

**О МОДЕЛИРОВАНИИ ИЗГИБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СТРУЙ РАСПЛАВА  
В ПОДРЕАКТОРНОМ БАССЕЙНЕ С ВОДОЙ ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС**

**Вахид Хасани Могадам, И. В. Казачков**

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*

Представлены результаты моделирования изгибных возмущений струй расплава в бассейне охладителя и распада струй на капли и показано, что в числе малоизученных проблем, которые нуждаются в решении для улучшения систем пассивной защиты от тяжелых аварий на АЭС, находятся распад тонких струй вследствие изгибной неустойчивости и глубина проникания струи в бассейн с испаряющимся охладителем. Эти проблемы относятся к начальной фазе тяжелой аварии в контейнменте при растекании расплава кориума в подреакторном бассейне с водой. От успешного решения этих проблем зависит эффективность пассивной системы защиты от тяжелых аварий.

*Ключевые слова:* струя, расплав, бассейн, изгибные волны, модель.

**Актуальность проблемы**

В пассивных системах защиты от тяжелых аварий на АЭС может рассматриваться конструкция с бассейном воды в подреакторном пространстве [1 - 5]. Назначение бассейна – улавливание струи расплава кориума и его удержание в контролируемом состоянии. Для этого необходимо исследовать особенности внедрения струи, ее распада на капли, застывания капель в частицы и охлаждения частиц в различных гипотетических сценариях аварии в диапазоне изменения известных физических свойств кориума.

На начальной стадии аварии с разрушением корпуса реактора тонкая струя расплава, проникающая в бассейн с водой, подвержена изгибным возмущениям оси струи, которые могут разру-

шить струю на отдельные фрагменты. Поэтому задача моделирования внедрения струй расплава в охладитель актуальна. Сложность ее в том, что физические свойства мало изучены и их диапазоны довольно широкие, к тому же необходимо учитывать взаимное влияние разных свойств и факторов.

**Математическая модель распространения тонких струй расплава в охладителе**

Уравнения динамики изгибных возмущений оси тонких струй рассматривались рядом авторов [1 - 5]. Для определения инкремента изгибных возмущений  $\chi$  получено дисперсионное соотношение вида [2, 3]:

$$\begin{aligned} & \gamma^2 \left\{ 1 + 0.25 \chi^2 A^2 B^2 \left( A^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-2} + \frac{A^2 - B^2}{8} \chi^2 \left( A^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-1} \times \right. \\ & \times \left[ 2 \cos \frac{\chi S}{a_0} + \frac{A^2 - B^2}{2} \sin^2 2 \frac{\chi S}{a_0} \left( A^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-1} \right] \Bigg\} = \frac{B^2 - A^2}{8} \chi^2 \left\{ 2 \frac{\chi}{a_0} \cos 2 \frac{\chi S}{a_0} [\rho_{2/1} U_0^2 \frac{\chi}{a_0} \times \right. \\ & \times \left( A^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-1} + (1 - \rho_{2/1}) g \left( A^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-1/2} \left( A^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-1/2} \Bigg] + \\ & + \frac{A^2 - B^2}{2} \sin^2 2 \frac{\chi S}{a_0} \left( \frac{\chi}{a_0} \right) [\rho_{2/1} U_0^2 \frac{\chi}{a_0} \left( A^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-2} + (\rho_{2/1} - 1) g \cdot \left( A^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-3/2} \times \\ & \times \left( A^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-1/2} \Bigg] - \frac{a_0^4}{4} \left( \frac{\chi}{a_0} \right)^3 (AB)^2 \left( A^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-5/2} \left\{ \rho_{2/1} U_0^2 \left( \frac{\chi}{a_0} \right) + \right. \\ & \left. + (\rho_{2/1} - 1) g \left( A^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-1/2} \left( A^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{1/2} \right\} + \rho_{2/1} U_0^2 \left( \frac{\chi}{a_0} \right)^2 + \\ & \left. + (\rho_{2/1} - 1) g \frac{\chi}{a_0} \left( A^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{1/2} \left( A^2 \cos^2 \frac{\chi S}{a_0} + B^2 \sin^2 \frac{\chi S}{a_0} \right)^{-1/2}, \right. \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A, B$  – константы (начальные амплитуды возмущений по двум координатам);  $\chi, a_0, s, \rho_{2/1}, g$  – длина волны, радиус струи, координата вдоль оси струи, отношение плотностей бассейна и струи и ускорение свободного падения соответственно.

