

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-142-148

УДК 620.9; 532

РАЗВИТИЕ РЕЛАКСАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НЕРАВНОВЕСНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ СОСУДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**THE DEVELOPMENT OF THE RELAXATION MODEL OF A NONEQUILIBRIUM PHASE TRANSITION FOR DESCRIBING THE OUTFLOW OF LIQUID FROM A HIGH PRESSURE VESSEL****Лежнин Сергей Иванович¹,**доктор физ.-мат. наук, гл. научн. сотр. E-mail: lezhnin@itp.nsc.ru**Lezhnin Sergey I. ¹, D. Sc., chief research fellow,****Алексеев Максим Валерьевич¹,**кандидат физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., E-mail: alekseev@itp.nsc.ru**Alekseyev Maksim V. ¹, C. Sc., senior research fellow,****Вожаков Иван Сергеевич¹,**младший научный сотрудник. E-mail: vozhakov@gmail.com**Vozhakov Ivan S. ¹, junior research fellow,****Богомоллов Александр Романович^{1,2},**доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник, E-mail: barom@kuzstu.ru**Bogomolov Aleksandr R., D. Sc., leading research fellow**¹ Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН), Россия, 630090, г. Новосибирск-90, пр. Ак. Лаврентьева, 1.¹ S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (RAS IT SB), 1, ave. Ak. Lavrent'eva, Novosibirsk, 630090, Russia.² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация: В работе выполнено теоретическое исследование неравновесного фазового перехода капельной структуры в парожидкостной среде. Развита предложенная релаксационная модель для описания тепловых и динамических процессов, возникающих в результате разгерметизации сосудов, заполненных водой под высоким давлением. Проведенные сравнительные расчеты демонстрируют принципиальное расхождение результатов при использовании старой и новой моделей.

Abstract: The theoretical investigation of a nonequilibrium phase transition using a drop structure is performed. A proposed relaxation model to describe the thermal and dynamic processes that result from the depressurization of vessels filled with high-pressure water is developed. The conducted comparative calculations using the old and new models demonstrate a fundamental discrepancy in the results.

Ключевые слова: двухфазная среда, вскипающая жидкость, релаксационная модель, метастабильное состояние

Keywords: two-phase medium, boiling liquid, relaxation model, metastable state

Для описания динамического процесса выброса вскипающей воды при разгерметизации емкостей с высоким давлением, как правило, применяют термодинамически неравновесную двухтемпературную модель пароводяной смеси [1-3]. При моделировании парообразования в реальных условиях необходимо либо задавать параметры гетерогенного механизма образования пузырьков (например, [4]), либо использовать иной (феноменологический) подход (например,

релаксационный [5]). В частности, в работах [6, 7] предлагается, как эмпирический параметр, задавать число готовых центров парообразования с дополнением асимптотическими моделями роста пузырьков. Из-за использования лишь пузырьковой структуры для описания двухфазной среды, это подход теряет адекватность при больших ($\alpha > 0,3-0,5$) объемных паросодержаниях.

В работе [1] на основании проведенного анализа переноса тепла в каплях, была предложена

простая релаксационная модель, в которой (как и в более ранней феноменологической модели [5,8-11]) использовалось уравнение для скорости роста локального массового паросодержания X в виде:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{X - X_{SAT}}{\theta}$$

При этом характерный размер каплей определялся критическим числом Вебера [12].

В работе [1] было показано преимущество модели по сравнению с более ранними предложенными модельными исследованиями. Модель теплообмена [1] не учитывала поток тепла из паровой фазы на межфазную поверхность, что не совсем приемлемо при значительных объемных паросодержаниях среды. При моделировании, также принималось достаточно сильное ограничение сохранения числа каплей в единице массы смеси. В настоящей работе предлагается модификация модели [1] с устранением существующих недостатков.

Согласно ячеистой модели, на микроуровне теплоизолированной ячейки, состоящей из капли и окружающего ее пара [12] (рис. 1), необходимая для фазового перехода теплота определяется разностью потоков тепла на поверхности капли из жидкости и из пара [12]:

$$\frac{dm_{DROP}}{dt} = 4\pi R_{DROP}^2 \frac{q_{IN}}{L} = 4\pi R_{DROP}^2 \frac{q_{LIQ} - q_{VAP}}{L} \quad (1)$$

Здесь m_{DROP} и R_{DROP} – масса и радиус капли, $q_{IN} = q_{LIQ} - q_{VAP}$ – результирующий удельный поток тепла на межфазной границе.

