

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ ТЕЧЕНИИ ТЯЖЕЛОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТРУБАХ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Погорелов М.Д., Бокова Т.А., Волков Н.С., Маров А.Р., Сумин Р.В.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия)

Введение

Перспективы развития реакторов на быстрых нейтронах в России тесно связаны с реакторными установками натриевой серии и инновационным проектом БРЕСТ со свинцовым теплоносителем, к строительству которого приступили непосредственно с начала 2019 года. В отличие от натриевого теплоносителя, а тем более – от водяного, тяжелые жидкометаллические теплоносители (такие как свинец, свинец-висмут) являются наименее исследованными с точки зрения гидродинамики, что обусловлено его особенностями.

Существующие методики расчета гидравлических потерь свинцового теплоносителя на участках трубопроводов и местных сопротивлений, освещенные в открытой научной литературе, в своей основе опираются на использовании коэффициентов в уравнениях, полученных для водяного теплоносителя. Получение же адекватных специфике и технологии свинцового теплоносителя эмпирических зависимостей и коэффициентов возможно только на соответствующих исследовательских стендах.

1. Специфика свинцового теплоносителя и структура пристенного слоя

К специфическим свойствам свинцового теплоносителя, определяющим гидравлику его течения, относятся:

- низкое давление насыщенного пара $1,44 \cdot 10^{-17}$ Па при $t = 127^\circ\text{C}$, $5,38 \cdot 10^{-5}$ Па при $t = 527^\circ\text{C}$;
- высокая температура кипения $t_{\text{кип}} = 1750^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении, в условиях реакторного контура – больше;
- большее, чем у воды, поверхностное натяжение $\sigma \approx 400$ н/м при $t = 350^\circ\text{C}$;
- существенно большая плотность $\rho = 10,5 \cdot 10^3$ кг/м³ при $t = 450^\circ\text{C}$, определяющая силы инерции в потоке;
- теплопроводность $\lambda = 16,58$ Вт/(м·К) при $t = 400^\circ\text{C}$;
- большая чем у воды, но меньшая чем у натрия; кинематическая вязкость $\nu \approx 20,99 \cdot 10^{-8}$ м²/с при $t = 400^\circ\text{C}$;
- несмачиваемость поверхности сталей и чугунов с нанесенными на них защитными оксидными покрытиями; краевой угол смачивания оксидированных сталей (в среде сухого аргона) составляет $\Theta = 110 - 120^\circ$.

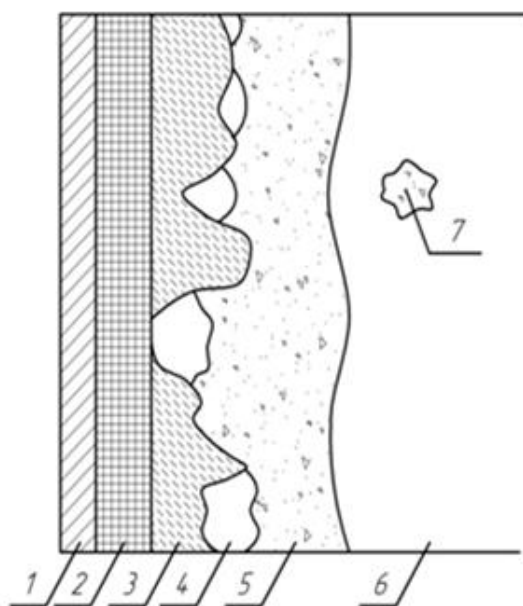
Опыт эксплуатации стендов с ТЖМТ показывает, что при наличии растворенного кислорода в расплаве теплоносителя формируется пристенная область, обладающая рядом специфических характеристик, отличающих гидродинамические характеристики этих теплоносителей от традиционных (натрий, вода) [10]. К таким особенностям 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, теплогидравлические, коррозионно–эрозионные, триботехнические и другие эксплуатационные характеристики элементов контуров с реакторами, охлаждаемыми свинцовым и свинцово- висмутовым теплоносителями.

По результатам исследований, проведенных в НГТУ им. Р. Е. Алексеева, предложена схема пристенной области, представленная на рисунке 1.

