

УДК 536.2

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ПОРИСТЫХ СРЕД

Якуш С.Е.

ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского» Российской академии наук,

Москва, e-mail: yakush@ipmnet.ru;

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, e-mail: yakush@bmstu.ru

Настоящая статья посвящена анализу возможности охлаждения пористого объема тепловыделяющего материала, погруженного в водяной бассейн. Определены критические условия, при которых происходит локальное осушение пористой среды, что приводит к ухудшению условий теплоотвода и потенциально способно вызвать разогрев и плавление материала. Задача решается численно в двумерной осесимметричной постановке, описание течения в пористой среде производится на основе трехфазной континуальной модели. Представлены результаты расчетов, демонстрирующие структуру течения до и после возникновения осушенной области. Получены зависимости от времени максимальной температуры пористой среды, достигаемой после возникновения осушенной зоны. Показано, что зависимость размеров осушенной зоны от удельной мощности тепловыделения носит линейный характер. Экстраполяцией данной зависимости к нулевому размеру осушенной зоны определена критическая мощность тепловыделения для системных давлений 1,3 и 3 бар. Результаты работы применимы к анализу безопасности атомных энергетических установок при тяжелых авариях.

Ключевые слова: многофазные течения, пористые среды, осушение, критические условия

CRITICAL CONDITIONS OF WATER COOLING OF HEAT-RELEASING POROUS MEDIA

Yakush S.E.

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,

Moscow, e-mail: yakush@ipmnet.ru;

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: yakush@bmstu.ru

This article is devoted to the analysis of conditions under which a porous volume of heat-releasing material immersed in a water pool can be cooled down. Critical conditions are determined for the occurrence of local dryout of the porous medium which deteriorates the heat removal and can potentially cause heating up and melting of the material. The problem is solved numerically in the 2D axisymmetric framework, multiphase flows in the porous medium are described by the interpenetrating continuum model. Results of simulations demonstrating the flow structure prior to and after dryout occurrence are presented. Time dependencies of the maximum temperature of porous medium attained after dryout occurrence are obtained. It is shown that the relative size of dry zone depends linearly upon the specific heating power. By extrapolation of this dependency back to zero size of the dry zone, the critical heating power is determined for the system pressures of 1,3 and 3 bar. The results obtained are relevant to the safety analysis of nuclear power installations in the case of severe accidents.

Keywords: multiphase flows, porous media, dryout, critical conditions

Во многих технических приложениях возникают задачи о безопасном охлаждении тепловыделяющих материалов. Сюда относится определение характеристик охлаждения, а также критических условий, при нарушении которых имеющиеся способы охлаждения не позволяют снимать выделяющееся в материале тепло, вследствие чего происходит разогрев материала сверх заданных пределов.

Примером такой задачи может служить охлаждение тепловыделяющего пористого материала, погруженного в большой объем воды. Данный случай возникает в атомной энергетике в случае тяжелой аварии с плавлением активной зоны реактора, когда высокотемпературный расплав кориума, взаимодействуя с водяным теплоносителем, фрагментируется на капли, образующие

при застывании дисперсные частицы. Выпадающие на поверхность частицы формируют пористую среду, в которой происходит объемное тепловыделение, обусловленное наличием в кориуме продуктов распада. Важной задачей является обеспечение пассивного охлаждения такой среды в объеме воды без возникновения областей локального осушения, поскольку вторичное плавление материала может привести к термическому воздействию на контейнмент реактора и попаданию радиоактивных материалов в окружающую среду [2, 7, 9].

Критические условия охлаждения могут быть получены в аналитическом виде только в одномерной постановке, когда выделяющийся в объеме пар покидает пористый слой на его верхней границе, и через ту же границу в слой поступает замещающая

пар вода. В таком случае, как известно, критические условия получаются решением алгебраического уравнения для скоростей фильтрации фаз в условиях противонаправленных потоков [5, 6, 8]. Более сложные геометрические конфигурации необходимо исследовать численными методами [3, 11, 12].