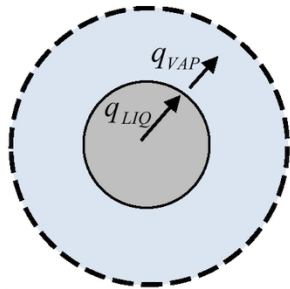


Рис. 1. Схематичное изображение ячейки «жидкость-пар».

Fig. 1. Schematic representation of a liquid drop in a vapor.

Для определения q_{LIQ} и q_{VAP} решаем следующую упрощенную модельную задачу.

А именно, рассматриваем регулярный тепловой режим теплообмена [13] при фиксированном давлении P в сферической жидкой капле фиксированного размера и в сферическом слое, заполненном паром (рис. 1). При этом температуру поверхности капли считаем равной температуре насыщенного пара $T_{SAT}(P)$ [12].

В этом предельном случае изменение температуры в любой точке описывается

«основной» экспонентой. В частности, для капли получается соотношение:

$$\frac{dT_{LIQ}}{dt} = \frac{T_{SAT}(P) - T_{LIQ}}{\tau_{LIQ}} \quad (2)$$

где T_{LIQ} – средняя по объему капли температура перегретой (или недогретой) воды, а время релаксации

$$\tau_{LIQ} = \frac{R_{DROP}^2}{\pi^2 a_{LIQ}} \quad (3)$$

Аналогичную формулу (2) для регулярного теплового режима в окружающем каплю паре можно получить, считая заполненный паром сферический слой, плоской пластиной:

$$\frac{dT_{VAP}}{dt} = \frac{T_{SAT}(P) - T_{VAP}}{\tau_{VAP}} \quad (4)$$

где из [13]

$$\tau_{VAP} = \frac{R_{DROP}^2 \left[(1 - \Phi)^{-1/3} - 1 \right]^2}{\pi^2 a_{VAP}} \quad (5)$$

Здесь Φ – объемное паросодержание. Для получения необходимой в модельных численных расчетах «релаксационной» формулы вида (2), (3) для массового паросодержания X , проделаем ряд выкладок. Считаем, что система монодисперсна (все капли одинакового размера). Поскольку удельная (на ед. массы) межфазная поверхность равна:

$$\frac{3(1 - \Phi)}{R_{DROP} \rho} = \frac{3(1 - X)}{R_{DROP} \rho_{LIQ}},$$

то скорость увеличения (или уменьшения) массового паросодержания определяется выражением:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{3q_{IN}(1 - \Phi)}{R_{DROP} L \rho} = \frac{3q_{IN}(1 - X)}{R_{DROP} L \rho_{LIQ}} \quad (6)$$

Реально при изменении паросодержания X изменяется размер каплей при сохранении числа каплей в единице массы парожидкостной среды N_{DROP} . Не теряя общности, можно считать, что при сохранении размера каплей, изменяется N_{DROP} (подобные модели заложены в теплогидравлические коды, например в [14]).

Из теплового баланса для капли и пара в ячейке:

$$q_{LIQ} = -\frac{R_{DROP}}{3} C_{P,LIQ} \rho_{LIQ} \frac{dT_{LIQ}}{dt} = -\frac{R_{DROP}}{3} C_{P,LIQ} \rho_{LIQ} \frac{[T_{SAT}(P) - T_{LIQ}]}{\tau_{LIQ}} \quad (7)$$

$$-q_{VAP} = -\frac{R_{DROP}}{3} \frac{\varphi}{1-\varphi} C_{P,VAP} \rho_{VAP} \frac{dT_{VAP}}{dt} = -\frac{R_{DROP}}{3} \frac{\varphi}{1-\varphi} C_{P,VAP} \rho_{VAP} \frac{[T_{SAT}(P) - T_{VAP}]}{\tau_{VAP}}$$

