

*В.В. Лозовецкий<sup>1</sup>, Ф.В. Пелевин<sup>2</sup>, А.В. Пономарев<sup>2</sup>*

Московский государственный университет леса, Россия (1)  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия (2)

## ТЕПЛООБМЕН В ШАРОВЫХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРИ КИПЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в засыпках шаровых тепло выделяющих элементов (твэлах) применительно к активным зонам ядерных реакторов с шаровыми топливными тепло выделяющими элементами.

Дано описание термодинамической установки, методики препарирования моделей, измерения и обработки экспериментальных данных.

Установлены пузырьковый и переходный режимы кипения в тепло выделяющих элементах.

Получены критериальные зависимости, которые удовлетворительно описывают данные по теплоотдаче, соответственно, для областей пузырькового и переходного режимов кипения в шаровой засыпке.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Шаровые твэлы с топливом на основе микрочастиц с многослойным покрытием привлекают в последнее время внимание специалистов, занятых проектированием активных зон высокотемпературных ядерных реакторов и водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР), а также другого энергонпряженного теплообменного оборудования. Такие твэлы обеспечивают удержание продуктов деления ядерного топлива до температуры 1600 °С и выше, что позволяет получить на выходе из активных зон высокотемпературных газо-охлаждаемых реакторов (ВТГР) газ с температурой 900 °С и выше, а в ВВЭР, выполненных по одноконтурной схеме, перегретый пар сверхкритических параметров и увеличить КПД до 50%. Это в свою очередь снижает потребление энергии и вредную нагрузку на окружающую среду, способствующую возникновению «парникового эффекта» и глобальному изменению климата. Использование такой технологии тормозится недостатком данных, касающихся процессов теплообмена и гидродинамики в тепло выделяющих сборках, другом теплообменном оборудовании с засыпкой шаровых твэлов, и расчетных зависимостей для описания этих процессов.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. ИЗМЕРЕНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Теплообмен при различных режимах кипения в засыпках шаровых элементов, в частности, микро- и макротвэлов диаметром от 2 до 60 мм привлекает в последнее время внимание ученых в связи с возможностью их использования в водо-водяных энергетических реакторах (ВВЭР) [1 - 4].

В работе проведено исследование теплоотдачи при пузырьковом и переходном режимах кипения в засыпке шаровых элементов из свинца диаметром 3 мм.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Она состояла из рабочего участка 5, изготовленного из эбонита, что позволяло доводить температуру шарового элемента в опытах до 300°С. Внутренний диаметр рабочего участка составлял 30 мм, длина – 75 мм. В его нижней части была установлена поддерживающая решетка с семью отверстиями диаметром 5 мм, закрытыми сеткой с высокой пористостью, над которой располагалась засыпка шаровых свинцовых элементов диаметром 3 мм. Для её фиксации шаровые элементы сверху прижимались аналогичной по конструкции решеткой.

Вода в рабочий участок 5 поступала из напорного бака с переливом 1, проходя через теплообменник 8, в котором она подогревалась до температуры на 2-4°С ниже температуры насыщения  $T_s$ . В рабочем участке 5 вода нагревалась до  $T_s$ , за счет теплообмена с элементами шаровой засыпки, нагреваемыми токами высокой или ультразвуковой частоты, генерируемыми индуктором 7, питаемым от системы ТВЧ или ультразвукового генератора 11 типа УЗГ-4. Испаренная вода конденсировалась в холодильнике змеевикового типа 9 и собиралась в конденсаторе 10. Постоянство расхода воды обеспечивалось за счет постоянства уровня жидкости в напорном баке 1, а изменение расхода путем изменения этого уровня при опускании или подъеме переливной трубки. После проведения соответствующих измерений вода из конденсатора 10 сливалась в канализацию.

В процессе экспериментов, которые проводились при атмосферном давлении, с помощью хромель-копелевых термопар диаметром 0,2 мм, измерялась температура воды. В трех сечениях по высоте рабочего участка в шаровых элементах по его радиусу было установлено по три аналогичных термопары, по показаниям которых определялась средняя температура поверхности шаровых элементов  $T_w$ . ЭДС термопар измерялась с помощью приборов КСП-4 или ПП-63. Экспериментальный стенд имел периодически используемое дополнительное оборудование: термостат, наклонный микроманометр, запорно-регулирующую арматуру и пр. Тепловой поток рассчитывался по количеству испарившейся воды по формуле:

$$Q = r m_g,$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  
 $m_g$  – количество испарившейся воды, кг/с.

