

## Исследование гидравлических характеристик трасс со свинцовыми теплоносителями

Р.В. Сумин, Т.К. Зырянова, Т.А. Бокова, Н.С. Волков, М.Д. Погорелов, Д.С. Шалина, С.В. Колосов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), 603155 Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

**Реферат.** Приводятся результаты экспериментального исследования гидравлических характеристик трасс циркуляции свинцового теплоносителя. Целью исследования является получение рекомендаций для расчета гидравлических потерь в элементах циркуляционного контура, таких как потери на трение в прямой трубе и местные сопротивления (плавные повороты, резкое сужение), а также сравнение экспериментальных данных с существующими рекомендациями. Опыт эксплуатации экспериментальных стендов со свинцовыми и свинцово-висмутовыми теплоносителями показывает, что данный класс теплоносителей обладает рядом свойств, оказывающих значительное влияние на гидродинамику теплоносителя. Проведено сравнение экспериментальных значений коэффициентов потерь на трение по длине и местных гидравлических сопротивлений в случае течения свинцового теплоносителя с рекомендациями по расчету. Получены значения эквивалентной гидравлической шероховатости для поверхности контакта со свинцовыми теплоносителями. В ходе обработки экспериментальных данных выяснено, что при течении свинца происходит значительное изменение шероховатости поверхности трубопроводов. Данный эффект оказывает значительное влияние на гидравлические характеристики трасс циркуляции, что подтверждается согласованием экспериментов с рекомендуемыми формулами. Результаты исследования предлагаются к использованию при разработке циркуляционных контуров реакторных установок со свинцовыми теплоносителями типа БРЕСТ и БР-1200, экспериментальных стендов и при верификации расчетных кодов.

**Ключевые слова:** свинцовый теплоноситель, реактор на быстрых нейтронах, гидродинамика, гидравлические сопротивления.

**Для цитирования:** Сумин Р.В., Зырянова Т.К., Бокова Т.А., Волков Н.С., Погорелов М.Д., Шалина Д.С., Колосов С.В. Исследование гидравлических характеристик трасс со свинцовыми теплоносителями. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2025;4:66–79. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.05>

## Введение

В проектном направлении «Прорыв» [1] создается опытно-демонстрационный энергетический комплекс, состоящий из реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, модуля переработки отработавшего ядерного топлива и обращения с радиоактивными отходами, модуля рефабрикации топлива, а также разрабатывается коммерческий энергоблок на базе реакторных установок со свинцовым теплоносителем БР-1200 [2]. Существующие в настоящее время расчетные методики для проектирования трасс с тяжелым жидкокометаллическим теплоносителем созданы с применением эмпирических и полуэмпирических коэффициентов. Эти коэффициенты основаны на базах данных, созданных для водяного теплоносителя.

Опыт эксплуатации стендов с тяжелыми жидкокометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) показывает, что при наличии растворенного кислорода в расплаве теплоносителя формируется пристенная область, обладающая рядом специфических характеристик, отличающихся гидродинамические характеристики этих теплоносителей от традиционных (натрий, вода). К таким особенностям можно отнести:

- формирование оксидных покрытий на поверхностях конструкционных материалов, приводящее к несмачиванию сталей теплоносителем;
- концентрация частиц соединений компонентов сталей и теплоносителя в пристенной области, поступающих в теплоноситель и контур из различных источников;
- отсутствие непосредственного прямого контакта сталей с теплоносителем при нормальных (неаварийных) режимах работы элементов реакторного контура;
- существенное влияние структуры и характеристик пристенного слоя в потоке ТЖМТ на гидродинамические характеристики элементов контуров с реакторами, охлаждаемыми свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями.

Экспериментальные исследования по определению краевого угла смачивания свинцом на austenитной стали 08Х18Н10Т методом лежачей капли, проведенные ранее в НГТУ, показали, что в среде сухого аргона при температурах 400 – 450°С значение краевого угла смачивания составляет 120 – 130° [3].

Создание несмачиваемых поверхностей позволяет существенно изменить гидродинамику течения и сопротивление трения. В частности, исследования [4, 5] показали, что при течении жидкости по несмачиваемой шероховатой поверхности в пристенной области образуются газовые полости, которые обеспечивают отсутствие контакта жидкости со стенкой и неравенство нулю скорости на границе. Этот эффект приводит к появлению скольжения на границе раздела фаз, что является одним из ключевых механизмов снижения гидравлического сопротивления. Однако в работе [4] приведены данные, показывающие, что в случае естественной шероховатости в несмачиваемых каналах потери давления по сравнению со смачиваемыми каналами могут как уменьшаться, так и увеличиваться, что зависит от высот шероховатости, значения числа Рейнольдса и давления. Работа [6] также демонстрирует, что формирование несмачиваемой поверхности в случае турбулентного потока может приводить как к уменьшению трения, так и к увеличению по сравнению со смачиваемыми стенками. При этом показано, что потери давления зависят от площади контакта жидкости со стенкой, которая для несмачиваемой стенки сильно зависит от давления.

