
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.586

EDN: FXXVYZ

ТЕСТИРОВАНИЕ МНОГОПЕТЛЕВОГО КОНТУРА В РЕЖИМЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Н.А. Прибатурин

ORCID: 0009-0005-3861-6630 e-mail: nialp@ibrae.ac.ru

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
*Москва, Россия***П.Д. Лобанов**

ORCID: 0000-0002-3020-6021 e-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
*Новосибирск, Россия***А.С. Курдюмов**

ORCID: 0000-0002-1833-0484 e-mail: kurdumov@itp.nsc.ru

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
*Новосибирск, Россия***А.И. Светоносков**

ORCID: 0009-0000-3540-4070 e-mail: svetonosov.a.i@gmail.com

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
*Новосибирск, Россия***А.В. Чинак**

ORCID: 0000-0003-3011-7464 e-mail: chinak@mail.ru

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
Новосибирск, Россия

Приведены результаты тестирования стенда с жидкометаллическим теплоносителем, имеющего четыре циркуляционных контура, соединяющихся в верхней камере: один источник тепловыделения в виде семи-стержневого имитатора тепловыделяющей сборки и четыре теплообменника, отводящие тепло от каждого контура. Получены данные по режиму естественной циркуляции свинцово-висмутového расплава в двух- и четырехпетлевой циркуляционной системе, данные по изменению режима естественной циркуляции при нарушении отвода тепла от одной из циркуляционных петель.

Ключевые слова: реакторная установка, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, естественная циркуляция, многопетлевой контур, тепловыделяющая сборка.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Прибатурин, Н.А. Тестирование многопетлевого контура в режиме естественной циркуляции свинцово-висмутového теплоносителя / Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, А.И. Светоносков, А.В. Чинак // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 50-58. EDN: FXXVYZ

TESTING OF MULTI-LOOP CIRCUIT IN NATURAL CIRCULATION MODE OF LEAD-BISMUTH COOLANT

N.A. Pribaturin

ORCID: **0009-0005-3861-6630** e-mail: **nialp@ibrae.ac.ru**

Nuclear Safety Institute RAS

Moscow, Russia

P.D. Lobanov

ORCID: **0000-0002-3020-6021** e-mail: **lobanov@itp.nsc.ru**

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

Novosibirsk, Russia

A.S. Kurdyumov

ORCID: **0000-0002-1833-0484** e-mail: **kurdumov@itp.nsc.ru**

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

Novosibirsk, Russia

A.I. Svetonosov

ORCID: **0009-0000-3540-4070** e-mail: **svetonosov.a.i@gmail.com**

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

Novosibirsk, Russia

A.V. Chinak

ORCID: **0000-0003-3011-7464** e-mail: **chinak@mail.ru**

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS

Novosibirsk, Russia

Abstract. The article presents the results of test bench with a liquid metal coolant with four circulation circuits connected in the upper chamber: one heat source in the form of a seven-rod fuel assembly simulator and four heat exchangers removing heat from each circuit. Data on the mode of natural circulation of lead-bismuth melt in two- and four-loop circulation systems, as well as data on changes in the natural circulation mode when the heat transfer in one of the circulation loops is disrupted are obtained.

Key words: reactor plant, heavy liquid metal coolant, natural circulation, multi-loop circuit, fuel assembly.

FOR CITATION: N.A. Pribaturin, P.D. Lobanov, A.S. Kurdyumov, A.I. Svetonosov, A.V. Chinak. Testing of multi-loop circuit in natural circulation mode of lead-bismuth coolant. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 50-58. EDN: FXXVYZ

Введение

Исследование процессов установления режима естественной циркуляции (ЕЦ) в контуре реакторной установки (РУ) с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) и, собственно, работы замкнутого контура реактора в режиме ЕЦ – крайне важные задачи, поскольку их решения определяют основные положения обоснования безопасности РУ со свинцовым теплоносителем. Они не могут быть решены без знания теплогидравлических характеристик течения металлического теплоносителя при работе установки в режиме ЕЦ. В замкнутом контуре без использования насосов естественная конвекция действует как единственный возможный способ циркуляции жидкости.

Несмотря на высокий интерес к ЕЦ в РУ с тяжелым жидким металлом (свинцовый расплав, свинцово-висмутовый сплав), круг ее исследований при параметрах работы с

ТЖМТ все еще весьма ограничен. В научных центрах Италии и Германии [1-3] выполнены и продолжаются исследования режима ЕЦ демонстрирующие особенности естественной циркуляции в контуре с одной циркуляционной петлей для эвтектики *свинец – висмут*. В ряде случаев эксперименты были обеспечены пре-тестовыми и пост-тестовыми расчетами.

В работах [4-6] подробно изучен и описан режим ЕЦ свинцово-висмутового теплоносителя с целью получения экспериментальных данных и проверки кодов, включая CFD-модели. Эксперимент проведен на установке с замкнутым гидродинамическим контуром, состоящим из двух горячих и одной холодной ветки. В контуре используется жидкий эвтектический сплав свинца и висмута. ЕЦ в этих работах изучалась на установке с двумя последовательно соединенными петлями. Основной контур состоял из бака-аккумулятора со свинцово-висмутовым сплавом, а также вертикальных и горизонтальных участков циркуляционных петель. Высота контура – 6500 мм; расстояние между осями вертикальных участков – 740 мм, длина вертикального участка – 5830 мм. Внутренний диаметр труб установки – 27,86 мм. Нагрев теплоносителя производится электричеством, тепло от контура отводится теплообменником, установленным в верхней точке системы. В работе [6] описаны итоги экспериментов, полученных на такой установке.