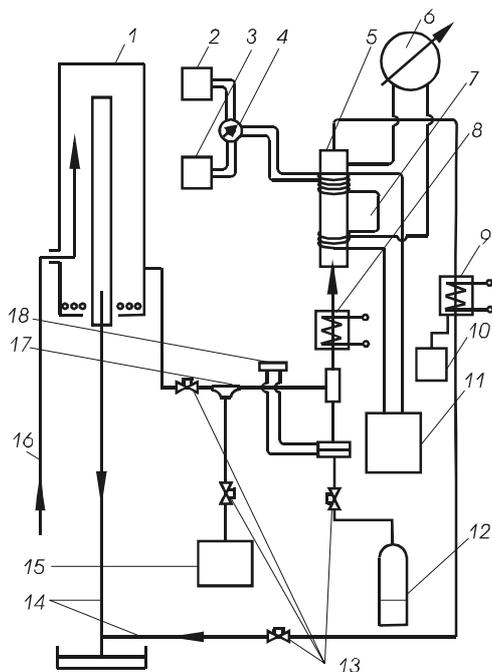


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – напорный бак с переливом, 2 – КСП-4, 3 – ПП-63, 4 – переключатель термомпар, 5 – рабочий участок, 6 – пьезометры, 7 – индуктор, 8 – теплообменник, 9 – холодильник, 10 – конденсатор, 11 – генератор УЗГ-4, 12 – баллон, 13 – вентили ДУ, 14 – слив в канализацию, 15 – термостат, 16 – подвод от водопровода, 17 – тройник, 18 – наклонный микрометр

Количество испарившейся воды  $m_e$  в единицу времени определялось по количеству воды в конденсаторе 10 за соответствующий промежуток времени. Следует отметить, что такой метод определения теплового потока  $Q$  достаточно точен, т.к. количество тепла, идущего на подогрев воды до температуры насыщения  $T_s$ , не превышало 20% от количества тепла, идущего на её испарение. Детальная оценка погрешности определения теплового потока таким способом показала, что она не превышала 17%, а в большинстве экспериментов составляла от 1,5% до 10%.

В процессе экспериментов основные параметры, характеризующие теплоотдачу в засыпке шаровых элементов, изменялись в следующем диапазоне: температура воды  $T_e$  от 96 °C до 100 °C, давление  $p \cong 10^5$  Па, температура поверхности шаровых элементов  $T_w$  от 101,5 до 150,9 °C, удельный тепловой поток  $q$  от  $1,159 \cdot 10^4$  до  $2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, расход воды  $m_e$  от  $0,3 \cdot 10^{-3}$  до  $10,6 \cdot 10^{-3}$  кг/с, массовое паросодержание  $\beta$ , рассчитанное как отношение массы образующегося в канале пара  $m_n$ , к массе воды  $m_e^k$  составляло от 1,74 до 58,5%.

Обработка экспериментальных данных показала, что при малых разностях температур поверхности шаровых элементов и насыщенной воды  $\Delta T_s = T_w - T_s$  с ростом удельного теплового потока коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  увеличивался. Следует отметить, что температура поверхности определялась по показаниям термомпар, установленных, как было указано

выше, в шаровых элементах в трех сечениях по высоте рабочего участка, как среднее их значение по формуле:

$$T_w = \frac{\sum_{i=1}^n T_{wi}}{n},$$

где  $n = 9$  – количество шаровых элементов, в которых были установлены термомпары.

### 3. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ

Увеличение коэффициента теплоотдачи с ростом плотности теплового потока отмечалось до его значения порядка  $q = (1,09-1,1) \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> (рис. 2). Можно предположить, что до этих значений удельного теплового потока режим кипения в шаровой засыпке был пузырьковый.

