



УДК 532.5.032

*Б.Ф. Балунув, Е.Н. Сайкова, Ю.Г. Сухоруков***ГИДРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗОРОВ
В ПЕРЕГОРОДКАХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ***B.F. Balunov, E.N. Saykova, Yu.G. Sukhorukov***GAPS HYDRAULIC RESISTANCE IN REGENERATIVE HEATERS GRIDS**

Приведены результаты экспериментального исследования по определению коэффициента гидросопротивления трения в узком кольцевом зазоре, образованном при проходе теплообменных труб через отверстия в дистанционирующих перегородках вертикальных регенеративных подогревателей. На основе результатов исследования предложены соотношения для расчета коэффициента гидросопротивления трения $\lambda_{тр} = f(Re)$ в реальных зазорах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ. КОЭФФИЦИЕНТ ГИДРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ. УЗКИЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЗАЗОР. ВЕРТИКАЛЬНЫЙ РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПОДОГРЕВАТЕЛЬ. ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИЕ ПЕРЕГОРОДКИ.

The results of investigation of friction Hydraulic resistance COEFFICIENT determination in a narrow circular GAP are described. The narrow circular GAP is made by passing of heat-exchange pipes through the holes in the spacer grids of the vertical regenerative heaters. Based on the investigation results some ratios for calculation of friction Hydraulic resistance COEFFICIENT $\lambda_{тр} = f(Re)$ ARE PROPOSED.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION. FRICTION HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT. NARROW CIRCULAR GAP. VERTICAL REGENERATIVE HEATER. SPACER GRIDS.

Чтобы взаимно дистанционировать теплообменные трубы в вертикальных пароводяных регенеративных подогревателях, установлены с определенным шагом дистанционирующие перегородки (ДП). Теплообменные трубы пропускаются через сверления в ДП, имеющие несколько больший диаметр по сравнению с внешним диаметром труб. Уменьшение диаметра сверления затрудняет сборку трубного пучка, но позволяет снять часть конденсата, стекающего по внешней поверхности труб и повысить интенсивность теплоотдачи при конденсации пара на этой поверхности.

Особенно значительны протечки конденсата и даже проскоки пара через перегородку, образующую верхнюю грань выгородки, в которой расположен охладитель конденсата. Для организации в нем противоточного движения теплообменивающих сред конденсат из придонной части основного объема подогревателя поднимают в транспортной части выгородки до ее верхней грани на 2–4 м. Поэтому перепад давления на перегородке достигает 20–40 кПа.

Для оценки эффективности и целесообразности применения тех или иных мер по снижению протечек через ДП необходимо знать расход этих протечек. При этом в соотношениях

$$G_{\text{заз}} = \left(\frac{F}{\sqrt{\sum \zeta}} \right)_{\text{заз}} \sqrt{2 \Delta p p_{\text{конд}}}, \quad (1)$$

где

$$\sum \zeta = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}} + \lambda_{\text{тр}} \frac{H_{\text{ДП}}}{d_3}; \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{тр}} = f(Re; \Delta/d_3), \quad (3)$$

используемых при расчете расхода однофазного потока через одиночный зазор отсутствуют рекомендации для расчета коэффициента гидросопротивления трения $\lambda_{\text{тр}}$ для реального зазора. Так, отверстия в перегородках просверливаются без чистовой обработки поверхности и имеют шероховатость $\Delta = (25-30)10^{-3}$ мм, которая лишь на порядок отличается от эквивалентного диаметра рассматриваемого зазора $d_3 = 4(F/\Pi)_{\text{заз}} = (d_{\text{отв}} - d_{\text{тр}})$.

В соотношениях (1)–(3): $G_{\text{заз}}$ — массовый расход через зазор в ДП, кг/с; $F_{\text{заз}}$ — площадь проходного сечения зазора, м²; $\Sigma\zeta$ — суммарный коэффициент гидросопротивления зазора в ДП; Δp — перепад давления между верхней и нижней гранями ДП, Па; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды, кг/м³; $\zeta_{\text{вх}}$ и $\zeta_{\text{вых}}$ — коэффициенты гидросопротивления соответственно входа потока в зазор и выхода из него; $H_{\text{дп}}$ — высота ДП, м.

