

Б.Г. Покусаев, А.К. Некрасов, Д.А. Некрасов

Московский государственный университет инженерной экологии, Россия

## ВСКИПАНИЕ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ С ЗЕРНИСТЫМ СЛОЕМ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИИ

### АННОТАЦИЯ

Приведены результаты математического моделирования вскипания недогретой воды в кольцевом канале при импульсном тепловыделении. Исследуется процесс образования и роста паровых пузырьков до момента их слияния в паровую пленку с учетом реальной шероховатости поверхности и времени активации соответствующих центров парообразования от температуры поверхности. Используется микрослоевая модель с учетом образования сухого пятна под пузырьком. Решается также задача о формировании волны давления в кольцевом канале вследствие взрывного вскипания перегретого микрослоя под пузырьками. Представлены результаты анализа влияния зернистого слоя на перегретый пристенный слой жидкости.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследованию динамических процессов при вскипании недогретой жидкости посвящено значительное число работ, из которых следует, что определяющую роль в них играет скорость изменения температуры поверхности нагрева. В экспериментальной работе [1] выполненной на вертикальном кольцевом канале при импульсном подводе электрической мощности к внутренней обогреваемой трубке, исследовался кризис кипения воды при различных давлениях, темпах изменения температуры стенки нагревателя и начальных недогревах воды.

В связи с постоянно растущим интересом к проблеме микротвэльных водоохлаждаемых реакторов [2], в опытах [1] исследовалась также роль шаровых засыпок в процессах вскипания. Во всех случаях в экспериментах фиксировалось формирование волн давления в канале. Опыты также показали, что наличие шаровой засыпки приводит к заметному отличию в поведении волны давления. В результате детального изучения этого явления, в том числе с помощью скоростной видеосъемки, была предложена физическая модель процесса, в которой рост давления связывается с формированием и движением границы паровой пленки. В представленной работе предпринята попытка математического описания этих сложных процессов.

### 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При моделировании описанных выше процессов выделим основные последовательно сменяющие друг друга стадии [3]: прогрев пристенной области до температуры насыщения, образование и рост пузырьков пара на поверхности нагревателя в недогретой жидкости, формирование и распространение волны давления в канале.

Первая стадия процесса, включая расчеты с различными засыпками, подробно описана в работе [4]. Результатом расчетов здесь является время прогрева и распределения температур на момент начала образования пузырьков как в чистой жидкости, так и в присутствии шаровой засыпки.

#### 2.1. Задача о росте и развитии пузырька пара на поверхности нагревателя

Вторая стадия является наиболее сложным и многофакторным процессом, поскольку рост пузырьков пара на поверхности нагревателя в условиях нестационарного разогрева стенки, несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных этой проблеме, является слабоизученным явлением.

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования процесса возникновения и роста пузырьков пара до момента их слияния в паровую пленку.

Для расчета времени покрытия пузырьками пара поверхности нагрева необходимо знать распределение размеров микрошероховатостей, которые определяют начальные радиусы пузырьков, и необходимый перегрев для начала их роста. Принимаем [5], что шероховатость поверхности подчиняется нормальному закону распределения. Выбираем несколько интервалов с одинаковым шагом и находим среднее значение шероховатости на данном отрезке функции. Вычисляем вероятности попадания величины в выбранные интервалы. Далее рассчитываем площади поверхности впадин для каждого размера шероховатости, принимая угол при вершине впадины  $\approx 90^\circ$  и определяем доли, занимаемые каждым типом впадин на единице поверхности ( $1 \text{ см}^2$ ). Результаты вычислений количества впадин для 7 класса точности поверхности приведены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость числа впадин от глубины

Глубина впадины, мкм	Число впадин, $n \cdot 10^8$
0,56	0,5178
1,4	1,198
2,3	1,627
3,2	1,198
4,04	0,5178

Связь перегрева жидкости с геометрией впадины находится из условия теплового равновесия зародыша, находящегося в перегретом слое жидкости и определяется по формуле:

$$T_w = \frac{2\sigma T_s}{r\rho_v R_c} + T_s. \quad (1)$$

При моделировании процесса роста пузырька используется микрослоевая модель [6]. Целями расчета здесь являются зависимости скорости роста пузырька и объема микрослоя от темпа тепловыделения и величины недогрева жидкости с учетом образования сухого пятна под пузырьком. Расчетная схема задачи показана на рис. 1.

