

УДК 621.039, 532.529

АНАЛИЗ РЕКОМЕНДАЦИЙ ЗАМЫКАЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ РАСЧЕТЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ НА ТРЕНИЕ В КОНТУРАХ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Исаков Н. Ш. (ns.isakov@gmail.com),

Перевезенцев В. В., д. т. н., профессор (perevezentsev@bmstu.ru)
(МГТУ имени Н.Э. Баумана)

Представлены результаты экспериментального исследования интегральных гидравлических характеристик двухфазного потока в режиме естественной циркуляции в вертикальных каналах. Выполнен сравнительный анализ и определены границы применимости расчетных методик, применяемых при проектировании и обосновании систем безопасности водоохлаждаемых ядерных энергетических установок, на основе сопоставления расчетных зависимостей с полученными экспериментальными результатами. Предложены рекомендации по выбору и уточнению расчетных соотношений для потерь давления на трение.

► **Ключевые слова:** вертикальный канал, двухфазный поток, естественная циркуляция, паросодержание, расчетные зависимости, системы охлаждения, трение, ядерные энергетические установки.

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.94.4.002

ANALYSIS OF RECOMMENDATIONS OF CLOSING RELATIONS USED IN CALCULATING FRICTION PRESSURE LOSSES IN CIRCUITS WITH THE NATURAL CIRCULATION OF TWO-PHASE FLOWS OF A WATER-COOLED NUCLEAR POWER UNIT

Isakov N. Sh., Perevezentsev V. V., Ph. D., professor
(BMSTU)

The results of an experimental study of the integral hydraulic characteristics of two-phase flow in the mode of natural circulation in vertical channels are presented. A comparative analysis is done and determined are the limits of applicability of computational techniques used in the design and validation of safety systems of water-cooled nuclear power units, based on a comparison of the calculated dependences with the experimental results. Recommendations for the selection and refinement of the closing relations for friction pressure losses are proposed.

► **Keywords:** vertical channel, two-phase flow, natural circulation, steam void, closing relations, coolant systems, friction, nuclear power unit.

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.94.4.002

Введение

Естественная циркуляция в системах охлаждения ядерных энергетических установок (ЯЭУ) представляет интерес для обоснования проектных решений, вопросов эксплуатации и обеспечения безопасности. Это особенно актуально для ЯЭУ нового поколения, в которых предусматривается использование естественной циркуляции теплоносителя в системах охлаждения, предназначенных для обеспечения теплоотвода как в условиях нормальной эксплуатации, так и при аварийных ситуациях. В частности, проекты атомных станций, особенно малой мощности, используют системы охлаждения, основанные на использовании естественной циркуляции однофазного и двухфазного потоков. Режимы естественной циркуляции двухфазных потоков в необогреваемых каналах реализуются в тяговых участках контуров охлаждения. Тяговые участки обеспечивают необходимый движущий напор для циркуляции в контуре теплоотвода. Для определения движущего напора и скорости циркуляции необходимы сведения об истинном объемном паросодержании и потерях давления по контуру, включая потери давления на трение. При проектировании систем и в обоснование безопасности ЯЭУ для определения теплогидравлических характеристик контуров с двухфазным теплоносителем используются и рекомендованные отраслевые методики, и различные расчетные теплогидравлические коды. Для верификации расчетных теплогидравлических кодов необходимы экспериментальные данные о структурных и интегральных характеристиках двухфазных потоков. В данной работе представлены результаты по определению потерь давления на трение, полученные на основе данных диагностики двухфазных потоков по паросодержанию с использованием зондовых методов (кондуктометрические датчики) и данных по распределению давления (дифференциальные манометры) по направлению движения двухфазного потока, для определения структурных характеристик, необходимых для описания математических моделей двухфазных потоков, используемых в одномерных и трехмерных теплогидравлических расчетных кодах.

Гидродинамика двухфазных течений характеризуется следующими параметрами: паросодержание (газосодержание), скорость скольжения фаз, площадь поверхности межфазной границы, относительные скорости фаз, потери давления, включая нивелирные, на ускорение и на трение.

