

УДК 536.242

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ НА ВХОДЕ В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИЙ КАНАЛ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Ковецкая М.М., канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова 2а, Киев, 03680, Украина

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.4>

Приведено результати дослідження впливу температури теплоносія на вході в обігрівач мий канал на стійкість природної конвекції в замкненому циркуляційному контурі

Представлены результаты исследования влияния температуры теплоносителя на входе в обогреваемый канал на устойчивость естественной конвекции в замкнутом циркуляционном контуре.

The results of the study for influencing coolant temperature at entrance to heated channel on the stability of natural convection in a closed circulation loop are presented.

Библ. 20, рис. 3.

Ключевые слова: естественная конвекция, устойчивость двухфазного потока.

C_p – теплоемкость;
 D – диаметр;
 G – расход;
 Π – периметр канала;
 g – ускорение свободного падения;
 i – энтальпия;
 p – давление;
 q – плотность теплового потока;
 r – теплота парообразования;
 S – площадь проходного сечения;
 T, t – температура;
 w – скорость;
 z – продольная координата;
 ρ – плотность;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 μ – коэффициент молекулярной вязкости;

ν – коэффициент кинематической вязкости;
 Φ – истинное объемное паросодержание;
 x – массовое расходное паросодержание;
 θ – угол отклонения от вертикали;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения;
 ξ – коэффициент гидравлического сопротивления;
 τ – время;
 Fr – критерий Фруда;
 Re – критерий Рейнольдса.

Индексы нижние:

s – насыщение;
 w – стенка;
 вх, вых – вход, выход;
 нк – начало кипения;
 1 – вода;
 2 – пар.

Исследования условий возникновения неустойчивости двухфазного и однофазного потоков теплоносителя в элементах энергетического оборудования не прекращаются с середины прошлого столетия. Особенно интенсивно проводятся исследования устойчивости потока теплоносителя в циркуляционных контурах ядерных энергетических установок, так как возникновение термогидравлической неустойчивости может привести к ухудшению надежности реакторного оборудования. Механизмы неустойчивости двухфазных потоков в элементах энергетического оборудования хорошо изучены и писаны в литературе [1-4]. Однако интерес к исследованиям устойчивости потока теплоносителя не ослабевает в связи с усовершенствованием конструкций энергетического оборудования, появлением теплоносителей с новыми эффективными теплопередающими свойствами. Для интенсификации теплообмена в теплонапря-

женных каналах используются пористые покрытия, что приводит к необходимости исследования устойчивости течения в пористых каналах [5-7], условий возникновения термокапиллярной неустойчивости [8]. Использование наножидкостей с эффективными теплопередающими свойствами для охлаждения высокотемпературных поверхностей потребовало изучения устойчивости течений таких теплоносителей в каналах различной геометрии [9-11].

При разработке ядерных реакторов четвертого поколения особое внимание уделяется пассивным системам безопасности, основанным на принципе естественной циркуляции теплоносителя. Некоторые проекты ядерных реакторов малой и средней мощности интегральной компоновки предусматривают режим работы с естественной циркуляцией теплоносителя в первом контуре. Низкий движущий напор, характерный для

систем с естественной циркуляцией теплоносителя требует проведения анализа термогидравлической неустойчивости в каналах и контурах таких реакторных установок [12]. Исследования нестационарных процессов и устойчивости двухфазных потоков занимают значительное место при обосновании безопасности ЯЭУ, включая анализ аварийных режимов. При полном обесточивании АЭС охлаждение активной зоны водоохлаждаемых реакторов в режиме остаточного тепловыделения должно надежно обеспечиваться естественной циркуляцией теплоносителя.

Наиболее общим видом неустойчивости, встречающихся в двухфазных системах, является колебания волн плотности (неустойчивость плотностных волн). Она обусловлена многочисленными обратными связями между расходом теплоносителя, скоростью генерации пара и перепадом давления в кипящем канале.

