

УДК 621.039.55

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_53

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДРОССЕЛЬНОЙ ШАЙБЫ ТВС ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ОПТИМИЗИРОВАННОГО ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГОБЛОКА**Д.Н. Солнцев**

ORCID: 0000-0002-1756-2363 e-mail: solntsev@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.А. Добров**

ORCID: 0000-0001-7363-8791 e-mail: dobrov@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Д.В. Доронков**

ORCID: 0000-0003-0668-4215 e-mail: nevid000@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Н. Пронин**

ORCID: 0000-0001-7174-3643 e-mail: Proninaleksei@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Рязанов**

ORCID: 0000-0002-4951-8930 e-mail: a_v_ryazanov@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.С. Снегирева**

ORCID: 0000-0001-5410-0013 e-mail: angelinasneg87@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) дроссельной шайбы кассетной ТВС реактора оптимизированного плавучего энергоблока, представляющей собой два коаксиальных диска с наборами отверстий разного диаметра. Диаметры и расположение отверстий подобраны таким образом, чтобы при повороте дисков площадь проходного сечения линейно зависела от угла поворота. В результате экспериментальных исследований на высоконапорном аэродинамическом стенде ФТ-50 НГТУ им. Р.Е. Алексеева получены данные о зависимости КГС от критерия Рейнольдса и от угла поворота дисков относительно друг друга. На основе общепринятого подхода и рекомендуемой современными работами формулы для одномерного расчета КГС дроссельных шайб проведено расчетное исследование. Показано, что расчет КГС шайбы по одному отверстию эквивалентного диаметра приводит к завышенным значениям сопротивления вне зависимости от поворота дисков. Определено значение поправочного коэффициента для выбранной формулы, при котором расчетные данные соответствуют экспериментальным.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, гидравлическое профилирование, активная зона, дроссельная шайба, тепловыделяющая сборка, ядерный реактор, плавучий энергоблок, реактор РИТМ-200, гидродинамика, теплоноситель.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Солнцев, Д.Н. Расчетно-экспериментальные исследования гидравлического сопротивления дроссельной шайбы ТВС ядерного реактора для оптимизированного плавучего энергоблока / Д.Н. Солнцев, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов, А.С. Снегирева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 4. С. 53-62. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_53

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE HYDRAULIC RESISTANCE OF THE THROTTLE WASHER OF THE FUEL ASSEMBLY OF A NUCLEAR REACTOR FOR AN OPTIMIZED FLOATING POWER UNIT

D.N. Solntsev

ORCID: **0000-0002-1756-2363** e-mail: **solntsev@nntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Dobrov

ORCID: **0000-0001-7363-8791** e-mail: **dobrov@nntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.V. Doronkov

ORCID: **0000-0003-0668-4215** e-mail: **nevid000@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.N. Pronin

ORCID: **0000-0001-7174-3643** e-mail: **Proninaleksei@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Ryazanov

ORCID: **0000-0002-4951-8930** e-mail: **a_v_ryazanov@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.S. Snegireva

ORCID: **0000-0001-5410-0013** e-mail: **angelinasneg87@gmail.com**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The hydraulic resistance coefficient (HRC) of the throttle washer of the cassette fuel assembly of the reactor of an optimized floating power unit, which exists of two coaxial disks with sets of holes of different diameters, has been experimentally determined. The diameters and the location of the holes are selected in such a way that when the discs are rotated, the area of the passage section linearly depends on the angle of rotation. As a result of experimental studies at the FT-50 high-pressure aerodynamic stand of the Nizhny Novgorod Technical University named after R.E. Alekseev, data were obtained on the dependence of the HRC on both the Reynolds criterion and on the angle of rotation of the disks relative to each other. Based on the generally accepted approach and the formula recommended by modern works for the one-dimensional calculation of the HRC of throttle washers, a computational study was carried out on the resulting data. It is shown that the calculation of the HRC of the washer for a single hole of equivalent diameter leads to overestimated resistance values, regardless of the rotation of the discs. The value of the correction factor for the selected formula is determined, at which the calculated data correspond to the experimental ones.