Данные параметры могут быть извлечены из первичной информации, получаемой по результатам диагностики зондовым методом, и ее дальнейшей обработки на основе совокупности балансовых уравнений с привлечением измеряемых режимных параметров (расходы фаз, потери давления). Исследованиям двухфазных течений со спутным движением фаз в вертикальных каналах посвящены как экспериментальные работы [1 – 4], в которых разработаны полуэмпирические методики определения потерь давления на трение, так и работы, в которых выполнены численные расчеты этих параметров [5 – 6]. Большинство работ и имеющиеся методики получены и рекомендованы на основе экспериментальных данных для принудительной циркуляции в вертикальных трубах относительно больших диаметров ($D > 100$ мм) при давлениях более 1 МПа. Применительно к системам с естественной циркуляцией, где реализуются малые массовые скорости ($\rho w < 1000$ кг/м²/с) при достаточно низких давлениях ($p < 0,3$ МПа), характерных для систем аварийного теплоотвода в ЯЭУ, результатов существенно меньше. В связи с изложенным необходимо расширение объема экспериментальных данных верификационной базы для соответствующих условий протекания процессов, а также определение условий применимости и уточнение расчетных методик.

В работе представлены новые результаты потерь давления двухфазных течений «вода – воздух» в вертикальных каналах круглого сечения в режиме естественной циркуляции при низких массовых скоростях циркуляции ($\rho w < 1000$ кг/м²/с) для значений истинного объемного газосодержания, характерных для пузырьковых и снарядных режимов. Экспериментальные данные получены для спутного движения фаз в вертикальных каналах различных диаметров – 30 и 60 мм – при давлении 0,1 МПа, что соответствует диапазону изменения критериального числа Бонда ($Bo = gD^2(\rho' - \rho'')/\sigma$): от 120 до 480. Исследованы границы применимости расчетных методик, используемых при проектировании и обосновании безопасности ЯЭУ.

Замыкающие соотношения для расчета потерь давления на трение

В соответствии с нормативным подходом [7] для определения потерь давления на трение ($\Delta p_{тр}$) в восходящих течениях в трубах рекомендуется использовать формулу:

$$\Delta p_{тр} = \xi \frac{l \rho' w_0^2}{d} \left[1 + \psi x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

где:

$\psi = f(p, w_{см})$ – коэффициент пропорциональности, определяемый по номограмме [7], для давления (p) и средней скорости смеси на участке ($w_{см}$);
 x – массовое паросодержание.

Наряду с этим в [7, 8] для определения истинного объемного газосодержания при подъемном течении в вертикальных каналах рекомендуется использовать подход, основанный на допущениях гомогенности потока [9]. Так, например, в [7]:

$$\Delta p_{тр} = \xi_{2ф} \frac{L G_{см}^2}{D 2 \rho_{см}}, \quad (2)$$

где:

$\xi_{2ф}$ – коэффициент гидравлического сопротивления двухфазной смеси, зависящий от числа Рейнольдса (Re):

$\xi_{2ф} = 64 / Re_{см}$ при $Re > 2000$ (ламинарный режим);

$\xi_{2ф} = 0,316 / Re_{см}^{0,25}$ при $Re_{см} > 2000$ (турбулентный режим).

$$Re_{см} = \frac{G_{см} D}{\mu_{см}}, \quad (3)$$

где:

$G_{см}$ – массовая скорость смеси;

$\mu_{см}$ – динамическая вязкость смеси;

L, D – длина и диаметр канала;

ρ', ρ'' – плотность жидкой и газовой фазы;

$\rho_{см}$ – плотность смеси, определяемая из соотношения $\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{x}{\rho''} + \frac{1-x}{\rho'}$.

Существуют различные замыкающие соотношения для расчета динамической вязкости смеси, применяемые при расчете коэффициента гидравлического сопротивления двухфазной смеси трению. В работе [10] при расчетах потерь давления на трение рекомендованы для использования следующие замыкающие соотношения для $\mu_{см}$ [11, 12]:

$$\mu_{см} = \mu'(1 - \beta)(1 + 2,5\beta) + \mu''\beta; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mu_{см} = & 0,5\mu' \frac{2\mu' + \mu'' - 2(\mu' - \mu'')x}{2\mu' + \mu'' + (\mu' - \mu'')x} + \\ & + 0,5\mu'' \frac{2\mu'' + \mu' - 2(\mu'' - \mu')(1-x)}{2\mu'' + \mu' + (\mu'' - \mu')(1-x)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где:

μ', μ'' – динамическая вязкость жидкой и газовой фазы;

β – расходное объемное содержание газовой фазы.

Авторами работы [13] предложена зависимость для $\xi_{2ф}$:

$$\xi_{2ф} = \begin{cases} \xi_{лам}, & \text{для } Re_{2ф} \leq Re_{кр} \\ \xi_{т} - (\xi_{т} - \xi_{лам}) \exp\left(-\frac{Re_{2ф} - Re_{кр}}{Re_*}\right), & \text{для } Re_{2ф} > Re_{кр}, \end{cases} \quad (6)$$

где:

$$Re_{кр} = 2300;$$

$$Re_* = 750;$$

$$Re_{2ф} = \frac{G_{см} D \left[x^2 + (1-x)^2 \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right) \right]}{\mu'' x + \mu' (1-x) \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)};$$

$$\xi_{лам} = 64 / Re_{2ф};$$

$$\xi_{т} = \frac{1}{\left[1,74 - 2 \lg \left(\frac{2k_{ш}}{D} + \frac{49}{Re_{2ф}^{0,91}} \right) \right]^2},$$

где $k_{ш}$ – размер шероховатости стенки канала.

