

11. Жуков Ю.М. Возможность использования скелетных таблиц для трубы при расчете кризиса теплоотдачи в пучках стержней водоохлаждаемых реакторов. — Атомная энергия, 1994, т. 77, вып. 2, с. 108—111.
12. Сергеев В.В. Обобщение данных по кризису теплообмена при кипении воды в трубах и стержневых сборках. — В сб.: Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР, 1998, т. 2. Обнинск, с. 330—337.
13. Lee M., Liao L. An assessment of the critical heat flux approaches of thermalhydraulic system analysis codes using bundl data from the heat-transfer research facility. — Nucl. Technol., 1994, v. 105, № 2, p. 216—230.
14. Ефанов А.Д., Кириллов П.Л., Смогалева И.П. и др. Теплогидравлическая база знаний для решения задач анализа и управления тяжелыми авариями. — В сб.: Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР, 1998, т. 2, с. 144—149.
15. Бобков В.П., Смогалева И.П. О точности описания различными кодами критических тепловых потоков в пучках. — Теплоэнергетика, 2001, № 3, с. 21—28.
16. Бобков В.П. Метод расчета критического теплового потока в смешанных сборках стержней. — Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 3, с. 25—28.

Поступило в Редакцию 8.02.02

УДК 621.039.54.001.63

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ И ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМАХ КИПЕНИЯ В ЗАСЫПКЕ ШАРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

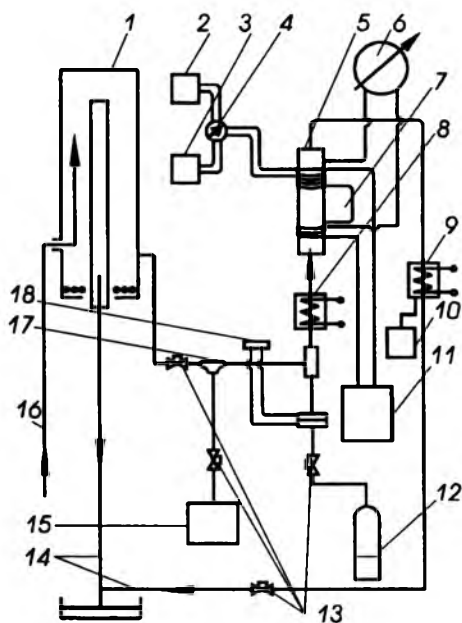
*Лозовецкий В.В. (Моск. гос. ун-т леса),
Смирнов Л.П. (ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Теплообмен при различных режимах кипения в засыпке шаровых элементов, в частности, микро- и макротрещинах диаметром от 2 до 60 мм привлекает в последнее время внимание в связи с возможностью их использования в ВВЭР [1, 2].

В настоящей работе исследована теплоотдача при пузырьковом и переходном режимах кипения в засыпке шаровых элементов из свинца диаметром 3 мм. Схема установки показана на рис. 1. Она состояла из рабочего участка, изготовленного из эбонита, что позволяло достигать температуры шарового элемента в опытах до 300 °С. Внутренний диаметр рабочего участка 30 мм, длина 75 мм. В его нижней части была установлена решетка с семью закрытыми сеткой с высокой пористостью отверстиями диаметром 5 мм, над которой располагалась засыпка шаровых элементов. Для ее фиксации шаровые элементы сверху прижимались аналогичной по конструкции решеткой.

Вода в рабочий участок поступала из напорного бака с переливом, проходя через теплообменник, в котором она подогревалась до температуры на 2—4 °С

Р и с. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — напорный бак с переливом; 2, 3 — потенциометр КСП-4 и ПП-63 соответственно; 4 — переключатель термопар; 5 — рабочий участок; 6 — пьезометры; 7 — индуктор; 8 — теплообменник; 9 — холодильник; 10 — емкость; 11 — генератор УЗГ-4; 12 — баллон; 13 — вентили; 14 — слив в канализацию; 15 — термостат; 16 — подвод от водопровода; 17 — тройник; 18 — наклонный микроманометр