Также в результате проведенных исследований было обнаружено, что в образованной в результате эксплуатации контуров с ТЖМТ пристенной области в зоне контакта со стальными поверхностями изменяется шероховатость контактирующих поверхностей, которая растет за счет повышения температуры теплоносителя, термодинамической активности кислорода в расплаве и времени циркуляции. Все это может сказаться на гидродинамических характеристиках участков контуров



*Рис. 1. Схема приграничной области контакта твердого и жидкого металла:
1 – сталь; 2 – оксидное покрытие; 3 – слой рыхлых отложений, слабо сцепленных с оксидным покрытием; 4 – газовая фаза (вследствие несмачивания теплоносителем оксидной поверхности); 5 – диффузионный слой пограничного турбулентного слоя, обогащенный примесями; 6 – пограничный турбулентный слой; 7 – частицы примесей, находящиеся в потоке теплоносителя вблизи пристенной области, не сцепленные со слоями 3 и 5*

2. Описание экспериментального стенда ТР-2022

На этапе первичной апробации в состав экспериментального стенда ТР-2022 входят следующие элементы:

- напорная емкость, предназначена для создания напора, исключив влияние насоса;
- манометр, предназначен для измерения уровня давления в напорной емкости;
- отжимные бачки, служат для определения статического давления жидкости;
- экспериментальный участок;
- расходомерная емкость, предназначена для измерения расхода теплоносителя объемным методом. На крышке емкости установлены два неподвижных электроконтактных датчика уровня, по сигналам которых определяется время заполнения водой известного объема емкости ($\Delta V = 9,51$ л.);
- газовый редуктор, предназначен для регулирования подачи сжатого воздуха в напорную емкость.
- компрессор, предназначенный для подачи сжатого воздуха в напорную емкость.

Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 2.

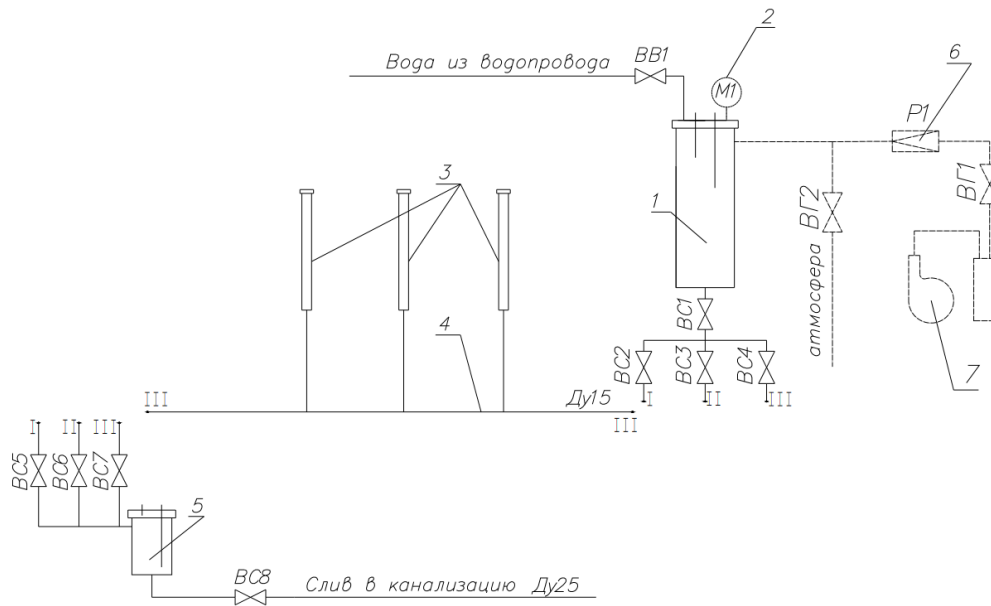


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда TP-2022:

1 – напорная емкость; 2 – манометр; 3 – отжимные бачки; 4 – экспериментальный участок;
5 – расходомерная емкость; 6 – редуктор газовый; 7 – компрессор;
(I, II, III) – Движение теплоносителя в зависимости от исследуемых участков

3. Описание экспериментальных участков

Первый экспериментальный участок представляет собой прямую трубу Ду 15 круглого поперечного сечения с толщиной стенки 2 мм и длиной 1520 мм, изготовленную из стали 08Х18Н10Т (рисунок 3). В начале и конце экспериментального участка имеются сверления диаметром 7 мм, к которым привариваются трубки для отбора давления (№1, 2) в отжимные бачки.