В работе [7] проведено экспериментальное исследование потерь давления при течении свинцово-висмутового теплоносителя. Здесь шероховатость рассматривается как фактор, увеличивающий потери, а ее значения берутся из стандартных справочников, например, [8]. При этом результаты исследования показывают, что потери давления можно рассчитывать по инженерным рекомендациям.

Создание методики гидравлического расчета трасс циркуляции с тяжелым жидкокометаллическим теплоносителем позволит оптимизировать гидравлическое сопротивление первого контура реакторной установки типа БРЕСТ, а также режимы работы главного циркуляционного насоса.

Целью исследования является получение рекомендаций для расчета гидравлических потерь в элементах циркуляционного контура, таких как потери на трение по длине прямой трубы, потери на трение плавных поворотов и потери на местном гидравлическом сопротивлении в виде резкого сужения, а также сравнение экспериментальных данных с существующими рекомендациями.

## Описание экспериментального стенда и экспериментальных участков

Для исследования гидравлических характеристик трасс научной группой модернизирован стенд ФТ-5 НГТУ, который позволяет проводить исследования гидравлических характеристик трасс на водяном и свинцовом теплоносителях. Контур циркуляции предназначен для обеспечения циркуляции теплоносителя через различные экспериментальные участки, в том числе экспериментальные участки «Прямая труба» (рис. 1), «Резкое сужение» (рис. 2), «Плавный поворот на 135°» и «Плавный поворот на 90°» (рис. 3).

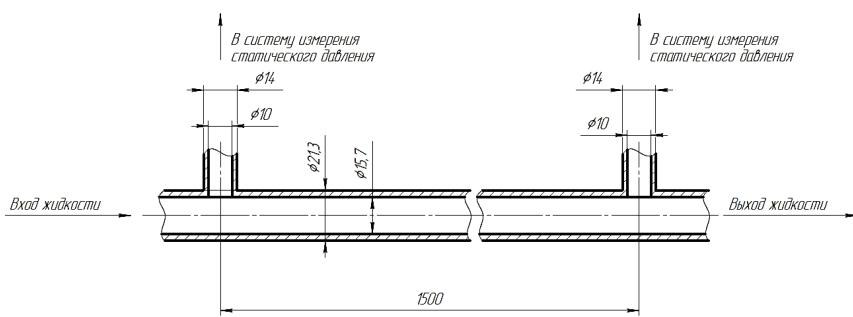


Рис. 1. Эскиз экспериментального участка «Прямая труба»

Стенд ФТ-5 также обеспечивает циркуляцию жидкого свинца через экспериментальные трассы с различными моделями гидравлических сопротивлений (см. рис. 1–3) и другие трассы, работоспособность систем газа, контроля, регулирования параметров и электроснабжения стенда и выполнение других операций согласно программе испытаний.

В состав стендаФТ-5 НГТУ для проведения исследовательских испытаний входит следующее (рис. 4):

- контур циркуляции свинцового теплоносителя;

## Исследование гидравлических характеристик трасс со свинцовым теплоносителем

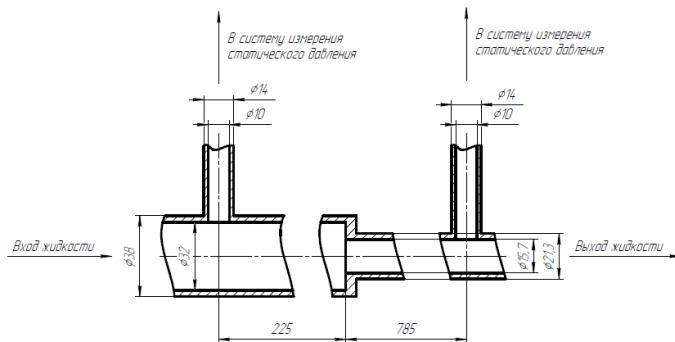


Рис. 2. Эскиз экспериментального участка «Резкое сужение»

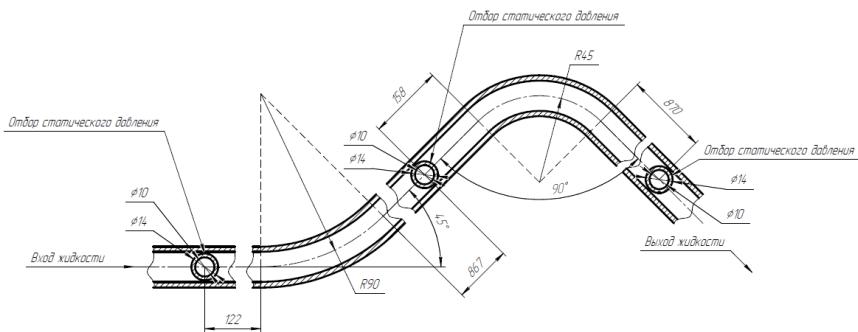


Рис. 3. Эскиз трассы с экспериментальными участками «Плавный поворот на 135°» и «Плавный поворот на 90°», вид сверху