Нашей целью была разработка соотношений для расчета значения $\lambda_{\text{тр}}$ применительно к реальным условиям работы вертикальных регенеративных подогревателей на основе экспериментального исследования и имеющихся рекомендаций.

Описание экспериментальной установки.

Схема установки представлена на рис 1. Основная исследуемая ее часть — фрагмент узла прохода теплообменных труб (2) вертикального подогревателя через ДП (1). При создании этого

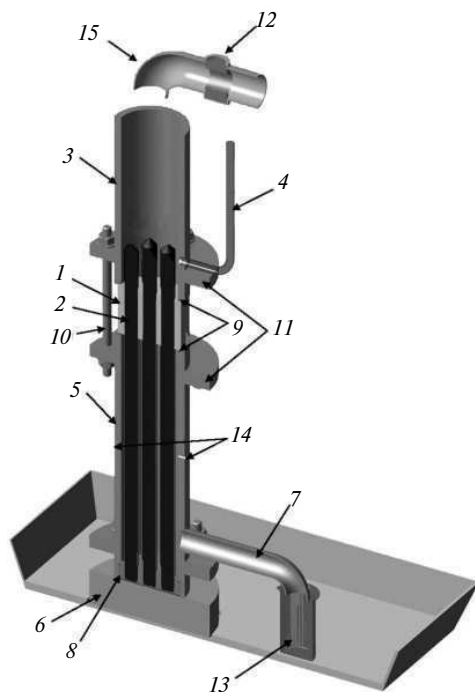


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — исследуемая ДП; 2 — имитаторы теплообменных труб; 3 — верхняя камера; 4 — водоуказательная трубка; 5 — нижняя камера; 6 — днище нижней камеры; 7 — водоотводящая трубка; 8 — дополнительная ДП; 9 — резиновые уплотнения; 10 — болтовые соединения; 11 — фланцы; 12 — шаровый кран; 13 — мерная мензурка; 14 — отверстия для выравнивания с атмосферным давлением в нижней камере; 15 — трубопровод подвода конденсата

узла использовались натурные материалы как для перегородки (сталь 20), так и для трубок (сталь 12Х18Н10Т или латунь 68). Натурными были сохранены и геометрические размеры элементов: диаметр трубок — 15,99 мм, толщина $H_{\text{дп}}$ ДП — 16 или 60 мм, диаметр отверстий в них — 16,13–16,59 мм. В экспериментах использовались шесть имитаторов перегородок, отличающихся высотой и диаметром отверстий в них. Геометрические характеристики исследованных ДП приведены в таблице. Каждая ДП имела семь отверстий, расположенных по гексагональной решетке с шагом 22 мм. Сверление отверстий в ДП были выполнены по заводской технологии. Диаметры всех отверстий измерялись нутромером с погрешностью $\pm 0,05$ мм. Замеры проводились с обоих торцов ДП в двух перпендикулярных плоскостях. Отличие между ними не превышало 0,05 мм. В таблице приведен усредненный диаметр всех отверстий. В отверстия устанавливались заглушенные с верхнего торца имитаторы теплообменных труб высотой 340 мм. Диаметры труб измерялись микрометром с погрешностью $\pm 0,01$ мм.

Геометрические характеристики исследованных перегородок

Номер варианта ДП	$H_{\text{дп}}$, мм	$d_{\text{отв}}$, мм
1	16	16,54
2	16	16,13
3	16	16,31
4	16	16,59
5	60	16,52
6	60	16,33