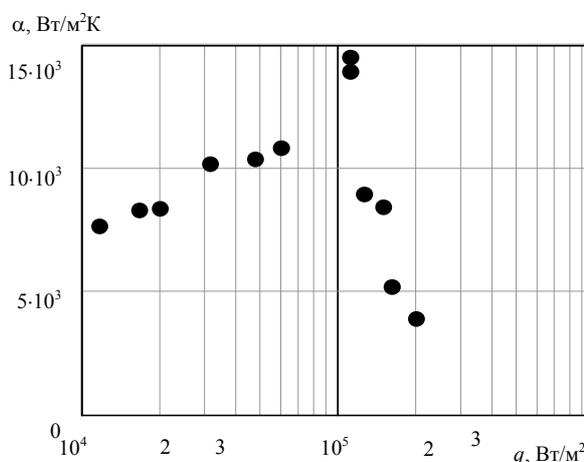


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока

Анализ величин, влияющих на процесс кипения в этой области и при переходном режиме кипения, показал, что коэффициент теплоотдачи может быть выражен функциональной связью критерия Нуссельта с рядом безразмерных комплексов зависимости следующего вида:

$$Nu_e = f \left[ \frac{d_{ш}}{\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_e - \rho_n)}}}; \frac{r}{(C_{эке} \Delta T_s)}; Pr_e; \frac{\lambda_{эке}}{\lambda_e} \right],$$

где  $Nu_e = \frac{\alpha d_{ш}}{\lambda_e}$  – критерий Нуссельта для воды;

$d_{ш}$  – диаметр шарового элемента, м;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $C_{эке}$  – эквивалентная теплоемкость воды, Дж/кг;  $Pr_e$  – критерий Прандтля для воды;  $\lambda_e$  – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К);  $\lambda_{эке}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К);  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  $\rho_e, \rho_n$  – плотность воды и пара соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Эквивалентная теплоемкость и эквивалентный коэффициент теплопроводности определялись по следующим формулам:

$$C_{\text{эКВ}} = \varepsilon \cdot C_{\text{в}} + (1-\varepsilon) \cdot C_{\text{ш}},$$

$$\lambda_{\text{эКВ}} = \varepsilon \cdot \lambda_{\text{в}} + (1-\varepsilon) \cdot \lambda_{\text{ш}},$$

где  $\varepsilon$  – пористость засыпки шаровых элементов;  $C_{\text{в}}$  – теплоемкость воды, Дж/кг;  $C_{\text{ш}}$  – теплоемкость материала шарового элемента, Дж/кг;  $\lambda_{\text{в}}$  – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К);  $\lambda_{\text{ш}}$  – коэффициент теплопроводности материала шарового элемента, Вт/(м·К).

Значения физических свойств воды определялись при температуре насыщения, а плотности пара при  $T = (T_{\text{в}} + T_{\text{с}})/2$ .

Данные по коэффициенту теплоотдачи при пузырьковом режиме кипения представлены на рис. 2. Они хорошо описываются соотношением

$$\text{Nu}_{\text{в}} = 0,03 \left[ \frac{d_{\text{ш}}}{\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п}})}}}} \right]^{0,48} \left[ \frac{r}{C_{\text{эКВ}} \Delta T_{\text{с}}} \right]^n \text{Pr}_{\text{в}}^{1,79} \times \left( \frac{\lambda_{\text{эКВ}}}{\lambda_{\text{в}}} \right)^m,$$

$$\text{где } m = 0,69 \cdot \left[ \frac{d_{\text{ш}}}{\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п}})}}}} \right]^{0,6}, \quad n = -0,313 \cdot \text{Pr}_{\text{в}}^{0,3}.$$

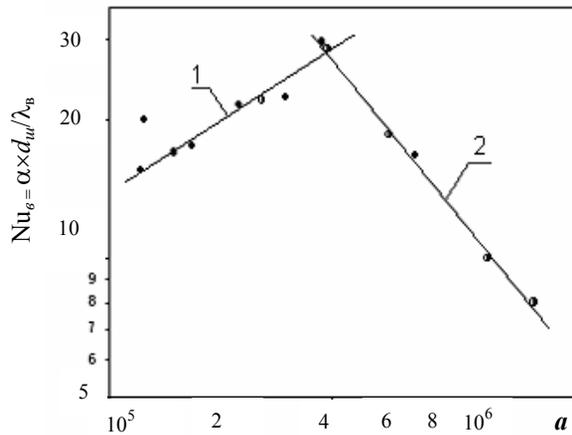


Рис. 3 Корреляционная зависимость для коэффициента теплоотдачи

где комплекс

$$a = \left[ \frac{d_{\text{ш}}}{\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п}})}}}} \right]^{0,9} \left[ \frac{r}{C_{\text{эКВ}} \Delta T_{\text{с}}} \right]^n \text{Pr}_{\text{в}}^{2,73} \left( \frac{\lambda_{\text{эКВ}}}{\lambda_{\text{в}}} \right)^m;$$