Key words: hydraulic resistance, core hydraulic profiling, reactor core, throttle washer, fuel assembly, nuclear reactor, floating power unit, RITM-200 reactor, hydrodynamics, coolant.

FOR CITATION: D.N. Solntsev, A.A. Dobrov, D.V. Doronkov, A.N. Pronin, A.V. Ryazanov, A.S. Snegireva. Computational and experimental studies of the hydraulic resistance of the throttle washer of the fuel assembly of a nuclear reactor for an optimized floating power unit. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 4. Pp. 53-62. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_53

Введение

В рамках развития технологий плавучих атомных станций Госкорпорацией «Росатом» ведется разработка нового оптимизированного плавучего энергоблока (ОПЭБ). Предполагается, что на одном ОПЭБ будут установлены две реакторные установки (РУ) типа РИТМ-200М, которые обеспечат общую электрическую мощность станции на уровне 100 МВт. Реакторная установка РИТМ-200М является модернизированным вариантом РУ, созданной для универсального атомного ледокола, с увеличенной до десяти лет топливной кампанией при обогащении топлива менее 20 % [1].

В основу РУ положен парогенерирующий блок интегрального типа с принудительной циркуляцией теплоносителя, расположением парогенератора внутри корпуса реактора и активной зоной с увеличенным энергоресурсом [2]. ТВС заключены в шестигранные чехлы, внутри которых размещены центральный вытеснитель с поглощающим стержнем системы управления и защиты, пучок твэлов и стержни с выгорающим поглотителем [3,4]. Для уменьшения неравномерности подогрева теплоносителя предусмотрено гидравлическое профилирование активной зоны. Оно реализуется за счет установки на входе в каждую ТВС дроссельных шайб (рис. 1), имеющих индивидуальные коэффициенты гидравлического сопротивления. Это позволяет распределить расход теплоносителя между всеми ТВС согласно их тепловой нагрузке.

Особенности конструкции ТВС потребовали экспериментального определения ее гидравлических характеристик, в частности, определения КГС дроссельной шайбы в зависимости от числа Рейнольдса и от угла поворота ее дисков.

Описание экспериментального стенда

Решение данной задачи проводилось в лаборатории «Реакторная гидродинамика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Экспериментальный стенд ФТ-50, представляющий собой высоконапорный аэродинамический разомкнутый контур, предназначен для исследований локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в моделях ТВС, изучения процессов межъячеечного перемешивания в моделях фрагментов активных зон с использованием метода диффузии пропанового трассера [5-6], а также верификации импортозамещающих отечественных CFD-программ [7-9].

Экспериментальная модель кассетной ТВС активной зоны состоит из входного участка и фрагмента активной части ТВС до первой дистанционирующей решетки (рис. 2). Геометрия и размеры проточной части ЭМ соответствуют натурным в увеличенном масштабе. Увеличенный масштаб и моделирование гидродинамики теплоносителя воздухом позволили добиться значений чисел Рейнольдса $Re \sim 65000$ при относительно невысокой скорости потока, при которой влиянием сжимаемости воздуха можно пренебречь.

Входной участок экспериментальной модели включает в себя наконечник ТВС, в состав которого входит дроссельная шайба. Шайба ЭМ выполнена из двух одинаковых коаксиальных дисков. В каждом диске имеются группы отверстий разного диаметра для протекания теплоносителя (рис. 3). Для реализации гидравлического профилирования активной зоны при изготовлении ТВС заданный КГС шайбы устанавливается за счет поворота одного диска шайбы относительно другого.

