

УДК 532.5:536.4

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОДЫ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕМ КАНАЛЕ

Ковецкая М.М., канд. техн. наук, Скицько А.И., канд. техн. наук, Сорокина Т.В., канд. техн. наук, Домашев В.Е.

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

Наведено результати чисельного моделювання процесів теплообміну у вертикальному парогенеруючому каналі на основі RNG  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності. Показано вплив режимних параметрів на зміну локальних характеристик двофазного потоку.

Представлены результаты численного моделирования процессов теплообмена в вертикальном парогенерирующем канале на основе RNG  $k-\varepsilon$  модели турбулентности. Показано влияние режимных параметров на изменение локальных характеристик двухфазного потока.

The results of numerical modeling for heat transfer processes in the vertical steam generating channel on the basis of RNG  $k-\varepsilon$  model turbulence are presented. Effect of regime parameters on the change of the local characteristics of the two-phase flow is shown.

Библ. 10, рис. 5.

**Ключевые слова:** численное моделирование, двухфазный поток, парогенерирующий канал.

$d$  – размерность пространства, диаметр;  
 $l$  – длина;  
 $w$  – скорость;  
 $T$  – температура;  
 $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  
 $x$  – массовое расходное паросодержание;  
 $\varphi$  – истинное объемное паросодержание;  
 $\mu$  – динамическая вязкость;

$\rho$  – плотность;  
 $\varepsilon$  – скорость диссипации энергии;  
 $Pr$  – число Прандтля;

### Нижние индексы:

eff – эффективный параметр;  
 t – турбулентный  
 1 – жидкость;  
 2 – пар.

### Введение

Интерес к исследованию закономерностей тепло-массопереноса в двухфазных потоках не ослабевает в связи с постоянным совершенствованием теплообменного оборудования. Для определения условий надежной и безопасной работы парогенерирующих каналов в энергетическом оборудовании необходимо знание локальных характеристик двухфазного потока и законы их изменения в переходных и аварийных режимах. В настоящее время для обоснования безопасности АЭС и расчета аварийных режимов используются в основном одномерные нестационарные математические модели двухфазных потоков [1]. Эти модели не могут адекватно предсказывать характеристики турбулентных двухфазных потоков для всего спектра аварийных ситуаций [2]. В таких условиях большое значение приобретают пространственные эффекты, характеризующиеся локальными значениями параметров двухфазных потоков. В двухфазных потоках пузырьковой структуры наблюдается немонокотное распределение истинного объемного паросодержания, аномальное влияние высоких значений пристенного паросодержания на вязкие напряжения при подьемном течении теплоносителя.

В активных зонах водоохлаждаемых ядерных реакторов могут возникать режимы с «подкипанием», при

которых температура теплоносителя вблизи стенки превышает температуру насыщения, при этом средняя по сечению температура теплоносителя остается меньше температуры насыщения [3]. Если на вход в парогенерирующий канал подается вода недогретая до температуры насыщения, то для условий докритического кипения на разных участках канала могут одновременно существовать режимы: вынужденной конвекции однофазной жидкости; поверхностное кипение, при котором температура теплоносителя продолжает увеличиваться; развитое кипение насыщенной жидкости, когда средняя температура теплоносителя достигает температуры насыщения [4]. Использование многомерных моделей двухфазных потоков позволяет более точно учитывать изменения не только осредненных, но и локальных параметров теплоносителя, определять границы смены режимов течения, уточнять систему замыкающих уравнений в одномерных математических моделях [5].

### Постановка задачи

В работе представлены результаты исследования гидродинамики и теплообмена при течении двухфазного теплоносителя в парогенерирующем канале. Рассматривается течение в вертикальной обогреваемой трубе диаметром 10 мм и длиной 1 м, на вход которой подается вода недогретая до температуры насыщения. К

стенке трубы подводится постоянный тепловой поток. Величина плотности теплового потока на стенке существенно меньше критического значения.

