

УДК 532.546

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ПОРИСТОГО СЛОЯ И АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

© 2011 г.

С.Е. Якуш<sup>1</sup>, Н.Т. Лубченко<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный

yakush@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Выполнено численное моделирование охлаждения однородного тепловыделяющего пористого слоя, находящегося в объеме воды. С помощью аналитической и численной моделей исследованы критические условия, при которых происходит осушение слоя. Проведено сравнение численных и аналитических решений при использовании различных моделей трения, в том числе с учетом межфазного трения. Рассмотрены факторы, вносящие неопределенность в величину критического теплового потока. Исследована глобальная чувствительность критического теплового потока к модельным и физическим параметрам задачи. Проведена оптимизация модельных параметров, определяющих функциональные зависимости для относительных фазовых проницаемостей на имеющихся экспериментальных данных. Определены индексы чувствительности критического 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.

*Ключевые слова:* пористая среда, кипение, критический тепловой поток, анализ чувствительности, анализ неопределенностей.

### Постановка задачи

В связи с задачами безопасности АЭС при тяжелых авариях важное значение имеет изучение возможности длительного удержания слоя дисперсных частиц (дебрисов) в объеме воды и определение критических условий локального осушения [1]. В настоящем исследовании рассматривается однородный пористый слой (диаметр частиц  $d$ , пористость  $\varepsilon$ ) с распределенным источником тепла  $Q$ , находящийся на непроницаемом основании в объеме воды в состоянии насыщения. Теплосъем обусловлен испарением воды (объемная скорость  $\Gamma$ ), движение жидкой (индекс  $L$ ) и газовой (индекс  $G$ ) фаз в вертикальном направлении описывается уравнениями неразрывности и нелинейной фильтрации:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i \alpha_i}{\partial t} + \frac{\partial j_i}{\partial z} &= \Gamma_i, \\ -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho_i g &= \frac{\mu_i}{KK_{ri}} j_i + \frac{\rho_i}{\eta \eta_{ri}} |j_i| j_i + \frac{F_{ij}}{\varepsilon \alpha_i}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho_i$  – плотность,  $\alpha_i$  – объемная доля,  $j_i$  – скорость фильтрации,  $\Gamma = \Gamma_G = -\Gamma_L = Q/\Delta H_{ev}$ ,  $P$  – давление,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\mu_i$  – вязкость,  $F_{ij}$  – межфазное трение. Параметры фаз и тепло-та испарения  $\Delta H_{ev}$  берутся на линии насыщения

при системном давлении  $P_{sys}$ . Проницаемости вязкой и весомой жидкости

$$K = \frac{\varepsilon^2 d^2}{150(1-\varepsilon)^2}, \quad \eta = \frac{\varepsilon^3 d}{1.75(1-\varepsilon)}. \quad (2)$$

Относительные фазовые проницаемости описываются степенными зависимостями ( $\alpha = \alpha_G$ ):

$$\begin{aligned} K_{rL} &= (1-\alpha)^{nL}, & \eta_{rL} &= (1-\alpha)^{mL}, \\ K_{rG} &= \alpha^{nG}, & \eta_{rG} &= \alpha^{mG}. \end{aligned} \quad (3)$$

Обычно принимаются  $nL = nG = 3$ , показатели степени  $mL, mG$  по разным данным варьируются от 3 до 6, предложены различные модели межфазного трения [2].

Стационарное охлаждение пористого слоя возможно, когда при заданной мощности тепловыделения выполняется условие равенства массовых потоков воды и пара. При превышении критической мощности восходящий поток пара блокирует поступление воды, так что стационарное решение становится невозможно. Для плоского слоя максимальная мощность, при которой возможно стационарное охлаждение, характеризуется критическим тепловым потоком на верхней границе (dryout heat flux, DHF), который может быть получен численным решением системы уравнений (1)–(3), или аналитически [1, 2].

Цель работы состоит в определении зависимости критического теплового потока от характеристик пористой среды, а также в количественном анализе неопределенности DHF вследствие неопределенности диаметра частиц  $d$ , пористости  $\epsilon$  и системного давления  $P_{sys}$ .

**Численное моделирование**

На рис. 1а приведено распределение объемного паросодержания при стационарном охлаждении слоя толщиной 1 м (диаметр частиц 3 мм, пористость 40%) при различной удельной мощности тепловыделения. Паросодержание максимально на верхней границе слоя, где и происходит блокирование поступления воды при превышении критической мощности. На рис. 1б приведены рассчитанные (численно и аналитически) зависимости DHF от диаметра частиц для двух моделей трения (Reed, MTD – см. описание в [2]), в сравнении с экспериментальными данными. Видно, что модель (1)–(3) позволяет получить хорошее согласие с экспериментом при надлежащем выборе параметров модели трения.

