

УДК 621.039

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_77
EDN КНРАЈГ

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСИТЕЛЬНЫХ ЛОПАТОК НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ РЕШЕТОК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

А.Н. ПронинORCID: 0000-0001-7174-3643 e-mail: Proninaleksei@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***С.М. Дмитриев**ORCID: 0000-0003-0637-7004 e-mail: dmitriev@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Проведено экспериментальное исследование влияния геометрических параметров смесительных лопаток перемешивающих дистанционирующих решеток *ТВС-Квадрат* на их гидравлическое сопротивление. Методология основана на моделировании течения водяного теплоносителя в активной зоне реактора в области автомодельного течения на основе теории гидродинамического подобия. Исследовано влияние угла наклона лопаток в диапазоне от 15 до 40° с постоянной площадью затеснения проходного сечения, а также площади затеснения проходного сечения лопатками в диапазоне от 6,8 до 10,6 мм² с постоянным углом наклона 25° на коэффициент гидравлического сопротивления перемешивающих дистанционирующих решеток. Все исследования проведены для коридорного пучка труб с относительным шагом $S/d=1,3$ при значениях критерия Рейнольдса от 10 000 до 100 000. Получены интегральные зависимости, характеризующие влияние геометрических параметров лопаток на гидравлическое сопротивление и позволяющие прогнозировать гидравлическое сопротивление, а также проводить обоснованный выбор геометрических параметров смесительных лопаток при проектировании и создании новых конструкций перемешивающих устройств. Набор экспериментальных данных послужил основой для создания базы данных, которая может быть использована для валидации расчетных кодов и программ комплексного математического моделирования с использованием современных вычислительных машин.

Ключевые слова: ТВС-Квадрат, перемешивающие решетки, смесительные лопатки, коэффициент гидравлического сопротивления, экспериментальные исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пронин, А.Н. Влияние геометрических характеристик смесительных лопаток на гидравлическое сопротивление перемешивающих решеток тепловыделяющих сборок ядерных реакторов / А.Н. Пронин, С.М. Дмитриев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 77-84.

DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_77 EDN: КНРАЈГ

INFLUENCE OF GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF MIXING BLADES ON HYDRAULIC RESISTANCE OF MIXING GRIDS OF FUEL ASSEMBLIES OF NUCLEAR REACTORS

A.N. ProninORCID: 0000-0001-7174-3643 e-mail: Proninaleksei@mail.ruNizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

S.M. Dmitriev

ORCID: **0000-0003-0637-7004** e-mail: **dmitriev@nntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to experimental studies of the influence of geometric parameters of mixing blades of TVS-Kvadrat mixing spacer grids on hydraulic resistance. The research methodology is based on modeling the flow of water coolant in the reactor core in the region of self-similar flow based on the theory of hydrodynamic similarity. The influence of the blade inclination angle in the range from 15° to 40° with a constant area of the flow cross-sectional area, as well as the influence of area of the flow section obstruction by the blades in the range from 6.8 to 10.6 mm² with a constant inclination angle of 25° on the hydraulic resistance coefficient of mixing spacer grids were studied. All studies were conducted for a corridor tube bundle with a relative pitch $S/d=1.3$ at Reynolds criterion values from 10.000 to 100.000. As a result of the studies, integral dependencies were obtained that characterize the influence of the geometric parameters of the blades on the hydraulic resistance. The obtained dependencies will allow predicting the hydraulic resistance, as well as making substantiated choices of the geometric parameters of mixing blades when designing and creating new designs of mixing devices. The set of experimental data served as the basis for creating a database that can be used to validate calculation codes and programs for complex mathematical modeling using modern computers.

Key words: TVS-Kvadrat, mixing grids, mixing blades, hydraulic resistance coefficient, experimental studies.

FOR CITATION: A.N. Pronin, S.M. Dmitriev. Influence of geometrical characteristics of mixing blades on hydraulic resistance of mixing grids of fuel assemblies of nuclear reactors. Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 77-84. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_77 EDN: KHPAIG

Введение

В активных зонах ядерных реакторов с водяным теплоносителем для интенсификации процессов теплообмена и перемешивания теплоносителя используют специальные перемешивающие решетки различных конструкций [1-4]. Их применение позволяет сгладить неравномерность распределения температуры теплоносителя в ТВС и повысить запасы до кризиса теплообмена [5-8]. Данные эффекты достигаются за счет создания направленных конвективных течений и дополнительной турбулизации потока теплоносителя за счет различных конструктивных элементов решеток – смесительных лопаток, отгибов, отверстий, закручивающих каналов и т.д. Наиболее широкое распространение получили решетки с смесительными лопатками, которые могут иметь различную форму, площадь и угол наклона.