В контурах с естественной циркуляцией наблюдается комплексное влияние параметров теплоносителя на устойчивость течения, когда изменение одного из параметров может приводить к изменению других параметров противоположным образом влияющих на устойчивость. Так при увеличении плотности теплового потока, несмотря на увеличение расхода теплоносителя, увеличивается область выходных параосодержаний, где наблюдается теплогидравлическая неустойчивость. Неоднозначно влияние недогрева теплоносителя на входе в парогенерирующий канал на границу устойчивости: увеличение недогрева при его низких значениях дестабилизирует течение, а при высоких значениях стабилизирует [4].

В работе рассмотрено влияние температуры теплоносителя на устойчивость течения в замкнутом контуре теплогидравлического стенда ИТТФ НАНУ в режиме естественной циркуляции. Контур включает подъемный участок с обогреваемой и необогреваемой зоной, конденсатор и опускной участок, где течет однофазный теплоноситель [13]. На вход в электрообогреваемый канал подается вода недогретая до температуры насыщения и подогревается до температуры начала кипения. Далее пароводяная смесь проходит необогреваемый (тяговый) участок, поступает в конденсатор и через опускной канал однофазный теплоноситель возвращается на вход в обогреваемый канал. Рассматривается режим, когда плотность теплового потока на стенке обогреваемого канала остается постоянной, а температура теплоносителя на входе увеличивается.

Основная система уравнений

Для описания тепломассообменных процессов в области двухфазного течения теплоносителя исполь-

зуем одномерную нестационарную частично неравновесную математическую модель, которая показала удовлетворительные результаты при исследовании кризиса теплообмена в нестационарных режимах [14]. Математическая модель включает систему уравнений сохранения массы, импульса и энергии для средних по сечению канала параметров двухфазного потока в виде

$$\frac{\partial(\rho_1(1-\varphi)+\rho_2\varphi)}{\partial\tau} + \frac{1}{S} \frac{\partial G}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial G}{\partial\tau} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{\rho_x S} \right) = -S \frac{dp}{dz} - \tau_w \Pi - [\rho_1(1-\varphi) + \rho_2\varphi] g S \cos \theta, \quad (2)$$

$$\rho_\varphi \frac{\partial \tilde{a}}{\partial \tau} + \frac{1}{S} \frac{\partial(Gi)}{\partial z} = q_w - \frac{G}{S} g \cos \theta, \quad (3)$$

$$\rho_i = f_i(i_i, p); \quad i=1,2,$$

где $G = G_1 + G_2$, $G_1 = S(1-x)\rho_1 w_1$, $G_2 = Sx\rho_2 w_2$,

$$x = G_2/G, \quad \rho = \rho_1(1-\varphi) + \rho_2\varphi, \quad \tau_w = \frac{\xi G^2}{8S^2 \rho_x},$$

$$\frac{1}{\rho_x} = \frac{(1-x)^2}{\rho_1(1-\varphi)} + \frac{x^2}{\rho_{2s}}, \quad \rho_\varphi = \frac{\partial}{\partial i} [\rho_1(1-\varphi)i_1 + \rho_2\varphi i_2].$$

В рассматриваемых режимах плотность теплового потока на стенке обогреваемого канала значительно меньше критического значения поэтому можно считать, что пар находится в равновесном состоянии: $i_2=i_{2s}$; $\rho_2=\rho_{2s}$ – параметры пара на линии насыщения. На обогреваемой части контура в качестве граничного условия задается постоянная плотность теплового потока на стенке, в необогреваемой части используется условие постоянства температуры стенки.

Для решения системы уравнений (1)-(3) задаются замыкающие соотношения, описывающие процессы теплового и механического взаимодействия фаз на

межфазной границе и со стенкой канала. Наибольшее влияние на адекватность расчетов нестационарных режимов двухфазного теплоносителя оказывает точность задания границы начала кипения. В рассматриваемой модели граница $z_{\text{HK}}(\tau, t_{\text{HK}})$ начала кипения определяется как сечение канала, в котором температура теплоносителя достигает температуры t_{HK} начала поверхностного кипения, которая определяется по формуле [15]

$$t_{\text{HK}} = t_s - \eta \frac{\alpha [t_w(t_s) - t_s] \rho S}{G}, \quad \eta = (14+p)10^{-6}. \quad (4)$$

Здесь $t_w(t_s)$ – температура стенки в сечении канала, в котором температура теплоносителя достигает температуры насыщения; η – параметр, характеризующий влияние давления.