В настоящей работе рассмотрен пример численного моделирования охлаждения осесимметричного пористого объема, поверхность которого имеет гауссову форму. Получены поля многофазного течения (пар, вода) как для случая успешного охлаждения, когда вода смачивает весь объем пористой среды, так и в случае возникновения локального осушения. Определены критические условия охлаждения для различных размеров частиц пористого материала.

Постановка задачи

Рассматривается объем пористого материала (диаметр частиц D_p , пористость ε) с равномерно распределенным объемным источником тепла $\dot{Q}_w$. Пористый материал находится на непроницаемом основании в большом объеме воды (бассейне) глубиной H . Теплоъем обусловлен испарением воды (объемная скорость испарения Γ), движение жидкой (индекс l) и газовой (индекс v) фаз описывается уравнениями неразрывности и нелинейной фильтрации:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_i \alpha_i)}{\partial t} + \nabla(\rho_i \mathbf{j}_i) = \Gamma_i; \quad (1)$$

$$\nabla P = \rho_i \mathbf{g} - \left(\frac{\mu_i}{KK_{ri}} \mathbf{j}_i + \frac{\rho_i}{\eta \eta_{ri}} |\mathbf{j}_i| \mathbf{j}_i \right) + \mathbf{F}_{ij}; \quad (2)$$

$$\varepsilon \rho_i \alpha_i \frac{d_i h_i}{dt} = \varepsilon \alpha_i \frac{d_i P}{dt} + \quad (3)$$

$$+ \nabla(\varepsilon \alpha_i \lambda_i \nabla T_i) + \Gamma_i (h_i^l - h_i) + \dot{Q}_{si} + \dot{Q}_i^l;$$

$$(1-\varepsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T_s) + \dot{Q}_w - \dot{Q}_{sl} - \dot{Q}_{sv}, \quad (4)$$

здесь α_i – объемная доля i -й фазы, ρ_i и μ_i – плотности и вязкости фаз; $\mathbf{j}_i$ – фильтрационные скорости; $\Gamma_v = -\Gamma_l = \Gamma$ – скорость испарения на единицу объема; P – давление; $\mathbf{g}$ – ускорение силы тяжести; K и η – линейная и квадратичная проницаемости; K_{ri} и η_{ri} – соответствующие относительные фазовые проницаемости; $\mathbf{F}_{ij}$ – силы межфазного трения; T_i , h_i и λ_i – температуры, удельные энтальпии и теплопроводности фаз; $\dot{Q}_{si}$ – мощность теплопередачи от дисперсных частиц в i -ю фазу; $\dot{Q}_i^l$ – мощность межфазного теплообмена на единицу объема; T_s ,

ρ_s и C_s – температура, плотность и удельная теплоемкость материала дисперсных частиц.

Трение двухфазного потока в пористой среде описывается путем введения линейной и квадратичной проницаемостей [4]:

$$K = \frac{\varepsilon^3 D_p^2}{150(1-\varepsilon)^2}; \quad \eta = \frac{\varepsilon^3 D_p}{1,75(1-\varepsilon)}. \quad (5)$$

Замыкающие соотношения для уравнений (1)–(5), задающие законы трения и теплообмена, подробно рассмотрены в работах [11, 12].

Граничные условия задачи формулируются следующим образом. На всех твердых поверхностях (дно и стенки бассейна) задаются условия непротекания и адиабатичности. На верхней границе расчетной области ставится заданное системное давление P_{sys} . Начальная температура в системе считается равной температуре насыщения при этом давлении $T = T_{sat}(P_{sys})$, так что вода у дна бассейна первоначально недогрета вследствие более высокого давления, вызванного гидростатическим давлением столба жидкости.

В данной задаче основной интерес представляет двухфазное течение в пористом объеме, тогда как внешнее течение играет второстепенную роль. Поэтому для описания течения вне пористого объема используется упрощенный подход: вводится некоторая пористая среда, обладающая малым сопротивлением (достигается путем использования большого диаметра частиц и высокой пористости), что позволяет использовать те же уравнения (1)–(5), что и в основном пористом слое, не привлекая полные уравнения двухфазных жидкостей.