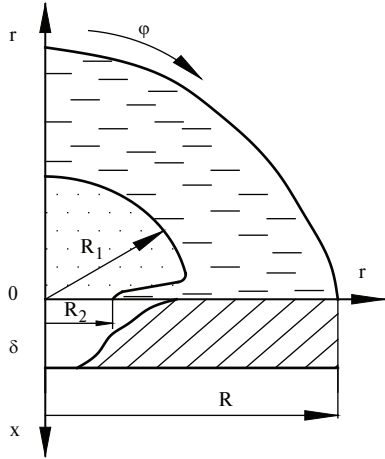


Рис. 1. Расчетная схема для пузырька в заключительной стадии роста с учетом сухого пятна

Для вычисления скорости роста пузырька используется уравнение теплового баланса:

$$L \frac{dm}{dt} = \int_S q dS. \quad (2)$$

Распределения плотности тепловых потоков  $q$  при росте пузырька в пристенном слое с неоднородной по толщине и переменной по времени температурой находятся из решения задачи определения температурного поля жидкости, окружающей растущий пузырек и включающей следующие уравнения:

$$(c_p \rho)_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial \tau} + u \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_1 r^2 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \sin \varphi \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} \right), \quad (3)$$

где  $u = \frac{\partial R_1}{\partial \tau}$ ;

$$(c_p \rho)_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_2 r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + q_v, \quad (4)$$

где  $0 < r < R$ ;  $0 < \varphi < 90^\circ$ ;  $0 < x < \delta$ ;  $0 < \tau < t$ ;

Начальное условие:  $T_1 = T_2 = T_0$ ;

Граничные условия:

$T_1 = T_{\text{sat}}$  при  $r = R_1$ ,  $0 < \varphi < \varphi_1$  и  $\varphi = \varphi_1$ ;  $0 < r < R_1$

$$T_1 = T_2 \quad \text{и} \quad \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} = \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad \text{при} \quad (\varphi = 90^\circ) \wedge (x = 0);$$

$$0 < r < R.$$

На остальных границах  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ .

По мере испарения микрослоя под пузырьком образуется сухое пятно. Принимаем, что интенсивность теплообмена между паром и поверхностью нагревателя значительно меньше, чем на остальных поверхностях пузырька (при  $\varphi = \varphi_1$ ,  $R_2 < r < R_1$  и  $r = R_1$ ,  $0 < \varphi < \varphi_1$ ), на которых происходит фазовый переход, поэтому в расчете поверхность сухого пятна по отношению к пару полагаем теплоизолированной.

Для равновесного состояния пара в пузырьке, на основании уравнения состояния

$$pV = mBT, \quad (5)$$

где  $V = \frac{2}{3} \pi R^3$ , и принимая, что давление в пузырьке слабо отличается от давления в жидкости, а температура  $T$  равна температуре насыщения  $T_s$  при данном давлении, для вычисления текущего радиуса пузырька можно получить следующее выражение:

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} \frac{mBT_s}{p}}, \quad (6)$$

где

$$m = \frac{1}{L} \iint_{\tau_s} q dS d\tau. \quad (7)$$

Задача решалась численно методом конечных разностей в программной среде Visual Fortran 6.6. В начале решались уравнения энергии (для жидкости) при  $u=0$  (для нагревателя) методом суммарной аппроксимации [7] с использованием неявной конечно-разностной схемы. При достижении температурой поверхности заданного перегрева относительно температуры насыщения, на основании найденного температурного поля определялось распределение тепловых потоков  $q$  по поверхности пузырька начального радиуса  $R_0$ . По формуле (6) рассчитывалась масса пара в пузырьке и затем по формуле (5) находился новый радиус пузырька  $R_1$  и скорость движения границы пузырька  $u$  по радиусу  $r$ . При найденных скорости роста и радиусе пузырька расчет повторялся на новом шаге по времени и заканчивался на момент, когда поверхность, занятая пузырьками равна всей поверхности нагревателя. Результаты расчетов показаны на рис. 2.

Анализ результатов этих расчетов показал, что с увеличением теплового потока в стенке нагревателя преобладающую роль в покрытии всей поверхности играют первые зарождающиеся пузырьки.