Над ДП располагалась верхняя камера 3 — вертикальная труба диаметром 76/68 мм и высотой 1,8 м. Через верхний открытый торец этой трубы по трубке 15 с регулирующим краном 12 подавался от ТЭЦ НПО «ЦКТИ» турбинный конденсат с температурой 9,5–54 °С. Конденсат имел следующие характеристики: прозрачность более 30 см; $pH = 7,0$; хлориды — 3 мг/л; содержание — 4,2 мг/л; электропроводимость — 7 мкСм/см. Регулировкой расхода подаваемого конденсата устанавливался заданный уровень воды над ДП в рассматриваемом опыте. Для его измерения верхняя камера была снабжена стеклянной водоуказательной трубкой 4. Под ДП располагалась нижняя камера 5, в верхней части

стенки которой имелись отверстия 14 для создания под исследуемой ДП 1 атмосферного давления и для контроля отсутствия полного водяного заполнения нижней камеры. В придонной части камеры располагалось сливное отверстие для водоотводящей трубы 7. После стабилизации уровня воды в верхней камере под ней на фиксированный промежуток времени $\tau = (30-60)$ с, устанавливалась мерная мензурка требуемого объема $V = (25 \text{ мл} - 2 \text{ л})$.

При проведении опытов в стационарных условиях измерялись следующие параметры воды:

уровень h в верхней камере относительно верхнего среза ДП с максимальной абсолютной погрешностью $\Delta h = \pm 0,5$ мм;

объемный расход воды через установку определялся по темпу заполнения мерной мензурки — $G = V/\tau$ (среднеквадратичная относительная погрешность (СКОП) составила $\delta G \approx 0,021$);

температура t_b воды на сливе из установки измерялась лабораторным термометром с максимальной абсолютной погрешностью $\Delta t_b = \pm 0,2$ °С.

Перед каждой серией опытов проводилась протирка и промывка установки конденсатом. Серия экспериментов с конкретным типоразмером ДП и материалом трубок состояла из 7–21 опытов, проводимых при различных значениях уровня h воды в верхней трубе. В каждой серии первый и последний опыт дублировался при идентичных значениях h для контроля отсутствия снижения расхода воды из-за засорения зазора продуктами коррозии и механическими включениями. Лишь при получении идентичных значений расхода (отличие менее 2 %) проведенная серия опытов допускалась к дальнейшей обработке.

Анализ результатов экспериментов

Обобщение результатов экспериментов проводилось в виде функции $\lambda_{\text{тр}} = f(\text{Re})$, где* $\lambda_{\text{тр}} = (\Sigma \zeta - \zeta_{\text{вх}} - \zeta_{\text{вых}}) d_3 / H_{\text{ДП}}$ при $\Sigma \zeta = \frac{2\Delta p}{\rho_b W^2} = \frac{2g(F_{\text{пр}}^2)_{\text{заз}} \rho_b^2 (h + H_{\text{др}})}{G_{\text{заз}}^2}$, а $\text{Re} = wd_3 / \nu_b = 4G / \Pi \rho_b \nu_b$ — число Рейнольдса. Среднеквадратичная относительная погрешность определения значения $\Sigma \zeta$ достигала $\delta(\Sigma \zeta) = 0,57$ в основном из-за вы-

* Все использованные обозначения эксплицированы в конце статьи.

сокой погрешности определения составляющей $\delta(F_{\text{пр}}^2) = 0,56$. В то же время СКОП определения остальных рассмотренных комплексов — весьма умеренны: $\delta((h + H_{\text{др}})/G^2) = 0,03$; $\delta(\text{Re}) \approx \delta(G) = 0,02$.

Для рассматриваемых условий в соответствии с рекомендациями [1] $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$; $\zeta_{\text{вых}} = 1,0$.

Результаты обработки $\lambda_{\text{тр}} = f(\text{Re})$ представлены на рис. 2 для всех рассматриваемых ДП с их дифференциацией. СКОП определения значения $\lambda_{\text{тр}}$ достигала $\delta(\lambda_{\text{тр}}) = 0,69$, что приводило к заметному расслоению данных по типоразмерам ДП.