Особенности распространения и распада струй на капли в значительной мере определяются отношением плотностей сред. Рассмотрим их на примере двух пар жидкостей: “вода - воздух” и “расплав - вода”. Допустим, что струйка возду-

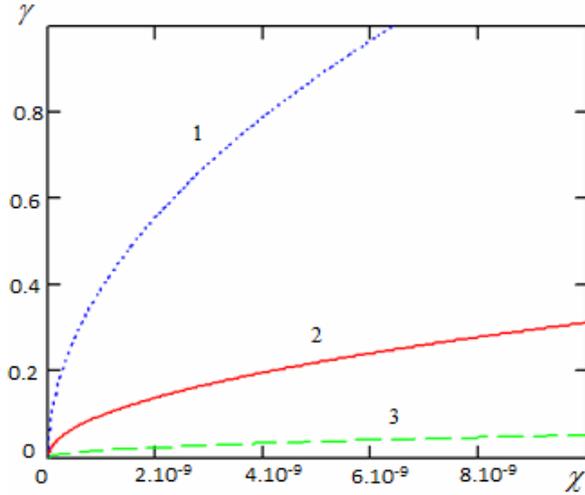


Рис. 1. Зависимость инкремента нарастания возмущений от длины волны: 1 -  $U_0 = 9$  м/с; 2 - 3 м/с; 3 - 0,5 м/с.

Начальный радиус струйки:  $a_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  м, смещения оси по направлениям в плоскости, перпендикулярной оси,  $H = 1 \cdot 10^{-4}$  м и  $Z = 1 \cdot 10^{-4}$  м. Их отношение  $B/A = 1$ . Тогда число Фруда будет, соответственно,  $Fr = 8257, 917,8, 25,48$  (кривые 1 - 3 на рис. 1 и 2), отношение плотностей  $\rho_{21} = 830$ . Посмотрим, насколько будет зависеть рост возмущений (инкремент  $\gamma$ ) и длина нераспавшейся части струи от длины изгибных волн  $\chi$  [2, 3]:

$$\gamma = \pm \frac{4U_0\chi}{a_0\sqrt{4+\chi^2}} \sqrt{\rho_{21} + \frac{B}{A} \frac{\rho_{21}-1}{\chi \cdot Fr}},$$

$$\frac{L_*}{a_0} = \ln\left(\frac{\Delta a_0}{A}\right) \frac{U_0}{a_0 \sqrt{\frac{B}{A} (\rho_{21}-1) \frac{g\chi}{a_0}}}. \quad (2)$$

### Моделирование взаимодействия струй с охладителем

Как видно из представленных на рис. 3 и 4 данных, в области коротких изгибных волн ин-

кремент нарастает с увеличением длины волны, а глубина проникания струи в бассейн (длина нераспавшейся части струи) падает (чем больше скорость струи, тем интенсивнее). Если под действием случайных возмущений струя изгибается, то согласно [2, 3] можно определить длину сплошной части струи  $L_*/a_0$  до ее распада вследствие роста изгибной неустойчивости, а также найти зависимость инкремента нарастания возмущений от разных параметров задачи. Возьмем для примера следующие значения начальной скорости струи:  $U_0 = 9, 3, 0,5$  м/с.

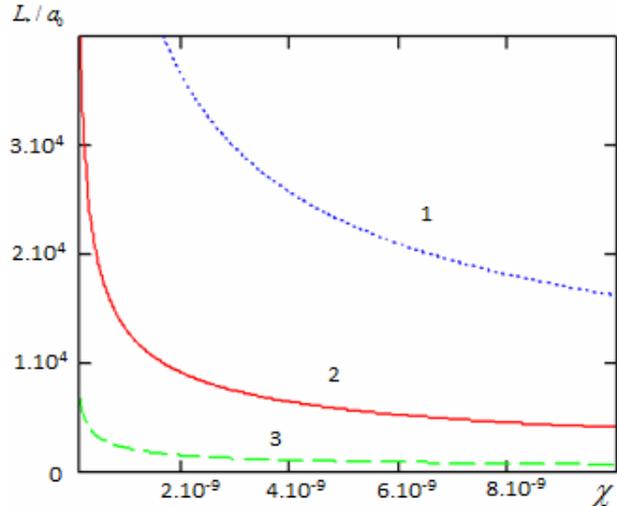


Рис. 2. Зависимость длины нераспавшейся части струи от длины волн.