Численный метод

Описанная выше математическая модель (1)–(5) реализована программно для двумерного осесимметричного случая. Особенности численной реализации описаны в работах [11, 12]. Используется полностью неявная численная схема первого порядка точности по времени, для пространственных аппроксимаций используется схема MUSCL второго порядка точности. На каждом шаге значения переменных на верхнем временном слое находятся методом Ньютона путем выполнения глобальных итераций. На каждой глобальной итерации сначала решаются уравнения импульса для компонент скорости фаз, а также находятся коэффициенты, связывающие приращения скорости с приращениями давления и объемного паросодержания. Затем осуществляется линеаризация уравнений неразрывности и энергий фаз, после чего решение

полученной системы линейных алгебраических уравнений производится методом PGMRES с предобуславливателем ILUT [1].

Параметры расчетов

Все расчеты проводились при фиксированных размерах бассейна (диаметр 9 м, высота 6 м). Пористая среда занимала объем, ограниченный сверху поверхностью, описываемой гауссовой функцией

$$z_s(r) = H_0 \exp\left(\frac{-r^2}{R_0^2}\right),$$

где $H_0 = 2,5$ м; $R_0 = 1,75$ м (общий объем пористой среды при этом составлял $23,7$ м³). Пористость среды была постоянной и равной 40 %. При плотности материала (корнума) $\rho_s = 8285,1$ кг/м³, при данных параметрах масса тепловыделяющей среды составляет 120 т. Считается, что пористая среда состоит из частиц со средним диаметром $D_p = 2$ мм.

В проведенных расчетах главными варьируемыми параметрами были объемная мощность тепловыделения

$$\dot{Q}_w = W \rho_s (1 - \varepsilon),$$

где W – удельная мощность тепловыделения на единицу массы материала) и давление на верхней границе расчетной области P_{sys} . Начальная температура воды в бассейне принималась равной температуре насыщения при давлении P_{sys} , температура пористой среды бралась равной температуре насыщения при локальном давлении (превышающем P_{sys} на величину гидростатического

давления). Расчеты проводились на интервале времени 3 часа.

Результаты расчета

Рассмотрим сначала случай, когда скорость тепловыделения относительно невелика, так что охлаждение пористой среды происходит без ее осушения. На рис. 1 показано распределение объемного паросодержания и поля скоростей пара (слева) и жидкости (справа) в момент времени $t = 3600$ с для случая $P_{sys} = 1,3$ бар, $W = 100$ Вт/кг (при этом $\dot{Q}_w = 0,5$ МВт/м³). Отметим, что в отсутствие осушения стационарные распределения параметров устанавливаются в течение нескольких первых минут; тем не менее, расчеты проводились в течение часа физического времени, чтобы убедиться в том, что не происходит медленного изменения паросодержания, приводящего к возникновению осушенных зон.

Из рис. 1 видно, что максимальное паросодержание достигается в верхней части пористого объема, при этом максимальная объемная доля пара составляет 80 %. Выделяющийся пар движется практически вертикально, образуя над вершиной пористого объема нагретую струю. Видно также, что в окружающем пространстве развивается циркуляционное течение жидкости. Важно отметить, что внутри пористого объема течение жидкости происходит снизу вверх, хотя и с малыми скоростями. Следовательно, в двумерном (и пространственном) случае имеет место не противоток пара и воды (как в случае плоского слоя), а их сонаправленное течение.