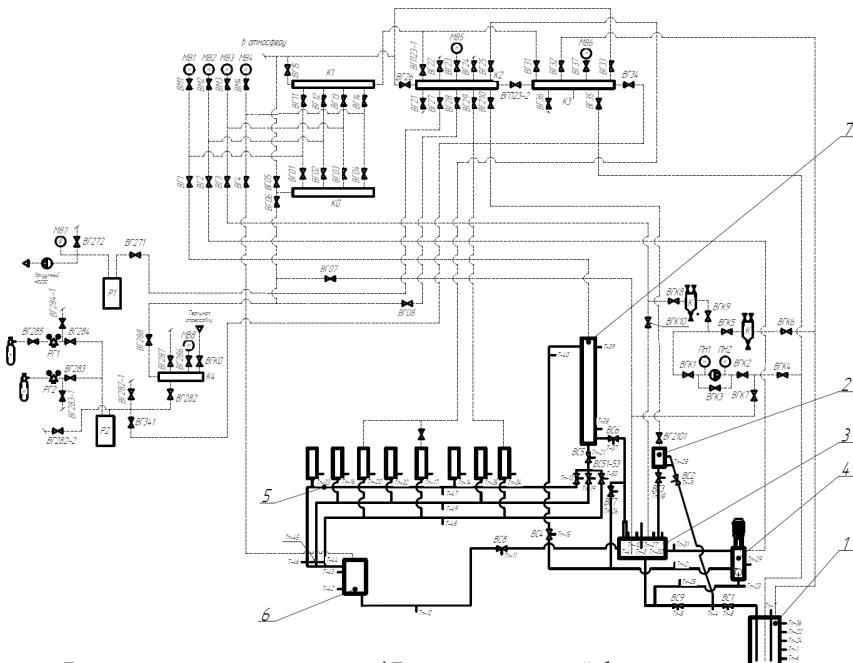


Рис. 4. Принципиальная схема стенда ФТ-5. 1 – плавильный бак; 2 – механический фильтр; 3 – буферная емкость; 4 – жидкometаллический насос; 5 – экспериментальные участки; 6 – емкость измерения расхода; 7 – напорная емкость

- газовая система;
- система водяного охлаждения оборудования стенда;
- система электрообогрева емкостей и трубопроводов с ТЖМТ;
- система сбора, обработки и предоставления информации;
- система управления оборудованием стенда и управления его параметрами.

Циркуляция свинцового теплоносителя организована по следующей схеме (рис. 4): жидкостный насос 4 прокачивает свинцовый теплоноситель через вентиль ВС4, создавая в напорной емкости 7 статический уровень, который является движущим для экспериментального участка; с напорной емкости через вентиль ВС5 и ВС52 свинец прокачивается через один из экспериментальных участков (см. рис. 1 – 3), откуда сливается в расходомерную емкость 6; из расходомерной емкости через вентиль ВС8 свинец поступает в буферную емкость 3, откуда снова поступает на всас насоса.

## Методика проведения эксперимента

Расход свинцового теплоносителя определялся объемным методом с погрешностью  $\pm 0,7\%$ , статическое давление в точках отбора определялось как уровень столба жидкости в отжимной емкости, который измерялся с помощью рефлекс-радарного прибора контроля уровня СЖУ-1-МВ-К-0-Ф с точностью  $\pm 5,5\%$ . Давление в отжимных емкостях выровнено за счет сообщения по газу через коллектор К2. Теплоноситель – свинец марки С1 ГОСТ 3778–98. Температура свинцового теплоносителя  $420^\circ$ , концентрация кислорода в теплоносителе  $c = 10^{-6}$ , % масс. (определялась с помощью ДАК, заводской номер № 2024–06). Материал трубопроводов – сталь 12Х18Н10Т. Давление в контуре циркуляции  $1,5 \text{ кгс}/\text{см}^2$ .

Измерение шероховатости стенки до и после циркуляции свинцового теплоносителя проводилось профилометром TR220 с точностью  $\pm 10\%$ .

Для расчета коэффициента потерь на трение по длине на участке «Прямая труба» применима формула

$$\lambda = \Delta H / ((l/d)w^2 / 2g), \quad (1)$$

где  $\Delta H$  – потери напора, м;  $d$  – диаметр трубопровода, м;  $\lambda$  – коэффициент потерь на трение по длине;  $l$  – длина трубопровода, м;  $w$  – средняя скорость в трубопроводе, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Согласно [8], для оценки коэффициента потерь на трение по длине необходимо учитывать режим течения. Предельное число Рейнольдса  $Re$ , при котором технические трубы перестают быть гидравлически гладкими:

$$Re = 15 / (\Delta/d), \quad (2)$$

где  $\Delta$  – эквивалентная равномерно-зернистая шероховатость стенки, м.