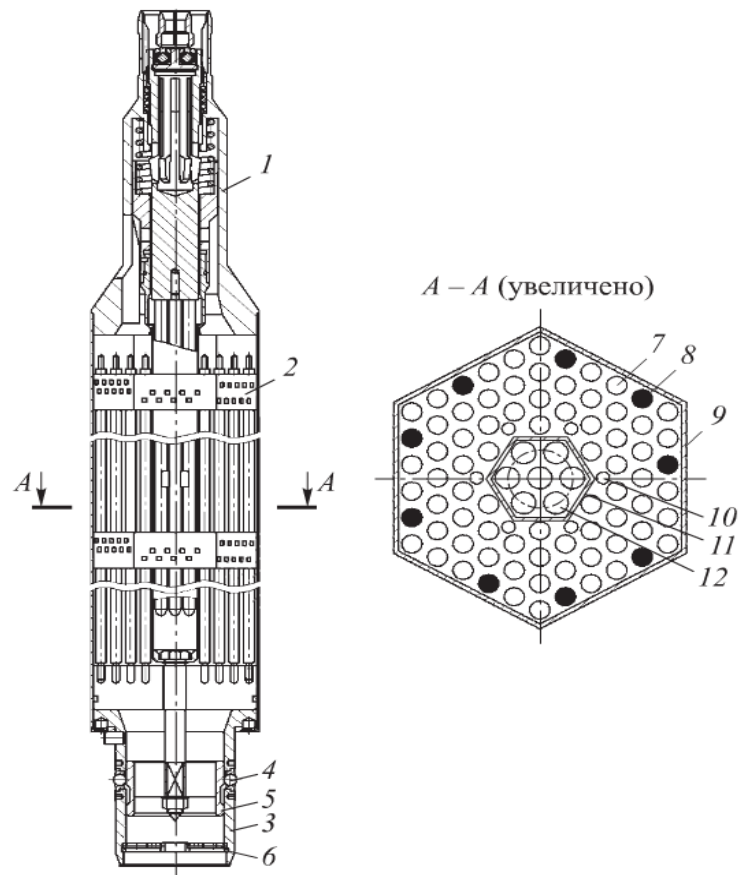


Рис. 1. Общий вид ТВС реакторной установки РИТМ-200 [3]:

1 – головка; 2 – дистанционирующая решетка; 3 – хвостовик; 4 – шариковый замок; 5 – втулка; 6 – дроссельная шайба; 7 – твэл; 8 – СВП; 9 – чехол; 10 – пруток-вытеснитель; 11 – шестигранный вытеснитель; 12 – поглощающий стержень

Fig. 1. General view of the fuel assemblies of the RITM-200 reactor plant [3]:

1 – head; 2 – spacer grate; 3 – shank; 4 – ball lock; 5 – sleeve; 6 – throttle washer; 7 – fuel element; 8 – rods of the burn-out absorber; 9 – cover; 10 – displacer rod; 11 – hexagonal displacer; 12 – absorbing rod

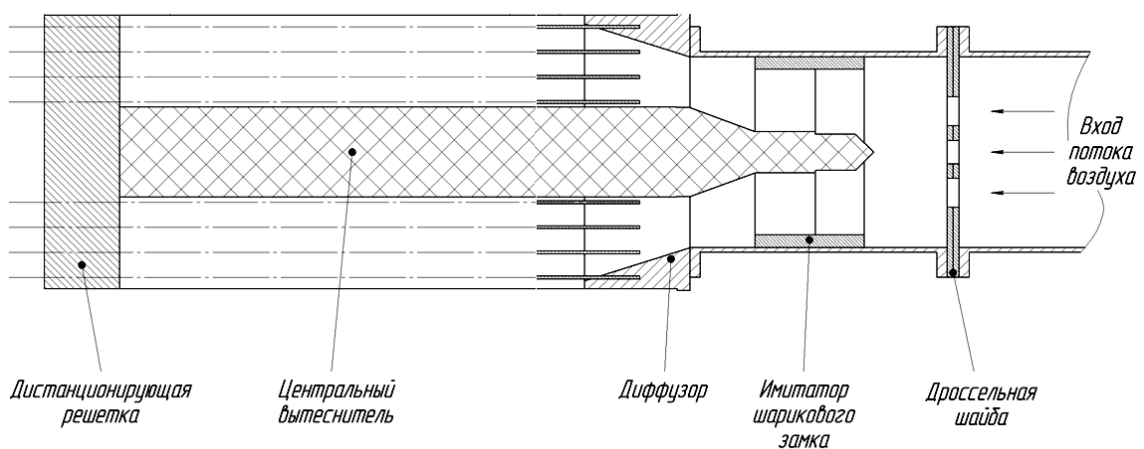


Рис. 2. Схема экспериментальной модели входного участка ТВС

Fig. 2. Scheme of the experimental model of the input section of the fuel assembly