Авторы предложенной зависимости в работе [13] провели сравнительный анализ результатов вычислений потерь давления на трение по (6) с наиболее широко используемыми замыкающими соотношениями в отечественных и зарубежных теплогидравлических кодах, таких как «РАТЕГ», «КОРСАР», «RELAP», «CATHARE», по широкому диапазону экспериментальных данных. В результате сравнений было показано, что соотношения (6) имеют хорошее согласование с экспериментальными данными и более высокую точность, чем остальные корреляции, что позволило рекомендовать внедрение (6) в теплогидравлический расчетный код «HYDRA-IBRAE».

При моделировании двухфазных течений в контурах ЯЭУ для определения потерь давления на

трение во многих теплогидравлических кодах применяют подход, основанный на методе Локкарта-Мартинелли, суть которого заключается в использовании эмпирических соотношений для параметров двухфазности $\Phi_{ж}^2$ и $\Phi_{г}^2$:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2ф} = \Phi_{ж0}^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_{ж0} = \Phi_{г0}^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_{г0}, \quad (7)$$

где $\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2ф}$, $\left(\frac{dp}{dz}\right)_{ж0}$, $\left(\frac{dp}{dz}\right)_{г0}$ – потери давления на

трение при течении двухфазного потока, однофазного потока (жидкой или газовой фазы) с расходом, равным расходу двухфазного потока.

Применение подхода, изложенного в (7), также возможно в следующем виде:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2ф} = \Phi_{ж}^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_{ж} = \Phi_{г}^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_{г}, \quad (8)$$

где $\left(\frac{dp}{dz}\right)_{ж}$, $\left(\frac{dp}{dz}\right)_{г}$ – потери давления на трение при течении однофазного потока с соответствующим расходом жидкой или газовой фазы.

Для параметров двухфазности существуют различные замыкающие соотношения, которые рекомендованы для широкого диапазона условий течений двухфазного потока. В настоящее время продолжаются работы по усовершенствованию этой методики. Среди рекомендованных в современных работах высокую степень точности имеют зависимости авторов Friedel [14], Muller-Steinhagen – Heck [15], Mishima – Hibiki [16], Sun – Mishima [17].

Расчетная методика (9), предложенная Friedel [14], основана на обобщении обширной базы экспериментальных данных (более 25 000 экспериментальных точек) и использует критериальные числа Фруда (Fr) и Вебера (We), а также соотношения между плотностями и динамическими вязкостями для жидкой и газовой фаз.

$$\Phi_{ж0}^2 = A_{Fr} + \frac{3,24x^{0,78}(1-x)^{0,22} \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}}\right)^{0,91} \left(\frac{\mu_{г}}{\mu_{ж}}\right)^{0,19} \left(1 - \left(\frac{\mu_{г}}{\mu_{ж}}\right)\right)^{0,7}}{Fr_{ж0}^{0,045} \cdot We_{ж0}^{0,045}}, \quad (9)$$

где:

$$A_{Fr} = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} \frac{\xi_{ж0}}{\xi_{г0}};$$

$\xi_{ж0}, \xi_{г0}$ – коэффициенты гидравлического сопротивления потерь давления на трение при течении однофазного потока (жидкой или газовой фазы) с расходом, равным расходу двухфазного потока;

$$Fr_{ж0} = \frac{G_{см}^2}{gD\rho_{ж}^2}, \quad We_{ж0} = \frac{G_{см}^2 D}{\sigma\rho_{ж}} \quad \text{– критериальные числа Фруда и Вебера для жидкости.}$$

Расчетные соотношения (10) по расчетной методике Muller-Steinhagen – Heck [15] получены авторами обобщением результатов обработки и сравнительного анализа более десяти широко применяемых корреляций и экспериментальных данных и относятся к наиболее часто рекомендуемым в современных обзорах по расчетам градиента давления в двухфазных потоках:

$$\Phi_{ж0}^2 = Y^2 x^3 + (1-x)^{0,33} (1 + 2x(Y^2 - 1)),$$

$$Y^2 = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{ж0} / \left(\frac{dp}{dz}\right)_{г0}. \quad (10)$$

