

*А.В. Безносков, С.С. Пинаев, А.А. Молодцов, А.В. Назаров, Т.А. Бокова*

Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, Россия

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА СВИНЦОВОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ – РАБОЧЕЕ ТЕЛО

### АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований теплогидравлических характеристик контактного теплообмена свинцовый теплоноситель – рабочее тело.

Проводили барботаж воды, пароводяной смеси и пара под слой свинца в свободный и затесненный имитаторами трубной системы объем парогенератора.

В экспериментах определены распределение пузырей по размеру, скорость их всплытия, структура двухкомпонентного потока (распределение пузырей в объеме свинца), изменение температуры пузырей в процессе подъема, характеристики процесса испарения капли воды в составе пузыря.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно концепции «течь перед разрушением» первоначальное истечение воды будет происходить через отверстие малого размера (трещину, разрушенное утонение истертой стенки и др.). Проходя через такое отверстие, рабочее тело ( $355\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $30\text{ МПа}$ ) будет частично испаряться вследствие уменьшения давления до давления в районе течи в контуре свинцового теплоносителя, что иллюстрирует рис. 1.

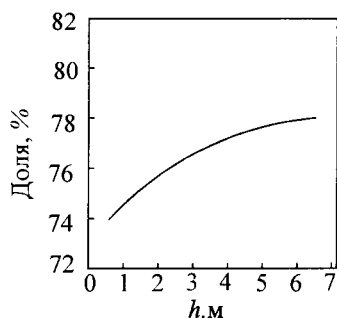


Рис. 1. Доля неувспевшей воды при переходе из контура рабочего тела давлением  $30\text{ МПа}$  и температурой  $355\text{ }^{\circ}\text{C}$  в объем свинцового теплоносителя с частичным испарением за счет снижения давления при различной заглубленности места течи под уровень свинца.

Экспериментально и теоретически подтверждено, что образующаяся струя рабочего тела разбивается на части за счет объемного вскипания и гидродинамического взаимодействия со свинцом. В случае течи экономайзерного и испарительного участков температура воды пара в раздробленной струе понизится до температуры

насыщения ( $\sim 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) соответствующей давлению в локальном участке свинцового теплоносителя. Поскольку в основном размер пузырей превышает  $1\text{ мм}$ , то силами поверхностного натяжения, увеличивающимися давлением в пузыре, можно пренебречь. На близком расстоянии от отверстия истечения формируются пузыри, содержащие капли конденсата, которые изолированы от непосредственного соприкосновения со свинцом паровой прослойкой, образовавшейся в результате частичного вскипания в процессе дросселирования и теплообмена со свинцом. Тепло свинца температурой  $420\text{--}540\text{ }^{\circ}\text{C}$  в пузыре передается излучением поверхности раздела фаз пар–свинец, а также за счет теплопроводности и конвективной теплопередачи через паровую прослойку переменной толщины к поверхности раздела пар–конденсат. Этот процесс сопровождается постепенным испарением воды и соответствующим увеличением объема пара в пузыре, причем конденсат при перепаде температур  $250\text{--}380\text{ }^{\circ}\text{C}$  должен находиться в сферoidalном состоянии рис. 2.

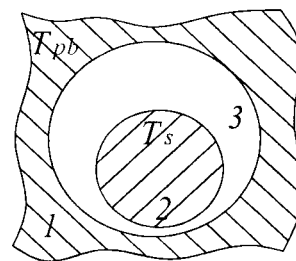


Рис. 2. Схема процесса испарения: 1 – свинцовый теплоноситель; 2 – капля воды; 3 – паровая прослойка.

В реакторах типа БРЕСТ, на свободной поверхности свинца будут сепарироваться и выходить в объем системы защитного газа пузыри, содержащие или пар температурой от  $540$  до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температура насыщения вблизи свободного уровня свинца), или пар той же температурой и воду температурой  $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Условием отсутствия выхода и сепарации воды из свинца является полное ее испарение за время нахождения в объеме свинцового теплоносителя. Дифференциальное уравнение (1) описывает испарение капли воды в свинце.

$$\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) \left[ \frac{1}{A_2} + \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \left( \left( \frac{\rho'}{\rho''} + 1 \right) \frac{R_{нач}^3}{R_k^3} - \frac{\rho'}{\rho''} \right) \right]^{-1} + 0,255 \sqrt{\frac{\lambda'' r (T_1 - T_2)}{2 R_k}} \sqrt{R_k g \rho' \rho''} = r \rho' \frac{dR_k}{d\tau} \quad (1)$$

где:  $\sigma_0$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $T_1, T_2$  – температура излучающей и облучаемой поверхностей (свинца и капли воды);  $A_2$  – поглощательная способность поверхности капли;  $\varepsilon_1$  – степень черноты поверхности свинца;  $\rho''$ ;  $\rho'$  – плотность воды и соответственно пара;  $R_{нач}$  – начальный радиус капли;  $R_k$  – радиус капли;  $\lambda''$  – коэффициент теплопроводности пара;  $r$  – теплота парообразования;  $g$  – ускорение свободного падения.