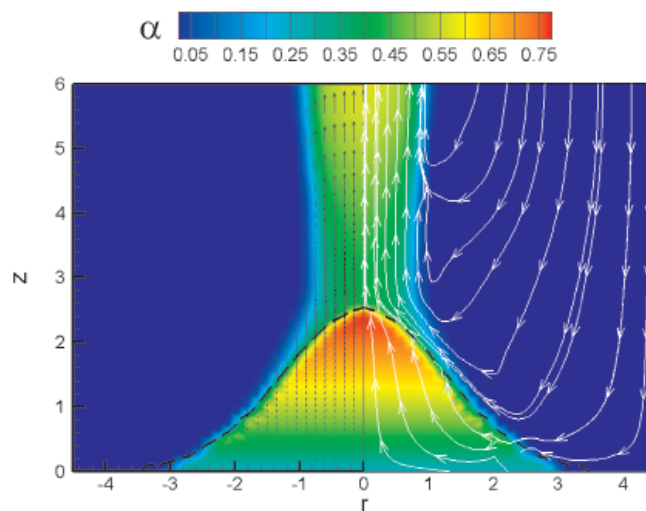


Рис. 1. Стационарное распределение паросодержания в пористой среде при объемной мощности тепловыделения $0,5$ МВт/м³; векторами показана скорость газа (слева), линиями тока – скорость жидкости (справа).

Граница тепловыделяющей среды показана штриховой линией

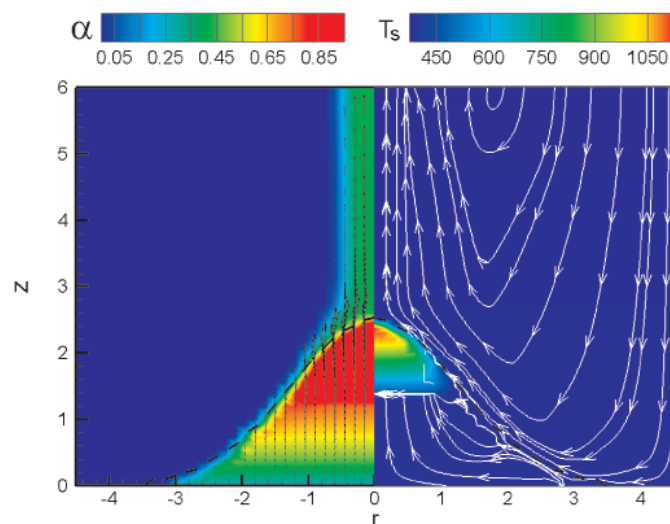


Рис. 2. Распределение паросодержания (слева) и температуры пористой среды при объемной мощности тепловыделения $1,24 \text{ МВт/м}^3$; векторами показана скорость газа (слева), линиями тока – скорость жидкости (справа). Граница тепловыделяющей среды показана штриховой линией

Рассмотрим теперь случаи, когда в пористом объеме возникает осушенная область. На рис. 2 представлены распределения паросодержания (слева) и температуры пористой среды (справа) при удельной мощности тепловыделения при тепловыделении, превышающем критический порог: представленные результаты соответствуют моменту времени $t = 3$ часа для случая $P_{\text{sys}} = 3$ бар, $W = 250 \text{ Вт/кг}$ (при этом $\dot{Q}_w = 1,24 \text{ МВт/м}^3$). Отметим, что при увеличении давления осушение пористой среды возникает при более высоких мощностях тепловыделения, поскольку выделяющийся пар обладает большей плотностью и меньшим удельным объемом, что облегчает его истечение из пористой среды и замещение водой.

Из рис. 2 следует, что осушение происходит в верхней части пористого объема, при этом движение пара носит практически вертикальный характер. Максимальный разогрев частиц составляет 1200 К , что, однако, недостаточно для вторичного плавления материала, при этом максимум температуры достигается в верхней точке пористого объема. Линии тока жидкости показывают, что в нижней части пористой среды направление течения жидкости по-прежнему совпадает с направлением течения пара, так что условия противотока фаз не возникают нигде.

На рис. 4 показаны зависимости относительной высоты осушенной зоны

$$\xi = \frac{Z_t - Z_b}{H_0},$$

(где Z_t и Z_b – координаты верхней и нижней границ осушенной области на оси симметрии) от удельной мощности тепловыделения W , полученные в расчетах при системном давлении $P_{\text{sys}} = 1,3$ и 3 бар. Для каждого давления расчетные точки хорошо аппроксимируются линейной функцией. Экстраполяция данной линейной функции к нулевому значению ξ дает критическое значение мощности тепловыделения, составляющее для указанных давлений $W_0 = 104,2$ и $133,7 \text{ Вт/кг}$ соответственно (при этом объемная мощность тепловыделения равна $0,518$ и $0,665 \text{ МВт/м}^3$).