Расчетные соотношения (11) авторов Mishima – Hibiki [16], (12) авторов Sun – Mishima [17] и их модификации для каналов малого диаметра ($Bo < 500$) получили также большое распространение, они основываются на широком спектре экспериментальных данных и подходе, предложенном в работе Chisholm [18], и учитывают влияние диаметра канала, числа Бонда (Bo), чисел Рейнольдса ($Re_{ж}, Re_{г}$):

$$\Phi_{ж}^2 = 1 + \frac{C}{X_{ж}} + \frac{1}{X_{г}^2}, \quad (11)$$

где:

$$X_{ж}^2 = \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{г}}\right)^{0,25} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{1,75} \frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}};$$

$$C = 21(1 - \exp(-0,319D)).$$

$$\Phi_{ж}^2 = 1 + \frac{C}{X_{г}^{1,19}} + \frac{1}{X_{г}^2}, \quad (12)$$

где $C = 21(1 - \exp(-C_1 Bo^{0,5}))$, а $C_1 = 1,79 \left(\frac{Re_{г}}{Re_{ж}}\right)^{0,4} \left(\frac{1}{x} - 1\right)^{0,5}$.

Выбранные для анализа рекомендации по замыкающим соотношениям при расчете потерь давления на трение для двухфазных потоков характеризуются их возможностями использования для режимов течения, реализуемых при естественной циркуляции двухфазных смесей в вертикальных

каналах относительно малых диаметров ($Bo < 500$), а также на основе выводов предшествующих исследований по обоснованию их применимости. Для сравнительного анализа рекомендаций использованы результаты экспериментальных исследований структурных и интегральных характеристик двухфазных потоков в контуре с естественной циркуляцией, выполненных авторами настоящей работы.

Экспериментальный стенд и измерения структурных и интегральных характеристик двухфазного потока в контуре с естественной циркуляцией

Экспериментальный стенд [19] (рис. 1), с использованием которого были выполнены экспериментальные исследования, представляет собой адиабатический контур циркуляции. В состав контура входят: сменный экспериментальный участок 1, подводящий участок 7 и опускной участок 4, а также бак-сепаратор 2. Воздух от компрессорной установки с баллоном-ресивером 6 подавался в заполненный водой экспериментальный участок через расположенную по оси канала вставку

с семью расположенными по треугольной решетке отверстиями диаметром 0,15 мм. Внешний диаметр вставки составлял 10 мм. На рис. 2 показаны характерные картины истечения газовой фазы из устройства подачи (вставки) в объем воды для различных расходов воздуха. Истекающая из вставки воздушная струя имеет характерную форму конуса с углом раскрытия, увеличивающимся с ростом расхода воздуха.

Расход воздуха в экспериментах изменялся в диапазоне от 0,023 до 3,76 м³/ч. Приведенная скорость воды (w_0') определялась по измеренным объемным расходам воды из соотношения $w_0' = Q'/f_k$ (где Q' – объемный расход воды в контуре циркуляции; f_k – площадь проходного сечения канала). В условиях превышения движущего напора, возникающего из-за разности плотностей однофазной (перед устройством подачи воздуха) и двухфазной сред (в верхней части канала перед сепарацией воздуха), гидравлического сопротивления контура в последнем развивается естественная циркуляция. В пределах канала от сечения вдува воздуха до его сепарации наблюдается движение двухфазной среды.