кремент нарастает с увеличением длины волны, а глубина проникания струи в бассейн (длина нераспавшейся части струи) падает (чем больше скорость струи, тем интенсивнее).

Другой случай – струя охладителя в тяжелом расплаве (например, воды в топливе).

Здесь отношение плотностей бассейна и струи значительно ниже, чем в первом случае (примерно в 44 раза). Начальные параметры следующие:  $\rho_{21} = 19$ , начальная скорость  $U_0 = 1, 0,2$  и  $0,01$  м/с, начальный радиус струйки  $a_0 = 5 \cdot 10^{-2}$  м, смещения оси по направлениям  $O_1\eta - H = 1 \cdot 10^{-4}$  м и  $O_1\zeta - Z = 1 \cdot 10^{-4}$  м. Отношение начальных амплитуд возмущений струи  $B/A = 1$ . Число Фруда в первом случае ( $U_0 = 1$ ) равно  $Fr = 0,081$ . Как видно из представленных данных, инкремент нарастания в этом случае на порядок ниже, чем в предыдущем, поскольку при меньшей разности плотностей струи и бассейна сопротивление внедрению струи в бассейн и воздействие бассейна на струю меньше. Общие закономерности похожи.

Как видно из формулы (2), полученной с точ-

ностью до величин второго порядка по малым длинам волн, в случае малого отношения плотности бассейна и плотности струи (например, струя воды в воздухе), влияние бассейна на рост изгибных возмущений струи незначительно. Инкременты нарастания волн получаются величинами мнимыми, что означает чисто колебатель-

ный процесс без роста возмущений во времени. Следовательно, в этом случае распад струй вследствие роста изгибных возмущений невозможен. А зависимость частоты колебаний видна из рис. 3, 4 и 5, а, где  $\gamma$  уже будет не инкремент, а частота колебаний.

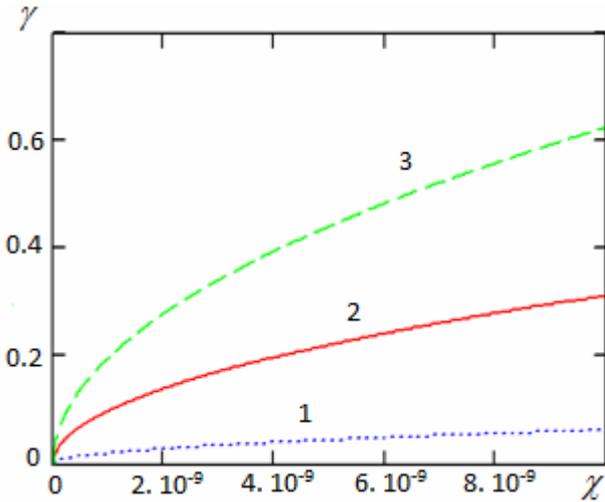


Рис. 3. Зависимость инкремента нарастания возмущений от длины волны.