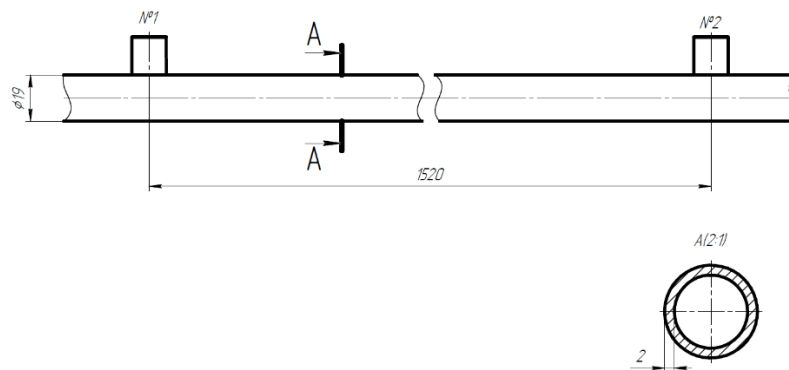


Рис. 3 Экспериментальный участок «прямая труба»

Второй экспериментальный участок представляет собой трубу круглого поперечного сечения с внезапным расширением-сужением (рисунок 4). В состав экспериментального участка входят следующие элементы: прямая труба Ду15, которая расширяется до Ду30 и сужается до Ду15 и три отбора на отжимные бачки (№ 1, 2 и 3).

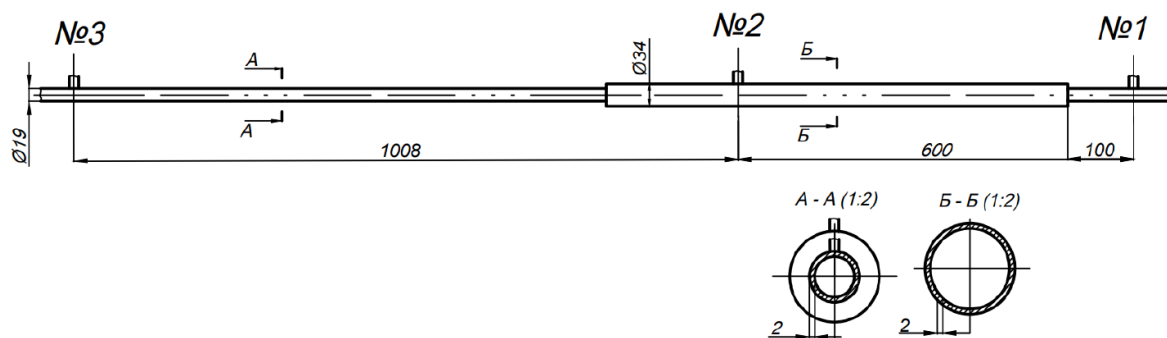


Рис. 4 Экспериментальный участок «внезапное сужение-расширение»

Третий экспериментальный участок представляет собой трубу круглого поперечного сечения внутренним диаметром 15,5 мм с последовательно идущими поворотами на 135° и 90° с толщиной стенки 2,1 мм (рисунок 5), изготовленную из стали 12Х18Н10Т. В начале и после стабилизации потока на каждом повороте имеются сверления диаметром 7 мм (всего три отбора), к которым привариваются трубки для отбора давления (№1,2,3) в отжимные бабки.

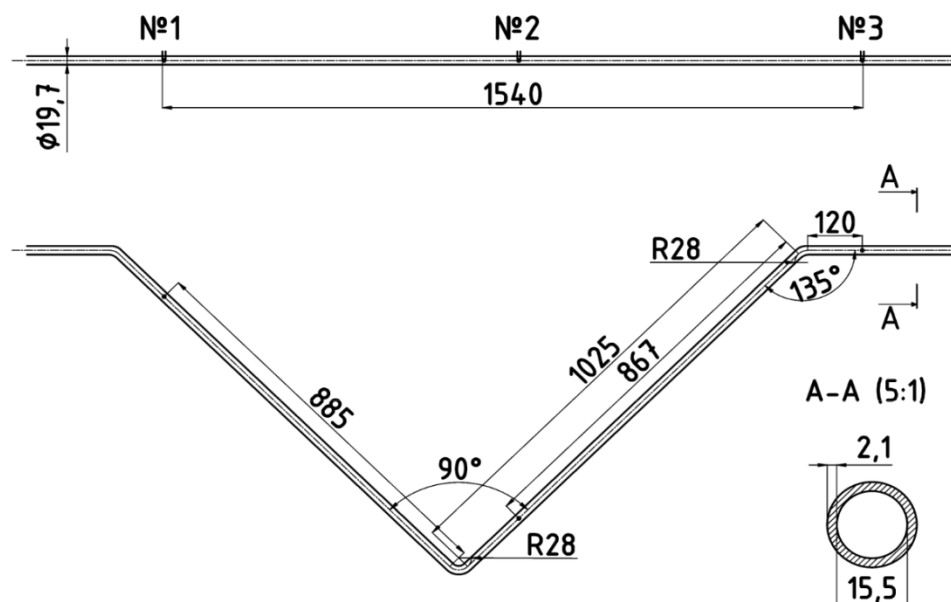


Рис. 5 Экспериментальный участок «поворот на 45 и 90 градусов»

4. Проведение исследований на экспериментальном стенде с ТЖМТ

После верификации экспериментального стенда по схеме, предназначенной для водяного теплоносителя, стенд подготавливается к проведению испытаний на ТЖМТ.