Двухжидкостная математическая модель, описывающая течение двухфазного теплоносителя, включает систему уравнений неразрывности, движения, энергии для фаз, а также уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии согласно RNG k - модели турбулентности, подробно описана в работах [6,7].

Основная система уравнений замыкается выражением для турбулентной вязкости [7]

$$\mu_{kt} = \frac{1}{24\sqrt{15}} \left[ \frac{(4k + 3\sqrt{6\pi C_K^3 \varepsilon \mu_k / \rho_k})^2}{C_K^{3/2} \varepsilon} - 216 C_K^{3/2} \mu_k / \rho_k \right], \quad (1)$$

где  $C_K = 1,605$  – ренормгрупповое значение константы Колмогорова, и выражением для турбулентного числа Прандтля

$$\frac{\left| \text{Pr}_{keff}^{-1} - a \right|^{\frac{a+1}{a+b}} \left| \text{Pr}_{keff}^{-1} + b \right|^{\frac{b-1}{a+b}}}{\left| \text{Pr}^{-1} - a \right|^{\frac{a+1}{a+b}} \left| \text{Pr}^{-1} + b \right|^{\frac{b-1}{a+b}}} = \frac{\mu_k}{\mu_{keff}}. \quad (2)$$

здесь  $a = \frac{1}{2} \left( \sqrt{4 \frac{d-1}{d} \tilde{A}_d^{-1} + 1} - 1 \right),$

$$b = \frac{1}{2} \left( \sqrt{4 \frac{d-1}{d} \tilde{A}_d^{-1} + 1} + 1 \right), \quad \tilde{A}_d = \frac{d-1}{2(d+2)},$$

Эффективная вязкость в уравнении (2) определяется следующим выражением

$$\mu_{keff} = \mu_{kt} + \mu_k,$$

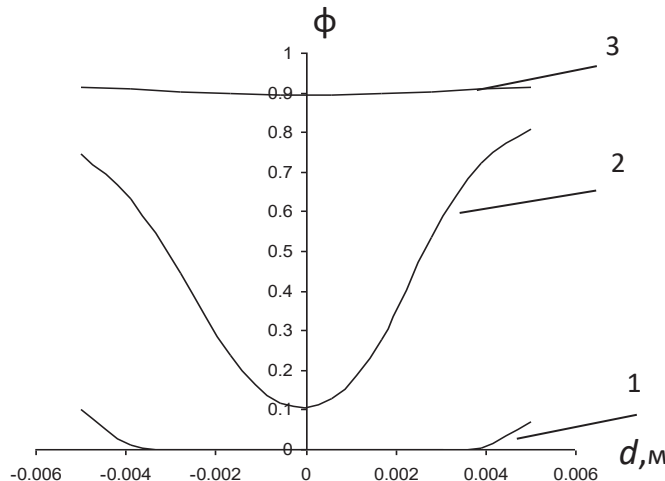
где  $\mu_{kt}$  – турбулентная вязкость, индекс  $k = 1,2$  для воды и пара соответственно.

**Результаты расчетов**

Для решения системы уравнений математической модели использовался метод контрольного объема [8]. Результаты верификации модели, представленные в работе [9], показали удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений паросодержания в вертикальном парогенерирующем канале.

Ниже представлены результаты расчетов распределения параметров двухфазного потока в вертикальной обогреваемой трубе.

На рис. 1 показан характер изменения профиля паросодержания в трех сечениях канала при давлении 2 МПа, массовой скорости 500 кг/(м<sup>2</sup>·с), плотности теплового потока на стенке 0,35 МВт/м<sup>2</sup>, температуры воды на входе 432 К. В сечении 1 на расстоянии 0,45м от входа весь генерируемый пар сосредоточен в узкой пристенной области (линия 1 рис. 1). По мере прогревания теплоносителя увеличивается количество пара как вблизи стенки, так и в ядре потока. Профиль паросодержания приобретает седловидную форму с максимумом вблизи стенки (линия 2 рис. 1). В сечениях близких к выходу из трубы увеличивается количество пара в ядре потока и соответственно профиль паросодержания выравнивается (линия 3 рис. 1). На выходе из канала наблюдается практически равномерное распределения пара по сечению канала, что свидетельствует о режиме развитого пузырькового кипения.