Одновременно с интенсификацией теплообмена и перемешивания теплоносителя повышается гидравлическое сопротивление ТВС, что приводит к повышению затрат на собственные нужды станции. Очевидно, что на все эти процессы ключевое значение оказывают геометрические характеристики смесительных лопаток – форма, угол наклона, площадь затеснения проходного сечения. В НГТУ были проведены исследования по изучению влияния основных геометрических параметров лопаток (угла наклона и площади затеснения проходного сечения) на гидравлическое сопротивление перемешивающих дистанционирующих решеток ТВС-Квадрат реакторов PWR.

Описание исследовательского стенда и методики исследований

Исследования влияния геометрических параметров лопаток на гидравлическое сопротивление решеток проведены на аэродинамическом стенде, в состав которого входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель и измерительный комплекс с системой сбора, хранения и обработки информации. Циркуляция рабочей среды осуществляется за счет работы вентилятора, который нагнетает воздух в ресиверную емкость. Далее, пройдя успокоительный участок, стабилизированный поток воздуха с постоянным расходом поступает в экспериментальную модель и выбрасывается в атмосферу.

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент ТВС-Квадрат размером 7x7 стержней с двумя дистанционирующими и одной перемешивающей дистанционирующей решетками. Относительный шаг твэльного пучка составляет $S/d=1,3$. Дистанционирующая решетка состоит из взаимно перпендикулярных пластин с пружинистыми элементами внутри ячеек, предназначенных для фиксации твэлов. Отличие конструкции перемешивающей дистанционирующей решетки от дистанционирующей заключается в установке на кромки решетки специальных смесительных лопаток. При проведении исследований поочередно варьировались угол наклона лопаток и площадь затеснения проходного сечения (рис. 1).

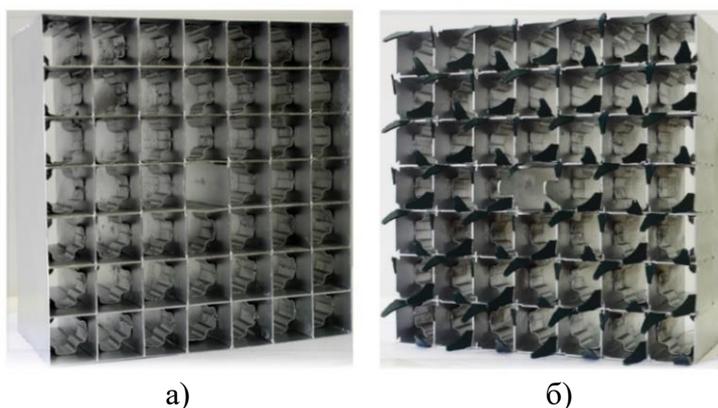


Рис. 1. Решетки экспериментальных моделей:

a) дистанционирующая решетка; б) перемешивающая дистанционирующая решетка

Fig. 1. Grids of experimental models:

a) spacer grid; b) mixing spacer grid

Конструкция экспериментальной модели обеспечивает возможность измерения статического давления в нескольких сечениях по длине экспериментальной модели. Схема расположения сечений отбора показана на рис. 2.