$$\text{Nu}_{\text{в}} = \frac{\alpha d_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{в}}}; \quad 1, 2 - \text{пузырьковый и переходной ре-}$$

жим кипения соответственно.

Из рис. 3 следует, что при пузырьковом режиме кипения, как и в случае кипения в большом объеме, с ростом удельного теплового потока коэффициент теплоотдачи увеличивается. Рост коэффициента теплоотдачи вызван ростом центров парообразования на поверхности шаровых элементов и увеличением скорости движения паровой среды, что связано с ростом величины паросодержания  $\beta$ . В случае кипения жидкости в условиях вынужденного движения в шаровой засыпке перенос тепла от поверхности нагрева в ядро осуществляется пузырьками пара, образовавшимися на ней, и конвекцией жидкости. Количество тепла, переносимого паром, зависит, в основном, от плотности теплового потока  $q$  на поверхности сферы. Количество тепла, переносимого путем конвекции жидкости, в случае малых объемов паросодержаний  $\beta$ , определяется скоростью циркуляции.

В зависимости от соотношения плотности теплового потока и скорости циркуляции вклад кипения (т.е. переноса тепла пузырьками пара) и конвективного переноса в процессе теплоотдачи будет неодинаковым. При малых скоростях циркуляции коэффициент теплоотдачи практически не зависит от скорости, определяется, в основном, процессом кипения и с увеличением плотности теплового потока возрастает (рис. 2). По мере увеличения скорости циркуляции зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока постепенно становится несущественной и начинает проявляться его зависимость от скорости циркуляции.

При достаточно развитом кипении, когда вблизи поверхности шарового элемента содержание пара становится значительным, высокая интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении определяется малым термическим сопротивлением тонкой жидкостной пленки, которая остается на самой теплоотдающей поверхности. Эффективная толщина этого слоя жидкости уменьшается по мере увеличения тепловой нагрузки, что приводит к увеличению интенсивности теплоотдачи.

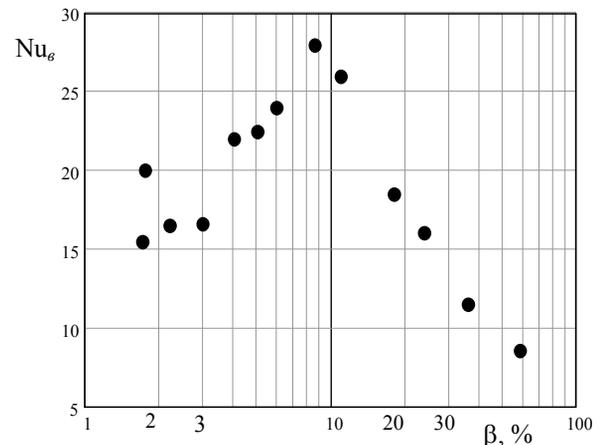


Рис. 4. Зависимость числа  $\text{Nu}_{\text{в}}$  от паросодержания  $\beta$

Из рис. 4 следует, что при паросодержании  $\beta = 8,58\%$  ( $q = 1,098 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>) имеет место максимум теплоотдачи. При дальнейшем росте паросодержания коэффициент теплоотдачи уменьшается и достигает своего минимального значения для данной серии экспериментов, соответствующего  $Nu_g = 8,06$  при  $\beta = 58,6\%$ . Снижение величины коэффициента теплоотдачи объясняется тем, что как на самой поверхности шаровых элементов, так и вблизи неё пузырьки пара непрерывно сливаются между собой, образуя большие паровые объёмы, которые все больше затрудняют доступ жидкости к теплоотдающей поверхности. В отдельных её областях возникают сухие пятна, их число и плотность непрерывно увеличиваются по мере увеличения  $T_w$  и соответственно  $\Delta T_s$  и  $\beta$ . Эти участки исключаются из теплообмена с жидкой средой, они контактируют с паром, теплоотдача к которому существенно менее интенсивна, чем к воде.