**Рис. 1. Распределение истинного объемного паросодержания по сечению трубы на расстоянии от входа: 1 – 0,45 м, 2 – 0,7 м, 3 – 0,997 м.**

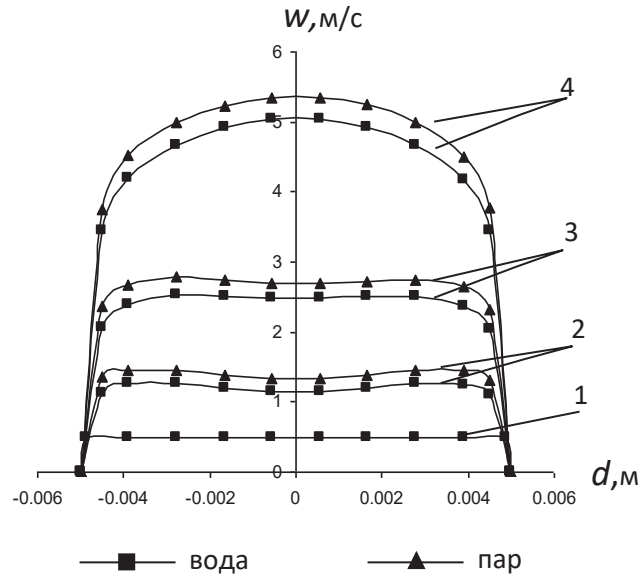


Рис. 2. Профили скорости воды и пара в сечениях: 1 – 0,002 м, 2 – 0,45 м, 3 – 0,7 м, 4 – 0,997 м от входа.

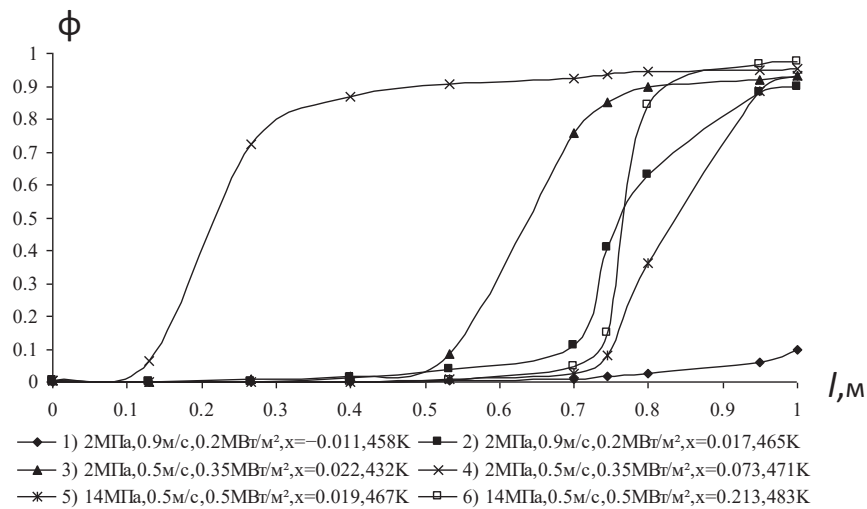


Рис. 3. Распределение истинного объемного паросодержания в среднем сечении по длине трубы.

На рис. 2 показаны профили скорости воды и пара в разных сечениях. На входе в трубу профиль скорости равномерный. В сечении 2 профили скорости воды и пара деформируются, приобретая седлообразную форму. Это связано с увеличением паросодержания в пристенной области. Далее по длине канала скорость воды и пара увеличивается в результате роста паросодержания и в выходном сечении профили скорости приобретают форму, присущую развитому турбулентному течению. Скорость проскальзывания по длине трубы изменяется от 0,19 м/с в сечении 2 до 0,3 м/с в выходном сечении.