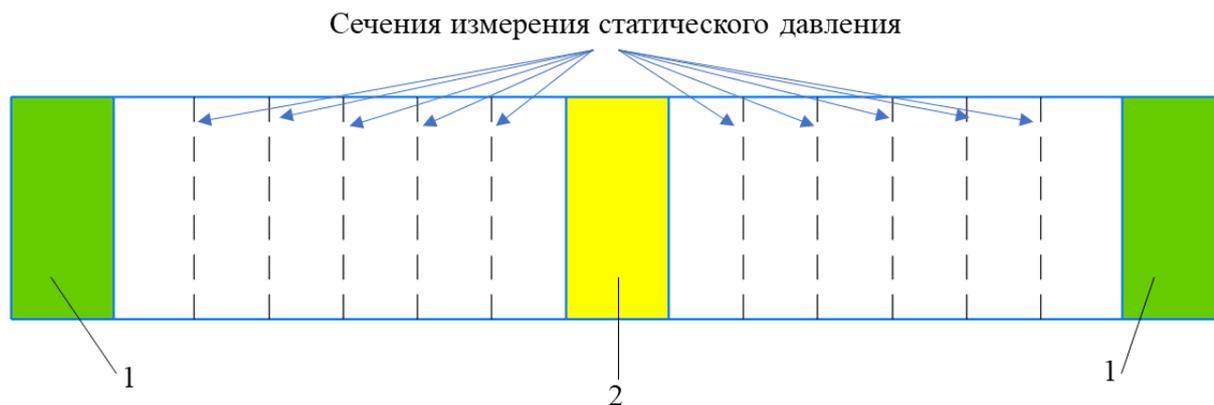


Рис. 2. Расположение сечения отбора статического давления в экспериментальной модели:

1) дистанционирующая решетка 2) перемешивающая дистанционирующая решетка

Fig. 2. Location of the static pressure sampling section in the experimental model:

a) spacer grid; b) mixing spacer grid

Полные потери давления $\Delta P_i^{полн}$ на i -ом участке экспериментальной модели складываются из потерь давления на трение $\Delta P_i^{трен.}$ и местных потерь $\Delta P_i^{мест.}$ на перемешивающей дистанционирующей решетке:

$$\Delta P_i^{\text{полн}} = \Delta P_i^{\text{трен.}} + \Delta P_i^{\text{мест.}} = \lambda \cdot \frac{L_i}{d_r} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} + \xi_{\text{ПДР}} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \quad (1)$$

где L_i – расстояние между сечениями отбора статического давления, м;

w – среднерасходная скорость рабочей среды через экспериментальную модель, м/с.

Потери давления на трение определяются экспериментальным путем на модели без перемешивающей дистанционирующей решетки. Для определения коэффициента гидравлического сопротивления решетки исследуемая конструкция устанавливается в модель, после чего по измеренному перепаду давлений в модели определяется КГС по соотношению:

$$\xi_{\text{ПДР}} = \frac{2 \cdot (\Delta P_i^{\text{полн.}} - \Delta P_i^{\text{трен.}})}{\rho \cdot w^2}. \quad (2)$$

Результаты исследований

Исследования гидравлического сопротивления производились в диапазоне значений критерия Рейнольдса от 10 000 до 100 000. Широкий диапазон значений позволил определить нижнюю границу зоны автомодельности течения. Установлено, что сопротивление гладкого пучка стержней, дистанционирующих и перемешивающих дистанционирующих решеток начиная с значений критерия Рейнольдса 60 000 можно считать постоянным и не зависящим от критерия Рейнольдса, что свидетельствует об автомодельности течения [9].

На первом этапе исследований был определен коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) дистанционирующей решетки, который составил 0,8 (рис. 3).

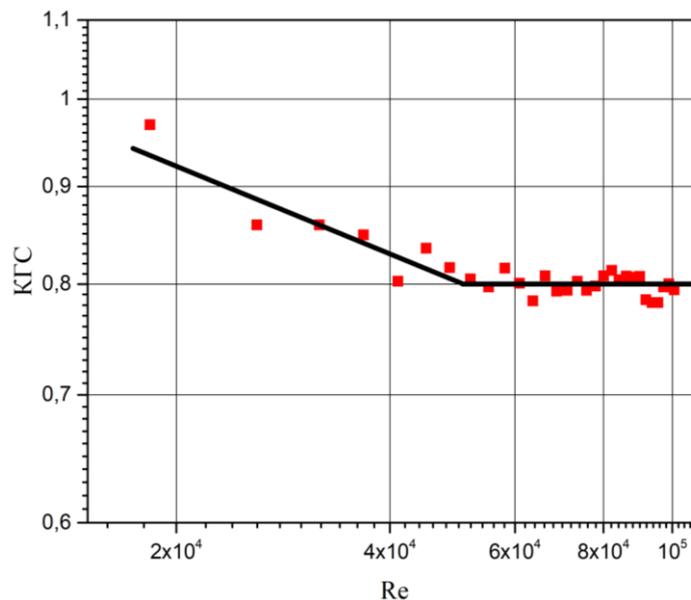


Рис. 3. Гидравлическое сопротивление дистанционирующей решетки

Fig. 3. Hydraulic resistance of the spacer grid

Для исследований влияния угла наклона лопаток на гидравлическое сопротивление решеток использовались экспериментальные модели с решетками, в которых угол наклона лопаток составлял 15°, 20°, 25°, 27,5°, 30°, 35°. Форма и размер лопаток выбирались таким образом, чтобы, независимо от угла наклона, затеснение поперечного сечения элементарных ячеек оставалось постоянным (8,51 мм²). В результате проведенных исследований были установлены значения КГС для каждого угла наклона лопаток (рис. 4).