В состав экспериментального стенда ТР-2022 при проведении испытаний на ТЖМТ входят следующие элементы:

- плавильный бак, предназначен для первоначального приема чушек свинца, их плавления, подачи свинца в циркуляционный контур через фильтр и приема свинца из контура и хранения свинца после его дренирования в расплавленном и в застывшем состоянии, а также для обработки свинца водородом и аргонородными смесями;
- буферная емкость, предназначена для восполнения недостающего объема теплоносителя;

- центробежный насос, предназначен для возврата теплоносителя из буферной в напорную емкость, чтобы поддерживать необходимый уровень столба теплоносителя в последнем;
- фильтр заполнения, предназначен для очистки теплоносителя от частиц дисперсных примесей теплоносителя, подаваемого из плавильного бака в контур и восстановления водородом оксидов свинца, накопленных в объеме фильтрующего материала, тем самым очистки фильтра от оксидов;
- напорная емкость;
- электроконтактные уровнемеры, предназначены для измерения уровня теплоносителя в напорном баке;
- отжимные бачки;
- экспериментальный участок;
- расходомерная емкость;
- коллектора высокого и низкого давления;
- газовые баллоны, наполненные аргоном и водородом;
- вакуумный насос, предназначен для откачки воздуха из контура стенда;
- конденсатор, предназначен для удаление водяного пара из газовой системы и контура осуществляется путем его конденсации в конденсаторе и последующего дренирования конденсата (воды) из объема конденсатора через вентиль в переносную мерную емкость.

Схема стенда на этапе проведения исследований с ТЖМТ представлена на рисунке 6.

Экспериментальный стенд позволяет переориентировать его на исследования гидравлических характеристик других гидравлических сопротивлений с заменой лишь исследуемых экспериментальных участков. Это дает возможность широко изучить особенности течения теплоносителя для создания полной экспериментальной базы о теплоносителе для его эффективного применения в реакторных установках, натурных и исследовательских стендах.

В ходе экспериментальных исследований гидравлики на свинцовом теплоносителе планируется получить массив данных, проанализировав который можно оценить влияние специфики свинцового теплоносителя на его гидравлику. Предполагается, что экспериментальные данные будут отличаться от результатов теоретического расчета.

Результатом влияния специфики используемого свинцового теплоносителя, обозначенной в разделе 1 – это изменение коэффициентов гидравлического сопротивления и потерь напора потока ТЖМТ по сравнению с расчетно-теоретическими данными для воды.