Исследовано влияние режимных параметров на те-

чение и теплообмен в двухфазном потоке для низких (2 МПа) и высоких (14 МПа) давлений при скорости на входе 0,5 м/с и 0,9 м/с, значениях плотности теплового потока 0,2...0,5 МВт/м<sup>2</sup>, температуры воды на входе 432...483К.

На рис. 3 представлено распределение истинного объемного паросодержания по длине трубы для разных значений режимных параметров.

При низком давлении с увеличением температуры воды на входе от 458К до 465К (режимы 1,2) существенно изменяется паросодержание в выходной области канала. С уменьшением недогрева воды на входе до тем-

пературы насыщения с 27К (режим 1) до 19К (режим 2) при прочих равных условиях, начиная с сечения 0,7м наблюдается интенсивная генерация пара и на выходе паросодержание достигает значения 0,9, что характеризует развитое пузырьковое кипение. С уменьшением скорости и увеличением теплового потока (режимы 3,4) начало интенсивного парообразования смещается ближе к входному сечению, область кипения существенно увеличивается. В режиме 3 (недогрев 53К) начало резкого роста паросодержания находится в сечении 0,5м, а в режиме 4 (недогрев 14К) рост паросодержания начинается с сечения 0,1м.

При высоком давлении (режимы 5,6) наблюдается сильное влияние температуры воды на входе на скорость изменения паросодержания, с уменьшением недогрева до температуры насыщения скорость изменения паросодержания резко увеличивается. Сечение начала интенсивного парообразования слабо зависит от температуры воды на входе. Эти режимы характеризуются большим недогревом воды на входе до температуры насыщения: в режиме 5 недогрев 143К, в режиме 6 недо-

грев 127К.

На рис. 4 представлены распределения максимального значения скорости воды и пара по длине канала. С увеличением температуры воды на входе (режимы 1,3 и 2,4) и плотности теплового потока (режимы 5,7 и 6,8) скорость воды и пара увеличивается начиная с сечения 0,5 м и до выхода из трубы, что связано с прогревом потока и увеличением паросодержания. При малом давлении и недогреве воды на входе до температуры насыщения 14К (режим 7,8) рост скорости, также как и рост паросодержания (режим 4, рис. 3) начинается от входного сечения. При высоком давлении (режимы 9,11 и 10,12) рост скорости менее интенсивный и становится заметным начиная с сечения 0,7 м, что связано с увеличением паросодержания в этом сечении. Во всех режимах разность скоростей воды и пара (скорость проскальзывания) увеличивается в направлении выходного сечения. Максимальная разность скоростей наблюдается в режиме 7,8, который характеризуется минимальным недогревом воды на входе до температуры насыщения (14К).