Р и с. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — напорный бак с переливом; 2, 3 — потенциометр КСП-4 и ПП-63 соответственно; 4 — переключатель термопар; 5 — рабочий участок; 6 — пьезометры; 7 — индуктор; 8 — теплообменник; 9 — холодильник; 10 — емкость; 11 — генератор УЗГ-4; 12 — баллон; 13 — вентили; 14 — слив в канализацию; 15 — термостат; 16 — подвод от водопровода; 17 — тройник; 18 — наклонный микроманометр

ниже температуры насыщения. В рабочем участке вода нагревалась до температуры насыщения за счет теплообмена с элементами шаровой засыпки. Шаровая засыпка нагревалась током высокой или ультразвуковой частоты индуктора, питаемого от системы высокочастотного генератора тока или ультразвукового генератора типа УЗГ-4. Испаренная вода конденсировалась в холодильнике змеевикового типа и собиралась в емкости. Постоянный расход воды обеспечивался за счет постоянства уровня жидкости в напорном баке, его изменение — изменением этого уровня.

Эксперименты проводили при атмосферном давлении. Температуру воды измеряли с помощью хромель-копелевых термопар диаметром 0,1 мм, установленных на входе и выходе рабочего участка. В трех сечениях по высоте рабочего участка в шаровых элементах по радиусу было установлено по три термопары, по показаниям которых определяли среднюю температуру поверхности шаровых элементов T_w . Э.д.с. термопар измеряли с помощью приборов КСП-1, 8 или ПП-63-9. Удельный тепловой поток рассчитывали по количеству испарившейся воды по формуле

$$q = r m_*,$$

где r — удельная теплота парообразования, Дж/кг; m_* — количество испарившейся воды, кг/с.

Количество испарившейся воды в единицу времени определяли по количеству воды в емкости за соответствующий промежуток времени. Такой метод определения теплового потока точен, так как количество тепла, идущего на подогрев воды до температуры насыщения, не превышало 20% вызывающего ее испарение. Погрешность определения теплового потока таким способом не превышала 17%, в большинстве экспериментов она составляла 1,5—10%.

Эксперименты были проведены в диапазоне температуры воды 96—100 °С, давления $\approx 10^5$ Па, температуры поверхности шаровых элементов 101,5—150,9 °С, удельного теплового потока $1,16 \cdot 10^4$ — $2 \cdot 10^5$ Вт/м², расхода воды $(0,3$ — $10,6) \cdot 10^{-3}$ кг/с, массового паросодержания 1,74—58,5%, рассчитанного как отношение массы воды в канале к массе образующегося пара в 1 с.

Обработка данных показала, что при малой разности температуры поверхности шаровых элементов и насыщения воды $\Delta T_s = T_w - T_s$ с ростом удельного теплового потока коэффициент теплоотдачи увеличивался. Температуру поверхности определяли по формуле

$$T_w = \sum_{i=1}^n T_{w_i} / n,$$

где $n = 9$ — число шаровых элементов, в которых были установлены термопары.

Коэффициент теплоотдачи с ростом плотности теплового потока увеличивался до достижения $(1,09$ — $1,1) \cdot 10^5$ Вт/м². Можно предположить, что до этих значений удельного теплового потока режим кипения в шаровой засыпке пузырьковый.

Анализ величин, влияющих на кипение в этой области и в переходном режиме, показал, что коэффициент теплоотдачи может быть выражен соотношением, содержащим ряд безразмерных комплексов:

$$Nu_* = f \left[d_{ш} / \sqrt{\sigma / g (\rho_* - \rho_n)}; \quad r / (C_{ж} - \Delta T_s); \quad Pr_*; \quad \lambda_{ж} / \lambda_* \right],$$

где $Nu_* = \alpha d_{ш} / \lambda_*$ — критерий Нуссельта; $d_{ш}$ — диаметр шарового элемента; α — коэффициент теплоотдачи; σ — коэффициент поверхностного натяжения воды; g — ускорение свободного падения; ρ_* , ρ_n — плотности воды и пара соответственно; $C_{ж}$ — эквивалентная теплоемкость воды; Pr_* — критерий Прандтля; λ_* — теплопроводность воды; $\lambda_{ж}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности воды.