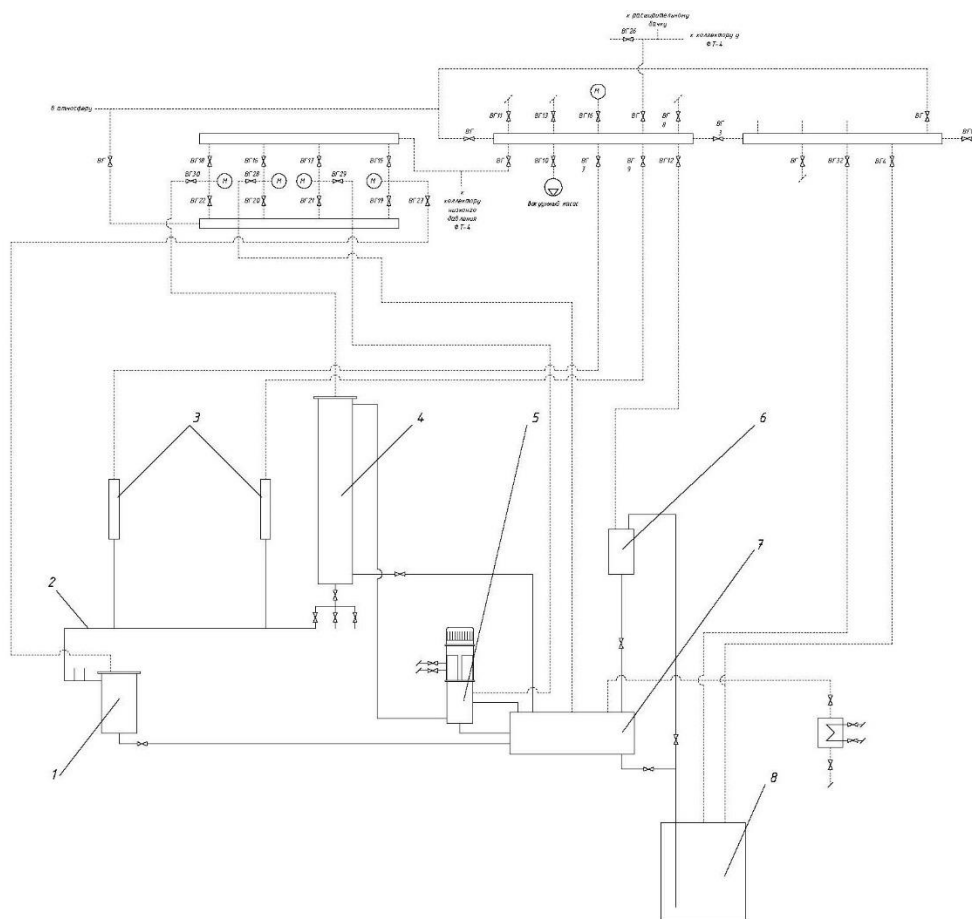


Рис. 6. Схема стенда TP-2022 на этапе проведения исследований на ТЖМТ:
 1 – расходомерная емкость; 2 – экспериментальные участки I, II и III; 3 – отжимные бабки;
 4 – напорная емкость; 5 – ЖМ-насос циркуляционный; 6 – фильтр; 7 – буферная емкость;
 8 – плавильный бак

5. Результаты проведения экспериментов на этапе первичной апробации стенда TP-2022

На рисунках 6, 7, 8, 9 и 10 представлены обработанные данные на этапе первичной апробации стенда TP-2022 на водяном теплоносителе.

На данном этапе апробации производится обработка полученных гидравлических данных исследуемого участка для их последующего сравнения с данными, полученными в ходе расчетно-теоретических исследований.

В сводных графиках приведены результаты серии измерений, полученные в ходе экспериментальных исследований по каждому экспериментальному участку: прямой трубе круглого сечения, трубе круглого сечения с поворотом потока на 135° и 90° и трубе круглого поперечного сечения с сужением и расширением для каждого давления, подаваемого в напорную емкость. Данные, полученные в ходе экспериментального исследования, обрабатывались в соответствии с общими рекомендациями, приведенными в литературе по расчету гидравлических сопротивлений участков контуров энергетического оборудования.