В экспериментах охвачен диапазон чисел Рейнольдса $\text{Re} = 4,6-2400$, формально практически весь относящийся к ламинарному течению ($\text{Re} < \text{Re}_{\text{пр}} = 2200$). Однако приведенные предельные числа Re относятся лишь к цилиндрическим гладким трубам. Смена формы канала изменяет профиль скорости ламинарного потока и может изменить число $\text{Re}_{\text{пр}}$. Так в работах [2–4] для стержневых сборок (продольное течение при шероховатости стержней $\Delta \approx 0,005$ мм) $\text{Re}_{\text{пр}} = 700-1200$. Наличие шероховатости поверхности канала должно вызвать более раннюю турбулизацию потока. В работе [5] приведен график Л. Моуди $\lambda_{\text{тр}} = f(\text{Re}; d/\Delta)$ при малых значениях $d/\Delta \geq 20$, но лишь для турбулентной области ($\text{Re} > 4000$). Только в справочнике [1] дано соотношение для расчета предельного числа $\text{Re}_{\text{пр}} = f(d/\Delta)$ для цилиндрических труб при $d/\Delta \geq 16,5$:

$$\text{Re}_{\text{пр}} = 754 \exp(0,0065d/\Delta). \quad (4)$$

Для рассмотренных в нашей работе значений $d_3/\Delta = 10,7-21,4$ расчет по (4) дает $\text{Re}_{\text{пр}} = 770$.

Предельное значение Re обычно связывается с отходом от пропорциональности потерь давления Δp и скорости потока w , что в случае применения формулы Дарси $\Delta p = \lambda_{\text{тр}} (L/d_3) \rho_b w^2 / 2$ эквивалентно отходу от обратной пропорциональности:

$$\lambda_{\text{тр}} = A/\text{Re}, \quad (5)$$

где для цилиндрических труб $A = 64$. Рассматриваемые здесь узкие кольцевые зазоры практически подходят под определение «плоская щель», для которой длина большей грани ($a = \pi \bar{d}_{\text{отв}} \approx \pi d_{\text{тр}}$) поперечного сечения намного превышает длину меньшей грани $b = 0,5(d_{\text{отв}} - d_{\text{тр}})$.

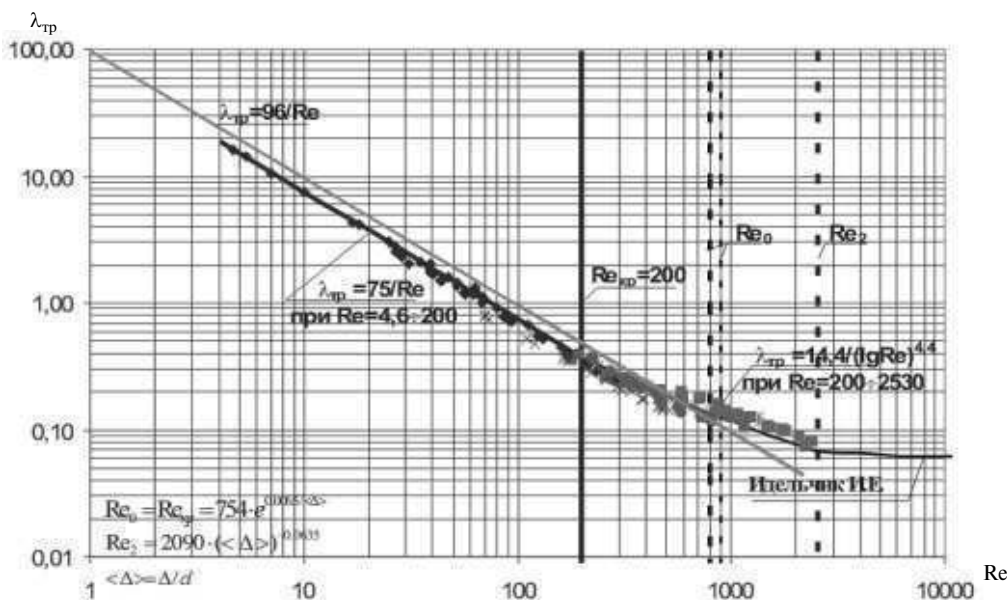


Рис. 2. Обобщение результатов всех экспериментов из [2] в виде зависимостей $\lambda_{тр} = f(Re)$ для шести вариантов ДП: ■ — 1; ◆ — 2 и 6; x — 3; * — 4; ● — 5