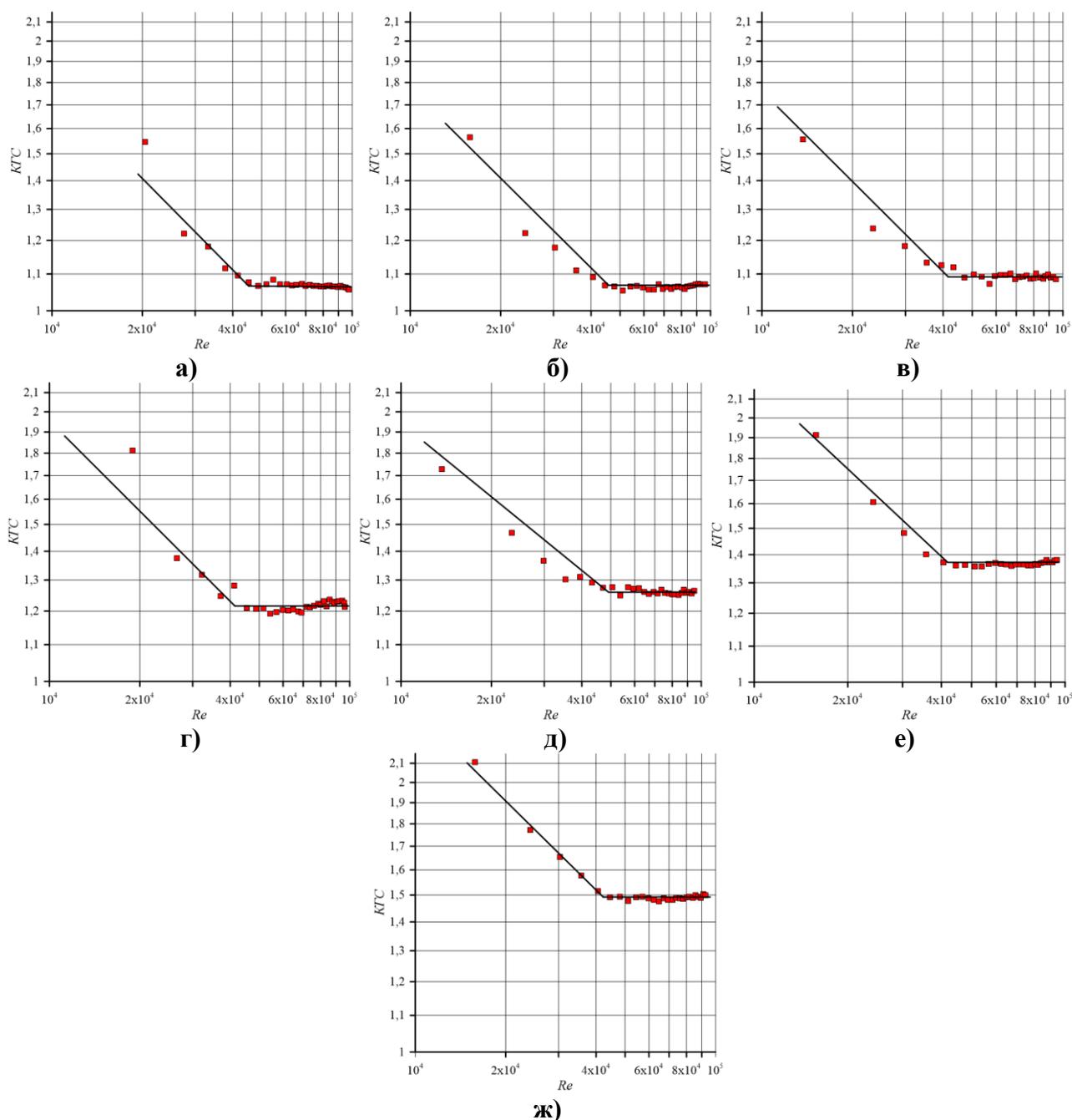


Рис. 4. Гидравлическое сопротивление решеток с различными углами наклона лопаток:
 а) угол наклона 15°; б) угол наклона 20°; в) угол наклона 25°; г) угол наклона 27,5°;
 д) угол наклона 30°; е) угол наклона 35°; ж) угол наклона 40°