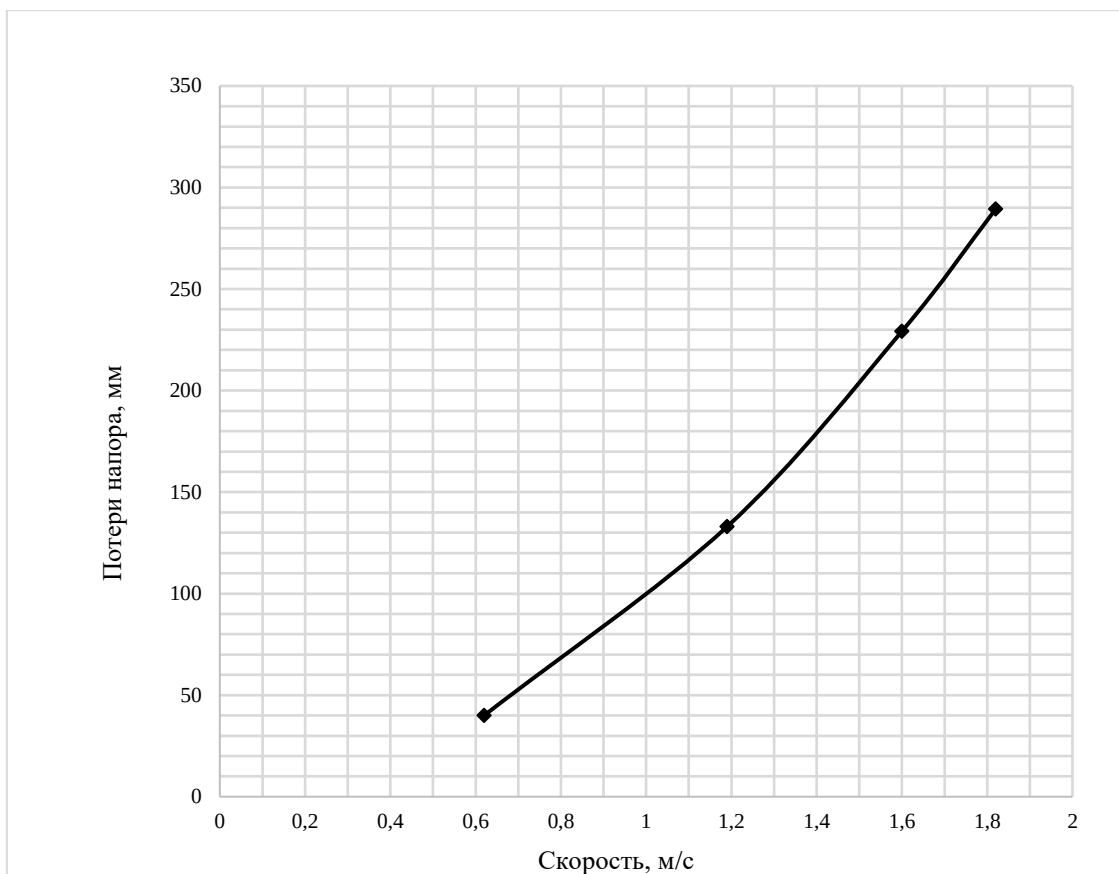


Рис. 6 Зависимость потерь напора от скорости теплоносителя для прямой трубы круглого поперечного сечения с поворотом на 45 градусов

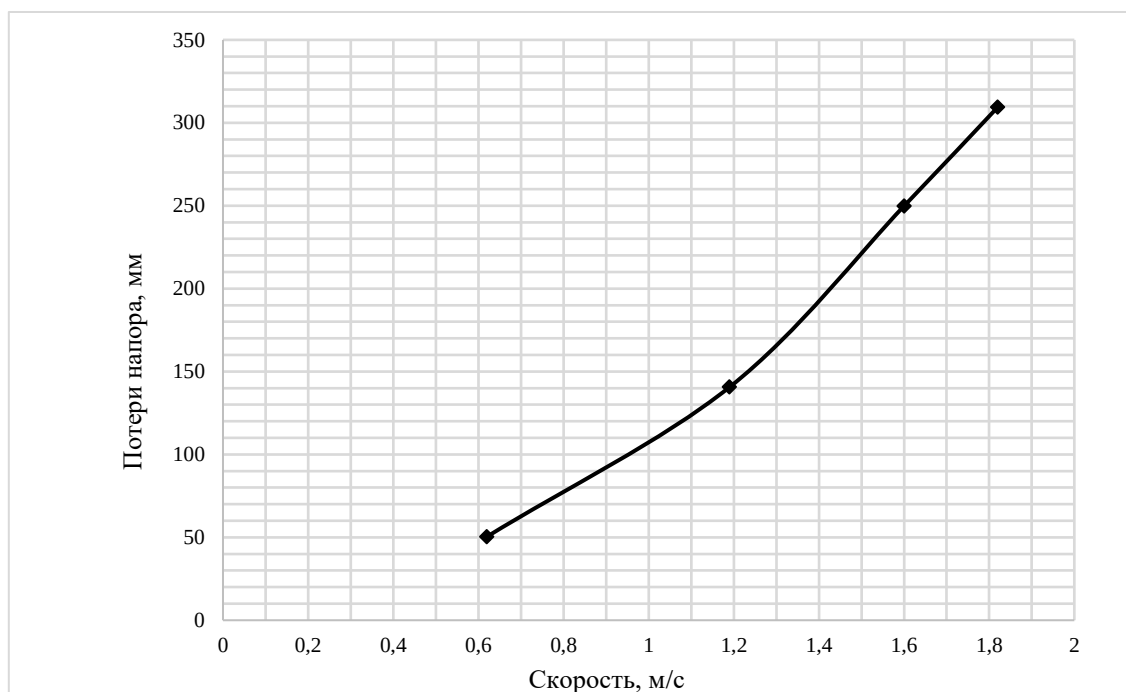


Рис. 7 Зависимость потерь напора от скорости теплоносителя для прямой трубы круглого поперечного сечения с поворотом на 90 градусов