Предельное число Рейнольдса, при котором для технических труб начинает действовать квадратичный закон:

$$Re = 560 / (\Delta/d). \quad (3)$$

## Исследование гидравлических характеристик трасс со свинцовым теплоносителем

Для установления режима течения было проведено исследование шероховатостей стенок трубопроводов после циркуляции свинцового теплоносителя. Имеется связь [9] шероховатости Ra и эквивалентной равномерно-зернистой шероховатости стенки

$$\Delta = 2,19 Ra^{0,877}, \quad (4)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, м.

Зависимость коэффициента потерь на трение по длине для свинцового теплоносителя представлена на рис. 5. Для всех режимов течения на всех экспериментальных участках соблюдается условие  $15/(\Delta/d) < Re < 560/(\Delta/d)$ , поэтому полученная характеристика сравнивается с формулой Альтшуля [8]:

$$\lambda = 0,11 (\Delta/d + 68/Re)^{0,25}. \quad (5)$$

Для расчета коэффициента местного гидравлического сопротивления на участках «Резкое сужение», «Плавный поворот на  $135^\circ$ » и «Плавный поворот на  $90^\circ$ » применима формула

$$\xi = \Delta H / (w^2 / 2g), \quad (6)$$

где  $\xi$  – коэффициент местного гидравлического сопротивления.

Для расчета коэффициента местного гидравлического сопротивления в виде «Плавного поворота на  $135^\circ$ » при условии  $R_{kp}/d > 3$  рекомендуется формула [8]:

$$\xi = 0,0175 \varphi \lambda_k R_{kp} / d, \quad (7)$$

где  $\varphi$  – угол плавного поворота, град;  $\lambda_k$  – коэффициент потерь на трение по длине плавного поворота;  $R_{kp}$  – критический радиус плавного поворота, м.

Для коэффициента потерь на трение по длине плавного поворота при

$1400 < Re \sqrt{\frac{d}{2R_{kp}}} < 5000$  имеется рекомендация Идельчика [8]:

$$\lambda_k = 5 / Re^{0,45} (d / (2R_{kp}))^{0,275}. \quad (8)$$

Однако формула (7) не позволяет учитывать шероховатость стенки трубопровода, поэтому для оценки  $\lambda_k$  можно использовать формулу Альтшуля (5).

Полученные коэффициенты потерь на местном гидравлическом сопротивлении в виде «Плавного поворота на  $90^\circ$ » при условии  $R_{kp}/d < 3$  сравнивались с формулой [8]:

$$\xi = 0,0175 \varphi \lambda_k R_{kp} / d + \xi_m k_\Delta k_{Re}, \quad (9)$$

где  $\xi_m$  – коэффициент местного гидравлического сопротивления поворота;  $k_\Delta$  – коэффициент, учитывающий шероховатость стенки;  $k_{Re}$  – коэффициент, учитывающий режим течения.

Полученные потери давления на местном гидравлическом сопротивлении в виде «Резкого сужения» сравнивались с расчетом по рекомендациям Идельчика [8] (10) и Руководства по безопасности РБ-075-12 [10] (11):

$$\xi = 0,5(1 - F_2/F_1)^{0,75}, \quad (10)$$

$$\xi = (1 - F_2/F_1)(0,4 + 0,5 F_2/F_1), \quad (11)$$

где  $F_1$  – площадь проходного сечения трубопровода до сужения, м<sup>2</sup>;  $F_2$  – площадь проходного сечения трубопровода после сужения, м<sup>2</sup>.

Для всех экспериментальных участков кроме участка «Прямая труба» для вычисления потерь на местном гидравлическом сопротивлении при расчете были учтены потери на участках прямых труб от точек отбора статического давления до самого местного сопротивления. Для этого расчетным путем из общего перепада давления между точками отбора были вычтены потери на трение по длине на участках прямых труб с учетом шероховатостей поверхностей, сформировавшихся после циркуляции свинцового теплоносителя.

## Результаты исследования

В ходе исследования получены зависимости потерь давления от скорости свинцового теплоносителя на участках «Прямая труба», «Плавный поворот на 135°», «Плавный поворот на 90°» и «Резкое сужение», а также шероховатости поверхностей стенок трубопроводов до и после циркуляции. Суммарное время циркуляции для каждого экспериментального участка составляет порядка 100 ч.

Результаты исследования шероховатостей представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Шероховатости поверхностей стенок трубопроводов

Участок	Шероховатость Ra до циркуляции, мкм	Шероховатость Ra после циркуляции, мкм	Эквивалентная равномерно-зернистая шероховатость стенки Δ до циркуляции, мм	Эквивалентная равномерно-зернистая шероховатость стенки Δ после циркуляции, мм
«Прямая труба»	2,138±0,258	4,507±0,491	0,023±0,002	0,045±0,004
Прямая труба после «Резкого сужения»	2,169±0,262	3,551±0,368	0,024±0,002	0,036±0,003
Прямая труба до «Резкого сужения»	2,082±0,210	9,051±0,910	0,023±0,002	0,083±0,007
Прямые трубы на участке с «Плавным поворотом на 135°» и «Плавным поворотом на 90°»	2,027±0,245	3,761±0,388	0,022±0,002	0,038±0,003

## Исследование гидравлических характеристик трасс со свинцовым теплоносителем

Из потерь давления косвенно получены эмпирические коэффициенты потерь на трение по длине (1), коэффициенты местных гидравлических сопротивлений плавных поворотов и резкого сужения (6).