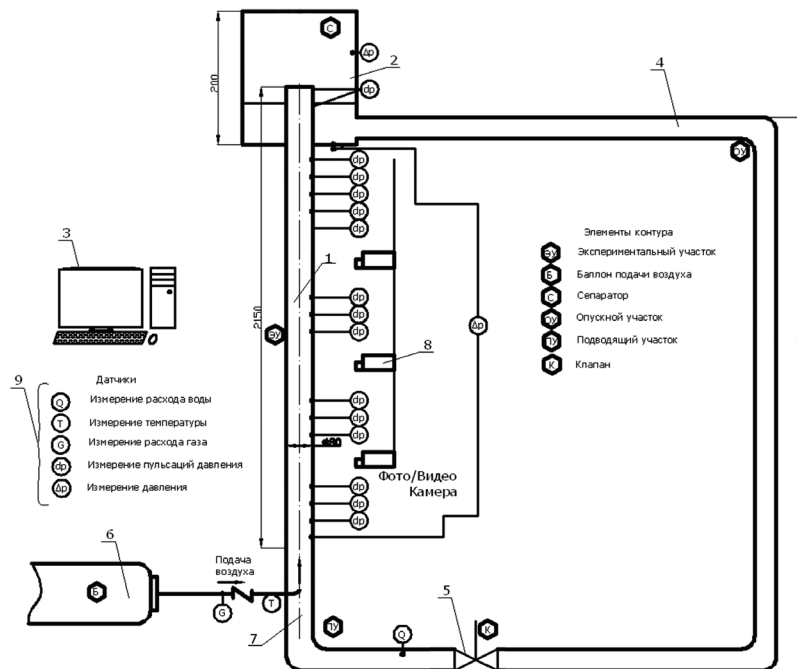


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования гидродинамики адиабатных двухфазных течений «вода – воздух» в режиме естественной циркуляции в вертикальных каналах: 1 – экспериментальный участок, 2 – бак-сепаратор, 3 – сбор данных и визуализация, 4 – опускной участок, 5 – вентиль опускного участка, 6 – баллон-ресивер компрессорной станции, 7 – подводящий участок, 8 – скоростная фото/видеокамера, 9 – датчики измерительной системы

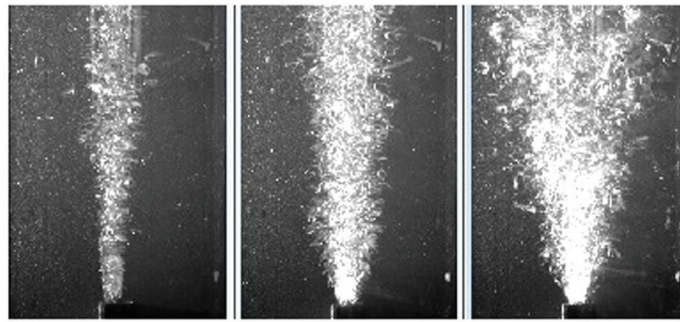


Рис. 2. Характерные картины истечения воздуха в объем воды с увеличением расхода воздуха (0,079; 0,125; 0,372 м³/ч) для канала 30 мм

Кондуктометрический метод измерения газосодержания (паросодержания) двухфазного потока основан на измерении электрической проводимости среды двухфазного потока, изменяющейся при различной концентрации газа (пара) в воде. Для определения значения локального паросодержания и построения профиля концентрации фаз датчик газосодержания размещался в потоке двухфазной смеси внутри экспериментального участка с возможностью его перемещения вдоль диаметра с помощью координатного устройства (шаг перемещения 0,05 мм).

Измерительная система включает в себя ультразвуковой расходомер и ротаметр, дифференциальные манометры типа «Сапфир-22МПС» для определения распределения давления по высоте.

Сигналы с датчика газосодержания с помощью аналогового-цифрового преобразователя и устройства регистрации данных USB NI 6211

записывались с частотой опроса 100 кГц, и полученная временная реализация сохранялась в файл для дальнейшей обработки в программном комплексе «LabView» совместно с сигналами датчиков давления и расходомера. Для обработки полученных сигналов была разработана программа в среде программного комплекса «LabView».

**Результаты экспериментальных исследований.
Анализ замыкающих соотношений**

Полученные по результатам измерения и обработки значения локального истинного газосодержания составляют массив данных, представляющий собой распределение локальных значений истинного газосодержания по сечению канала. Вид полученных распределений представлен на рис. 3 в виде зависимости локальных газосодержаний от безразмерной радиальной координаты.

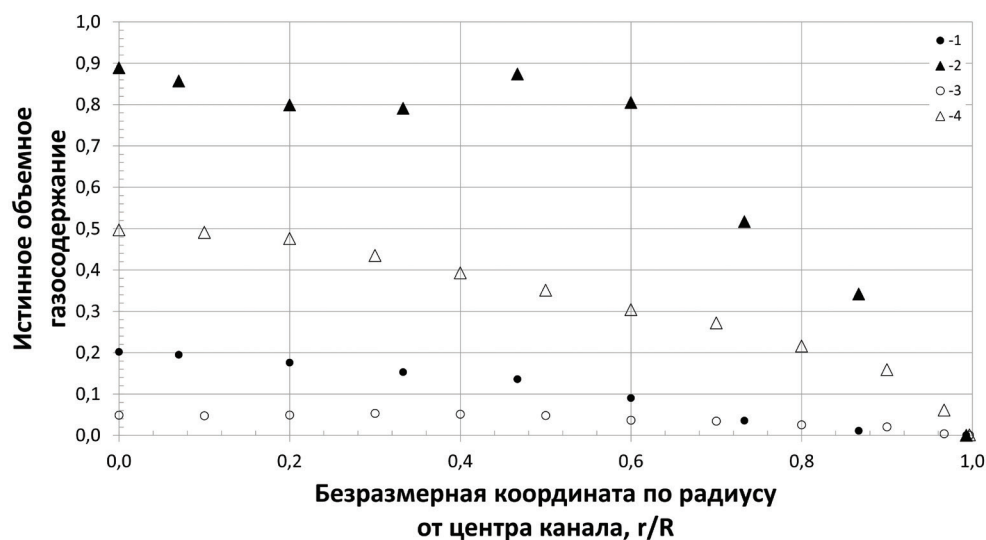


Рис. 3. Распределения локального истинного объемного газосодержания:
1 – $\beta = 0,28$ ($D = 60$ мм, $Bo = 480$), 2 – $\beta = 0,73$ ($D = 30$ мм, $Bo = 120$),
3 – $\beta = 0,09$ ($D = 60$ мм, $Bo = 480$), 4 – $\beta = 0,41$ ($D = 30$ мм, $Bo = 120$)