Подставляя (7) в (6) с учетом (2), (4), $q_{IN} = q_{LIQ} - q_{VAP}$, получаем

$$\frac{dX}{dt} = \frac{3q_{IN}(1-\varphi)}{R_{DROP}L\rho} = \frac{3q_{IN}(1-X)}{R_{DROP}L\rho_{LIQ}} - \frac{(1-X)}{L} C_{P,LIQ} \frac{dT_{LIQ}}{dt} - \frac{(1-X)}{L} \frac{\rho_{VAP}}{\rho_{LIQ}} \frac{\varphi}{1-\varphi} C_{P,VAP} \times \frac{dT_{VAP}}{dt} = -\frac{(1-X)}{L} C_{P,LIQ} \frac{dT_{LIQ}}{dt} - \frac{X}{L} C_{P,VAP} \frac{dT_{VAP}}{dt} \quad (8)$$

$$(1-X) \frac{\rho_{VAP}}{\rho_{LIQ}} \frac{\varphi}{1-\varphi} \equiv X$$

поскольку

Перепишем (8)

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{(1-X)}{L} C_{P,LIQ} \frac{dT_{LIQ}}{dt} - \frac{X}{L} C_{P,VAP} \frac{dT_{VAP}}{dt} = -\frac{(1-X)}{L} C_{P,LIQ} \frac{[T_{SAT}(P) - T_{LIQ}]}{\tau_{LIQ}} - \frac{X}{L} C_{P,VAP} \frac{[T_{SAT}(P) - T_{LIQ}]}{\tau_{LIQ}} \quad (9)$$

Из энтальпийного баланса при постоянном давлении естественным образом можно записать:

$$X_0 - X_{SAT} = -\frac{(1-X_0)}{L} C_{P,LIQ} (T_{LIQ,0} - T_{SAT}) - \frac{X_0}{L} C_{P,VAP} (T_{VAP,0} - T_{SAT}) \quad (11)$$

Если начальные условия таковы, что выполняется неравенство

$$\frac{X_0}{(1-X_0)} \frac{C_{P,VAP}}{C_{P,LIQ}} \leq \frac{(T_{SAT} - T_{LIQ,0})}{(T_{VAP,0} - T_{SAT})}, \quad (12)$$

то после повышения (понижения) давления при установлении равновесия происходит конденсация (испарение). В противном случае – наоборот.

По упрощенной модели [1], где не учитывались параметры пара, получалось другое равновесное значение паросодержания:

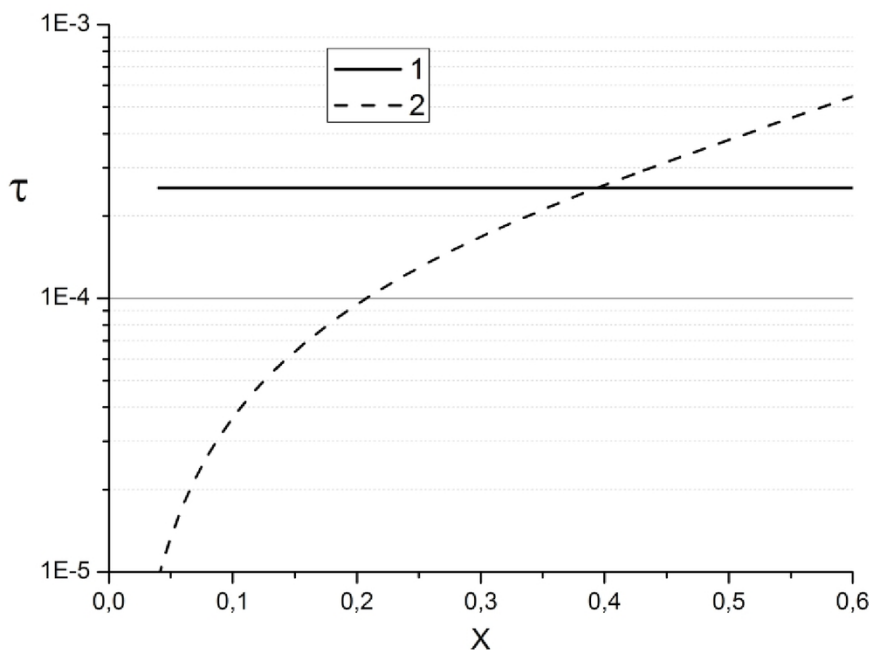


Рис. 2. Зависимость τ_{LIQ} (кривая 1) и τ_{VAP} (кривая 2) от массового паросодержания X . $T_0 = 250^\circ\text{C}$ (523 K), $P_0 = P_{SAT}(T_0) = 3,98$ МПа. Радиус капле $R_{DROP} = 20 \cdot 10^{-6}$ м.