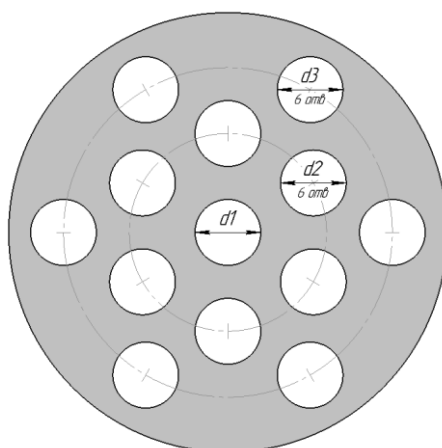


Рис. 3. Схема диска исследуемой дроссельной шайбы ТВС

Fig. 3. Disk diagram of the studied throttle washer of the fuel assembly

Методика проведения экспериментальных исследований

КГС дроссельной шайбы, отнесенный к сечению в пучке имитаторов твэлов, определяется по формуле:

$$\zeta_{дш} = \frac{2 \cdot \Delta P_{дш}}{\rho \cdot W_{cp}^2}, \quad (1)$$

где: $\zeta_{дш}$ – КГС дроссельной шайбы ЭМ;

$\Delta P_{дш}$ – потери давления, вызванные дроссельной шайбой, Па;

ρ – плотность теплоносителя, $\frac{кг}{м^3}$;

W_{cp} – среднерасходная скорость теплоносителя через модель, определенная по сечению в пучке имитаторов твэлов, м/с.

Ввиду сложного вихревого течения и существенной неравномерности профиля скорости, потери давления на участке с дроссельной шайбой $\Delta P_{дш}$ определялись следующим образом: сначала измерялось статическое давление в сечении перед местом установки дроссельной шайбы $P^{без\ дш}$ в модели с отсутствующей шайбой при различных числах Рейнольдса, а затем измерялось статическое давление $P^{дш}$ в том же сечении в модели с установленной дроссельной шайбой при тех же числах Рейнольдса. Таким образом, потери давления за счет дроссельной шайбы $\Delta P_{дш}$ определялись как:

$$\Delta P_{дш} = P^{дш} - P^{без\ дш}, \quad (2)$$

При каждом значении числа Рейнольдса величина $\zeta_{дш}$ определялась в зависимости от угла поворота шайбы в диапазоне $0^\circ \div 15^\circ$ с шагом 3° .

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования КГС элементов модели входного участка ТВС проводились в диапазоне чисел Рейнольдса $Re=10000 \div 65000$. Число Рейнольдса определялось по среднерасходной скорости и гидравлическому диаметру имитатора твэльного пучка, который был выполнен в геометрическом подобии с натурой в увеличенном масштабе. Регулирование расхода теплоносителя осуществлялось изменением числа оборотов вентилятора высокого давления. Исследования проводились сериями в пять повторений, на каждой из ко-

торых записывались значения давления в измеряемых сечениях при различных числах Рейнольдса. На рис. 4 представлены графики зависимости КГС шайбы от числа Рейнольдса для каждого из рассмотренных положений дисков шайбы.