Fig. 4. Hydraulic resistance of grids with different blade inclination angles:
 a) inclination angle of 15°; b) inclination angle of 20°; c) inclination angle of 25°;
 d) inclination angle of 27.5°; d) inclination angle of 30°; e) inclination angle of 35°;
 g) inclination angle of 40°

Увеличение угла наклона от 15 до 25° привело к росту коэффициента гидравлического сопротивления решетки менее 3 % с 1,05 до 1,08 (табл. 1). Зависимость КГС решетки от угла наклона описывается линейной функцией:

$$\xi = 0,004 \cdot \alpha + 0,986. \quad (3)$$

Таблица 1.
Гидравлическое сопротивление решеток в зависимости от угла наклона лопатки

Table 1.
Hydraulic resistance of grids depending on the blade inclination angle

Угол наклона лопатки	КГС решетки
15°	1,05
20°	1,07
25°	1,08
27,5°	1,2
30°	1,25
35°	1,36
40°	1,48

При изменении угла наклона от 27,5° до 40° наблюдается значительный рост КГС решетки (около 20 %) с 1,2 до 1,48. Зависимость КГС решетки от угла лопатки описывается линейной функцией:

$$\xi = 0,022 \cdot \alpha + 0,589 \quad (4)$$

В диапазоне углов наклона между 25 и 27,5° наблюдается скачкообразное увеличение сопротивления решетки на 10 % (рис. 5). Начиная с угла наклона лопатки 27,5°, рост гидравлического сопротивления решетки происходит более интенсивно, чем при меньших углах. Об этом можно судить по величине углового коэффициента в формулах аппроксимирующих прямых (3) и (4).

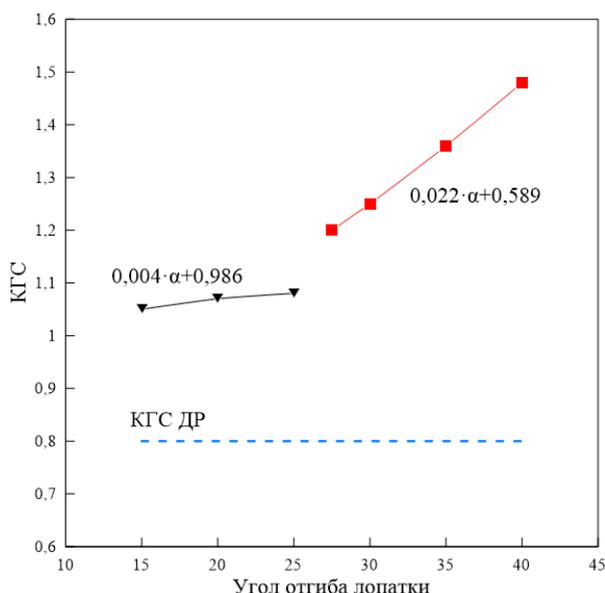


Рис. 5. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления перемешивающей дистанционирующей решетки от угла наклона смесительных лопаток

Fig. 5. Dependence of the hydraulic resistance coefficient of the mixing spacer grid on the inclination angle of the mixing blades

При установке смесительных лопаток на дистанционирующую решетку происходит увеличение гидравлического сопротивления от 31,3 до 85 % для углов наклона лопаток 15° и 40° соответственно. Результаты исследований показали, что при рассмотрении фактора гидравлического сопротивления нецелесообразно увеличивать угол наклона смесительных лопаток перемешивающих дистанционирующих решеток более 25°.

Набор экспериментальных данных послужил основой для создания базы данных, которая может быть использована для валидации расчетных кодов и программ комплексного математического моделирования с применением современных вычислительных машин [10]. Исследования влияния площади затеснения проходного сечения лопатками на гидравлическое сопротивление решеток проводилось для угла наклона лопаток 25° . Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления перемешивающих решеток от площади затеснения проходного сечения лопатками имеет линейный характер (рис. 4) и описывается соотношением:

$$\xi = 0,05 \cdot S_{\text{ЛОП}} + 0,9 \quad (5)$$

Увеличение площади затеснения с 6,8 до 10,6 мм^2 приводит к росту КГС на 20 % с 0,96 до 1,17. При сравнении с дистанционирующей решеткой установка лопаток с площадью затеснения проходного сечения от 6,8 до 10,6 мм^2 и углом наклона 25° увеличивает гидравлическое сопротивление от 18,8 до 46,3 % соответственно (рис. 6).