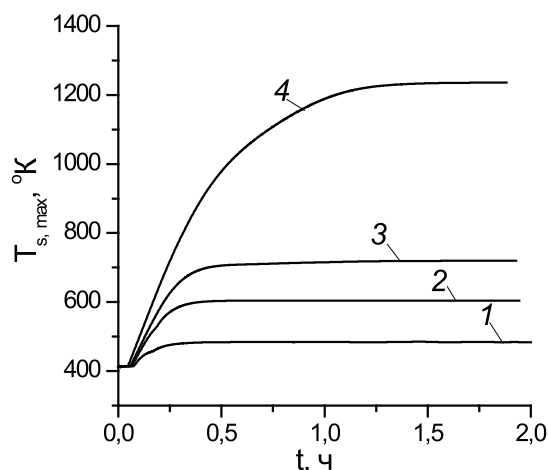


Рис. 3. Зависимость от времени максимальной температуры пористой среды при системном давлении 3 бар для удельных мощностей тепловыделения $W = 160 \text{ Вт/кг}$ (1), 180 Вт/кг (2), 200 Вт/кг (3) и 250 Вт/кг (4)

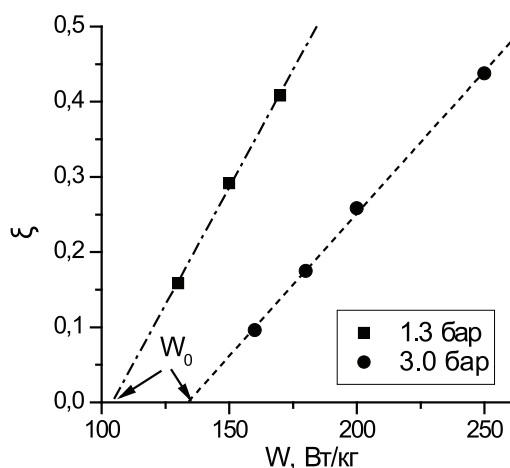


Рис. 4. Зависимость относительного размера осушенной зоны от удельной мощности тепловыделения для различных системных давлений. Стрелками показаны критические значения мощности

Заключение

Расчеты показывают, что для двумерных конфигураций осушенная область возникает в верхней части пористого слоя, что значительно отличается от одномерного случая, когда осушение начинается с «захлебывания» противоположно направленного потока воды и пара на верхней границе, после чего первоначальное пересыхание возникает в нижней части пористого слоя. Дальнейшие численные расчеты будут посвящены построению карты режимов, которая будет охватывать практически значимые диапазоны по свойствам пористой среды (диаметр частиц, пористость, давление), размерам и форме пористого объема.

Список литературы

1. Саад Ю. Итерационные методы для разреженных линейных систем: Учеб. пособие. – В 2-х томах. Том 1. – М.: Изд-во Московского университета, 2013. – 344 с.
2. Bürger M., Buck M., Pohlner G., Rahman S., Kulenovic R., Fichot F., Ma W., Miettinen J., Lindholm I., Atkhen K. Coolability of Particulate Beds in Severe Accidents: Status and Remaining Uncertainties // Progress in Nuclear Energy. – 2010. – Vol. 52, – P. 61–75.
3. 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 // Nuclear Engineering and Design. – 2006. – Vol. 236. – P. 2164–2188.
4. Ergün S. Fluid Flow through Packed Columns // Chemical Engineering Progress. – 1952. – Vol. 48. – P. 8994.
5. Hu K., Theofanous T. On the Measurement and Mechanism of Dryout in Volumetrically Heated Coarse Particle Beds // Int. J. Multiphase Flow. – 1991. – Vol. 17, № 4. – P. 519–532.
6. Lipinski R.A. One Dimensional Particle Bed Dryout Model // ANS Trans. – 1981. – Vol. 38. – P. 386–387.