Сравнение полученных значений коэффициента потерь на трение по длине для участка «Прямая труба» с рекомендациями представлено на рис. 5.

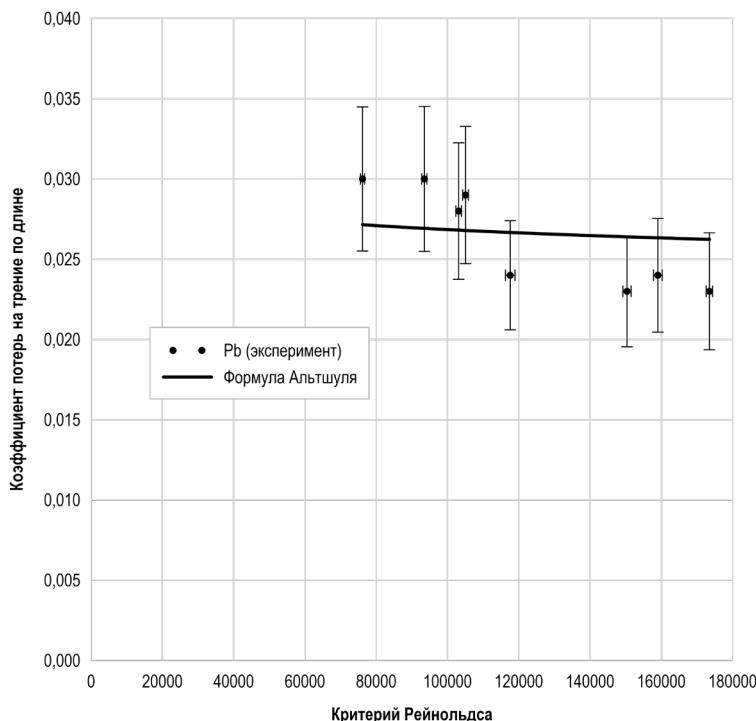


Рис. 5. Сравнение значений коэффициента потерь на трение по длине с рекомендациями

В ходе обработки экспериментальных данных установлено, что значения коэффициента потерь на трение по длине для свинцового теплоносителя в участке прямой трубы круглого сечения диаметром 15,7 мм согласуются с формулой Альтшуля (5) с точностью до 15%.

Сравнение полученных значений коэффициента местного гидравлического сопротивления для «Плавного поворота на 135°» с рекомендациями представлено на рис. 6.

В ходе обработки экспериментальных данных установлено, что значения коэффициента местного гидравлического сопротивления для «Плавного поворота на 135°» согласуются с рекомендациями Идельчика (7) с точностью до 7%.

Сравнение полученных значений коэффициента местного гидравлического сопротивления для «Плавного поворота на 90°» с рекомендациями представлено на рис. 7.

В ходе обработки экспериментальных данных установлено, что значения коэффициента местного гидравлического сопротивления для «Плавного поворота на 90°» согласуются с рекомендациями Идельчика (9) с точностью до 12%.

Так как для резкого сужения коэффициент местного гидравлического сопротивления является константой и не зависит от режима течения и шероховатости, целесообразно сравнить гидравлическую характеристику сопротивления с расчетом

## Investigation of Hydraulic Characteristics of Loops with Lead Coolant

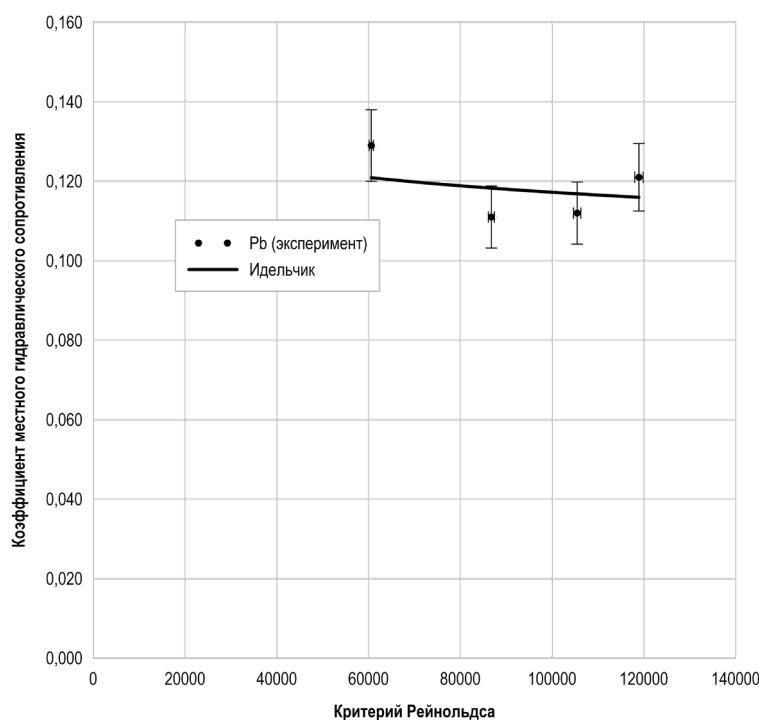


Рис. 6. Сравнение значений коэффициента местного гидравлического сопротивления для «Плавного поворота на 135°» с рекомендациями