Замыкающие соотношения, характеризующие тепловое и механическое взаимодействие фаз на межфазной границе и со стенками канала, подробно описаны в работе [16]. Тепловое взаимодействие фаз со стенкой определяется в зависимости от режима течения и теплообмена через коэффициенты теплоотдачи. Для двухфазного режима течения используется формула

$$\alpha_w = \alpha_{\text{mic}} S \min \left[1, \frac{T_w - T_s}{T_w - T_1} \right] + \alpha_{\text{mac}} F, \quad (5)$$

где α_{mic} , α_{mac} – коэффициенты теплоотдачи при микроконвекции и макроконвекции, S – функция подавления кипения, F – функция интенсификации конвективного теплообмена

$$\alpha_{\text{mic}} = 0.00122 \frac{\lambda_1^{0.79} C p_1^{0.45} \rho_1^{0.49} (T_w - T_s)^{0.24}}{\sigma^{0.5} \mu_1^{0.29} r^{0.24} \rho_2^{0.24}} (p_s - p)^{0.75},$$

$$\alpha_{\text{mac}} = 0.023 \left[\frac{\rho_1 |w_1| (1-\varphi) D}{\mu_1} \right]^{0.8} \left(\frac{C p_1 \mu_1}{\lambda_1} \right)^{0.4} \frac{\lambda_1}{D},$$

$$S = \begin{cases} 1 / (1 + 0,12 \text{Re}_m^{1,14}), & \text{Re}_m < 32,5 \\ 1 / (1 + 0,42 \text{Re}_m^{0,78}), & 32,5 < \text{Re}_m < 70 \end{cases}$$

$$F = \begin{cases} 1, & X_u^{-1} < 0,1 \\ 2,35 (X_u^{-1} + 0,213)^{0,736}, & 0,1 < X_u^{-1} < 100 \end{cases}$$

$$\text{Re}_m = 10^{-4} \frac{\rho_1 |w_1| (1-\varphi) D F^{1,25}}{\mu_1}$$

$$X_u^{-1} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{0,1}.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления на участках контура $\xi_{\text{тр}}$ определяется по известным формулам в зависимости от режима течения теплоносителя и наличия местных сопротивлений [17]. Коэффициент трения двухфазного потока в каналах определяется через коэффициент трения однофазного потока ξ_{w1} с поправкой на двухфазность по следующей зависимости

$$\xi_w = \xi_{w1} \frac{\rho}{\rho_0} \Phi^2 \quad (6)$$

$$\Phi^2 = \begin{cases} 1,73(1-x)^2 / (1-\varphi)^{1,64}, & 0 < 1-\varphi \leq 0,1 \\ 0,478(1-x)^2 / (1-\varphi)^{2,2}, & 0,1 < 1-\varphi \leq 0,39 \\ (1-x) / (1-\varphi)^{1,42}, & 0,39 < 1-\varphi < 1 \\ 1, & \varphi = 0 \end{cases}.$$

В большинстве математических моделей истинное объемное паросодержание φ определяется через коэффициент скольжения фаз либо используется уравнение генерации пара, которое можно получить, например, из уравнения энергии для смеси [16]. Определение среднего по сечению канала истинного объемного паросодержания по формуле

$$\varphi = \left[1 + K_w \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

требует задания зависимости для коэффициента скольжения фаз $K_w = w_2/w_1$, являющегося отношением скорости пара к скорости жидкости. В расчетных методиках в основном используется формула Осмачкина В.С. [18], описывающая коэффициент скольжения в трубе и полученная в стационарных условиях

$$K_w = 1 + \frac{0,6 + 1,5\beta^2}{\sqrt[4]{Fr}} \left(1 - \frac{p}{p_{\text{кр}}} \right), \quad (8)$$

где

$$\beta = \left[1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \right]^{-1},$$

$Fr = w_0^2 / (gD)$ – критерий Фруда.

Система уравнений (1)-(3) совместно с граничными условиями и замыкающими соотношениями (4)-(8) решается численно методом Эйлера с автоматическим выбором шага по времени согласно условию Куранта [19].