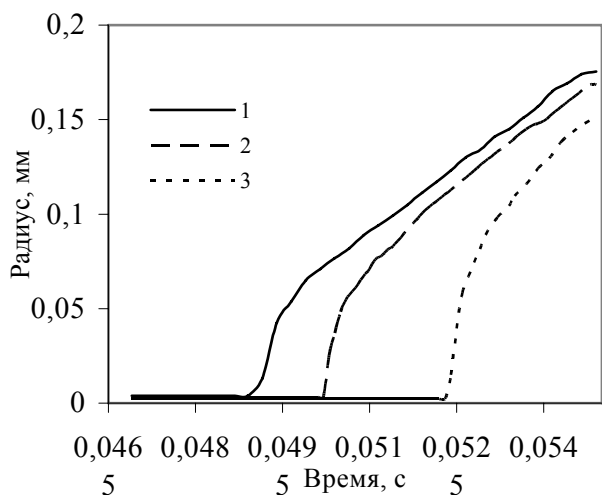


Рис. 2. Скорость роста пузырьков пара на поверхности нагревателя: 1, 2, 3- при температурах поверхности 135, 136 и 138 градусов соответственно

## 2.2. Задача о формировании волны давления в кольцевом канале

Следуя модели образования волны давления вследствие слияния пузырьков на поверхности нагревателя и последующему взрывному вскипанию микрослоя [1], для расчета амплитуды волны давления используем зависимость для гидравлического удара.

$$\Delta P = c_0 \rho \frac{dH}{d\tau}, \quad (8)$$

где  $c_0$  – скорость звука;  $\frac{dH}{d\tau}$  – скорость движения

межфазной границы. Для определения  $\frac{dH}{d\tau}$  используется модифицированное уравнение Рэлея для цилиндрической межфазной поверхности, записанное исходя из условия равенства паровых объемов полусферы и цилиндра.

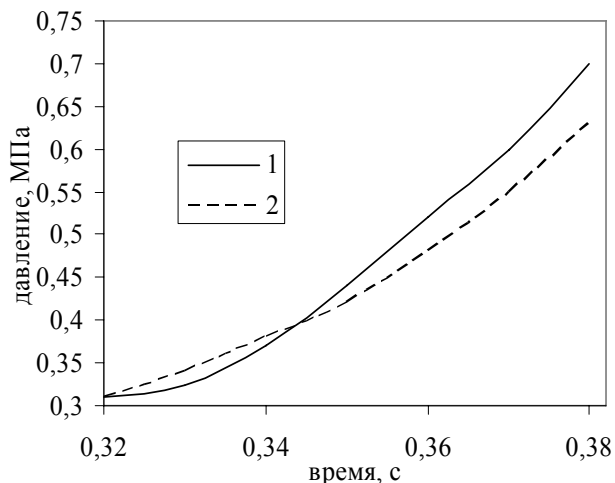


Рис. 3. Изменение давления по времени при  $q_v = 4,2 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>: 1 - результат расчета; 2- эксперимент [1]

$$H \frac{d^2 H}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dH}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_l H} = \frac{P_v(\rho_v T_v) - P_l}{\rho_l}, \quad (9)$$

где  $H = \frac{\pi R^2}{2l}$ . На рис. 3 показаны результаты проведенных расчетов по формуле (8) с учетом (9).

## 3. ВЛИЯНИЕ ШАРОВОЙ ЗАСЫПКИ

Анализ результатов экспериментального исследования [8] выявил существенное влияние шаровой засыпки на основные параметры (время индукции и максимальную амплитуду давления) процесса взрывного вскипания недогретой воды при быстром подводе мощности к поверхности нагревателя. Отметим некоторые особенности этого явления. Наличие шаровой засыпки с теплофизическими свойствами, отличными от свойств воды, приводит к различию в динамике протекания процессов теплообмена в пристенном слое воды и тем самым непосредственно влияет на время индукции. Засыпка также существенно влияет на объем перегретого слоя жидкости за счет эффекта вытеснения и условия распространения паровой полости в канале.

Оценим влияние размеров засыпки на объем жидкости, вытесняемый из перегретого слоя. Для этого выделим элементарные ячейки для кубической и ромбоэдрической схем упаковки и рассчитаем объем пристенного слоя и объем жидкости вытесняемый шариками различного радиуса.

Для кубической упаковки объем жидкости в слое толщиной  $h$ , для одного шарика, вычисляется по формуле:

$$V_{\text{мк.сл}} = 4R^2 h, \quad (10)$$

а объем, занимаемый шариком в слое, вычисляется по формуле:

$$V_{\text{шар}} = \pi R h^2 - \frac{\pi h^3}{3}. \quad (11)$$

Для ромбоэдрической упаковки эти же объемы вычисляются по формулам:

$$V_{\text{мк.сл}} = 2\sqrt{3}R^2 h \quad (12)$$

и

$$V_{\text{шар}} = \pi R h^2 - \frac{\pi h^3}{3}. \quad (13)$$

Для сопоставления этих объемов проведены расчеты для различных диаметров шарика, изменявшихся от 1 до 5 мм при постоянной величине перегретого слоя жидкости  $h$ , равного 0.1 мм. Результаты показаны на рис. 4.