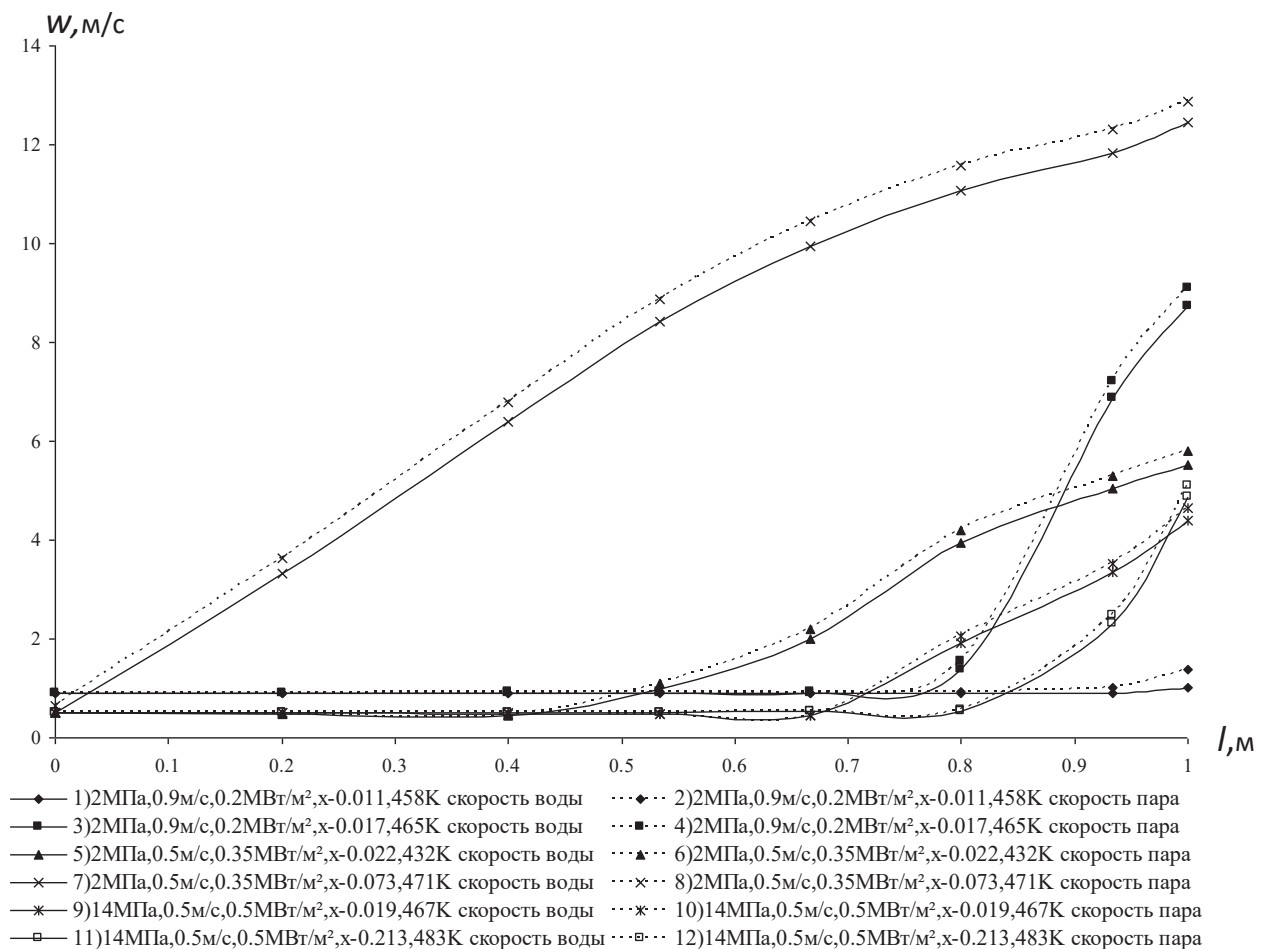


Рис. 4. Распределение скорости воды и пара в среднем сечении по длине трубы.