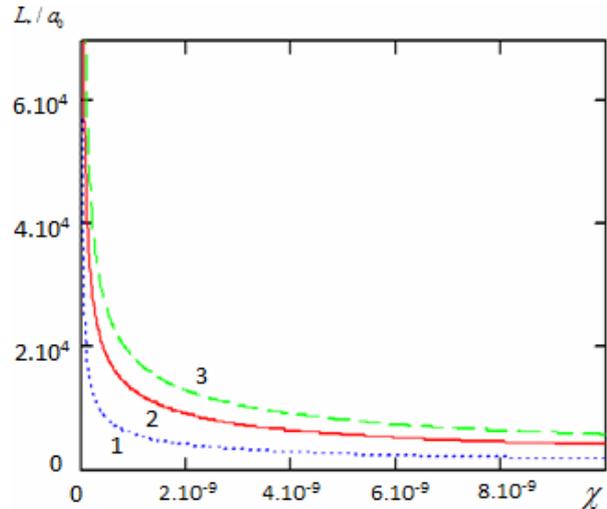
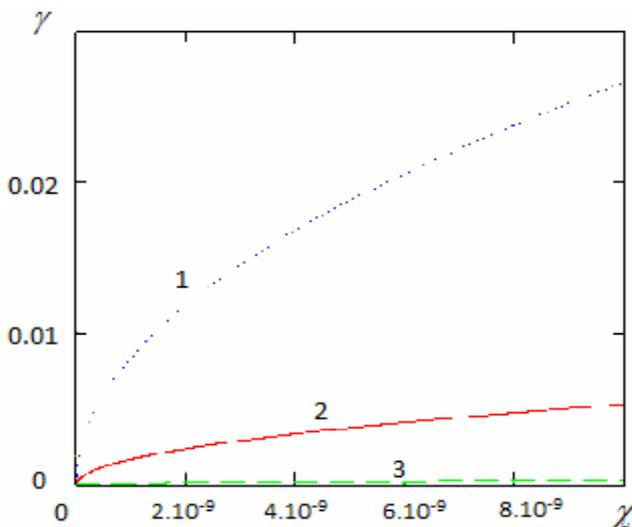
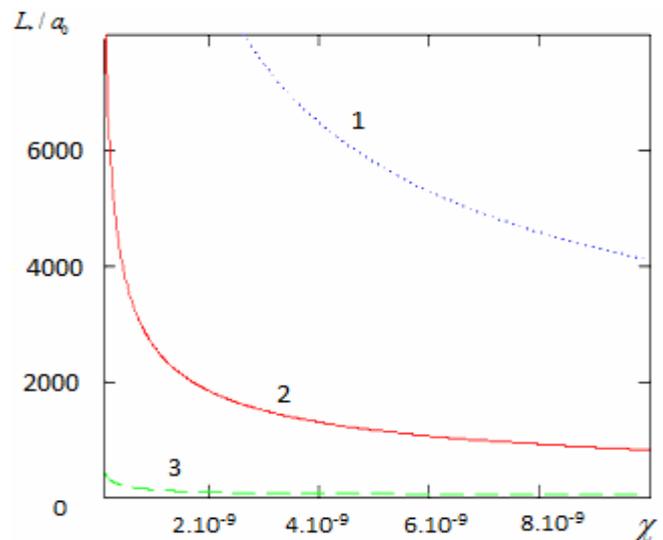


Рис. 4. Зависимость длины нераспавшейся части струи от длины волны.



а



б

Рис. 5. Зависимость инкремента нарастания возмущений (а) и длины нераспавшейся части струи (б) от длины волны для разных скоростей струи: 1 -  $U_0 = 1$  м/с; 2 - 0,2 м/с; 3 - 0,01 м/с.

Имеющиеся немногочисленные экспериментальные и теоретические данные других авторов подтверждают выявленные закономерности распространения и распада тонких струй за счет изгибных возмущений их оси [6 - 11].

#### Вычислительный эксперимент для волн произвольной длины

Кроме вышеприведенного анализа аналитического решения задачи об изгибных возмуще-

ниях струй [2, 3], полученного для малых длин волн возмущений в первом и втором приближениях, был проведен вычислительный эксперимент по расчету значений инкремента нарастания изгибных возмущений  $\gamma$  для произвольных значений длин волн на основе общего дисперсионного соотношения (1). Результаты расчетов представлены на рис. 6 - 8.