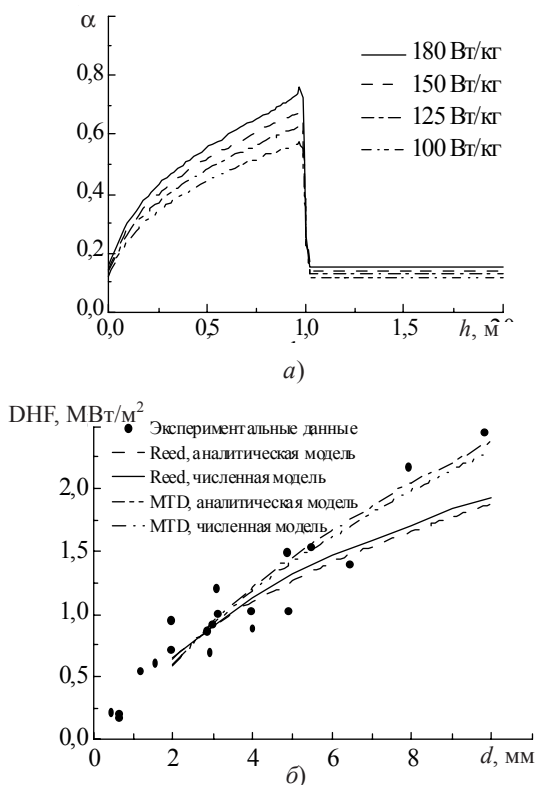


Рис. 1

**Количественный анализ неопределенности**

Модель (1)–(3) содержит ряд физических и модельных параметров. К физическим относятся пористость слоя, средний диаметр частиц и сис-

темное давление. Модельными являются показатели степени в выражениях для относительных фазовых проницаемостей (3). Для анализа чувствительности и неопределенности использовался пакет DAKOTA [3].

Глобальный анализ чувствительности Моррису [3, 4] показал, что два модельных параметра ( $nL$  и  $nG$ ) слабо влияют на DHF и могут быть зафиксированы. Оптимизация имеющихся двух других модельных параметров с использованием экспериментальных данных (см. рис. 1) дала значения  $mL = 3.5$ ,  $mG = 5.9$ , использованные в дальнейших расчетах.

На рис. 2а приведена функция распределения критического теплового потока, обусловленная неопределенностью физических параметров. Разложение дисперсии по Соболю [3–4] показало, что более 50% вклада в дисперсию критического теплового потока вызвано неопределенностью диаметра частиц. На основе кумулятивной функции распределения (рис. 2б) определены границы безопасной области, в которой возможно стационарное охлаждение пористого слоя.

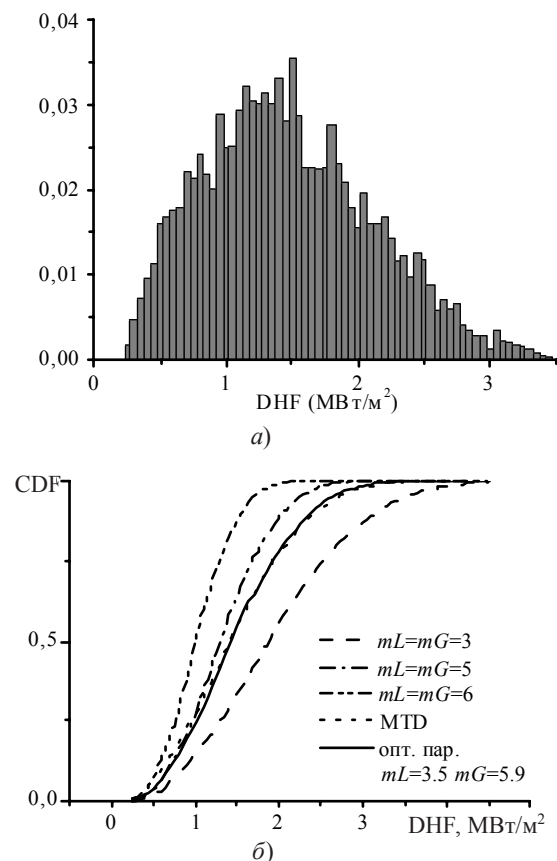


Рис. 2

*Список литературы*

1. Burger M. et al. Coolability of particulate beds in severe accidents: Status and remaining uncertainties //

Progress in Nuclear Energy. 2009. V. 52. P. 61–75.

2. Schmidt W. Interfacial drag of two-phase flow in porous media // Int. J. Multiph. Flow. 2007. V. 33. P. 638–657.

3. 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.

4. Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F., Ratto M. Sensitivity analysis in practice. J. Wiley & Sons, 2004. 232 p.

#### NUMERICAL MODELING OF COOLING OF A POROUS LAYER WITH INTERNAL HEAT RELEASE AND UNCERTAINTY ANALYSIS FOR THE DRYOUT HEAT FLUX

*S.E. Yakush, N.T. Lubchenko*

Numerical simulation of cooling of a heat-releasing porous layer submerged in water is carried out. Using the analytical and numerical models, the critical conditions under which local dryout of the porous medium occurs are studied. Numerical and analytical solutions obtained with different drag models, including those which explicitly account for the interphase drag, are analyzed. The uncertainty factors affecting the dryout heat flux are considered. Global sensitivity analysis is applied to the dryout heat flux as a function of physical and model parameters. Optimization of model parameters determining the functional dependencies of the relative phase permeability is carried out versus the experimental data available. Sensitivity indices are obtained for the dryout heat flux dependence on the physical parameters of the problem (particle diameter, porosity, system pressure). Probability density functions are obtained for the dryout heat flux, and the boundaries of the safe zone in which steady-state cooling of the porous layer is possible without local dryout are constructed.

*Keywords:* porous medium, boiling, critical heat flux, sensitivity analysis, uncertainty analysis.