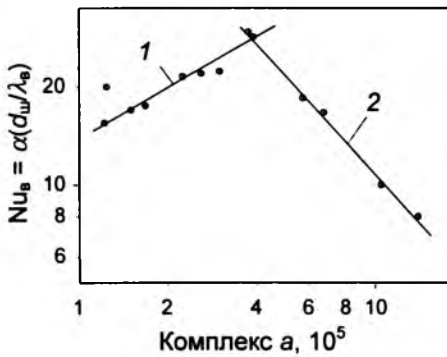
Эквивалентную теплоемкость и эквивалентный коэффициент теплопроводности определяли по формулам

$$C_{ж} = \varepsilon C_* + (1 - \varepsilon) C_{ш}; \quad \lambda_{ж} = \varepsilon \lambda_* + (1 - \varepsilon) \lambda_{ш},$$

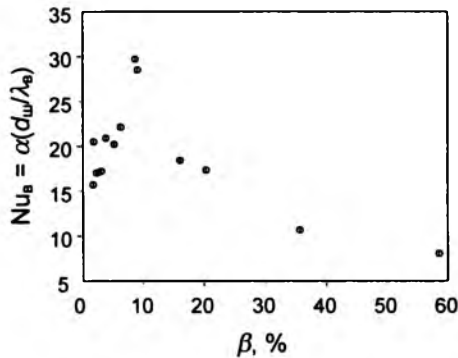
где ε — пористость засыпки шаровых элементов; C_* — теплоемкость воды; $C_{ш}$, $\lambda_{ш}$ — теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала шарового элемента соответственно.

Физические свойства воды определяли при температуре насыщения, плотности пара — при $T = (T_w + T_s) / 2$.

Данные для пузырькового режима кипения, представленные на рис. 2, описываются соотношением



Р и с. 2. Зависимость числа Нуссельта от удельного теплового потока: 1, 2 — пузырьковый и переходный режим соответственно



Р и с. 3. Зависимость числа Нуссельта от паросодержания

теплоотдачи от плотности теплового потока постепенно становится несущественной и обнаруживается его зависимость от скорости циркуляции. При развитом кипении, когда вблизи поверхности шарового элемента содержание пара значительно, высокая интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении определяется малым термическим сопротивлением жидкостной пленки на теплоотдающей поверхности. Эффективная толщина пленки жидкости снижается по мере увеличения тепловой нагрузки, что приводит к увеличению интенсивности теплоотдачи.

Из рис. 3 следует, что при паросодержании 8,6%, удельном тепловом потоке $1,1 \cdot 10^5$ Вт/м² отмечается максимум теплоотдачи. При дальнейшем росте паросодержания коэффициент теплоотдачи уменьшается и достигает своего минимального значения, соответствующего $Nu_B = 8,06$ при $\beta = 58,6\%$. Снижение коэффициента теплоотдачи объясняется сливанием пузырьков пара, которые, образуя большие паровые объемы, затрудняют доступ к теплоотдающей поверхности. В отдельных областях возникали сухие пятна, их число и плотность возрастают по мере увеличения температуры поверхности и соответственно разности температуры поверхности шаровых элементов и насыщения воды и массового паросодержания. Эти участки исключаются из теплообмена с жидкой средой, так как теплоотдача к пару существенно менее интенсивна.

Уменьшение теплоотдачи с ростом удельного теплового потока соответствует переходному режиму кипения и описывается критериальной зависимостью

$$Nu_B = 8,93 \cdot 10^6 \left[\frac{d_w}{\sqrt{\sigma / g(\rho_s - \rho_n)}} \right]^{-0,884} \left[\frac{r}{C_{3s} \Delta T_s} \right]^{n_1} Pr_s^{-2,69} \left(\frac{\lambda_{3s}}{\lambda_s} \right)^{m_1}, \quad (2)$$

где $m_1 = -1,28 \left[d_w / \sqrt{\sigma / g(\rho_s - \rho_n)} \right]^{0,6}$; $n_1 = -0,58 Pr_s^{0,3}$.

$$Nu_B = 0,03 \left[\frac{d_w}{\sqrt{\sigma / g(\rho_s - \rho_n)}} \right]^{0,48} \left[\frac{r}{C_{3s} \Delta T_s} \right]^n \times Pr_s^{1,79} \left(\frac{\lambda_{3s}}{\lambda_s} \right)^m, \quad (1)$$

где $m = 0,69 \left[\frac{d_w}{\sqrt{\sigma / g(\rho_s - \rho_n)}} \right]^{0,6}$; $n = -0,313 Pr_s^{0,3}$.