Так, представленные на рис. 6 зависимости  $\gamma(\lambda)$  для разных значений  $A, B$  показывают, что, в

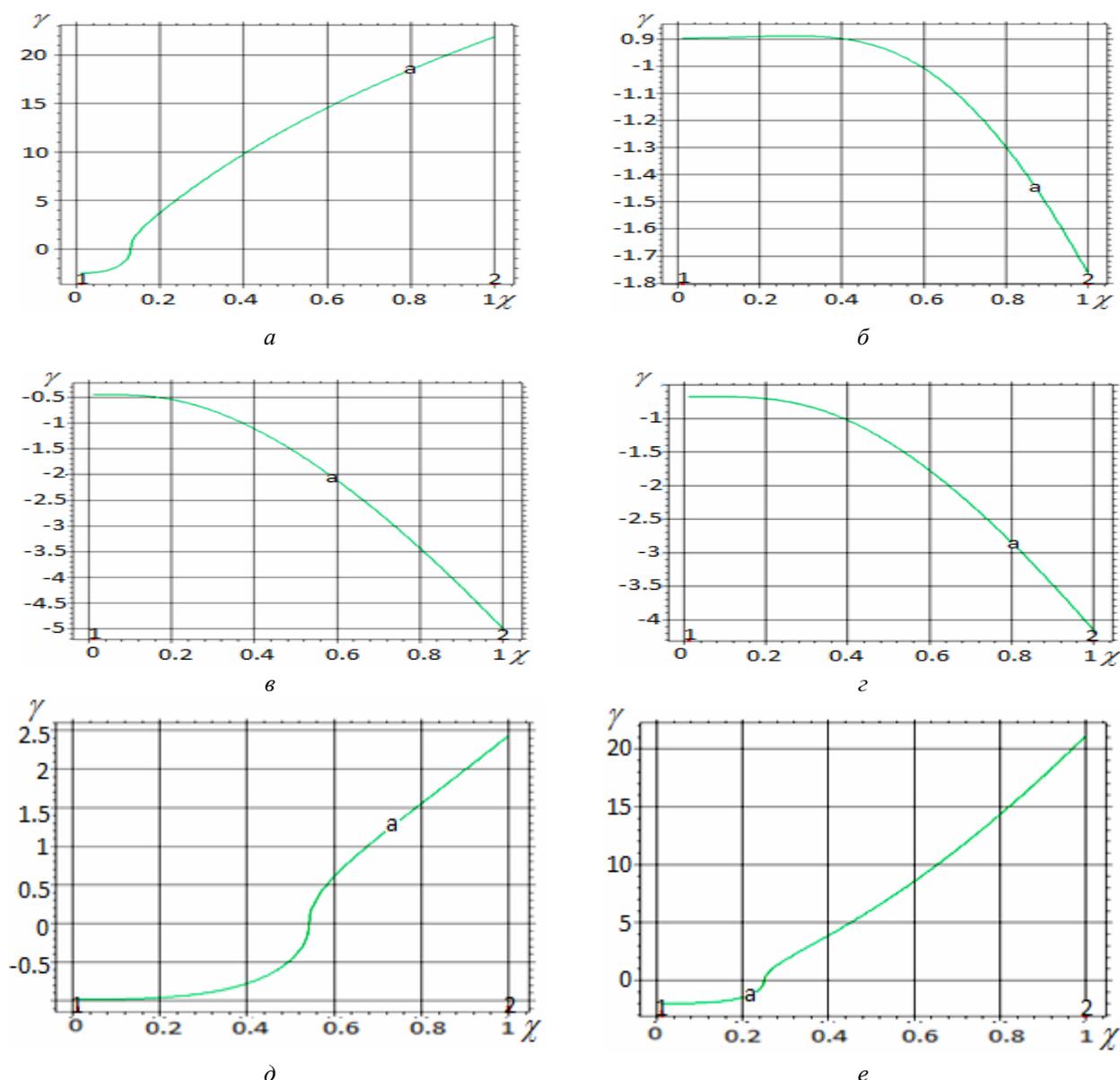


Рис. 6. Зависимость инкремента изгибных возмущений от длины волны:  
 $B = 1 - A = 0,1$  (а),  $A = 1,1$  (б),  $A = 5$  (в);  $A = 1 - B = 0,5$  (г),  $B = 1,1$  (д),  $B = 5$  (е).

отличие от приближенного аналитического решения, в общем случае и при низком отношении плотностей бассейна и струи ( $\rho_{21} = 0,1$ ) возможен рост изгибных возмущений с длиной волны выше критической (чем длиннее волны, тем выше рост их амплитуды). Причем картина существенно зависит от соотношения амплитуд возмущений по координатам в плоскости, перпендикулярной оси струи (отношение  $A/B$ ), что нарушает осевую симметрию струи (число Фруда здесь равно  $Fr = 1$ ).