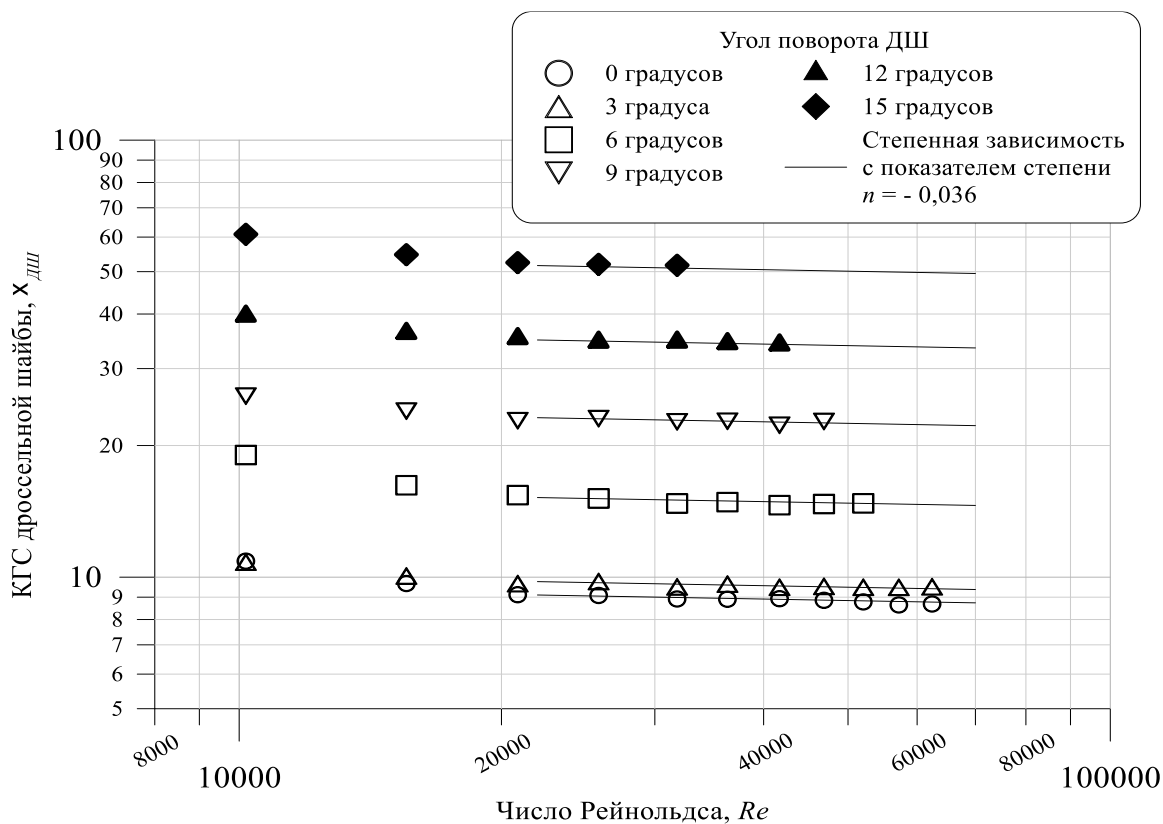


Рис. 4. Результаты определения КГС дроссельной шайбы в зависимости от числа Рейнольдса и угла поворота дисков

Fig. 4. The results of determining the HRC of the throttle washer depending on the Reynolds number and the angle of rotation of the discs

Проведенный анализ опытных данных о влиянии угла поворота дисков на КГС дроссельной шайбы (рис. 4) позволил сделать следующие выводы.

1. При числах Рейнольдса больше 25 000 экспериментальные значения КГС весьма удовлетворительно могут быть описаны степенной зависимостью с показателем степени $n = -0,036$, причем эта зависимость подходит для всех рассмотренных углов поворота дисков. Это позволяет рассчитать на основе модельного эксперимента значения КГС шайбы для натурной ТВС в штатных условиях работы ($Re \sim 100\ 000$);

$$\xi_{\text{нат}} = \xi_{\text{мод}} \cdot \left(\frac{Re_{\text{нат}}}{Re_{\text{мод}}} \right)^n, \quad (2)$$

2. При повороте дисков шайбы доля проходного сечения f , численно равная отношению открытой площади отверстий к площади сечения хвостовика ТВС, изменяется линейно, что обусловлено диаметрами и расположением отверстий. В свою очередь, КГС шайбы при повороте дисков изменяется по зависимости, близкой к квадратичной (рис. 5).