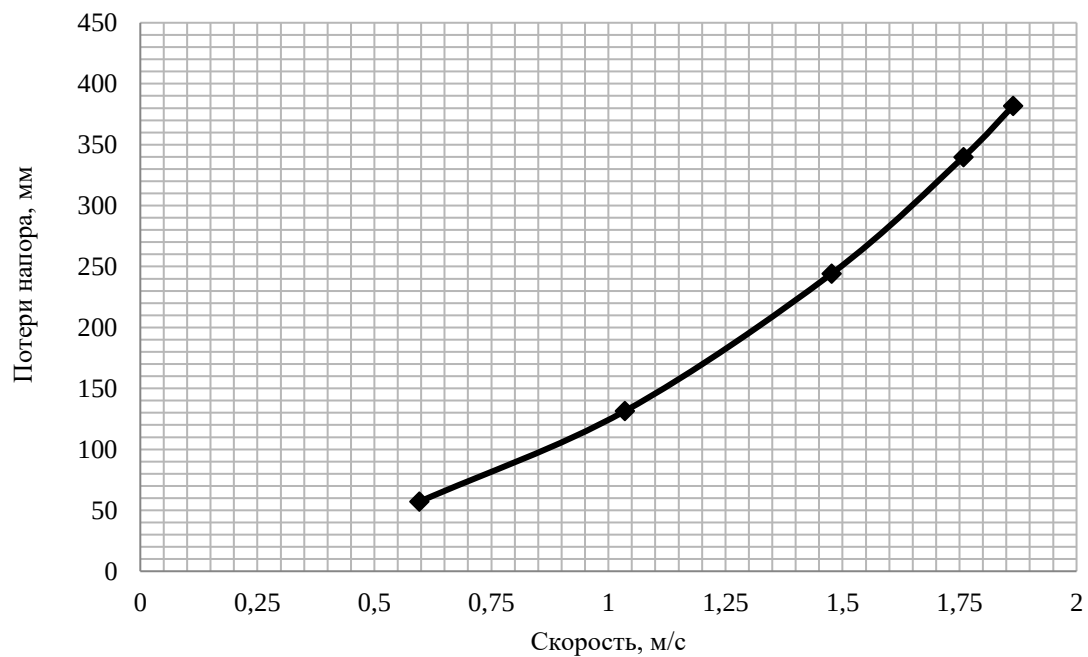


Рис. 8 Зависимость потерь напора на трение по длине от скорости теплоносителя для прямой трубы круглого поперечного сечения

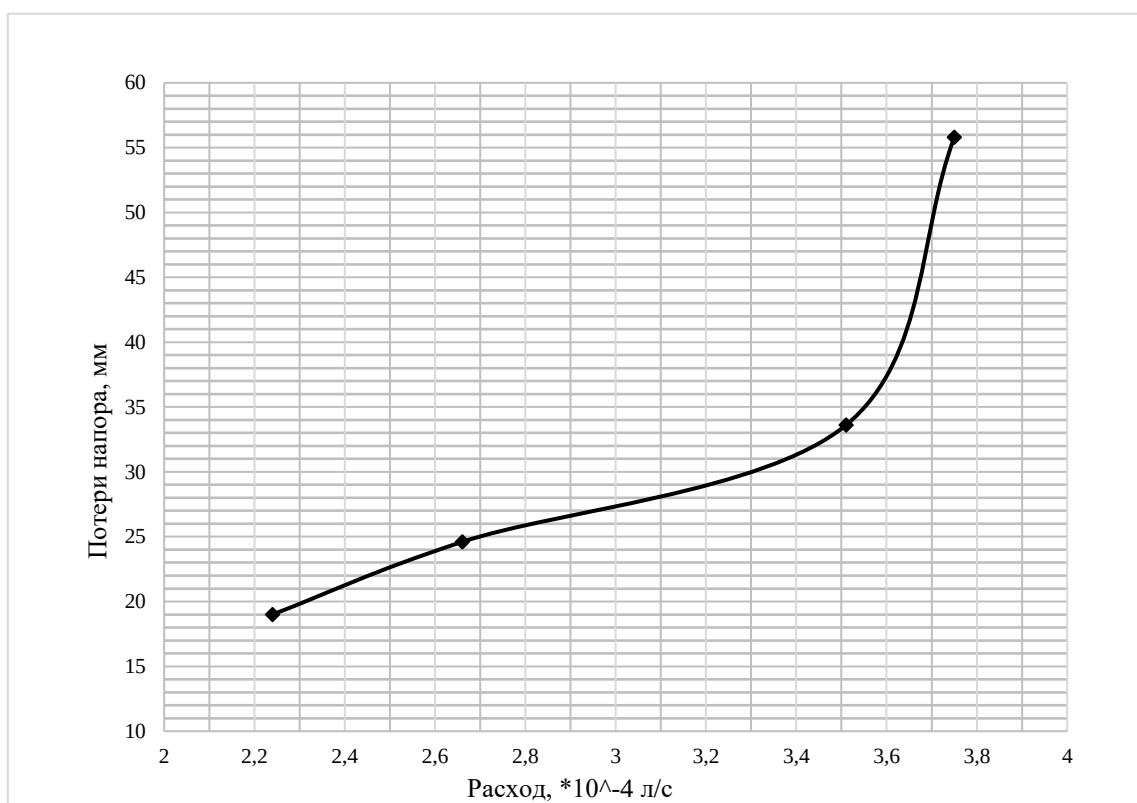


Рис. 9 Зависимость потерь напора на расширении от расхода теплоносителя для трубы круглого сечения