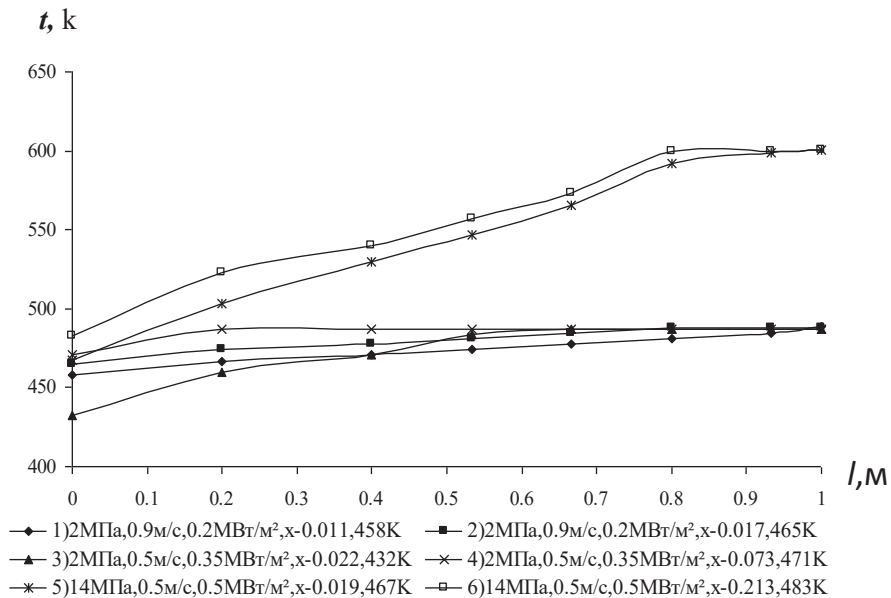


Рис. 5. Распределение температуры воды в среднем сечении по длине трубы.

На рис. 5 представлено распределение температуры воды по длине трубы. Температура воды по длине трубы увеличивается равномерно начиная от значения температуры на входе до температуры насыщения для данного давления. Далее температура воды практически не изменяется.

### Выводы

На основе двухжидкостной математической модели исследовано влияние параметров двухфазного потока на течение и теплообмен в вертикальной парогенерирующей трубе. Полученные результаты, характеризующие изменения истинного объемного паросодержания, позволили определить границу начала кипения, область неравновесного кипения и область развитого пузырькового кипения при низком (2 МПа) и высоком (14 МПа) давлениях.

При низком давлении на границу смены режимов кипения наиболее существенно влияет недогрев температуры воды на входе до температуры насыщения. С уменьшением недогрева и скорости на входе и увеличением плотности теплового потока на стенке граница начала кипения смещается к входному сечению.

При высоком давлении наблюдается сильное влияние температуры воды на входе на скорость изменения паросодержания по длине трубы. Скорость изменения паросодержания сильно увеличивается с увеличением температуры воды на входе. При этом граница начала кипения для заданных параметров скорости и плотности теплового потока слабо зависит от значения температуры воды на входе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Нигматулин Б.И., Василенко В.А., Соловьев С.Л. Разработка расчетных кодов нового поколения – акту-

альная задача развития отечественной атомной энергетики // Теплоэнергетика. – 2002. – № 11. – С. 2–10.

2. Артемьев В.К., Корниенко Ю.Н. Численное исследование гидродинамики и теплообмена пузырьковых двухфазных потоков в режимах с низкой массовой скоростью теплоносителя/ Тр. конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 26–30 мая 2003. – т.5. – С.100–113

3. Степанов О.Е., Карнаухов В.Е., Худяков А.М., Эйхорн Ю.Н., Буланов А.В., Лукашенко М.Л., Дикарев И.М., Лозашев О.В. Сравнительный анализ методов расчета теплоотдачи при кипении воды с недогревом// Теплоэнергетика. – 2014. – №3. – С.28–34

4. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. К.: Наук. Думка. –1980. –316 с.

5. Делайе Дж., Гюо М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика в атомной и тепловой энергетике. Перевод с английского. М.: Энергоатомиздат. –1984. – 424 с.

6. Авраменко А.А., Басок Б.И., Кузнецов А.В. Групповые методы в теплофизике. Киев.: Наук. Думка. – 2003. – 484 с.

7. Авраменко А.А., Басок Б.И., Дмитренко Н.П., Ковецкая М.М., Тыринов А.И., Давыденко Б.В. Ренормализационно групповой анализ турбулентности. Киев. ТОВ «ЕКСПРЕС». –2013. –300 с.

8. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Пер. с англ. М.: Мир. – 1980. – 616с.

9. Скицко А.И. Численное RNG-моделирование параметров потока в вертикальном парогенерирующем канале // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2012. – № 2. – С. 31 – 40.

10. Джусов Ю.П., Турчин Ю.Ю. Исследование распределения фаз в пароводяном потоке высокого давления в трубах // Тез. докл. всесоюзной конф. "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах." Л.: Наука. – 1990.

## THE NUMERICAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER AT A WATER FLOW IN THE VERTICAL STEAM GENERATING CHANNEL

**Kovetska M.M., Skitsko A.I., Sorokina T.V., Domashev V.E.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 03057, Kiev, vul. Zhelyabova 2a, Ukraine.