Fig. 2. Dependence of τ_{LIQ} (curve 1) and τ_{VAP} (curve 2) on the vapor quality of X . $T_0 = 250^\circ\text{C}$ (523K), $P_0 = P_{SAT}(T_0) = 3.98$ MPa. Drop radius $R_{DROP} = 20 \cdot 10^{-6}$ m.

$$X_0 - X_{SAT} = -\frac{(1-X)}{L} C_{P,LIQ} (T_{LIQ,0} - T_{SAT}) \quad (13)$$

Предположим, что вначале система находилась в равновесии при $P_0, T_0 = T_{SAT}(P_0), X_0$. Далее давление скачком изменилось до $P = P_0 + \Delta P$. Поскольку

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s = \frac{\beta T}{\rho C_p} \left(\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \right)$$

(β – изобарический коэффициент объемного расширения), то температура в жидкости и паре скачком изменилась до значений

$$T_{LIQ,0} \approx T_0 + \Delta P T_0 \beta_{LIQ} / \rho_{LIQ} C_{P,LIQ}, \quad T_{VAP,0} \approx T_0 + \Delta P T_0 \beta_{VAP} / \rho_{VAP} C_{P,VAP}, \quad (14)$$

а температура межфазной границы

$$T_{SAT}(P) \approx T_0 + \Delta P T_0 / \rho_{VAP} L \quad (15)$$

В этом случае, с учетом (14) и (15) неравенство (13) переходит в

$$\frac{X_0}{(1-X_0)} \frac{C_{P,VAP}}{C_{P,LIQ}} \leq \frac{\left(\frac{1}{L \rho_{VAP}} - \frac{\beta_{LIQ}}{\rho_{LIQ} C_{P,LIQ}} \right)}{\left(\frac{\beta_{VAP}}{\rho_{VAP} C_{P,VAP}} - \frac{1}{L \rho_{VAP}} \right)} \quad (16)$$

Из (9), (10) запишем связь $\delta X, \delta X_t, \delta X_{tt}$ с δT_{LIQ} и δT_{VAP} :

$$\delta X = -A_L \delta T_{LIQ} - B_V \delta T_{VAP}$$

$$\frac{d\delta X}{dt} = A_L \frac{\delta T_{LIQ}}{\tau_{LIQ}} + B_V \frac{\delta T_{VAP}}{\tau_{VAP}}, \quad (17)$$

$$\frac{d^2\delta X}{dt^2} = -A_L \frac{\delta T_{LIQ}}{\tau_{LIQ}^2} - B_V \frac{\delta T_{VAP}}{\tau_{VAP}^2}$$

$$A_L = \frac{(1-X_0)}{L} C_{P,LIQ},$$

где обозначили

$$B_V = \frac{X_0}{L} C_{P,VAP}. \text{ Из (17), исключая } \delta T_{LIQ} \text{ и } \delta T_{VAP},$$