Величина среднего истинного газосодержания $\bar{\varphi}$ по сечению канала радиусом R определяется на основе соотношения:

$$\bar{\varphi} = \frac{2\pi \int_0^R \varphi(r) dr}{\pi R^2}, \quad (13)$$

где $\varphi(r)$ – распределение локального газосодержания по радиусу канала.

На основе обработки данных по структурным характеристикам двухфазных течений (расходные и истинные объемные доли фаз, скорости фаз, режим течения) выполнены дополнительные уточнения полученных интегральных характеристик потока (скорость циркуляции, движущий напор, потери давления на трение, суммарные потери давления по контуру). Результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 4,

смеси $w_{cm} < 0,5$ м/с удовлетворительное согласование с экспериментальными результатами получено по результатам вычислений с применением расчетных соотношений авторов Sun – Mishima (12), Mishima – Hibiki (11), Muller-Steinhagen – Heck (10), Awad – Muzychka (5), Алипченков и др. (6).

Заключение

Современное развитие расчетных теплогидравлических методик предполагает использование новых экспериментальных данных с целью расширения областей и диапазонов применимости, в частности, для систем охлаждения с контурами естественной циркуляции двухфазных потоков в каналах малых диаметров.

Полученные в ходе работы экспериментальные результаты исследования структурных и интегральных характеристик двухфазного потока при

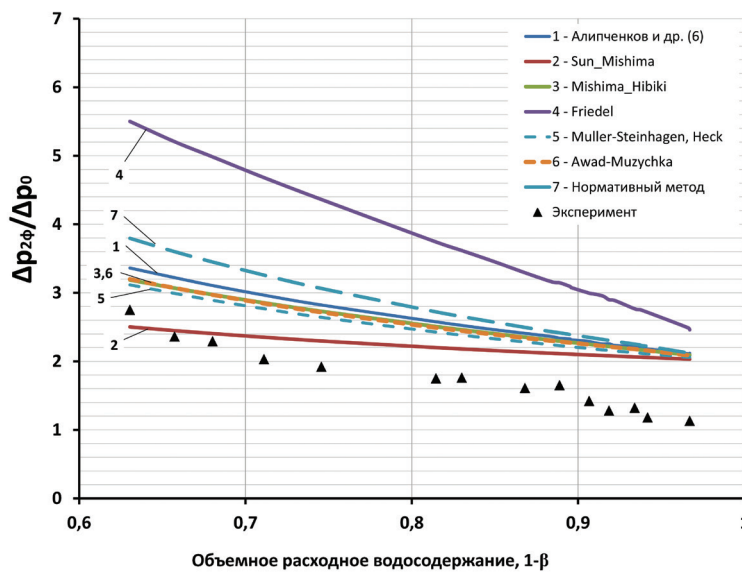


Рис. 4. Отношение потерь давления на трение к потерям давления при течении только жидкой фазы в зависимости от объемного водосодержания

отражают зависимости интегральных (потери давления) и структурных (доли фаз) гидродинамических характеристик исследованных двухфазных потоков для $Bo = 120$ и $Bo = 480$ в диапазоне чисел $Re_{cm} = 1 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^4$. Полученные экспериментальные данные (▲) для различных соотношений долей фаз и результаты вычислений по расчетным соотношениям построены в координатах: «Отношение потерь давления на трение к потерям давления при течении только жидкой фазы ($\Delta p_{2\phi} / \Delta p_0$)» и «Объемное расходное водосодержание, $1 - \beta$ ».

Как видно из рис. 4, для реализованных условий естественной циркуляции при значениях скорости

естественной циркуляции в вертикальных каналах малых диаметров использованы в сравнительном анализе с расчетными величинами потерь давления на трение по наиболее распространенным расчетным методикам. На основе сравнения проанализировано влияние учета малого диаметра ($Bo < 500$) в расчетных замыкающих соотношениях.