Для таких каналов согласно рекомендациям [6] $A = 96$. На рис. 2 представлена линия, рассчитанная по (5) при $A = 96$, а также линия, обобщающая результаты наших экспериментов. Ее отрезок при $Re = 4,6–200$ описывается соотношением

$$\lambda_{тр} = 75/Re. \quad (6)$$

Таким образом, для рассматриваемых зазоров допустимо принять значение $Re_{пр} = 200$. Более низкое значение числителя в (6) по сравнению с приведенным выше для «плоской щели», вероятно, связано с некорректностью расчета проходного сечения и эквивалентного диаметра зазора по измерениям нутромером и микрометром диаметров соответственно отверстия и трубки. В обоих случаях измерения проводились по максимальным выступам шероховатости, которые могли не лежать в одном сечении и занимать лишь незначительную долю всей высоты зазора. Поэтому истинные значения проходного сечения и эквивалентного диаметра могли отличаться от рассчитанных по результатам измерений на величину, соответствующую увеличению зазора на $\Delta\delta \leq \Delta_{отв} + \Delta_{тр} = (0,03–0,04)$ мм. С учетом указанных выше максимально возможных отличий в значениях $d_{отв}$ и $d_{тр}$ проведенные соответствующие расчеты дали более высокие величины $\lambda_{тр}$

и их обобщение при $A > 96$, что подтверждает корректность высказанного утверждения о причине отличия в значениях A .

В нашей работе максимальные значения $Re = 2400$ имели место в экспериментах с ДП1 и ДП4, для которых отношение $d_3/\Delta = 18–24$. В справочнике [1] для трубы с близким значением $d/\Delta = 22$ представлена линия $\lambda_{тр} = f(Re)$, которая нанесена на рис. 2. В области $Re = 2500–6000$ эта линия имеет слабое снижение значения $\lambda_{тр}$ с ростом Re и описывается соотношением

$$\lambda_{тр} = 0,014Re^{-0,092}. \quad (7)$$

При $Re > 6000$ описываемая линия выходит на автомодельное значение относительно числа Рейнольдса:

$$\lambda_{тр} = 0,061. \quad (8)$$

Эта линия представлена на рис. 2. Ее характер дает основание полагать, что для каналов, имеющих такую же относительную шероховатость, область значений $Re > 2500$ является турбулентной; в ней значение $\lambda_{тр}$ слабо зависит от формы канала и допустимо применение рекомендаций [1] к рассматриваемым «плоским щелям» при идентичных значениях d_3/Δ .

Кроме того, на рис. 2 наблюдается плавный переход от результатов проведенных нами экс-

периментов клинии $\lambda_{\text{тр}} = f(\text{Re})$, соответствующей рекомендации [1]. Это дает основание использовать для расчета значений $\lambda_{\text{тр}}$ в рассматриваемых зазорах при $\text{Re} > 2500$ соотношения (7), (8).

В промежуточной зоне ($\text{Re} = 200\text{--}2500$) отрезок линии, обобщающей результаты наших экспериментов, описывается соотношением

$$\lambda_{\text{тр}} = 14,4/(\lg \text{Re})^{4,4}. \quad (9)$$

Таким образом, используя соотношения (6)–(9), можно определить величину $\lambda_{\text{тр}} = f(\text{Re})$ для всех условий, интересующих практику.

В заключение отметим, что рекомендации [1] представлены в графическом виде $\lambda_{\text{тр}} = f(\text{Re})$ при параметре d/Δ (минимальное значение $d/\Delta = 16,5$) и охватывают диапазон чисел Рейнольдса $\text{Re} = 630\text{--}10000$. Эти рекомендации предполагают немонотонный характер изменения $\lambda_{\text{тр}} = f(\text{Re})$ в переходной области течения потока. Аналогичный характер изменения отображен в монографии Г. Шлихтинга [5], а также в экспериментах И. Никурадзе [8], проведенных при искусственной песочной шероховатости поверхности трубы. Рассматриваемые здесь узкие

кольцевые каналы обладают неравномерной «технической» шероховатостью поверхности. Для используемых на практике «технических» труб, как и в настоящей работе, имеет место в переходной области плавное монотонное снижение значения $\lambda_{\text{тр}}$.