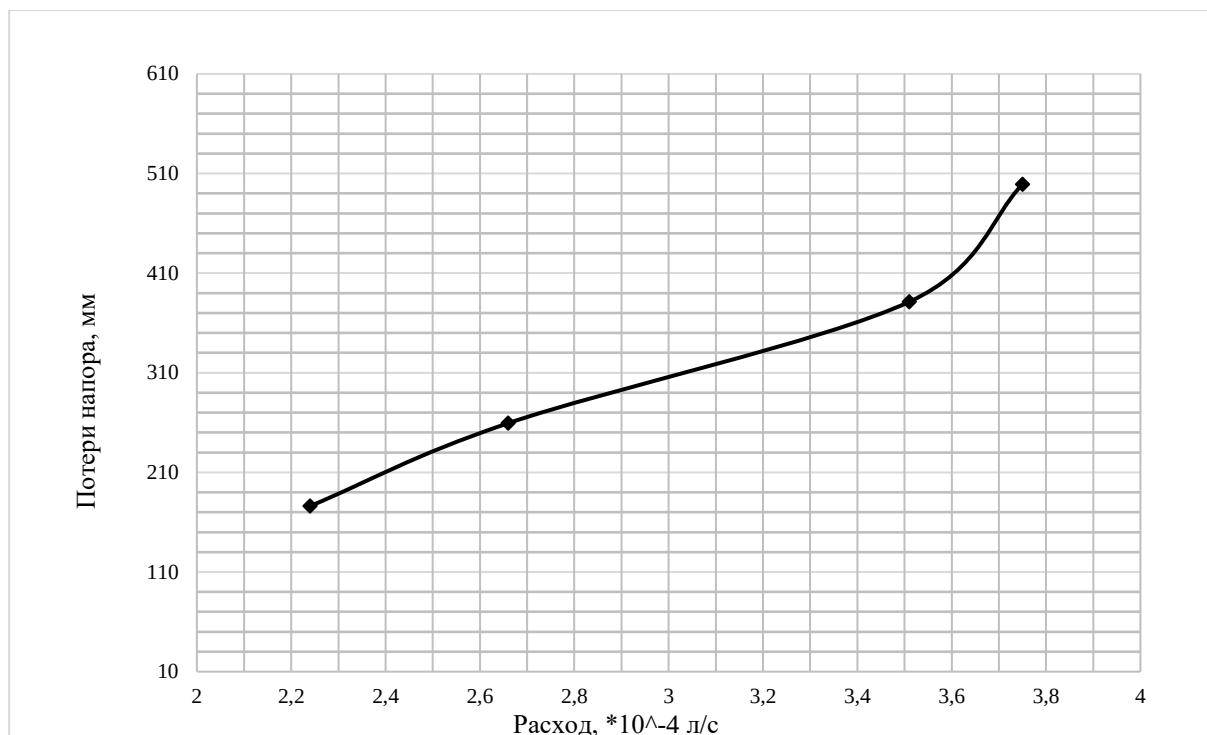


Рис. 10 Зависимость потерь напора на сужении от расхода теплоносителя для трубы круглого сечения

Заключение

Исследователями из НГТУ им. Р.Е. Алексеева был спроектирован и создан экспериментальный стенд, который позволяет проводить исследования как на водяном (проверяемые результаты), так и свинцовом теплоносителе (искомые данные), что дает возможность получить адекватную, верную информацию по гидравлическим потерям потока свинцового теплоносителя на участках трубопроводов и местных сопротивлениях. На первом этапе авторы провели апробацию стенда ТР-2022 для исследования местных гидравлических потерь на водяном теплоносителе при прохождении теплоносителем изогнутых участков трубопровода. Дальнейшее проведение экспериментальных исследований гидравлики на свинцовом теплоносителе позволит получить массив данных, анализ которого поможет уточнить уже известные зависимости и обеспечит базу для верификации CFD-кодов.

Список литературы

1. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е издание, перераб. и доп. – М. Машиностроение, 1992
2. Безносов А.В., Бокова Т.А. Оборудование, компоновка и режимы эксплуатации контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011. – 536 с.
3. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной энергетики. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
4. Четкин А.В. Высокотемпературные теплоносители. – М.: Энергия, 1971. – 496 с.
5. Безносов А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике. – М.: ИздАТ, 2007. – 432 с. ISBN: 5-86656-202-2. Электронный ресурс: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003085239> (дата доступа 24.01.2023)