Для естественной циркуляции двухфазных потоков в каналах малого диаметра характерна динамичность смены режимов течения, в частности, от пузырькового к сраядному, со сложной структурой перехода. В связи с этим требуется анализ применимости расчетных методик перед их

использованием при проектировании и обосновании систем охлаждения ЯЭУ. В ходе работы выявлено, что в области значений скорости смеси $w_{см} < 0,5$ м/с применение замыкающих соотношений, учитывающих критериальное число Bo , повышает точность численного моделирования. При объемном расходе паросодержания в диапазоне от 0,1 до 0,4 удовлетворительное согласование с экспериментальными результатами получено для соотношения, учитывающего влияние диаметра через критериальное число Bo , авторов Sun – Mishima (12). Подходы на основе обобщенной корреляции авторов Muller-Steinhagen – Heck (10) и расчета динамической вязкости двухфазной смеси по методике авторов Awad – Muzychka (15), имея более высокую точность по сравнению с другими

рассмотренными расчетными методиками, заметно уступают методике авторов Sun – Mishima (12). Несмотря на возможность использования упомянутых замыкающих соотношений на основе Bo , имеются диапазоны с существенными расхождениями с экспериментальными данными.

Таким образом, полученные экспериментальные данные по гидродинамическим структурным и интегральным характеристикам двухфазных потоков применимы для уточнения замыкающих соотношений теплогидравлических расчетных кодов, используемых при проектировании и обосновании систем безопасности водоохлаждаемых ЯЭУ для режимов естественной циркуляции в контурах с вертикальными каналами малых диаметров.

Список литературы

1. Schlegel J., Hibiki T., Ishii M. Development of a comprehensive set of drift-flux constitutive models for pipes of various hydraulic diameters // *Progress in Nuclear Energy*. 2010. № 52. P. 666 – 671.
2. Алексеев С. Б., Илюхин Ю. Н., Кухтевич В. О., Парамонова И. Л., Светлов С. В., Сидоров В. Г. Истинное объемное паросодержание в вертикальных трубах в условиях барботажа // *ТВТ*. 1999. № 37 (4). С. 620 – 626.
3. Логинов А. В., Мельников В. И., Соколов А. Н., Шмелев Д. И. Экспериментальный стенд по исследованию двухфазного водо-воздушного потока // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2011. № 6. С. 209 – 212.
4. Мельников В. И., Иванов В. В., Тепляшин И. А., Логинов А. В., Шмелев Д. И. Разработка многоточечной акустозондовой системы диагностики двухфазного теплоносителя // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2014. № 2. С. 27 – 34.
5. Schlegel J., Sawant P., Paranjape S., Ozar B., Hibiki T., Ishii M. Void fraction and flow regime in adiabatic upward two-phase flow in large diameter vertical pipes // *Nuclear Engineering and Design*. 2009. № 239 (12). P. 2864 – 2874.
6. Mishima K., Nakamura H., Shen X. Two-phase distribution in a vertical large diameter pipe // *International Journal of Heat Mass Transfer*. 2005. № 48 (1). P. 211 – 225.
7. РД-24.035.05-89. Методические указания. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. Введ. 01.07.1990. М.: 1989.
8. РБ-040-09. Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования водоохлаждаемых ядерных энергетических установок. Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 июля 2009 г. № 641. Введ. 20.07.2009.
9. Захарова Э. А., Лабунцов Д. А., Корнюхин И. П. Паросодержание двухфазного адиабатного потока в вертикальных каналах // *Теплоэнергетика*. 1968. № 4. С. 62 – 67.
10. Ghajar A. J., Bhagwat S. M. Flow Patterns, Void Fraction and Pressure Drop in Gas-Liquid Two Phase Flow at Different Pipe Orientations, *Frontiers and Progress in Multiphase Flow I* // Springer. 2014. Chapter 4. P. 157 – 212.
11. Beattie D. R. H., Whalley P. B. A simple two-phase frictional pressure drop calculation method // *International Journal of Multiphase Flow*. 1982. № 8 (1). P. 83 – 87.
12. Awad M. M., Muzychka Y. S. Effective property models for homogeneous two-phase flows // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008. № 33. P. 106 – 113.

13. Алипченков В. М., Беликов В. В., Давыдов А. В., Емельянов Д. А., Мосунова Н. А. Рекомендации по выбору замыкающих соотношений для расчета потерь давления на трение в контурах АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2013. № 5. С. 28 – 34.
14. Friedel L. Improved friction pressure drop correlation for horizontal and vertical two-phase flow // European Two-Phase Flow Group Meeting. Proceedings of the meeting / Ispra, 1979. Pap. 18. P. 485 – 492.
15. Muller-Steinhagen H., Heck K. A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes // Chemical Engineering and Processing. 1986. № 20. P. 297 – 308.
16. Mishima K., Hibiki T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes // International Journal of Multiphase Flow. 1996. № 22 (4). P. 703 – 712.
17. Sun L., Mishima K. Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in mini channels // International Journal of Multiphase Flow. 2009. № 35. P. 47 – 54.
18. Чисхолм Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках. М.: Недра, 1986. 204 с.
19. Исаков Н. Ш., Перевезенцев В. В. Диагностика двухфазных течений в вертикальных каналах в режиме естественной циркуляции по пристеночным пульсациям давления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 17 – 29.