The results of numerical modeling for heat transfer processes in the vertical steam generating channel on the basis of RNG k- $\epsilon$  model turbulence are presented. Effect of regime parameters on the change of the local characteristics of the two-phase flow is shown. The obtained results, characterizing the changes in the true volumetric vapor content, made it possible to determine the boundary of the beginning of boiling, the region of no equilibrium boiling, and the region of developed bubble boiling at the point (2 MPa) and high (14 MPa) pressures.

References 10, figures 5.

**Key words:** numerical modeling, two-phase flow, steam generating channel .

1. *Nigmatulin B.I., Vasilenko V.A., Solovev S.L.* Razrabotka raschetnykh kodov novogo pokoleniya – aktualnaya zadacha razvitiya otechestvennoy atomnoy energetiki [Development of new generation calculation codes is an urgent task of developing domestic nuclear energy]. *Teploenergetika* [Thermal power engineering], 2002, № 11, P. 2–10. (Rus)

2. *Artemev V.K., Kornienko Yu.N.* Chislennoe issledovanie gidrodinamiki i teploobmena puzyirkovykh dvuhfaznykh potokov v rezhimakh s nizkoy massovoy skorostyu teplonosatelya [Numerical study of hydrodynamics and heat transfer of bubble two-phase flows in modes with low mass velocity of coolant]. Tr. Konf. «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER» [Safety of NPPs with WWER], Podolsk, 26–30 may, 2003, V.5, P.100–113. (Rus)

3. *Stepanov O.E., Karnauhov V.E., Hudyakov A.M., Eyhorn Yu.N., Bulanov A.V., Lukashenko M.L., Dikarev I.M., Logashev O.V.* Sravnitelnyy analiz metodov rascheta teplootdachi pri kipenii vody s nedogrevom [Comparative analysis of heat transfer calculation methods for boiling water with heating]. *Teploenergetika* [Thermal power engineering], 2014, № 3, P. 28–34. (Rus)

4. *Tolubinskiy V.I.* Teploobmen pri kipenii [Heat transfer at boiling point]. K.: Nauk. Dumka, 1980, 316p. (Rus)

5. *Delaye Dzh., Gio M., Ritmyuller M.* Teploobmen i gidrodinamika v atomnoy i teplovooy energetike [Heat transfer and hydrodynamics in nuclear and thermal power engineering]. M.: Energoatomizdat, 1984, 424p. (Rus)

6. *Avramenko A.A., Basok B.I., Kuznetsov A.V.* Gruppyvyye metody v teplofizike [Group methods in thermophysics]. Kiev.: Nauk. Dumka, 2003, 484p. (Rus)

7. *Avramenko A.A., Basok B.I., Dmitrenko N.P., Kovetska M.M., Tyrinov A.I., Davydenko B.V.* Renormalization group analysis of turbulence. K.: Expres. 2013. 299 p. (Rus.)

8. *Rouch P.* Vyichislitel'naya gidrodinamika [Computational Fluid Dynamics]. M.: Mir, 1980, 616 p. (Rus)

9. *Skitsko A.I.* Chislennoe RNG-modelirovanie parametrov potoka v vertikalnom parogeneriruyuschem kanale [Numerical RNG-modeling of flow parameters in a vertical steam generating channel]. *Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologiya* [Energy: economy, technology, ecology], 2012, № 2, P. 31–40. (Rus)

10. *Dzhusov Yu.P., Turchin Yu.Yu.* Issledovanie raspredeleniya faz v parovodyanom potoke vyisokogo davleniya v trubakh [Investigation of phase distribution in a high-pressure steam-water flow in pipes]. Tez. dokl. vsesoyuznoy konf. "Dvuhfaznyy potok v energeticheskikh mashinakh i apparatah [Two-phase flow in power machines and apparatus], L.: Nauka, 1990. (Rus)

Получено 05.10.2017

Received 05.10.2017