7. Pohlner G., Buck M., Meignen R., Kudinov P., Ma W., Polidoro F., Takasuo E. Analyses on Ex-vessel Debris Formation and Coolability in SARNET Frame // Annals of Nuclear Energy. – 2014. – Vol. 74. – P. 50–57.
8. Reed A. The Effect Of Channeling on the Dryout of Heated Particulate Beds Immersed in a Liquid Pool // PhD Thesis, MIT, Cambridge. – 1982.
9. Schäfer P., Groll M., and Kulenovic R. Basic Investigations on Debris Bed Cooling // Nuclear Engineering and Design. – 2006. – Vol. 236. – P. 21042116.
10. Song J.H., Kim J.H., Hong S.W., Min B.T., Kim H.D. The Effect of Corium Composition and Interaction Vessel Geometry on the Prototypic Steam Explosion // Annals of Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 33. – P. 1433–1451.
11. Yakush S.E., Kudinov P., Lubchenko N.T. Risk and Uncertainty Quantification in Debris Bed Coolability // Proc. 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics. – 2013. – Paper NURETH15-283, 13 pp.
12. Yakush S.E., Kudinov P.A. Model for Prediction of Maximum Post-Dryout Temperature in Decay-Heated Debris Bed // Proc. 22th International Conference on Nuclear Engineering ICONE22, Prague, Czech Republic, July 7–11, 2014. – Paper ICONE22-31214, 11 p.

References

1. Saad Yu. Iteratsionniye metodi dlya razrezhennikh lineinikh sistem: Uchebnoye posobie. Tom 1. M.: Izdatelstvo Moskovskogo Universiteta, 2013. 344 p.
2. Bürger M., Buck M., Pohlner G., Rahman S., Kulenovic R., Fichot F., Ma W., Miettinen J., Lindholm I., Atkhen K. Coolability of Particulate Beds in Severe Accidents: Status and Remaining Uncertainties. Progress in Nuclear Energy. 2010. Vol. 52. pp. 61–75.
3. 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 // Nuclear Engineering and Design. 2006. Vol. 236. pp. 2164–2188.
4. Ergün S. Fluid Flow through Packed Columns // Chemical Engineering Progress. 1952. Vol. 48. pp. 8994.
5. Hu K., Theofanous T. On the Measurement and Mechanism of Dryout in Volumetrically Heated Coarse Particle Beds // Int. J. Multiphase Flow. 1991. Vol. 17. no. 4. pp. 519–532.
6. Lipinski R.A. One Dimensional Particle Bed Dryout Model // ANS Trans. 1981. Vol. 38. pp. 386–387.
7. Pohlner G., Buck M., Meignen R., Kudinov P., Ma W., Polidoro F., Takasuo E. Analyses on Ex-vessel Debris Formation and Coolability in SARNET Frame // Annals of Nuclear Energy. 2014. Vol. 74. pp. 50–57.
8. Reed, A. The Effect Of Channeling on the Dryout of Heated Particulate Beds Immersed in a Liquid Pool // PhD Thesis, MIT, Cambridge. 1982.
9. Schäfer P., Groll M., and Kulenovic R. Basic Investigations on Debris Bed Cooling // Nuclear Engineering and Design. 2006. Vol. 236. pp. 21042116.
10. Song J.H., Kim J.H., Hong S.W., Min B.T., Kim H.D. The Effect of Corium Composition and Interaction Vessel Geometry on the Prototypic Steam Explosion // Annals of Nuclear Energy. 2006. Vol. 33. pp. 1433–1451.
11. Yakush S.E., Kudinov P., Lubchenko N.T. Risk and Uncertainty Quantification in Debris Bed Coolability // Proc. 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics (NURETH-15). 2013. Paper NURETH15-283. 13 p.
12. Yakush S.E., Kudinov P.A. Model for Prediction of Maximum Post-Dryout Temperature in Decay-Heated Debris Bed // Proc. 22th International Conference on Nuclear Engineering ICONE22, Prague, Czech Republic, July 7–11, 2014. Paper ICONE22-31214. 11 p.