При  $A = 1, B = 1, \rho_{21} = 0,1, Fr = 1$  и 100 картина для чисел Фруда в диапазоне 1 - 100 практически идентична, и критическая длина волны приблизительно равна 0,73.

Как показывают результаты расчетов, представленные на рис. 7, зависимости  $\gamma(\chi)$  для  $A = B = 1, Fr = 1$  при разных значениях отношения

плотностей жидкостей свидетельствуют о том, что, в отличие от приближенного аналитического решения для малых длин волн, в общем случае и при очень низком отношении плотностей бассейна и струи ( $\rho_{21} = 0,01$ ) возможен рост изгибных возмущений с длиной волны выше 0,28.

При этом для  $\rho_{21} = 1$  (равноплотные жидкости) и  $\rho_{21} = 10$  (жидкость в бассейне в 10 раз плотнее жидкости внедряющейся струи) инкремент нарастания изгибных волн струи для всех длин волн положителен (растущие волны, вызывающие распад струи). Причем с ростом  $\rho_{21}$  инкремент возрастает (ускоряется распад струи) и с самых малых длин волн инкремент большой (при  $\rho_{21} = 1$  функция  $\gamma(\chi)$  выходит из нуля, тогда как при  $\rho_{21} = 10$  начинается примерно со значения 7).

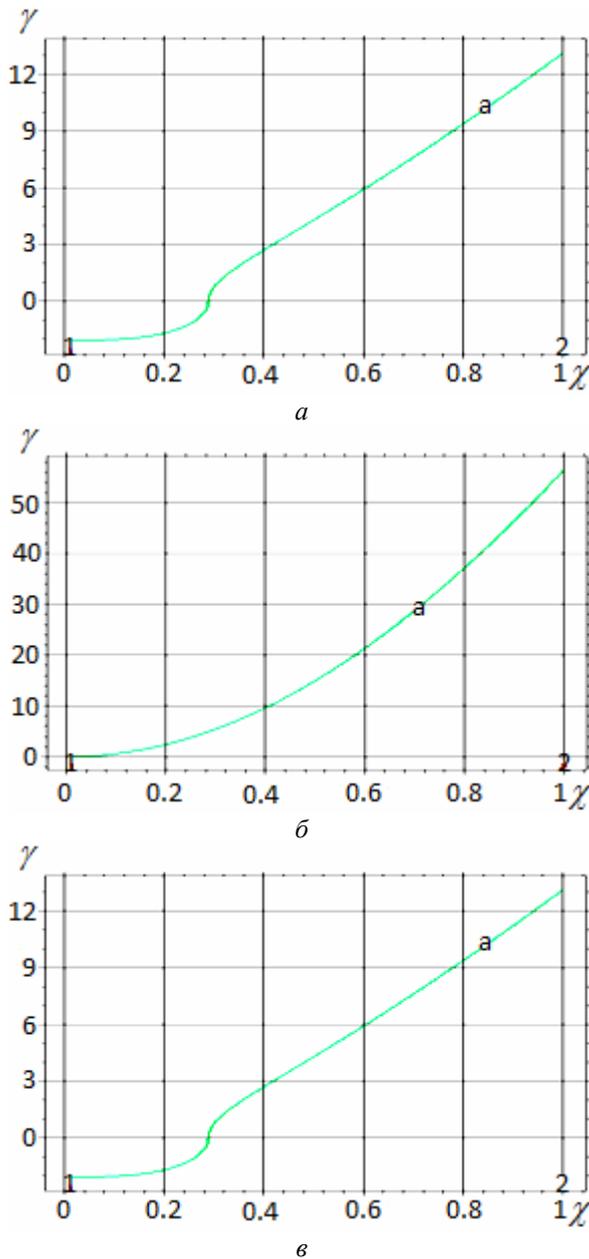


Рис. 7. Зависимость  $\gamma(\chi)$  для  $\rho_{21} = 0,01$  (а),  $\rho_{21} = 1$  (б) и  $\rho_{21} = 10$  (в).