Результаты расчетов

На рис. 1-3 представлено изменение во времени недогрева теплоносителя на входе в обогреваемый канал, расходов теплоносителя на входе и выходе при давлении в контуре 4 МПа, плотности теплового потока на стенке обогреваемого канала 0,3 МВт/м². Из рисунков видно, что режим неустойчивости начинается при недогреве теплоносителя до температуры насыщения на входе в обогреваемый канал 13К и заканчивается при недогреве 5К. Колебания расхода теплоносителя характеризуются регулярной формой и противофазным изменением расхода на выходе относительно расхода на входе в обогреваемый

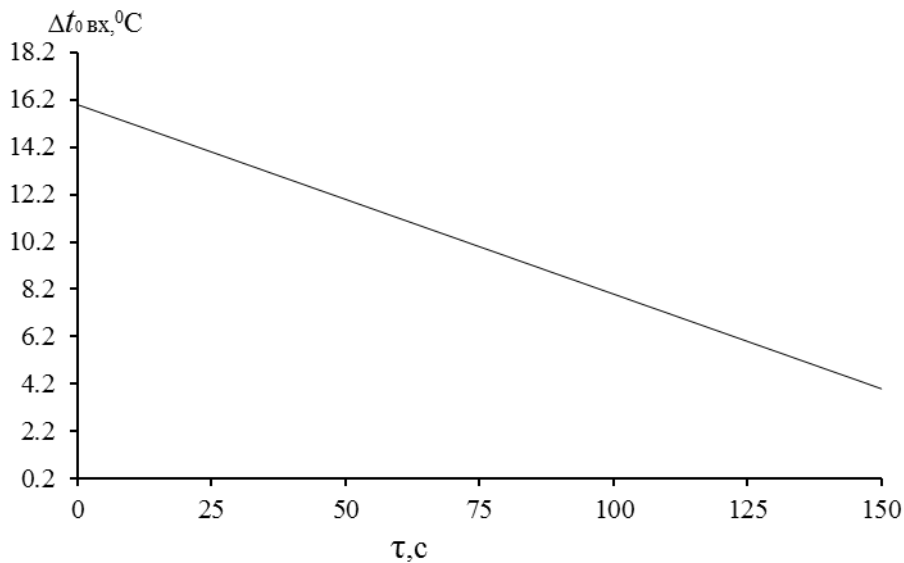


Рис.1. Изменение во времени недогрева теплоносителя на входе в обогреваемый канал.

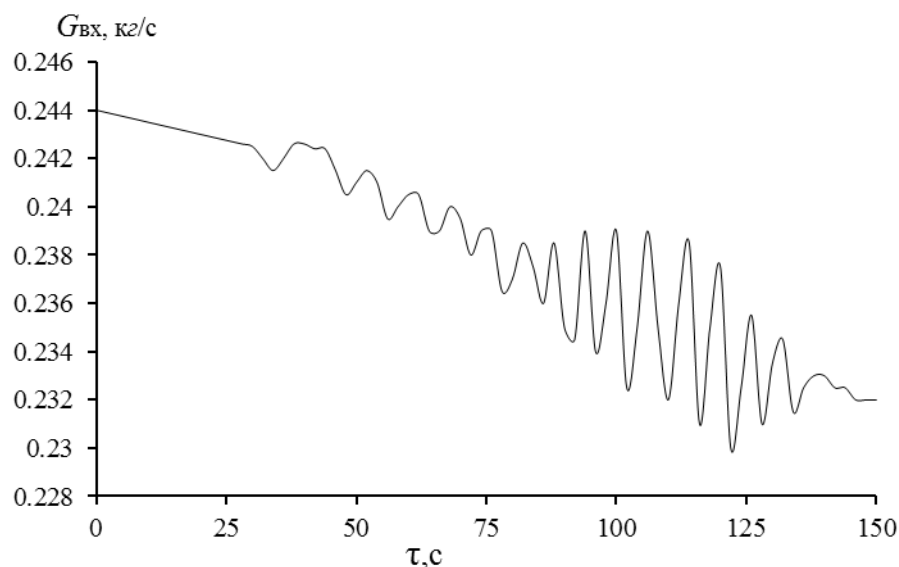


Рис.2. Изменение во времени расхода теплоносителя на входе в обогреваемый канал.