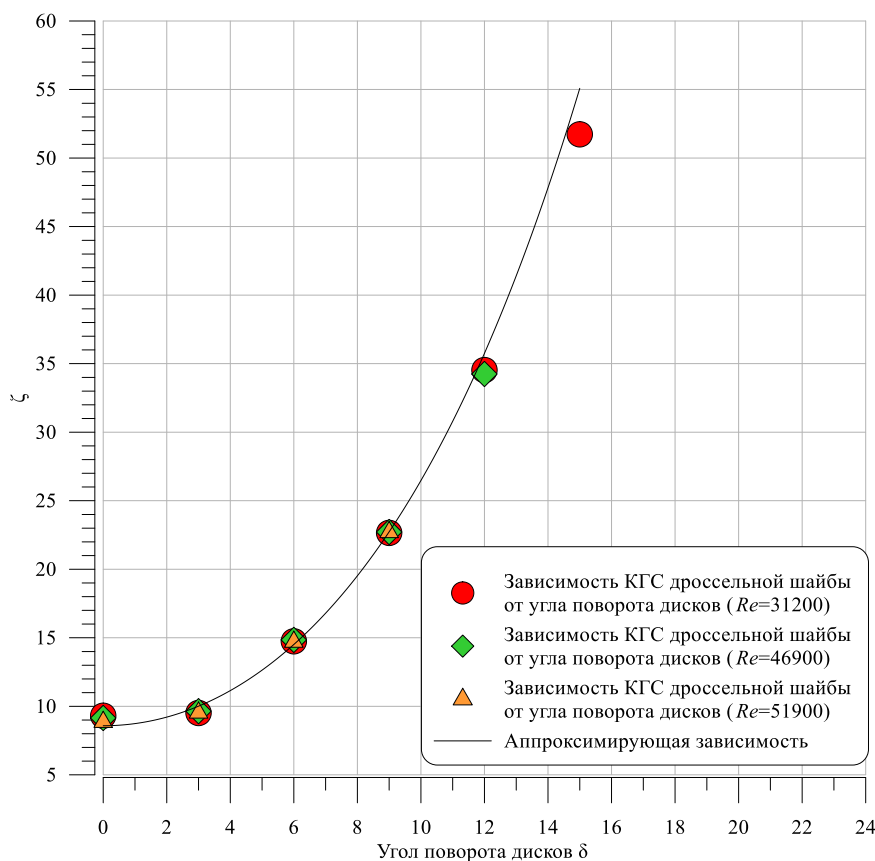


Рис. 5. Зависимость КГС дроссельной шайбы от угла поворота ее дисков

Fig. 5. Dependence of the HRC of the throttle washer on the angle of rotation of its discs

Методом наименьших квадратов была проведена аппроксимация данных по КГС дроссельной шайбы. В качестве аппроксимирующей зависимости была выбрана функция вида:

$$\zeta_{дш}(\delta) = A \cdot \delta^4 + B \cdot \delta^2 + \zeta_{дш}(0), \quad (3)$$

где $\zeta_{дш}(\delta)$ – значение КГС дроссельной шайбы при угле поворота дисков δ ; δ – угол поворота дисков дроссельной шайбы, градусы; A и B – коэффициенты.

В результате аппроксимации были определены значения коэффициентов A и B , после подстановки которых в формулу (3.1) была получена аппроксимирующая зависимость КГС дроссельной шайбы от угла поворота дисков:

$$\zeta_{дш}(\delta) = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \delta^4 + 0,15 \cdot \delta^2 + \zeta_{дш}(0), \quad (4)$$

Формула (3) применима в диапазоне чисел Рейнольдса 40000÷65000.

По результатам проведенных экспериментальных исследований была также проведена оценка погрешности определения значений КГС. Основной вклад в погрешность вносят следующие эффекты:

- погрешность определения расхода воздуха через ЭМ;
- приборная погрешность преобразователей давления;
- погрешность определения плотности воздуха по измеренной температуре;
- погрешность определения среднерасходной скорости.

Результаты оценки показали, что среднеквадратичная погрешность определения значений КГС с учетом пяти серий эксперимента составила не более 4,5 % для режимов с $Re > 40000$ и не более 5,8 % для режимов с $Re < 40000$.

Результаты расчетных исследований

Расчетное исследование заключалось в определении значения КГС дроссельной шайбы в зависимости от угла ее поворота на основе известных общепринятых рекомендаций [10]. В общем случае протекания потока через отверстие в стенке из одного объема в другой имеют место явления, изображенные на рис. 6 [10].