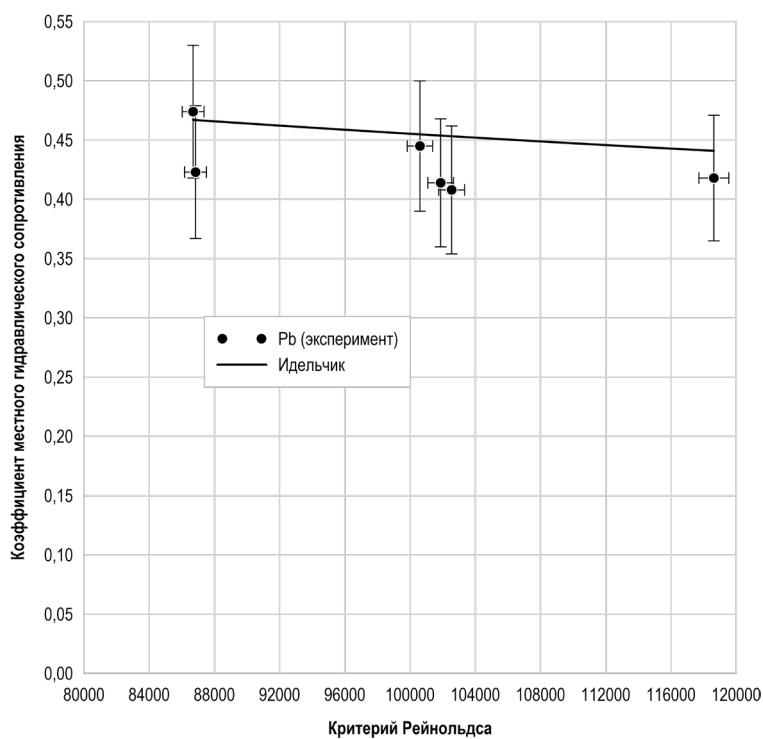


Рис. 7. Сравнение значений коэффициента местного гидравлического сопротивления для «Плавного поворота на 90°» с рекомендациями

## Исследование гидравлических характеристик трасс со свинцовым теплоносителем

по рекомендациям (10), (11). Сравнение полученных значений потерь давления на участке «Резкое сужение» с рекомендациями представлено на рис. 8.

Максимальное относительное расхождение между полученной кривой для свинцового теплоносителя и расчетами по рекомендациям (10), (11) составило  $\pm 7,3\%$ .

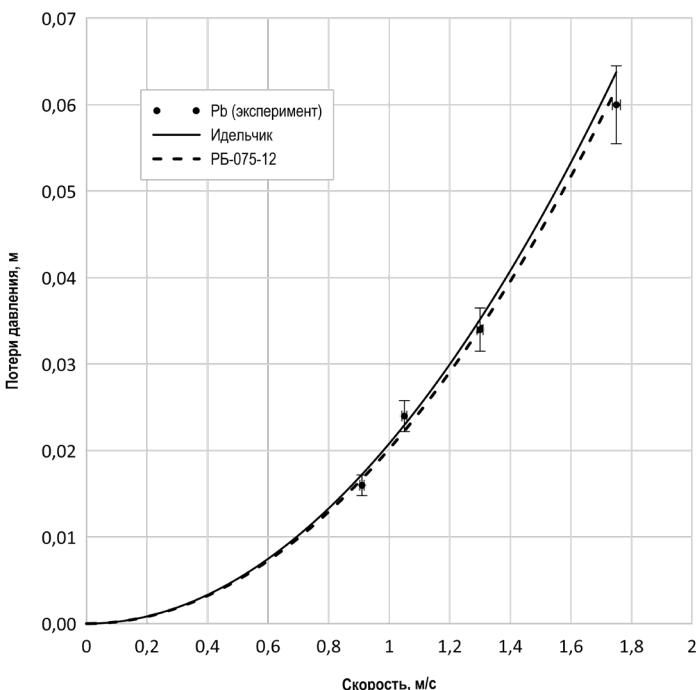


Рис. 8. Сравнение значений потерь давления на участке «Резкое сужение» с рекомендациями

## Заключение

Проведена серия экспериментальных исследований на стенде ФТ-5 НГТУ со свинцовым теплоносителем, в ходе которых получены зависимости потерь давления от скорости для экспериментальных участков «Прямая труба», «Плавный поворот на  $135^\circ$ », «Плавный поворот на  $135^\circ$ » и «Резкое сужение», из которых косвенно вычислены коэффициенты потерь на трение по длине (для «Прямой трубы»), коэффициенты местных гидравлических сопротивлений (для «Плавного поворота на  $135^\circ$ », «Плавного поворота на  $135^\circ$ » и «Резкого сужения»).