Уменьшение теплоотдачи с ростом удельного теплового потока соответствует переходному режиму кипения, для описания которого нами получена следующая критериальная зависимость

$$Nu_g = 8,93 \cdot 10^6 \left[ \frac{d_{ш}}{\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_g - \rho_n)}}} \right]^{-0,884} \left[ \frac{r}{C_{экв} \Delta T_s} \right]^{n_1} \times Pr_g^{-2,69} \left( \frac{\lambda_{экв}}{\lambda_g} \right)^{m_1},$$

$$\text{где } m_1 = -1,28 \cdot \left[ \frac{d_{ш}}{\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_g - \rho_n)}}} \right]^{0,6},$$

$$n_1 = -0,579 \cdot Pr_g^{0,3}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. При кипении в засыпке шаровых элементов во всем исследованном диапазоне наблюдается монотонный рост плотности теплового потока с увеличением параметра  $\Delta T_s$ , который несколько замедляется в области больших значений этого параметра.

2. Получены критериальные уравнения, которые удовлетворительно описывают данные по теплоотдаче соответственно для областей пузырькового и переходного режимов кипения в шаровой засыпке.

3. Переход от пузырькового режима кипения к переходному режиму кипения происходит при определенных значениях удельного теплового потока и, соответственно, перегревах поверхности шаровых элементов, и сопровождается уменьшением коэффициента теплоотдачи.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

ТВЧ – токи высокой частоты;

УЗГ – ультразвуковой генератор;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\beta$  – массовое паросодержание, %;

$\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности воды Вт/(м·К);

$\lambda_{экв}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К);

$\lambda_{ш}$  – коэффициент теплопроводности материала шарового элемента, Вт/(м·К).

$\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;

$\rho_g$  – плотность воды кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_n$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;

$\varepsilon$  – пористость засыпки шаровых элементов;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$Q$  – тепловой поток, Вт;

$r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

$m_g$  – количество испарившейся воды, кг/с;

$T_s$  – температура насыщения, К;

$T_g$  – температура воды, К;

$T_w$  – температура поверхности шаровых элементов, К;

$p$  – давление, Па;

$q$  – удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;

$m_n$  – масса образующегося в канале пара, кг;

$m_g^k$  – масса воды в канале, кг;

$Nu_g$  – критерий Нуссельта для воды;

$Pr_g$  – критерий Прандтля для воды;

$d_{ш}$  – диаметр шарового элемента, м;

$C_{экв}$  – эквивалентная теплоемкость воды, Дж/кг;

$C_{ш}$  – теплоемкость материала шарового элемента Дж/кг;

$C_g$  – теплоемкость воды Дж/кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Индексы:

$n$  – количество шаровых элементов, в которых были установлены термопары

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Перспективы** применения микротвэлов в ВВЭР / Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Хрулев А.А., Дегальцев Ю.Г., Глушков Е.С. Филиппов Г.А., Гришанин Е.И., Фальковский // Атомная энергия. 1999. Т. 86, № 6., С. 443-449.
2. **Перспективы** использования микротвэльного топлива для маневренной энергоустановки АТЭЦ АЭС с водопаровым корпусным ядерным реактором прямоточного типа / Хлопкин Н.С., Двойнишников Е.А., Филиппов Г.А., Богоявленский Р.Г. // Малая энергетика. Итоги и перспективы: тезисы Международного семинара. Москва, 2001. С. 119
3. **Лозовецкий В.В., Крымасов В.Н.** Гидромеханические и тепловые процессы в ядерных реакторах с микротвэльным топливом. М.: ВИНТИ РАН, 2003. 326 с.
4. **Лозовецкий В.В., Пелевин Ф.В., Крымасов В.Н.** Гидродинамика и теплообмен в слое тепловыделяющих элементов // Дисперсные потоки и пористые среды: Тр. 3-ей РНКТ. М.: МЭИ, 2002. Т.5. С. 254-257.