На основе результатов проведенного экспериментального исследования по определению гидросопротивления трения однофазного потока в узких шероховатых зазорах, образованных при проходе теплообменных труб через отверстия в дистанционирующих перегородках вертикальных регенеративных подогревателей, предложены соотношения для расчета коэффициента гидросопротивления трения $\lambda_{\text{тр}} = f(\text{Re})$ при $d_3/\Delta = 10,7\text{--}24$.

Предложенные соотношения охватывают широкий диапазон значений чисел Рейнольдса от ламинарной области, где $\lambda_{\text{тр}} = f(1/\text{Re})$, до автомодельной турбулентной области, где $\lambda_{\text{тр}} = f(\text{Re}) = \text{const}$. При обобщении использованы рекомендации справочников [1, 9], а также учебника Н.З. Френкеля [10].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Условные обозначения, принятые в статье: $d_{\text{отв}}$ и $d_{\text{тр}}$ — диаметры соответственно отверстия и трубки, м; d_3 — эквивалентный диаметр сечения канала, м; $F_{\text{пр}}$ — площадь проходного сечения канала, м²; G и G' — соответственно объемный и массовый расходы, м³/с и кг/с; $G_{\text{з}}$ и $G'_{\text{з}}$ — объемный и массовый расходы через один зазор в ДП, кг/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; $H_{\text{дп}}$ — высота ДП, м; h — высота уровня воды над ДП, м; h_{Σ} — суммарная высота ДП и уровня воды над ней, м; Δp — перепад давления, Па; Re — число Рейнольдса; $\text{Re}_{\text{пр}}$ — предельное число Рейнольдса для ламинарного потока;

$t_{\text{в}}$ — температура воды, °С; V — объем воды, м³; w — скорость воды, м/с; δ — величина зазора между отверстиями в ДП и теплообменными трубами, м; Δ — средняя абсолютная шероховатость поверхности отверстий в ДП, м; $\lambda_{\text{тр}}$ — коэффициент гидросопротивления трения; $\nu_{\text{в}}$ — кинематическая вязкость воды, м²/с; P и P_{Σ} — периметр и общий периметр зазоров ДП; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды, кг/м³; $\Sigma \zeta$ — суммарный коэффициент гидросопротивления зазоров в ДП; $\zeta_{\text{вх}}$ — коэффициент гидросопротивления входа конденсата в зазор; $\zeta_{\text{вых}}$ — коэффициент гидросопротивления выхода конденсата из зазора; τ — время, с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик — М.: Машиностроение, 1975. — 559 с.
2. Бабыкин, А.С. Интенсивность охлаждения частично осушенных твэлов в квазистационарных условиях [Текст] / А.С. Бабыкин, Б.Ф. Балунев, Т.С. Живицкая [и др.] // Атомная энергия. — 1993. Т. 75, вып. 4. — С. 276–281.
3. Нехорошев, П.М. Критические числа Рейнольдса при продольном течении жидкости в пучках

стержней [Текст] / П.М. Нехорошев // Вопросы атомной науки и техники. Физика и техника ядерных реакторов. — 1981. Вып. 3 (16). — С. 52–57.

4. Пустыльник, П.Н. Теплообмен при вынужденном продольном обтекании воздухом пучка труб при граничном условии $T_{\text{ст}} = \text{const}$ / П.Н. Пустыльник, Б.Ф. Балунев, А.Я. Благовещенский // Теплоэнергетика. — 1990. № 3. — С. 63–65.

5. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг — М.: Наука, 1974. — 711 с.

6. **Петухов, Б.С.** Теплообмен в ядерных энергетических установках [Текст] / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 470 с.