Из проведенных расчетов видно, что при росте радиуса шарика объем жидкости в слое, приходящемся на один шарик, растет заметно быстрее, чем объем жидкости вытесняемый шариком. То есть при увеличении радиуса шарика его влияние на пристенный слой, с точки зрения вытеснения жидкости, снижается, а при снижении увеличивается. Расчеты также показали, что способ упаковки шариков слабо влияет на эффект вытеснения.

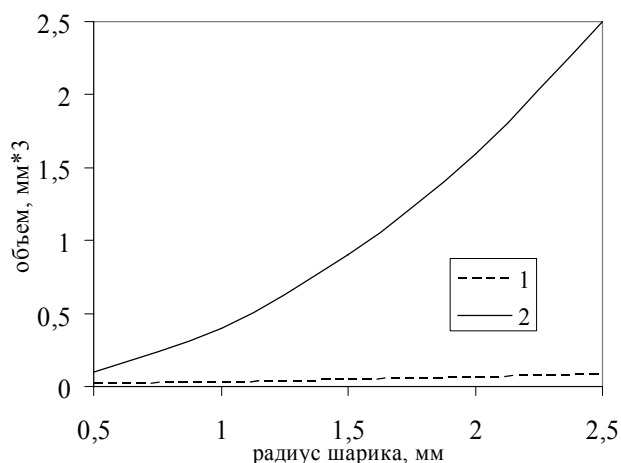


Рис. 4. Зависимость объемов перегретого слоя от радиуса шарика для кубической упаковки: 1- объем перегретого слоя, вытесняемого шариком; 2 - объем перегретого слоя под шариком

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в настоящей работе модель вскипания недогретой жидкости в кольцевом канале позволяет проводить расчеты амплитуды волны давления при различных темпах тепловыделения в нагревателе и начальных распределениях температур в пристенной области.

Выполнен анализ влияния размеров шаровой запытки на перегретый пристенный слой жидкости, который показал, что с уменьшением диаметра шариков роль эффекта вытеснения существенно возрастает.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 05-02-16313а, 05-02-08254 офи-а)*

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;  
 $\rho_v$  - плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;

$T_s$  - температура насыщения, К;  
 $T_w$  - температура стенки, К;  
 $B$  - газовая постоянная пара, Дж/(кг · К);  
 $L$  - теплота фазового перехода, Дж/кг;  
 $h_{cp}$  - средняя шероховатость, мкм;  
 $h_{ск}$  - среднеквадратичная шероховатость, мкм;  
 $c_p$  - теплоемкость, Дж/(кг · К);  
 $c_0$  - скорость звука в жидкости;  
 $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м К;  
 $\tau$  - время, с;  
 $m$  - масса пара, кг;  
 $q_v$  - объемная плотность тепловыделения, Вт/м<sup>3</sup>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Покусаев Б.Г., Казенин Д.А., Таиров Э.А., Чижиков С.А.** Моделирование ударных процессов при аварийном набросе мощности в сборке твэлов // Теплоэнергетика. 1999. №3. С. 53-62.
2. **Филиппов Г. А., Боговяленский Р. Г., Авдеев А.А.** Перспективы создания прямоточных микротвэльных ядерных реакторов с перегревом пара // Тяжелое машиностроение. 2002. № 1. С. 7-11.
3. **Деев В.И., Куценко К.В., Лаврухин А.А., Харитонов В.С.** Нестационарный кризис кипения жидкостей // Тез. докл. V Минского Междунар. Форума по тепло- и массообмену. Т. 2. Минск: Изд. ИТМО НАНБ, 2004.
4. **Покусаев Б.Г., Таиров Э.А., Некрасов А.К., Некрасов Д.А.** Нестационарные теплогидравлические процессы в зернистом слое Тезисы докладов 5-ого Минского Международного Форума по Тепло и Массообмену Том 2 Минск: Изд. ИТМО НАНБ. 2004,
5. **Кордонский Х.Б.** Приложения теории вероятностей в инженерном деле. М. 1963 г. 290 с.
6. **Cooper M.G., Lloyd A.G.P.** The microlayer in nucleate pool boiling // Int. J. Heat and Mass Transfer 1969.- vol. 12. – p. 895-913
7. **Самарский А.А.** Теория разностных схем. М.: Наука, 1984. 616 с.
8. **Покусаев Б.Г., Таиров Э.А., Казенин Д.А., Гриценко М.Ю., Сысков Л.В.** Теплогидравлические процессы в пористых структурах при импульсном тепловыделении на стенке // ТВТ. 2002. т.40. №2. С. 306-313.