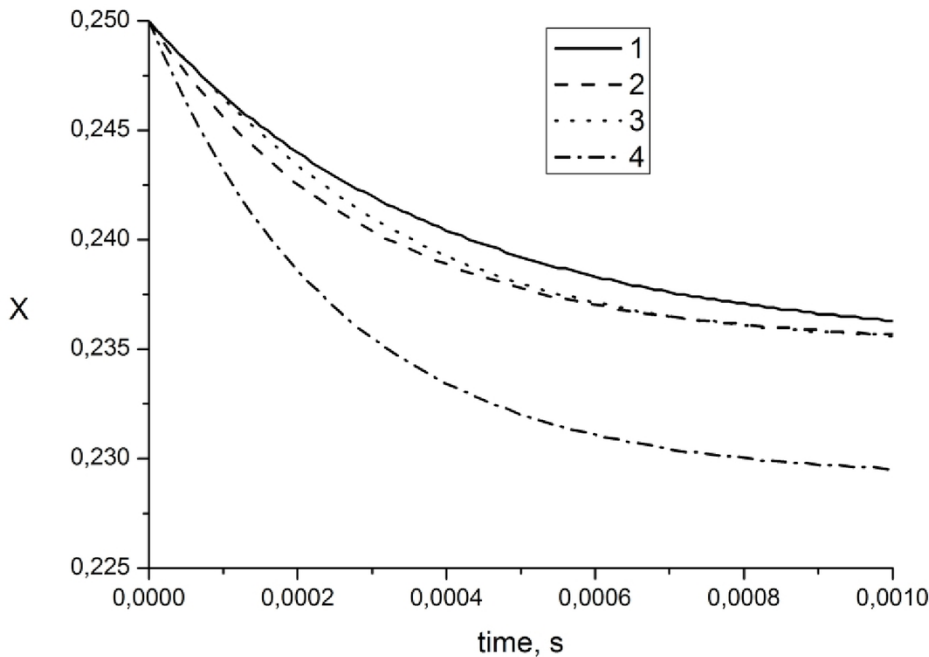


Рис. 3. Зависимость от времени массового паросодержания X при установлении равновесия по различным моделям: 1 – приближение (21) ($n = 1, \theta = \tau_{VAP} + \tau_{LIQ}$); 2 – приближение (21) ($n = 2, \theta = \sqrt{\tau_{LIQ}^2 + \tau_{VAP}^2}$); 3 – точное решение (17) или (18); 4 – приближение [1] ($\theta = \tau_{LIQ}$); $X_0 = 0,25, \Delta T = 10\text{K}$ (конденсация).

Fig. 3. Time dependence of the vapor quality X : 1 - approximation (21) ($n = 1, \theta = \tau_{VAP} + \tau_{LIQ}$); 2 - approximation (21) ($n = 2, \theta = \sqrt{\tau_{LIQ}^2 + \tau_{VAP}^2}$); 3 - the exact solution (17) or (18); 4 - approximation [1] ($\theta = \tau_{LIQ}$) $X_0 = 0.25, \Delta T = 10\text{K}$ (condensation)

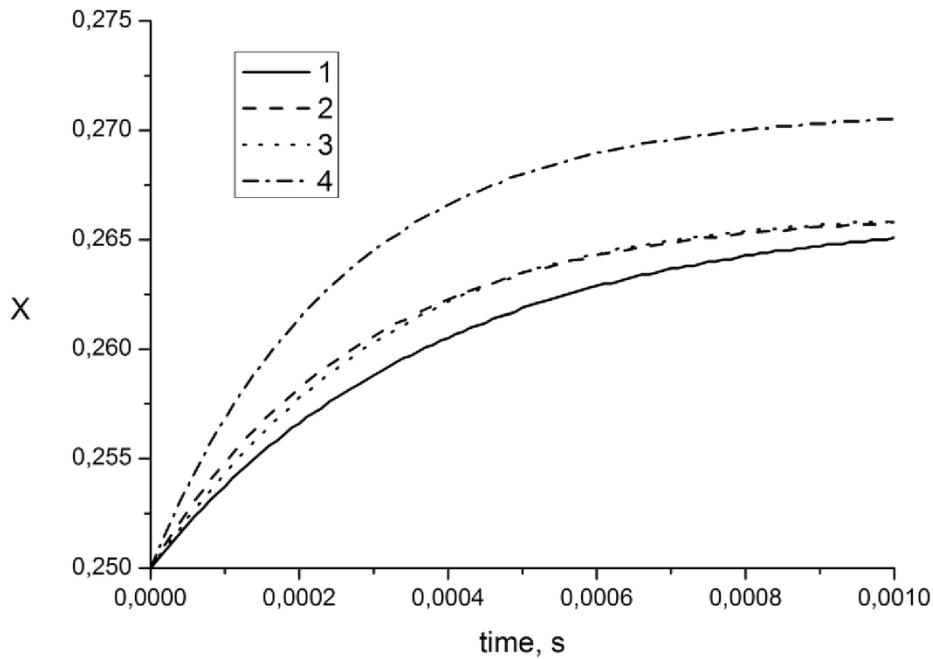


Рис. 4. Зависимость от времени массового паросодержания X при установлении равновесия по различным моделям: 1 – приближение (21) ($n = 1, \theta = \tau_{VAP} + \tau_{LIQ}$); 2 – приближение (21) ($n = 2, \theta = \sqrt{\tau_{LIQ}^2 + \tau_{VAP}^2}$); 3 – точное решение (17) или (18); 4 – приближение [1] ($\theta = \tau_{LIQ}$); $X_0 = 0,25, \Delta T = 10\text{K}$ (испарение)

