При этом уменьшается зависимость критического теплового потока от модели.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- CDF — кумулятивная функция распределения;
- D — дисперсии функций в методе разложения дисперсии;
- DHF — критический тепловой поток, Вт/м^2 ;
- d — диаметр частиц, м;
- d_{Sauter} — средний диаметр частиц по Заутеру;
- g — ускорение свободного падения, м/с^2 ;
- j — скорость фильтрации, м/с ;
- j_{LB} — скорость фильтрации воды через основание, м/с ;
- j_{LG} — относительная скорость фильтрации воды и пара, м/с ;
- F_{LG} — объемная сила межфазного трения, Н/м^3 ;
- H — толщина тепловыделяющего слоя, м;
- ΔH_v — удельная теплота испарения воды, Дж/кг ;
- K — проницаемость для вязкой жидкости, м^2 ;
- K_r — относительная фазовая проницаемость для вязкой жидкости;
- m — масса пористого вещества, кг;
- mG, mL, nG, nL — показатели степени в относительных фазовых проницаемостях;
- P — давление, Па;
- S_i — индекс чувствительности к i -й переменной;
- S_{Ti} — полный индекс чувствительности к i -й переменной;
- T — температура;
- W — удельная мощность тепловыделения, Вт/кг ;
- z — высота, м;
- α — объемная доля пара;
- ϵ — пористость;
- η — проницаемость для несжимаемой жидкости, м;
- η_r — относительная фазовая проницаемость для несжимаемой жидкости;
- μ_L, μ_G — динамическая вязкость жидкости и газа, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$;
- μ_i, μ_i^* — среднее и модифицированное среднее в методе Морриса;
- ρ — плотность, кг/м^3 ;
- σ_i — среднеквадратичное отклонение в методе Морриса;
- σ — поверхностное натяжение воды.

Индексы:
 G — газ;

L — жидкость;
 p — пористая среда;
 sys — системные параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bürger M., Buck M., Pohlner G. et al. Coolability of particulate beds in severe accidents: Status and remaining uncertainties // *Progress in Nuclear Energy*. — Vol. 52 — Pp. 61–75.
2. Lipinski R. A one dimensional particle bed dryout model // *ANS Trans.* — 1981. — Vol. 38. — Pp. 386–387.
3. Reed A. The effect of channeling on the dryout of heated particulate beds immersed in a liquid pool // PhD thesis — MIT, Cambridge. — 1982.
4. Hu K., Theofanous T. On the measurement and mechanism of dryout in volumetrically heated coarse particle beds // *Int. J. Multiphase Flow*. — 1991. — Vol. 17.
5. Schulenberg T., Müller U. An improved model for two-phase flow through beds of coarse particles // *Int. J. Multiphase Flow*. — 1987. — Vol. 13.
6. Schmidt W. Interfacial drag of two-phase flow in porous media // *Int. J. Multiphase Flow*. — 2007. — Vol. 33. — Pp. 638–657.
7. Yakush S., Kudinov P. Simulation of Ex-Vessel Debris Bed Formation and Coolability in a LWR Severe Accident // OECD/NEA Workshop "Implementation of Severe Accident Management (SAM) Measures". — 2009.
8. Bürger M., Buck M., Schmidt W., Widmann W. Validation and application of the WABE code: Investigations of constitutive laws and 2D effects on debris coolability // *Nucl. Eng. Des.* — 2006. — Vol. 236. — Pp. 2164–2188.
9. Ergun S. Fluid flow through packed columns // *Chem. Eng. Prog.* — 1952. — Vol. 48. — Pp. 89–94.
10. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидродинамика // Недр, М. — 1993.
11. Magallon D. Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments // *Nucl. Eng. Des.* — 2006. — Vol. 236. — Pp. 1998–2009.
12. Lindholm I. et al. Dryout heat flux experiments with deep heterogeneous particle bed // *Nucl. Eng. Des.* — 2006. — Vol. 236. — Pp. 2060–2074.
13. DAKOTA, a multilevel parallel object-oriented framework for design optimization, parameter estimation, uncertainty quantification, and sensitivity analysis. Version 5.0 user's manual // Sandia National Laboratories. — 2010.
14. Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F., Ratto M. Sensitivity analysis in practice // John Wiley & Sons, Ltd. — 2004. — 232 p.
15. Tutu N., Ginsberg T., Chen J. Interfacial drag for two-phase flow through high permeability porous beds // *J. Heat Transf.* — Vol. 160. — 865–870.
16. Соболев И. М. Глобальные показатели чувствительности для изучения нелинейных математических моделей // *Математическое моделирование* — Т. 17. — № 9. — 2005. — С. 43–52.
17. Соболев И. М. Об оценке чувствительности нелинейных математических моделей // *Математическое моделирование* — Т. 2. — № 1. — 1990. — С. 112–118.