### Выводы

Из проведенного анализа приближенного аналитического решения для изгибных волн малой длины, а также вычислительного эксперимента для общего случая волн произвольной длины следует, что задачи распада струй под действием изгибных возмущений требуют более детального изучения в широком диапазоне варьируемых параметров. Необходимо продолжить эти работы, чтобы понять причины распада струй и особенности их фрагментации в разных режимах. Необходимо детально объяснить физику происходящих процессов. Остается неясным, как интенсивное парообразование в бассейне влияет на

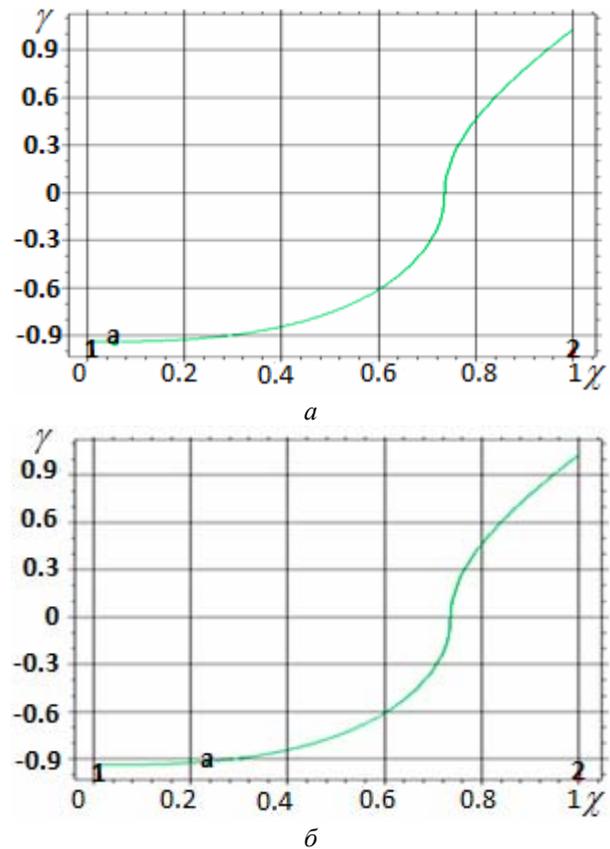


Рис. 8. Зависимость инкремента изгибных возмущений от длины волны для  $Fr = 1$  (а) и  $Fr = 100$  (б).

процесс распространения струй расплава. Выходящие навстречу струям расплава мощные струи пара, образующиеся от взаимодействия охладителя с высокотемпературной струей, могут оказывать столь сильное воздействие на динамику струи расплава, что как режим ее распространения в бассейне, так и режим распада струи на капли могут в значительной мере определяться именно этими процессами.