Для проведения сравнения с рекомендациями проведено исследование шероховатости поверхностей трубопроводов экспериментальных трасс до и после циркуляции свинцового теплоносителя. Получены значения эквивалентной гидравлической шероховатости для поверхности контакта со свинцовым теплоносителем при концентрации кислорода в теплоносителе  $c = 10^{-6}$ , % масс. и материала трубопроводов 12Х18Н10Т. Результаты показывают, что при циркуляции свинца происходит значительное увеличение шероховатости поверхности трубопроводов по сравнению с начальным состоянием. Это оказывает значительное влияние на потери давления в трассах циркуляции свинцового теплоносителя. Результаты экспериментов согла-

суются с расчетом по рекомендациям из справочника Идельчика и руководства по безопасности РБ-075-12 при учете шероховатостей поверхностей стенок, образующихся после циркуляции свинца.

Обобщение опытных данных позволяет сделать вывод, что для расчетов гидравлического сопротивления в случае течения свинцового теплоносителя при концентрации кислорода в теплоносителе  $c = 10^{-6}$ , % масс. и материала трубопроводов 12Х18Н10Т можно использовать известные рекомендации, однако следует использовать значения шероховатости, полученные для поверхностей, формирующихся после циркуляции свинца.

### **Финансирование**

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкокометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

### **Литература**

1. Адамов Е.О., Каплиенко А.В., Орлов В.В., Смирнов В.С., Лопаткин А.В., Лемехов В.В., Моисеев А.В. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии. *Атомная энергия*. 2020;129(4):185–194. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3582> (дата обращения 01.11.2025).
2. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами (под общ. ред. проф. Е.О. Адамова). Москва, АО «НИКИЭТ», 2020, 502 с. ISBN 978-5-98706-129-9.
3. Безносов А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И. Тяжелые жидкокометаллические теплоносители в атомной энергетике. Москва, ИздАТ, 2007, 432 с.
4. Park H., Choi C.-H., Kim C.-J. Superhydrophobic drag reduction in turbulent flows: a critical review. *Experiments in Fluids*. 2021;62(229):1–29. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03322-4>
5. Безносов А.В., Бокова Т.А., Дроздов Ю.Н., Махов К.А., Новожилова О.О., Ярмонов М.В. Триботехнические характеристики зон контакта в среде теплоносителей ядерных реакторов на быстрых нейтронах АЭС. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011;13(4–3):676–680. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17933949> (дата обращения 10.11.2025). EDN: MBYYCD.
6. Gose J.W., Golovin K., Boban M., Mabry J.M., Tuteja A., Perlin M., Ceccio S.L. Characterization of superhydrophobic surfaces for drag reduction in turbulent flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2018;845:560–580. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.210>
7. Ma W., Karbojian A., Sehgal B.R., Dinh T.-N. Thermal-hydraulic performance of heavy liquid metal in straight-tube and U-tube heat exchangers. *Nuclear Engineering and Design*. 2009;239(7):1323–1330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.03.014>
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям (под ред. М.О. Штейнберга). Москва, Машиностроение, 1992, 672 с. ISBN 5-217-00393-6.
9. Яблоков А.М., Кожухов Ю.В., Садовский Н.И. Численное исследование влияния эквивалентной песочной шероховатости рабочего колеса на характеристики малорасходной ступени центробежного компрессора. *Вестник Международной академии холода*. 2020;4:3–11. DOI: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2020-19-4-3-11>
10. Руководство по безопасности «Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования ядерных энергетических установок с жидкокометаллическим теплоносителем» (РБ-075-12). Федеральная служба по

Исследование гидравлических характеристик трасс со свинцовым теплоносителем

экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2012 (Введено в действие с 31 августа 2012 г.).

Поступила в редакцию 24.04.2025

После доработки 18.11.2025

Принята к опубликованию 27.11.2025

**Авторы**

Сумин Роман Викторович, ассистент,

E-mail: rom.sumin@yandex.ru

Зырянова Татьяна Константиновна, ассистент,

E-mail: ats@nntu.ru

Бокова Татьяна Александровна, доцент, к.т.н.,

E-mail: tatabo@bk.ru

Волков Никита Сергеевич, младший научный сотрудник,

E-mail: volkov.ns@nntu.ru

Погорелов Михаил Дмитриевич, ассистент,

E-mail: md.pogorelov@yandex.ru

Шалина Дарья Сергеевна, техник,

E-mail: daria-sh@list.ru

Колосов Сергей Владимирович, инженер,

E-mail: kolosovs.nn@yandex.ru

UDC 621.039.5

**Investigation of Hydraulic Characteristics of Loops with Lead Coolant**

**Sumin R.V., Zyryanova T.K., Bokova T.A., Volkov N.S., Pogorelov M.D., Shalina D.S., Kolosov S.V.**

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev*

*24 Minina St., 603155 Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract**

The article is devoted to an experimental study of the hydraulic characteristics of lead coolant circulation routes. The aim of the study is to obtain calculation formulas for determining hydraulic losses in the elements of a circulation circuit, such as friction losses in a straight pipe and local resistances (smooth turns, sharp narrowing), as well as comparing experimental data with existing recommendations.