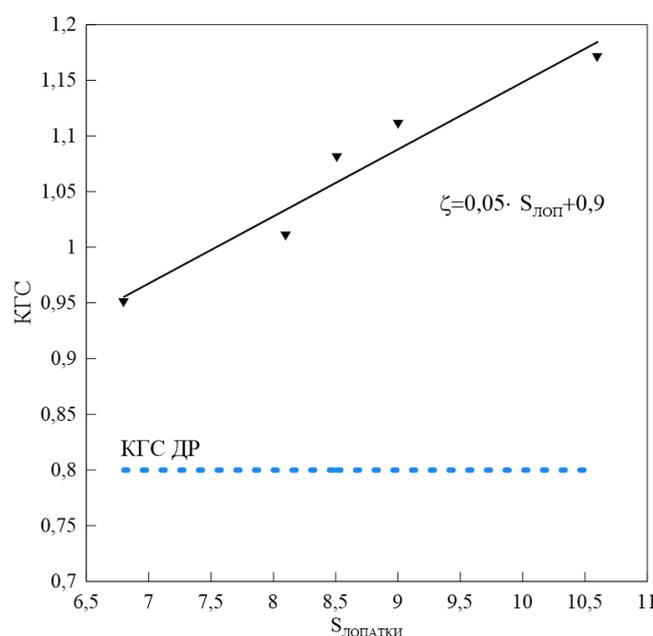


Рис. 6. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления перемешивающей дистанционирующей решетки от площади затеснения лопатками проходного сечения (угол наклона лопаток 25°)

Fig. 6. Dependence of the hydraulic resistance coefficient of the mixing spacer grid on the area of the flow section obstruction by the blades (blade inclination angle 25°)

Заключение

Проведенные исследования позволили определить интегральные зависимости, характеризующие влияние геометрических характеристик смесительных лопаток на гидравлическое сопротивление решеток.

Набор экспериментальных данных послужил основой для создания базы данных, которая может быть использована для валидации расчетных кодов и программ комплексного математического моделирования с использованием современных вычислительных машин.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0003).

Библиографический список

1. **Перепелица, Н.И.** Решетки со смесительными элементами для ТВС ВВЭР // Атомная энергия. 2020. Т. 128. Вып. 3. С. 123-130.
2. **Перепелица, Н.И.** Дистанционирующие решетки со смесительными элементами для ТВС PWR. Часть 2. // Атомная техника за рубежом, 2018. № 4. С. 3-8.
3. **Самойлов, О.Б.** Перемешивающая решетка тепловыделяющей сборки ядерного реактора / О.Б. Самойлов, А.И. Романов, В.Б. Кайдалов [и др.] // Патент №2383954 С1. – Бюл. «Изобретения. Полезные модели». 2016. № 23 (Электронная версия).
4. **Самойлов, О.Б.** Перемешивающая решетка тепловыделяющей сборки ядерного реактора / О.Б. Самойлов, А.И. Романов, В.Б. Кайдалов [и др.] // Патент №79211 U1. – Бюл. «Изобретения. Полезные модели». 2008. № 35 (Электронная версия).
5. **Дмитриев, С.М.** Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР / С. М. Дмитриев, А. В. Герасимов, А. А. Добров [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 2. С. 151-162. – DOI 10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162
6. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамики потока теплоносителя за дистанционирующей и перемешивающей решетками ТВСА-12PLUS реактора ВВЭР-1000 / С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2017. № 1. С. 126-134.
7. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования поля скорости потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР и ВБЭР / С.М. Дмитриев, И.В. Каратушина, А.Н. Пронин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 1(103). С. 113-118.
8. **Самойлов, О.Б.** Исследование эффективности пластинчатых решеток-интенсификаторов теплообмена в сборках типа ТВСА-Т. / О.Б. Самойлов, Д.Л. Шипов, А.В. Куприянов [и др.] // Атомная энергия. 2020. Т. 128. Вып. 1. С. 18-23.
9. **Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия / А.А. Гухман – М.: Высшая школа, 1973. – 295 с.
10. **Добров, А.А.** Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622378 Российская Федерация. ИЯЭ и ТФ-БД. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления перемешивающей решетки-интенсификатора ТВС реактора PWR от угла отгиба дефлектора: № 2021622278: заявл. 26.10.2021: опубл. 02.11.2021 / А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

*Дата поступления
в редакцию: 28.03.2025*

*Дата принятия
к публикации: 05.05.2025*