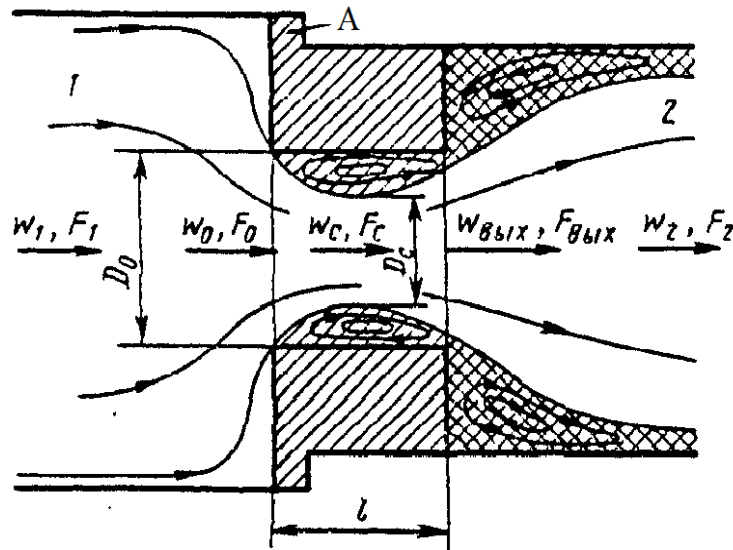


Рис. 6. Схема перетекания потока через отверстие в стенке из одного объема в другой

Fig. 6. Scheme of flow overflow through a hole in the wall from one volume to another

Поток перетекает из канала 1, расположенного перед перегородкой А с отверстием диаметром D_0 , в канал 2, расположенный за перегородкой. Прохождение потока через отверстие сопровождается искривлением траекторий движения частиц, вследствие чего они по инерции продолжают свое движение к оси отверстия. Это вызывает уменьшение первоначальной площади струи F_1 до площади F_c (сечение с-с), меньшей площади сечения отверстия F_0 . От сечения с-с траектории движущихся частиц выпрямляются, и в дальнейшем наблюдается внезапное расширение струи.

Коэффициент сопротивления перетеканию потока через отверстия в стенке с любой формой и любой толщиной краев в общем случае вычисляется по обобщенной формуле [формула 4-8, 10]:

$$\zeta \equiv \frac{\Delta P}{\rho \cdot W_0^2 / 2} = \zeta' \cdot \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0,75} + \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)^2 + \tau \cdot \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0,375} \cdot \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right) + \zeta_{mp} \quad (5)$$

Расчет был проведен для режима течения, соответствующего числу Рейнольдса $Re=60000$. Рассматривались случаи с углами установки шайбы, аналогичными эксперименту. В качестве диаметра отверстия в расчете принимался гидравлический диаметр отверстий дроссельной шайбы. На рис. 7 приведено графическое сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Анализ этих данных показал, что значения расчетных КГС находятся в линейной зависимости от экспериментальных КГС, при этом значение поправочного коэффициента составляет 0,894.