Повышение коэффициента теплоотдачи с увеличением удельного теплового потока вызвано ростом центров парообразования на поверхности шаровых элементов и скорости паровой среды, связанной с ростом паросодержания (рис. 3). При кипении жидкости в условиях вынужденного движения в шаровой засыпке перенос тепла от поверхности нагрева в ядро осуществляется паром, образовавшимся на ней, и конвекцией жидкости. Количество тепла, переносимого паром, зависит, в основном, от плотности теплового потока на поверхности сферы. Количество тепла, переносимого путем конвекции жидкости, в случае малого паросодержания определяется скоростью циркуляции.

В зависимости от соотношения плотности теплового потока и скорости циркуляции вклад кипения и конвективного переноса в теплоотдачу будет неодинаковым. При малой скорости циркуляции коэффициент теплоотдачи не зависит от скорости, определяется, в основном, кипением и с увеличением плотности теплового потока возрастает (см. рис. 2). С повышением скорости циркуляции зависимость коэффициента теплоотдачи

По результатам исследований можно заключить, что в исследованном диапазоне изменения плотности теплового потока наблюдается монотонный рост теплового потока с увеличением температуры насыщения, который немного замедляется в области больших значений этого параметра. Критерияльные уравнения (1), (2) удовлетворительно описывают данные о теплопередаче для областей пузырькового и переходного режимов кипения в шаровой засыпке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Хрулев А.А. и др. Перспективы применения микротвэлов в ВВЭР. — Атомная энергия, 1999, т. 86, вып. 6, с. 443—449.
2. Хлопкин Н.С., Двойнишников Е.А., Филиппов Г.А., Богоявленский Р.Г. Перспективы использования микротвэльного топлива для маневренной энергоустановки АТЭС АЭС с водопаровым корпусным ядерным реактором проточного типа. Тезисы Межд. семинара «Малая энергетика. Итоги и перспективы». 10—11 октября 2001 г. М., 2001. 119 с.

Поступило в Редакцию 27.09.02

УДК 539.12.08

ОЦЕНКА ДОЗЫ ПРИРОДНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕТРОСПЕКТИВНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ДОЗИМЕТРИИ

Орлов М.Ю., Степаненко В.Ф. (Мед. радиологический научный центр РАМН),
Хоши М., Такада Дж. (Научно-исследовательский институт ядерной медицины
и биологии Университета г. Хиросимы, Япония)

При разработке и использовании метода ретроспективной люминесцентной дозиметрии для измерения накопленной дозы облучения, например, на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению после ядерных аварий, одна из проблем связана с определением дозы природного излучения, поглощенной в кристаллах кварца из керамических образцов или кирпичей за период между моментом измерения и последним высокотемпературным отжигом материала. В работах, посвященных ретроспективной люминесцентной дозиметрии, обычно определяется годовая фоновая доза. Как правило, этот период равен нескольким десятилетиям лет и определяется с относительно небольшой погрешностью (несколько процентов) по записанной в каких-либо документах истории здания или по другим источникам. Само по себе фоновое облучение кристаллов кварца обусловлено космическим излучением, β - и γ -излучением природных радионуклидов. Вклад α -излучения исключается при протравливании кристаллов кварца, извлеченных из образцов.

Годовая фоновая доза была оценена в работах [1—9] для образцов, отобранных в разных районах земного шара — шт. Невада, США, Семипалатинская обл., Казахстан, Хиросима и Нагасаки, Япония, Бавария, Германия, Брянская и Челябинская обл., Россия.

Как видно из рис. 1, все значения годовой фоновой дозы, измеренные на удаленных одна от другой территориях, принадлежат одной статистической вы-

Р и с. 1. Статистическое распределение измеренной фоновой годовой дозы, представленное в обычном (а) и специальном масштабе (б): 1 — измеренные значения [1—9]; 2 — нормальное распределение с $D_{cp} = 3,55$ мГр/год и стандартным отклонением 0,67; 3 — среднее значение, равное $3,55 \pm 0,08$ мГр/год ($N = 64$)