7. **Самойленко, Л.А.** Исследование гидравлического сопротивления трубопроводов при переходном режиме движения жидкости и газов [Текст] / Л.А. Самойленко, Е.А. Прегер // Труды ЛИСИ. — Л., 1966. Вып. 50. — С. 27–39.

8. **Nikuradze, J.** Stromungsgesetze in rouhen Rohren [Text] / J. Nikuradze // VDI Forschungsheft. — № 361. — 1933. — S. 16–53.

9. **РД 24.035.05–89.** Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС [Текст] / НПО ЦКТИ. — Л., 1991.

10. **Френкель, Н.З.** Гидравлика [Текст] / Н.З. Френкель. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. — 456 с.

REFERENCES

1. **Idel'chik I.E.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam [Tekst]. — M.: Mashinostroenie, 1975. — 559 s. (rus.)

2. **Babykin A.S., Balunov B.F., Zhivitskaia T.S. [i dr.].** Intensivnost' okhlazhdeniia chastichno osushennykh tvelov v kvazistatsionarnykh usloviakh [Tekst]. — Atomnaya energiya. — 1993. T. 75, Vyp. 4. — С. 276–281. (rus.)

3. **Nekhoroshev P.M.** Kriticheskie chisla Reinol'dsa pri prodol'nom techenii zhidkosti v puchkakh sterzhnei [Tekst] // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Fizika i tekhnika iadernykh reaktorov. — 1981. Vyp. 3 (16). — С. 52–57. (rus.)

4. **Pustyl'nik P.N., Balunov B.F., Blagoveshchenskii A.Ya.** Teploobmen pri vyzhdenom prodol'nom obtekanii vozdukhom puchka trub pri granichnom uslovii $T_{sm} = \text{const}$ [Tekst] // Teploenergetika. — 1990. № 3. — С. 63–65. (rus.)

5. **Shlikhting G.** Teoriia pogranichnogo sloia [Tekst]. — M.: Nauka, 1974. — 711 s. (rus.)

6. **Petukhov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A.** Teploobmen v iadernykh energeticheskikh ustanovkakh [Tekst]. — M.: Energoatomizdat, 1986. — 470 s. (rus.)

7. **Samoilenko L.A., Preger E.A.** Issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniia truboprovodov pri perekhodnom rezhime dvizhenii zhidkosti i gazov [Tekst] // L.: Trudy LISI. — 1966. Vyp. 50. — С. 27–39. (rus.)

8. **Nikuradze J.** Stromungsgesetze in rouhen Rohren [Tekst] // VDI Forschungsheft. — 1933. № 361. — S. 16–53. (rus.)

9. **RD 24.035.05–89.** Teplovoi i gidravlicheskii raschet teploobmennogo oborudovaniia AES [Tekst] / NPO TsKTI. — L.: 1991. (rus.)

10. **Frenkel' N.Z.** Gidravlika [Tekst]. — M.-L.: Gosenergizdat, 1956. — 456 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАЛУНОВ Борис Федорович — доктор технических наук профессор заведующий лабораторией оборудования АЭС с водоохлаждаемыми реакторами; ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»; 191167, ул. Атаманская, д. 3/6, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: balunov.ckti@mail.ru

САЙКОВА Елена Николаевна — младший научный сотрудник; ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»; 191167, ул. Атаманская, д. 3/6, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: e.saykova@gmail.com

СУХОРУКОВ Юрий Германович — кандидат технических наук заместитель генерального директора; ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»; 191167, ул. Атаманская, д. 3/6, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: teploobmen@ckti.ru

AUTHORS

BALUNOV Boris F. — Joint-Stock Company «I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment; 191167, 3/6 Atamanskaya str., Saint-Petersburg, Russia; e-mail: balunov.ckti@mail.ru

SAYKOVA Elena N. — Joint-Stock Company «I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment; 191167, 3/6 Atamanskaya str., Saint-Petersburg, Russia; e-mail: e.saykova@gmail.com

SUKHORUKOV Yuriy G. — Joint-Stock Company «I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment; 191167, 3/6 Atamanskaya str., Saint-Petersburg, Russia; e-mail: teploobmen@ckti.ru..