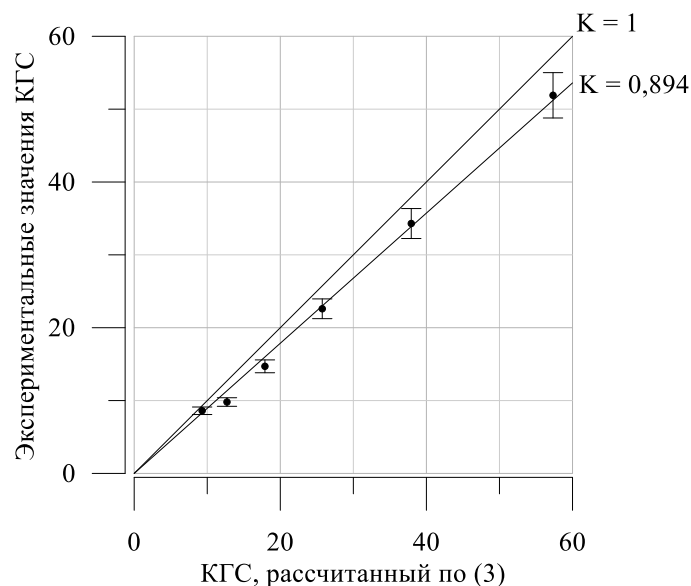


Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных значений КГС

Fig. 7. Comparison of calculated and experimental values of HRC

Полученные данные могут свидетельствовать о том, что после протекания через отверстие в шайбе часть потока подхватывается струей из соседних отверстий, в результате чего за дроссельной шайбой формируется меньшее количество вихрей, чем при протекании через одиночное отверстие эквивалентного диаметра. При этом происходит меньшая потеря энергии на вихреобразование за шайбой, и значения КГС, определенные экспериментально, оказываются меньше определенных по формуле (5). Кроме того, на величину КГС шайбы также могут оказывать влияние конструктивные элементы экспериментальной модели, расположенные после шайбы.

Заключение

Экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления дроссельной шайбы кассетной ТВС реактора оптимизированного плавучего энергоблока, представляющей собой два коаксиальных диска с наборами отверстий разного диаметра. Получена зависимость КГС от угла поворота дисков шайбы и критерия Рейнольдса. Проведено расчетное исследование, которое заключалось в определении значения КГС дроссельной шайбы в зависимости от угла ее поворота на основе известных общепринятых рекомендаций, представленных в справочнике по гидравлическим сопротивлениям. Выбрана формула для определения КГС в канале при перетекании потока через отверстия в стенке с любой формой и любой толщиной краев. Анализ расчетных результатов показал, что значения расчетных КГС находятся в линейной зависимости от экспериментальных КГС, при этом значение поправочного коэффициента составляет 0,894.

Полученные данные необходимы для расчетного обоснования и гидравлического профилирования активной зоны с целью приведения в соответствие расходов через отдельные ТВС их тепловым нагрузкам и подогревам теплоносителя. Это позволит обеспечить равномерное поле температуры теплоносителя на выходе из активной зоны.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Библиографический список

1. Атомные станции малой/средней мощности и плавучие атомные теплоэлектростанции [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.okbm.nnov.ru/business-directions/atomnye-stantsii-maloy-sredney-moshchnosti-i-plavuchie-atomnye-teploelektrostantsii/>. (Дата обращения: 17.09.2021).
2. РИТМ: Реакторные установки для атомных ледоколов и оптимизированных плавучих энергоблоков: [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.okbm.nnov.ru/images/pdf/ritm-200_extended_ru_web.pdf (Дата обращения: 31.01.2018).
3. **Самойлов, О.Б.** Исследование распределения потоков тепловых и эпитепловых нейтронов в ТВС универсального атомного ледокола / О.Б. Самойлов, В.И. Алексеев, В.Ю. Галицких, А.В. Белин, А.Н. Загляднов, В.В. Самусенков, С.Г. Устьянцев // Атомная энергия. 2016. Т.121. №6. С. 307-313.
4. **Солонин, В.И.** Транспортные реакторные установки: учебное пособие / В.И. Солонин, П.В. Марков. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 138 с.
5. **Дмитриев, С.М.** Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов / С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов // Приборы и методы измерений. 2015. - Т. 6. - № 2. - С. 188-195.
6. **Дмитриев С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования течения потока теплоносителя в кассетной активной зоне реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 4. С. 988-996.
7. **Дмитриев С.М.** Расчетное исследование локальной гидродинамики потока теплоносителя во входном участке ТВС реакторной установки РИТМ-200 / С.М. Дмитриев, А.А. Добров, Г.Ш. Иксанова, К.А. Мартынова, А.Е. Хробостов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2017. № 1. С. 129-134.
8. **Дмитриев, С.М.** Применение программы ЛОГОС для исследования особенностей гидродинамики в тепловыделяющей сборке реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев, А.А. Деулин, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57. № 3.2. С. 232-236.
9. **Дмитриев, С.М.** Моделирование течения потока теплоносителя в топливной сборке реактора плавучей АЭС с использованием CFD-программы ЛОГОС / С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 5. С. 1253-1259.
10. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975.

*Дата поступления
в редакцию: 20.10.2021*