Fig. 4. Time dependence of the vapor quality X : 1 – approximation (21) ($n = 1, \theta = \tau_{VAP} + \tau_{LIQ}$); 2 – approximation (21) ($n = 2, \theta = \sqrt{\tau_{LIQ}^2 + \tau_{VAP}^2}$); 3 – the exact solution (17) or (18); 4 – approximation [1] ($\theta = \tau_{LIQ}$); $X_0 = 0,25, \Delta T = 10\text{K}$ (evaporation)

можно получить для δX релаксационное уравнение 2-го порядка с двумя временами релаксации

$$\frac{d^2 \delta X}{dt^2} + \frac{(\tau_{LIQ} + \tau_{VAP})}{\tau_{LIQ} \tau_{VAP}} \frac{d\delta X}{dt} + \frac{1}{\tau_{LIQ} \tau_{VAP}} \delta X = 0 \quad (18)$$

При $\tau_{VAP} \rightarrow 0$ (точнее при $\tau_{VAP} \ll \tau_{LIQ}$) уравнение (18) можно переписать

$$\tau_{VAP} \frac{d^2 \delta X}{dt^2} + \frac{d\delta X}{dt} + \frac{\delta X}{\tau_{LIQ}} = 0 \quad (19)$$

Первый член в (19) (малый параметр при старшей производной) играет основную роль на малых временах [15]. Сначала теплообмен происходит с паром, температура в нем выравнивается, становится равной $T_{SAT}(P)$, несколько изменяется паросодержание. Далее, процесс описывается классическим релаксационным уравнением, в котором время релаксации определяется теплопереносом в жидкости

$$\frac{d\delta X}{dt} + \frac{\delta X}{\tau_{LIQ}} = 0 \quad (20)$$

При больших объемных и умеренных массовых паросодержаниях τ_{VAP} может быть близко к τ_{LIQ} (рис. 2). Поэтому, в общем случае, необходимо, оставаясь в рамках классического уравнения 1-го порядка вида (20), для θ можно предложить некое интерполяционное соотношение, например, вида

$$\theta = m \sqrt{\tau_{LIQ}^m + \tau_{VAP}^m} \quad (21)$$

и решать уравнение

$$\frac{d\delta X}{dt} + \frac{\delta X}{\theta} = 0 \quad (22)$$

Для сравнения различных «релаксационных» приближений были рассчитаны зависимости от времени паросодержания X при установлении термодинамического равновесия, то есть при стремлении $T_{LIQ}, T_{VAP} \rightarrow T_{SAT}(P)$, а $X \rightarrow X_{SAT}(P)$. Анализ расчетов показывает, что при $X_0 < 0,1$, когда $\tau_{VAP} \ll \tau_{LIQ}$, все приближенные решения близки к «точному» (решение системы уравнений (17)). Увеличение начального паросодержания приводит близким значениям τ_{VAP} и τ_{LIQ} , а

приближенные решения существенно отличаются от «точного» (рис. 3, 4 для $X_0 = 0,25$).

Наиболее приемлемым для всех случаев можно считать решение с $n = 2$

$$\theta = \sqrt{\tau_{LIQ}^2 + \tau_{VAP}^2} \quad (23)$$

Расчеты, результаты которых приведены на рис. 3 и 4 рассчитывались при параметрах: $T_0 = 523\text{K}$, $P_0 = P_{SAT}(T_0) = 3,98 \text{ МПа}$, $\Delta T = \pm 10\text{K}$ (испарение или конденсация), $R_{DROP} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

парожидкостной среде капельной структуры. Развита предложенная ранее релаксационная модель для описания тепловых и динамических процессов, возникающих в результате разгерметизации сосудов, заполненных водой под высоким давлением.

Выполнены расчеты характерных времен релаксации по различным моделям.