Проведенные исследования внедрения струй расплава в бассейн охладителя и распад струй на капли показал, что максимальная глубина внедрения нераспавшейся части струи в бассейн определяется отношением плотностей жидкостей, числом Фруда. В числе малоизученных проблем, которые нуждаются в решении для улучшения систем пассивной защиты от тяжелых аварий на АЭС, стоят проблема возникновения и развития изгибных возмущений оси струй и проблема проникания высокотемпературных струй в бассейн с испаряющимся охладителем. Эти проблемы относятся к начальной фазе тяжелой аварии в контейнменте при растекании расплава корнума в подреакторном бассейне с водой. После того, когда разрыв корпуса увеличивается в размере, струя становится толстой и расплав выходит более интенсивно в подреакторное пространство.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Казачков И.В.* Современное состояние и некоторые проблемы моделирования тяжелых аварий на зарубежных АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. - 2003. - № 1. - С. 25 - 34.
2. *Казачков И.В., Али Хасан Могоддам.* Моделирование теплогидравлических процессов при тяжелых авариях на АЭС: Монография. – К.: НТУУ «КПИ», 2008. - 172 с.
3. *Али Хасан Могоддам, Казачков И.В.* Удержание кориума в контейменте в тяжелых авариях на АЭС // Энергетика: економіка, технології, екологія. - 2007. - № 2. - С. 13 - 21.
4. *Haraldsson H.O., Kazachkov I.V., Dinh T.N., Sehgal B.R.* Analysis of thin jet breakup length in immiscible fluids // Abstracts. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Adv. in Fluid Mechanics (Montreal, Canada, 24 - 26 May, 2000). - Montreal, 2000. - P. 43 - 47.
5. *Kazachkov I.V., Haraldsson H.O., Yang Z.L., Sehgal B.R.* Instability analysis of the thin film flow dynamics in a micro channel // Abstracts. 5<sup>th</sup> Int. Symp. Heat Transfer. - Beijing, 2000. - P. 112 - 123.
6. *Bui V.A., Dinh T.N.* A Study of Instabilities of Liquid (Melt) Jet in a Lighter Coolant Pool. Book of summaries // EUROMECH Colloquium 355 on Interfacial Instabilities: Numerical Technique. Ecole Polytechnique (Paris, France, September 11 - 13, 1996). - Paris, 1996.
7. *Bui V.A., Dinh T.N., Sehgal B.R.* Numerical Simulation of Surface Instability Phenomena Associated with Fuel-Coolant Interaction // Proc. 8<sup>th</sup> Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NuReTH-8) (Kyoto, Japan, September, 1997). - Kyoto, 1997.
8. *Bui V.A., Dinh T.N., Sehgal B.R.* Analysis of Liquid Jet Instability: Effects of Physical Properties and Phase Change // Int. Symp. on Liquid-Liquid 2-Phase Flow and Transport Phenomena (Antalya, Turkey, 1997). - Antalya, 1997.
9. *Ентов В.М., Ярин А.Л.* Динамика струй и пленок вязких и реологически сложных жидкостей // Итоги науки и техники. - М., 1984. - Т. 18. - С. 112 - 197.
10. *Yarin A.L.* Dynamics of thin liquid jet and film flows // Longman Scientific & Technical. - Haifa, 1993.
11. *Saito M. et al.* Experimental study on penetration behaviors of water jet into Freon-11 and Liquid Nitrogen // ANS Proc. 1988. Nat. Heat Transfer Conference (Houston, Texas, USA, July 24 - 27, 1988). - Houston, 1988. - P. 173 - 183.

**ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ЗГІНАЮЧИХ ЗБУДЖЕНЬ СТРУМЕНІВ РОЗПЛАВУ В ПІДРЕАКТОРНОМУ БАСЕЙНІ З ВОДОЮ ПРИ ТЯЖКІЙ АВАРІЇ НА АЕС**

**Вахід Хасані Могоддам, І. В. Казачков**

Наведено результати моделювання згинаючих збуджень струменів розплаву в басейні охолоджувача та розпаду струменів на краплі й показано, що в числі маловивчених проблем, вирішення яких необхідне для покращання систем пасивного захисту від тяжких аварій на АЕС, є розпад тонких струменів унаслідок згинаючої нестійкості та глибина проникнення струменів до басейну з випаровуючим охолоджувачем. Ці проблеми належать до початкової фази тяжкої аварії в контейменті при розтіканні розплаву коріуму в підреакторному басейні з водою. Від успішного розв'язання цих проблем залежить ефективність пасивної системи захисту від тяжких аварій.

*Ключові слова:* струмінь, розплав, басейн, згинаючі хвилі, модель.

**ON THE MODELING OF BENDING PERTURBATIONS OF MELT JETS UNDER REACTOR VESSEL WATER POOL DURING SEVERE ACCIDENT AT NPP**

**Vahid Hasani Moghaddam, I. V. Kazachkov**

The given paper presents the modeling results of the bending melt jet perturbations in a coolant pool and disintegration of the jets on drops. It was shown that among the problems requiring studies for the improvement of the passive protection systems against severe accidents at NPP there are disintegration of the thin jets due to bending instability and the jet penetration length into volatile coolant pool. These problems belong to the initial stage of the severe accident in containment by the corium melt jet spreading under reactor vessel water pool. Successful solution of these problems predetermines the effectiveness of the passive protection system against severe accidents at NPP.

*Keywords:* jet, melt, pool, bending perturbations, model.

Поступила в редакцію 19.06.09,  
после доработки - 24.11.09.