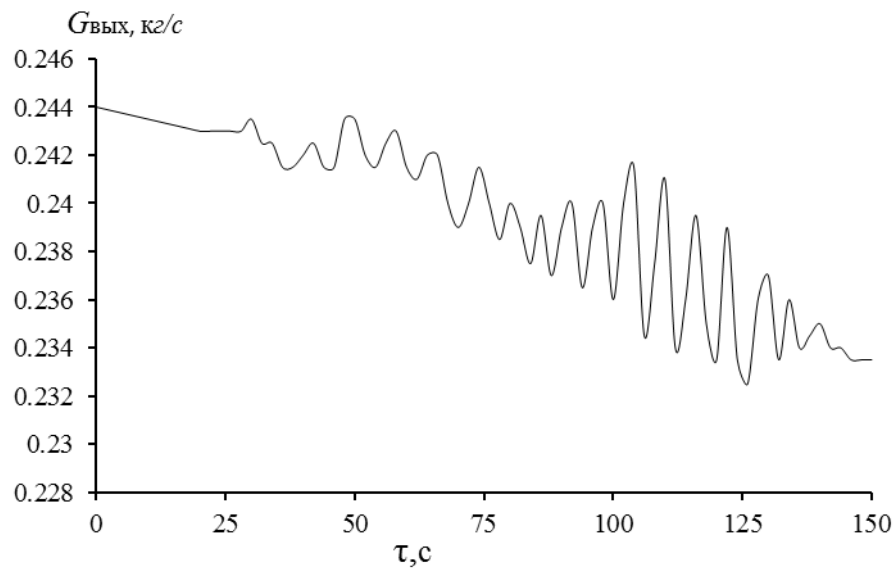


Рис.3. Изменение во времени расхода теплоносителя на выходе из обогреваемого канала.

канал. Период колебаний расходов имеет порядок времени транспорта теплоносителя через обогреваемый канал и составляет 6 с. Процесс характеризуется относительно медленной нестационарностью. Полученные результаты качественно согласуются с данными работы [20].

При малых недогревах теплоносителя на входе его увеличение приводит с одной стороны к уменьшению испарительной зоны в обогреваемом канале, что повышает устойчивость системы, с другой стороны граница начала кипения сдвигается к выходу из обогреваемого канала, что приводит к дестабилизации потока из-за увеличения амплитуды колебаний расхода на выходе. При некотором значении недогрева теплоносителя влияние дестабилизирующего и стабилизирующего факторов компенсируется. При таком значении недогрева наблюдается минимальная устойчивость системы. При дальнейшем увеличении недогрева начинает преобладать влияние стабилизирующего фактора и устойчивость потока увеличивается. В вертикальных обогреваемых каналах минимальная устойчивость двухфазного потока наблюдается при недогреве теплоносителя на входе 10...40 К [4]. Для рассматриваемых условий минимальная устойчивость течения достигается при значении недогрева теплоносителя на входе 13 К.

Выводы

Рассмотрено влияние недогрева теплоносителя на входе в обогреваемый канал на устойчивость двухфазного потока в замкнутом циркуляционном контуре. На основании одномерной нестационарной частично неравновесной математической модели течения двух-

фазного теплоносителя определена граница области неустойчивости естественной циркуляции в зависимости от недогрева теплоносителя на входе в обогреваемый канал.

Показано неоднозначное влияние недогрева теплоносителя на входе в парогенерирующий канал на границу устойчивости двухфазного потока: при малых значениях недогрева его увеличение дестабилизирует течение, при больших недогревах его увеличение стабилизирует течение.

Робота виконана за фінансової підтримки Цільової програми наукових досліджень Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України «Фундаментальні дослідження процесів перетворення та використання енергії» 2018-2019 р., проект 1.7.1.886 «Термогідравлічна нестійкість потоків теплоносіїв та розробка теплофізичних механізмів подолання її руйнівного впливу на елементи енергетичного обладнання».