Показано, что при определенных условиях значительное влияние на время релаксации оказывает паровая фаза.

Заключение
Проведено теоретическое исследование неравновесного фазового перехода в

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда проект №14-29-00093.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лежнин, С. И., Релаксационная модель парообразования для описания истечения вскипающей жидкости в область низкого давления / Лежнин, С. И., Вожаков И. С., Алексеев М. В., Богомолов А. Р. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016, № 5. – С. 93-102.
2. Lezhnin S., Modeling the outflow of liquid with initial supercritical parameters using the relaxation model for condensation/ Lezhnin S, Alekseev M, Vozhakov I, and Pribaturin N // MATEC Web Conf. Vol. 115, 2017, XXXIII Siberian Thermophysical Seminar (STS-33), Art. Num. 08015
3. Алексеев М.В., Волновые процессы при истечении водяного теплоносителя со сверхкритическими начальными параметрами/ Алексеев М.В., Вожаков И.С., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А. // Теплофизика и Аэромеханика. - 2017, Т 24, № 5. – С. 740-744.
4. Кумзерова, Е.Ю. Численное моделирование нуклеации и динамики пузырьков при быстром падении давления жидкости / Е.Ю. Кумзерова, А.А. Шмидт // Журнал технической физики. – 2002, Т.72, Вып.7. – С. 36-40
5. Zapolski, P. D. The non-equilibrium relaxation model for one-dimensional flashing liquid flow / P.D. Zapolski, Z. Bilicky, L. Bolle and J. Franco // Int. J. Multiphase Flow. – 1996, Vol.22, No.3. – P.473–483.
6. Болотнова, Р.Х. Гидродинамические особенности процессов истечения вскипающей жидкости / Р.Х. Болотнова, В. А. Бузина, М.Н. Галимзянов, В.Ш. Шагапов // Теплофизика и аэромеханика. – 2012, Т.19, № 6. – С. 719-730.
7. Болотнова, Р. Х. Пространственное моделирование нестационарной стадии истечения вскипающей жидкости из камер высокого давления / Р.Х. Болотнова, В. А. Бузина // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014, Т.7, №4. – С. 343-352.
8. Bergander M. J. Refrigeration Cycle With Two-Phase Condensing Ejector/ M. J. Bergander// International Refrigeration and Air Conditioning Conference. -2006, Paper No.748.
9. Ohkawa K. Assessment of Homogeneous Non-equilibrium Relaxation Critical Flow Model / K. Ohkawa // International Conference on Nuclear Engineering. - 2007, April 22-26, Nagoya, Japan, ICONE 15-10708, - 11p.
10. Angielczyk W. 1-D Modeling Of Supersonic Carbon Dioxide Two-Phase Flow Through Ejector Motive Nozzle / W. Angielczyk; Y. Bartosiewicz; D. Butrymowicz and J. -M. Seynhaeve // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. - 2010, Paper No.1102.
11. Артемов, В. И. Численное моделирование процессов тепло- и массопереноса в сопле и расширителе систем сепаратор-парогенератор теплоутилизационного комплекса / В.И. Артемов, К.Б. Минко, Г.Г. Яньков // Теплоэнергетика. – 2015, №12. – С. 61-69.
12. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. Том I. /Нигматулин, Р. И. – М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1987. – 330 с.
13. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. - М: Высшая школа, 1967. – 600 с.
14. Кудашов, И. Г., Моделирование процессов кипения натрия в одномерном двухжидкостном приближении кодом СОКРАТ-БН / И.Г. Кудашов, В.Н. Семенов, А.Л. Фокин, Р.В. Чалый, С.И. Лежнин, Э.В. Усов // Атомная энергия. – 2011. Т. 111, вып.3. – С. 137-139.
15. Найфэ, А. Введение в методы возмущений / А. Найфэ. – М.: Мир, 1984. – 536 с.