Пример численного решение уравнения представлен на рис. 3, 4.

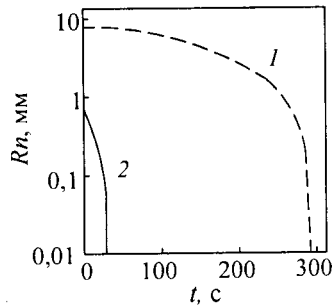


Рис. 3. Численное решение уравнения для начального диаметра капли воды: 1 – 10 мм, 2 – 1 мм; при заглублении отверстия истечения под уровень свинца на 500 мм при его температуре около 500 °С.

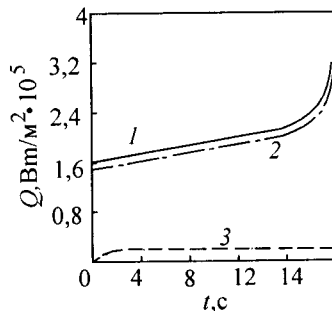


Рис. 4. Зависимость теплового потока от времени при испарении капли воды начальным радиусом 0,5 мм: 1 – суммарный тепловой поток, 2 – конвективная составляющая, 3 – составляющая излучения.

На рис. 5 видно, что длительность испарения капли максимальным радиусом 10 мм ~ 10 мин, радиусом 0,1 мм ~ 1,5 с. Оценка продолжительности ее жизни в объеме свинца и дальность пути переноса с потоком теплоносителя может быть определена путем сравнения длительности испарения воды в пузыре со временем его нахождения в объеме свинца и продолжительностью движения в составе двухкомпонентного потока до момента сепарации на свободной поверхности свинца.

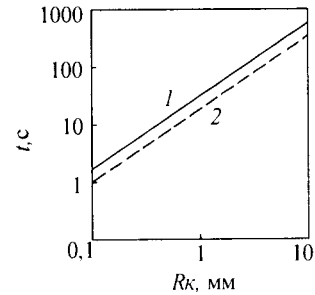


Рис. 5. Зависимость длительности испарения от исходного размера капли воды и заглубления течи: 1 – 0,5 м, 2 – 6,5 м.

## 2. ПАРАМЕТРЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования контактного теплообмена проведены при барботаже воды, пароводяной смеси и пара температурой 100-350 °С под давлением 1 - 25 МПа через отверстия истечения диаметром 0,6-10, мм в слое свинца толщиной от 100 до 3000 мм температурой 350-600 °С в свободный объем и имитаторы трубной системы парогенератора в случае пузырькового, факельного истечения и раздробленной о преграду в форме трубки струи рабочего тела. В экспериментах определяли распределение пузырей по размеру, скорость их всплытия, изменение их температуры в процессе всплытия, структуру двухкомпонентного потока (распределение пузырей в объеме свинца), характеристики испарения капли воды в составе пузыря и пульсации температуры.

## 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Эксперименты по определению коэффициента теплопередачи проводили следующим образом: находили разницу снижения температуры свинца в емкости высотой 3600 мм, диаметром 260 мм без подачи и с подачей воды на барботаж на глубине 1000 мм через отверстие диаметром 1 мм. По этой разнице, при известной теплоемкости свинца, определяли количество тепла, отведенного в окружающую среду и затраченного на испарение конденсата. Полученную разницу сравнивали с необходимой для испарения всего расхода

барботируемой воды, после чего вычисляли количество, выносимое паром выше свободного уровня свинца (количеством тепла, переданного паровой фазе, в оценках пренебрегается).

В одной из серий экспериментов были получены следующие данные: снижение температуры свинца составило  $0,019\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , теплоотвод за счет испарения воды –  $4,29\text{ кВт}$ , средний расход, подаваемый на барботаж, –  $30\text{ кг/ч}$  при давлении  $3\text{ МПа}$  и температуре  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  через отверстие диаметром  $1\text{ мм}$ , заглубленное под уровень свинца температурой  $390 - 360\text{ }^{\circ}\text{C}$  на  $1000\text{ мм}$ . Мощность, необходимая для полного испарения вводимого конденсата, составляла  $18,5\text{ кВт}$ . Согласно расчетным оценкам при использованных допущениях  $77,2\%$  массы воды не испарилось и сепарировалось на свободной поверхности вместе с паром в виде мелких капель.

Одной из характеристик, определяющей контактный теплообмен является суммарная поверхность пузырей – границы раздела теплообменивающихся сред. Минимальный радиус пузырей («легкой фазы») фиксируемый в эксперименте составлял  $0,5\text{ мм}$ , что соответствовало разрешающей способности используемых электроконтактных датчиков конструкции НГТУ. Пузырь фиксировали по размыканию электрической цепи между контактами датчика. Расстояние между контактами в датчиках составляло  $\sim 0,9 - 1\text{ мм}$ . Так как диаметр сопла истечения в эксперименте не превышал  $1\text{ мм}$ , формирование капель в момент истечения диаметром менее  $1\text{ мм}$  представляется маловероятным. Пример экспериментально полученного распределения числа пузырей в зависимости от их размера в непосредственной близости от отверстия истечения показан на рис. 6.