ЛИТЕРАТУРА

1. Тонг Л. Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. – М.: Мир. – 1969. – 344 с.
2. Морозов И.И., Герлига В.А. Устойчивость кипящих аппаратов. – М.: Атомиздат. – 1969. – 280 с.
3. Митенков Ф.М., Моторов Б.И. Механизмы неустойчивости процессов в тепловой и ядерной энергетике. – М.: Энергоиздат. – 1983. – 96 с.
4. Хабенский В.А., Герлига В.А. Нестабильность потока теплоносителя в элементах энергооборудования. – СПб.: Наука. – 1994. – 288 с.

5. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Basok B.I., Blinov D.G. Investigation of stability of a laminar flow in a parallel-plate channel filled with a fluid saturated porous medium // *Phys. Fluids*. – 2005. – 17. – P. 094102-1 - 094102-6.
6. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Nield D.A. Instability of slip-flow in a channel occupied by a hyperporous medium // *Journal of Porous Media*. – 2007. – vol. 10. – P. 435 - 442.
7. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow instability in a curved porous channel formed by two concentric cylindrical surfaces // *Transport in Porous Media*. – 2007. – vol. 69. – P. 373 - 381.
8. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Harmand S., Tyrinov A. I. Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – 91. – P. 77 – 88.
9. Avramenko A. A., Tyrinov A. I., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P. Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity // *Phys. Fluids*. – 2016. – 28. – P. 034104-1 - 034104-16.
10. Avramenko A. A., Tyrinov A. I., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P. Centrifugal instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity between co-axial rotating cylinders // *European Journal of Mechanics B/Fluids*. – 2016. – 60. – P. 90– 98.
11. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Moskalenko A. A., Lohvynenko P. N., Kovetska Yu. Yu. Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – 139. – P. 87 – 98.
12. Корниенко Ю.Н. Особенности поведения границ неустойчивости волн плотности в параллельных каналах с подъемными участками в условиях низких массовых скоростей// *Тепловые процессы в технике*. – 2014. –Т. 6, №5. – С.194–201.
13. Антипов В.Г. Экспериментальное определение границ области неравновесного кипения в парогенерирующем канале.// *Промышленная теплотехника*. – 2011. –Т. 33, №5. – С.13–19
14. Ковецкая М.М., Кризис теплообмена в парогенерирующих каналах в нестационарных режимах с увеличением мощности// *Промышленная теплотехника*. – 2011. –Т. 33, №3. – С.60–64
15. Делайе Дж., Гюо М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика в атомной и тепловой энергетике. – М.: Энергоиздат, 1984. – 424 с.
16. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.
17. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. М.: Энергоатомиздат. –1987. – 376 с.
18. Осмачкин В.С., Лысцова Н.И. О расчете критических тепловых нагрузок в пучках стержней. Препринт ИАЭ-2204. – М.: 1972. – 24 с
19. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир. –1980. –616 с.
20. Хабенский В.Б., Балдина О.М., Калинин Р.И. Механизм пульсаций и влияние конструктивных и режимных параметров на границу устойчивости потока. Достижения в области исследования теплообмена и гидродинамики двухфазных потоков в элементах энергооборудования. – Л.: Наука. –1973. –С.48–66

EFFECT OF WATER TEMPERATURE AT INLET TO THE STEAM GENERATING CHANNEL ON STABILITY OF THE TWO-PHASE FLOW

Kovetskaya M.M.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova 2a, Kiev, 03680, Ukraine.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.4>

The paper considers the influence of the coolant temperature on stability of the flow in the closed loop of thermal-hydraulic test bench in the natural circulation mode. The loop includes a lifting section with a heated and unheated zone, condenser and lowering section where the single-phase coolant flows. The regime is considered, when the heat flow on the wall of the heated channel remains constant and the temperature of the coolant inlet increases.

The effect of underheating at entrance to heated channel on the stability of the natural circulation of the coolant is considered. A one dimensional unsteady mathematical model of a two-phase coolant flow is presented. Boundaries of natural circulation instability region are determined depending on the coolant underheating at the entrance to the heated channel. Fluctuations in coolant flow rate are characterized by regular shape and an antiphase change in the flow rate at the outlet.