The experience of operating experimental stands with lead and lead-bismuth coolant shows that this class of coolant has a number of properties that have a significant effect on the fluid dynamics of the coolant. In the course of an experimental study, a significant discrepancy was found between the data obtained and recommendations from the literature. Calculation formulas for determining the hydraulic losses in the elements of the circulation circuit are also obtained. The friction losses along the length of the straight pipe and smooth turns for the lead coolant are significantly higher than recommended. At the same time, pressure losses at a sharp constriction can be considered to coincide with the recommendations.

The results of the study are proposed for use in the development of circulation circuits of reactor installations with lead coolant of the BREST and BR-1200 types, experimental stands and in the verification of design codes.

**Keywords:** lead coolant, fast neutron reactor, hydrodynamics, hydraulic resistances.

**For citation:** Sumin R.V., Zyryanova T.K., Bokova T.A., Volkov N.S., Pogorelov M.D., Shalina D.S., Kolosov S.V. Investigation of Hydraulic Characteristics of Loops with Lead Coolant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;4:66–79. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.05> (in Russian).

## **References**

1. Adamov E.O., Kaplienko A.V., Orlov V.V., Smirnov V.S., Lopatkin A.V., Lemekhov V.V., Moiseev A.V. Brest Lead-Cooled Fast Reactor: From Concept to Technological Implementation. *Atomic Energy*. 2021;129(4):179–187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00731-w>
2. Handbook of Russian Nuclear Power. Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors (general edit. prof. E.O. Adamov). Moscow, NIKIET Publ., 2020, 502 p. ISBN 978-5-98706-129-9 (in Russian).
3. Beznosov A.V., Dragunov Yu.G., Rachkov V.I. *Heavy liquid metal heat carriers in nuclear power engineering*. Moscow, IzdAT, 2007, 432 p. ISBN 5-86656-202-2 (in Russian).
4. Park H., Choi C.-H., Kim C.-J. Superhydrophobic drag reduction in turbulent flows: a critical review. *Experiments in Fluids*. 2021;62(229):1–29. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03322-4>
5. Beznosov A.V., Bocova T.A., Drozdov Yu.N., Makhov K.A., Novozhilova O.O., Yarmonov M.V. Tribological characteristics of the contact zones of coolants of nuclear fast reactors at a nuclear power plant. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(4–3):676–680 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17933949> (accessed Nov. 10, 2025). EDN: MBYYCD (in Russian).
6. Gose J.W., Golovin K., Boban M., Mabry J.M., Tuteja A., Perlin M., Ceccio S.L. Characterization of superhydrophobic surfaces for drag reduction in turbulent flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2018;845:560–580. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.210>
7. Ma W., Karbojian A., Sehgal B.R., Dinh T.-N. Thermal-hydraulic performance of heavy liquid metal in straight-tube and U-tube heat exchangers. *Nuclear Engineering and Design*. 2009;239(7):1323–1330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.03.014>
8. Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistance (edit. M.O. Steinberg). Moscow, Mashinosstroenie Publ., 1992, 672 p. ISBN 5-217-00393-6 (in Russian).
9. Yablokov A.M., Kozhukhov Yu.V., Sadovsky N.I. Numerical study of the effect of equivalent sand roughness of an impeller on the characteristics of a low-flow stage of a centrifugal compressor. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2020;4:3–11. DOI: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2020-19-4-3-11>
10. Safety Manual “Design ratios and methods for calculating the hydrodynamic and thermal characteristics of elements and equipment of nuclear power plants with liquid metal coolant” (RB-075-12). Federal Environmental, Technological and Nuclear Supervision Service, Moscow, 2012 (Effective from August 31, 2012) (in Russian).

## **Authors**

Roman V. Sumin, Assistant,

E-mail: rom.sumin@yandex.ru

Tatiana K. Zyryanova, Assistant,

E-mail: ats@nntu.ru

Tatiana A. Bokova, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: tatabo@bk.ru

Nikita S. Volkov, Junior Researcher,

E-mail: volkov.ns@nntu.ru

Исследование гидравлических характеристик трасс со свинцовым теплоносителем

Mikhail D. Pogorelov, Assistant,  
E-mail: md.pogorelov@yandex.ru  
Darya S. Shalina, Technician,  
E-mail: daria-sh@list.ru  
Sergey V. Kolosov, Engineer,  
E-mail: kolosovs.nn@yandex.ru