Часть воды испаряется в процессе дросселирования. В условиях эксперимента, неиспарившаяся часть составляла  $92\%$  рис. 7.

Измеренная средняя скорость движения пузыря в рассматриваемой серии экспериментов составила  $\sim 0,3\text{ м/с}$ . Скорость пузыря определяли по известному расстоянию между контактами датчика и времени размыкания контактов.

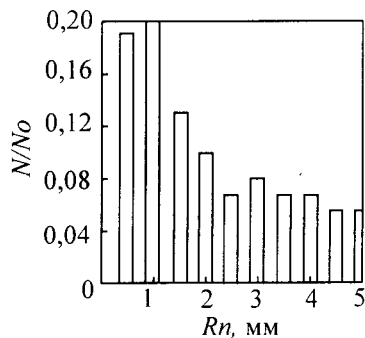


Рис. 6. Распределение пузырей пара по размеру.

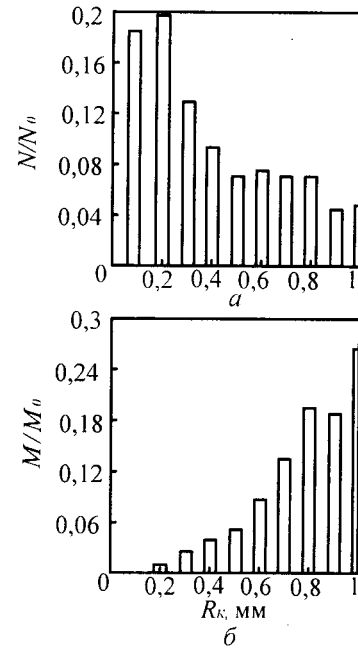


Рис. 7. Распределение капель неиспарившейся воды в зависимости от их размера: а – по количеству, б – по массе.

В качестве усредненного приближения характеристики контактного теплообмена примем коэффициент теплопередачи, определяемый по выражению

$$k = \frac{Q}{F\Delta T} \quad (2)$$

где  $Q$  – мощность, затрачиваемая на испарение воды;  $F$  – суммарная площадь контактного теплообмена (в расчетах принимается равной суммарной площади конденсата в первый момент после дросселирования конденсата при выходе из отверстия истечения);  $\Delta T$  – температурный напор, определяемый как разность средней температуры свинца в двухкомпонентном потоке и температуры конденсата, равной температуре насыщения при локальном давлении в данном месте;  $F$  – суммарная площадь контактного теплообмена (в расчетах принимается равной суммарной площади капель воды в первый момент после дросселирования при выходе из отверстия истечения).

С учетом измеренных мощности, отводимой при барботаже воды ( $4,29\text{ кВт}$ ), средней скорости пузырей ( $0,3\text{ м/с}$ ), расхода барботируемого рабочего тела ( $30\text{ кг/ч}$ ), заглубления течи ( $1\text{ м}$ ) и распределения размера капель, представленного на рис. 8, – экспериментальный коэффициент теплопередачи составил  $145\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ .

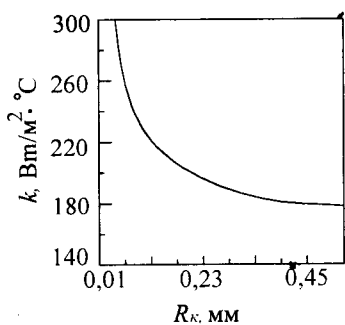


Рис. 8. Расчетная зависимость коэффициента теплопередачи от радиуса капли воды.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Численное решение уравнения (1) с учетом распределения капель воды по размеру и изменению их массы с 92% (начальное количество воды, не закипевшей при дросселировании) до 72% (количество, сепарирующееся на свободной поверхности свинца) приводит к коэффициенту теплопередачи  $156 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ . Близость коэффициента теплопередачи, определенного экспериментально и рассчитанного по выражению (2) при диаметре капли немного больше 1 мм рис. 8, свидетельствует о качественном соответствии теоретической модели теплообмена реальным условиям.

Расчетным путем показано и экспериментально подтверждено, что длительность испарения капли воды диаметром 1 мм превышает 30 с. В экспериментах с подачей воды на барботаж полного ее испарения за время всплытия (30 с и более) не происходило, и в воздухе над емкостью были видны капли конденсата, что совпадает с расчетами. Экспериментально определенный коэффициент теплопередачи с испарением воды при контактном теплообмене  $0,145 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  почти в 1,5 раза меньше коэффициента теплопередачи через стенку конструкционного материала в аналогичных условиях, вследствие высокого термического сопротивления паровой прослойки, окружающей каплю воды и меньшей разницы скоростей теплообменивающихся сред. Количество тепла, передаваемое в фиксированном объеме при контактном теплообмене, может существенно превышать количество тепла, передаваемое через стенку, за счет возможности существенного увеличения площади теплопередающей поверхности, что также подтверждено экспериментально.