The ambiguous effect of underheating of the coolant at the entrance to the steam generating channel on the boundary of the stability of a two-phase flow is shown: at low values of underheating, its increasing destabilizes flow; at large underheating its increasing stabilizes the flow.

Key words: natural convection, two-phase flow stability.

References 20, figures 3.

1. *Tong L.* [Heat transfer at boiling and two-phase flow], Moskva, Mir [Mir], 1969. 344p. (Rus)
2. *Morozov I.I., Gerliga V.A.* [Stability boiling apparatus], Moskva, Atomizdat, [Atomizdat], 1969. 280p. (Rus)
3. *Mitenkov F.M., Motorov B.I.* [Mechanisms of instability of processes in thermal and nuclear power engineering], Moskva, Energoizdat, [Energoizdat], 1983. 96p. (Rus)
4. *Habenskij V.A., Gerliga V.A.* [The instability of the flow of coolant in the elements of power engineering], SPb.: Nauka, [Nauka], 1994. 288p. (Rus)
5. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Basok B.I., Blinov D.G.* Investigation of stability of a laminar flow in a parallel-plate channel filled with a fluid saturated porous medium. *Phys. Fluids*. 2005. V.17. - P. 094102-1 - 094102-6.
6. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Nield D.A.* Instability of slip-flow in a channel occupied by a hyper-porous medium. *Journal of Porous Media*. 2007. V.10. P. 435 - 442.
7. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Flow instability in a curved porous channel formed by two concentric cylindrical surfaces. *Transport in Porous Media*. 2007. V. 69.P. 373 - 381.
8. *Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Harmand S., Tyrinov A. I.* Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. V.91. P. 77 – 88.
9. *Avramenko A. A., Tyrinov A. I., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P.* Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity. *Phys. Fluids*. 2016. V.28. P. 034104-1 - 034104-16.
10. *Avramenko A. A., Tyrinov A. I., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P.* Centrifugal instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity between co-axial rotating cylinders. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 2016. V.60. P. 90– 98.
11. *Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Moskalenko A. A., Lohvynenko P. N., Kovetska Yu. Yu.* Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*. 2018. V.139. P. 87 – 98.
12. *Kornienko Yu.N.* [Features of the behavior of the density wave instability boundaries in parallel channels with lifting sections under conditions of low mass velocities], *Teplovye processy v tekhnike* [Thermal processes in technology], 2014. V.6. №5. P. 194–201. (Rus.)
13. *Antipov V.G.* [Experimental determination of the boundaries of the non-equilibrium boiling region in the steam generating channel], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 20011. V. 33. № 5. P. 13–19. (Rus.)
14. *Kovetskaya M.M.* [The crisis of heat transfer in the steam generating channels in non-stationary modes with increasing power], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 20011. V. 33. № 3. P. 60–64. (Rus.)
15. *Delaje Dzh., Gio M., Ritmyuller M.* [Heat transfer and hydrodynamics in nuclear and thermal power engineering], Moskva, Energoizdat, [Energoizdat], 1984. 424p. (Rus)
16. *Kuznecov Yu.N.* [Heat transfer in the problem of safety of nuclear reactors], Moskva, Energoatomizdat, [Energoatomizdat], 1989. 296p. (Rus)
17. *Kirillov P.L., YUr'ev YU.S., Bobkov V.P.* [Handbook of Thermo-Hydraulic Calculations], Moskva, Energoatomizdat, [Energoatomizdat], 1987. 376p. (Rus)
18. *Osmachkin V.S., Lyscova N.I.* [About the calculation of the critical thermal loads in the beam rods], Moskva,

Preprint ІАЕН-2204,[Preprint ІАЕН-2204], 1972.24р.
(Rus)

19. *Rouch P.* [Computational Fluid Dynamics], Moskva,
Mir [Mir], 1980. 616р. (Rus)

20. *Habenskij V.B., Baldina O.M., Kalinin R.I.* [The
mechanism of pulsations and the influence of design

and operating parameters on the stability boundary of
the flow. Achievements in the study of heat transfer and
hydrodynamics of two-phase flows in the elements of power
equipment], Leningrad, Nauka [Nauka], 1973. 48–66р.
(Rus)

Отримано 31.01.2019

Received 31.01.2019