REFERENCES

1. Lezhnin, S. I. Relaksacionnaja model' paroobrazovaniya dlja opisaniya istecheniya vskipajushhej zhidkosti v oblast' nizkogo davlenija [Vaporization relaxation model for the calculation of the boiling liquid outflow in a low pressure area] / Lezhnin S.I., Vozhakov I.S., Alekseev M.V., Bogomolov A.R. // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. [Bulletin of the Kuzbass State Technical University] – 2016, No 5. – P. 93-102. (In Russian).
2. Lezhnin S., Modeling the outflow of liquid with initial supercritical parameters using the relaxation model for condensation/ Lezhnin S, Alekseev M, Vozhakov I, and Pribaturin N // MATEC Web Conf. Vol. 115, 2017, XXXIII Siberian Thermophysical Seminar (STS-33), Art. Num. 08015
3. Alekseev M.V., Volnovye processy pri istechenii vodjanogo teplonositelja so sverhkriticheskimy nachal'nymi parametrami [Wave processes at the expiration of the water coolant with supercritical initial parameters] / Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A.// Teplofizika i aeromekhanika. [Thermophysics and Aeromechanics]. -2017, V. 24, N. 5. – P. 740-744. (In Russian).
4. Kumzerova, Chislennoe modelirovanie nukleatsii i dinamiki puzyr'kov pri bystrom padenii davleniya zhidkosti [Numerical modeling of nucleation and bubble dynamics in a fast drop in fluid pressure]/Kumzerova, E.Yu., Shmidt A.A. //Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical physics] - 2002, V.72, N.7. – PP. 36-40 (In Russian).
5. Zapolski, P. D. The non-equilibrium relaxation model for one-dimensional flashing liquid flow / P.D. Zapolski, Z. Bilicky, L. Bolle and J. Franco // Int. J. Multiphase Flow. – 1996, Vol.22, No.3. – P.473–483.
6. Bolotnova R.Kh., Gidrodinamicheskie osobennosti protsessov istecheniya vskipayushchey zhidkosti. [Hydrodynamic peculiarities of the processes of expiration of the boiling liquid]./Bolotnova R.Kh., Buzina V. A., Galimzyanov M.N., Shagapov V.Sh.// Teplofizika i aeromekhanika. [Thermophysics and Aeromechanics] – 2012, V.19, N. 6. – PP. 719-730. (In Russian).
7. Bolotnova P. X. Prostranstvennoe modelirovanie nestatsionarnoy stadii istecheniya vskipayushchey zhidkosti iz kamer vysokogo davleniya [Spatial modeling of non-stationary stage of the expiration of the boiling liquid from high-pressure cells] / Bolotnova P. X. , Buzina V. A. // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred [Computational continuum mechanics].- 2014, V.7, N. 4. – PP. 343-352.(In Russian).
8. Bergander, M. J. Refrigeration Cycle With Two-Phase Condensing Ejector / M. J. Bergander// International Refrigeration and Air Conditioning Conference. - 2006, Paper No.748.
9. Ohkawa, K. Assessment of Homogeneous Non-equilibrium Relaxation Critical Flow Model / K. Ohkawa // International Conference on Nuclear Engineering. - 2007, April 22-26, Nagoya, Japan, ICONE 15-10708. - 11p.
10. Angielczyk, W. 1-D Modeling Of Supersonic Carbon Dioxide Two-Phase Flow Through Ejector Motive Nozzle / W. Angielczyk; Y. Bartosiewicz; D. Butrymowicz and J. -M. Seynhaeve // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. - 2010, Paper No.1102.
11. Artemov, V.I. Numerical simulation of heat and mass transfer processes in the nozzle and expansion unit of the separator steam generator system in waste heat utilization complex / V.I. Artemov, K.B. Minko, G.G. Yan'kov // Thermal engineering. – 2015, Vol. 62, No.12. – P. 897-905.
12. Nigmatulin, R. I. Dynamics of multiphase media. Vol. 1. – M.: CRC Press, 1987. – 330 p.
13. Lykov, A. V. Theory of heat conduction. / A.V. Lykov. – M.: Vysshaya Shkola, 1967. – 599.
14. Kudashov, I. G. Sodium boiling: One-dimensional two-liquid modeling using the SOKRAT-BN computer code / I.G. Kudashov, V.N. Semenov, A.L. Fokin, R.V. Chalyi, S.I. Lezhnin, E.V. Usov // Atomic Energy. – 2012, Vol.111, No. 3. – P. 179-184.
15. Naife, A. Introduction to perturbation methods / A. Naife. – M.: Mir, 1984. – 536 p.

Поступило в редакцию 05.11.2017
Received 05.11.2017