References

1. Schlegel J., Hibiki T., Ishii M. Development of a comprehensive set of drift-flux constitutive models for pipes of various hydraulic diameters // Progress in Nuclear Energy. 2010. No. 52. P. 666 – 671.
2. Alekseev S. B., Ilyhin Y. N., Kuhtevich V. O., Paramonova I. L., Svetlov S. V., Sidorov V. G. True volumetric vapor content in vertical pipes under sparging conditions // TVT. 1999. No. 37 (4). P. 620 – 626.
3. Loginov A. V., Melnikov V. I., Sokolov A. N., Shmelev D. I. Experimental stand for the study of two-phase water-air flow // Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzhya. 2011. No. 6. P. 209 – 212.
4. Melnikov V. I., Ivanov V. V., Teplyashin I. A., Loginov A. V., Shmelev D. I. Development of multi-point acoustic probe diagnostics system of two-phase coolant // Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika. 2014. No. 2. P. 27 – 34.
5. Schlegel J., Sawant P., Paranjape S., Ozar B., Hibiki T., Ishii M. Void fraction and flow regime in adiabatic upward two-phase flow in large diameter vertical pipes // Nuclear Engineering and Design. 2009. No. 239 (12). P. 2864 – 2874.
6. Mishima K., Nakamura H., Shen X. Two-phase distribution in a vertical large diameter pipe // International Journal of Heat Mass Transfer. 2005. No. 48 (1). P. 211 – 225.
7. RD-24.035.05-89. Methodical instructions. Thermal and hydraulic calculation of heat-exchange equipment of nuclear power plant. Effective since 01.07.1990. М.: 1989.
8. RB-040-09. Safety guide. Calculation dependences and methods for calculating the hydrodynamic and thermal characteristics of elements and equipment of water-cooled nuclear power plants. Approved by Order No. 641 of the Federal Service for environmental, technological and nuclear supervision of July 20, 2009. Effective since 20.07.2009.
9. Zaharova E. A., Labuntsov D. A., Kornyhina I. P. Vapor content of a two-phase adiabatic flow in vertical channels // Teploenergetika. 1968. No. 4. P. 62 – 67.
10. Ghajar A. J., Bhagwat S. M. Flow Patterns, Void Fraction and Pressure Drop in Gas-Liquid Two Phase Flow at Different Pipe Orientations, Frontiers and Progress in Multiphase Flow I // Springer. 2014. Chapter 4. P. 157 – 212.
11. Beattie D. R. H., Whalley P. B. A simple two-phase frictional pressure drop calculation method // International Journal of Multiphase Flow. 1982. No. 8 (1). P. 83 – 87.
12. Awad M. M., Muzychka Y. S. Effective property models for homogeneous two-phase flows // Experimental Thermal and Fluid Science. 2008. No. 33. P. 106 – 113.
13. Alipchenkov V. M., Belikov V. V., Davydov A. V., Emelyanov D. A., Mosunova N. A. Recommendations on the selection of closing relations for calculating friction pressure losses in the circuits of WWER nuclear power plants // Teploenergetika. 2013. No. 5. P. 28 – 34.
14. Friedel L. Improved friction pressure drop correlation for horizontal and vertical two-phase flow // European Two-Phase Flow Group Meeting. Proceedings of the meeting / Ispra, 1979. Pap. 18. P. 485 – 492.

15. Muller-Steinhagen H., Heck K. A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes // *Chemical Engineering and Processing*. 1986. No. 20. P. 297 – 308.
16. Mishima K., Hibiki T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes // *International Journal of Multiphase Flow*. 1996. No. 22 (4). P. 703 – 712.
17. Sun L., Mishima K. Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in mini channels // *International Journal of Multiphase Flow*. 2009. No. 35. P. 47 – 54.
18. Chisholm D. *Two-phase flow in pipelines and heat-exchangers*. M.: Nedra, 1986. 204 p.
19. Isakov N. Sh., Perevezentsev V. V. Diagnostics of Two-Phase Flows in Vertical Channels During the Natural Circulation by Near-Wall Pressure Pulsations. *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.* 2015. No. 3. P. 17 – 29.