В последнее годы в Китае активно проводятся исследования использования жидкометаллических теплоносителей в энергетических установках [7-9]. В работе [9] описан эксперимент с устойчивыми и переходными режимами ЕЦ расплава свинца и висмута в контуре, диаметр которого – 42 мм, расстояние между центрами нагрева и охлаждения – 3700 мм; мощность нагрева – 30 кВт. Контур циркуляции состоит из бака-аккумулятора с металлическим теплоносителем, вертикальной нагревательной секции, бака-расширителя, горизонтальной охлаждающей секции и измерительных устройств (термопары, расходомер, датчики перепада давления). Теплоноситель нагревается электричеством в секции длиной 1500 мм и охлаждается водой в секции длиной 1200 мм. В работе исследовались установившиеся и переходные режимы ЕЦ при условии ступенчатого изменения мощности нагрева и двух уровнях гидравлического сопротивления контура, далее экспериментальные данные сравнивались с результатами моделирования. Установлено, что на ЕЦ влияет геометрия контура и его гидравлическое сопротивление. Из-за высокого теплового расширения и высокой теплопроводности расплава ЕЦ в системе начинается очень быстро; отмечена быстрая реакция изменения скорости потока теплоносителя на резкие перепады мощности нагрева, а резкие перепады температуры приводили к блокировке потока (временной) и резким колебаниям температуры теплоносителя. В работе [10] отражено экспериментально-расчетное исследование развития ЕЦ свинцово-висмутового теплоносителя в замкнутом циркуляционном контуре. Для экспериментальных исследований ЕЦ была использована одна циркуляционная петля контура. Было показано формирование устойчивого течения жидкометаллического теплоносителя из состояния покоя за счет подвода избыточного тепла к имитатору тепловыделяющей сборки. С помощью CFD-модуля CONV-3D на базе DNS выполнено моделирование происходящих процессов. Особенностью этого контура является его модульная схема, что позволяет в дальнейших исследованиях включать в работу от одного до четырех замкнутых гидродинамических контуров.

Отличием настоящей работы от описанных выше исследований является тестирование циркуляционного контура при работе нескольких циркуляционных петель, имеющих один источник тепла и несколько теплообменников для отвода тепла. Такое исследование дополняет и расширяет существующие данные, полученные в работе [10], и позволяет выявить закономерности развития естественной конвекции, которые можно упустить при анализе процессов циркуляции на реальных реакторных установках с несколькими контурами циркуляции теплоносителя.

Конструкция многопетлевого контура

Исследования проводились в контуре, состоящем из четырех петель, представляющих собой вертикальные цилиндрические каналы с постоянным внутренним диаметром (внутренний диаметр каналов – 35 мм, толщина стенок – 1,5 мм). Петли контура соединяются наверху, в контуре присутствует источник теплоты и четыре теплообменника для охлаждения. Восходящая линия циркуляционной системы имеет расширительный бак, горизонтальные линии, выходящие из бака (длина – 750 мм), горизонтальные линии, к которым подводится тепло и опускные линии (длина – 3078 мм). Расстояние между участками нагрева и охлаждения – 2860 мм. Объем контура с теплоносителем равен 0,022 м³.

В нижней части восходящей линии стенда присутствует источник тепла в виде модели ТВС. Модель ТВС состоит из семи вертикальных стержней, имитирующих тепловыделяющие элементы (номинальной мощностью 2 кВт, линейной мощностью 4,35 кВт/м), расположенных в шестигранной решетке с относительным шагом 1,4 между центрами стержней.

Установка позволяет проводить исследования с одной, двумя, тремя и четырьмя петлями, так как есть возможность отключать отдельные петли, установив заглушки. Для каждой возвратной петли возможна регулировка расхода с помощью дросселя.

Схема стенда приведена на рис. 1.

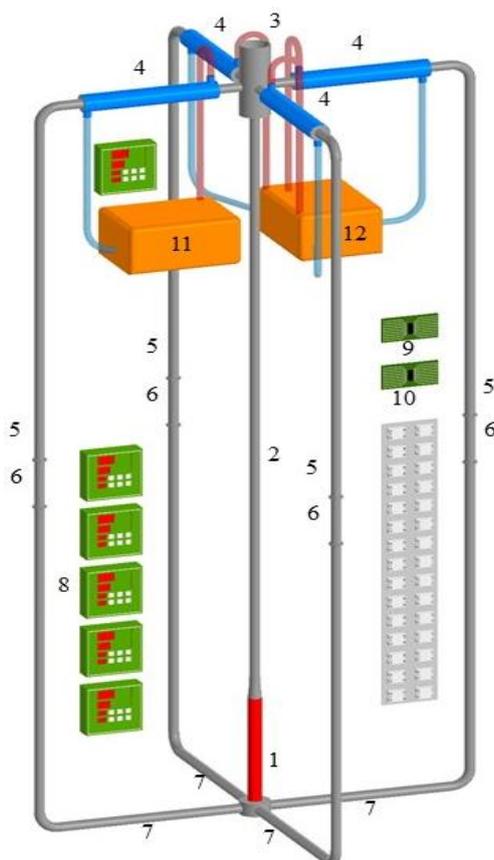


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – модель-имитатор ТВС; 2 – восходящая линия; 3 – верхний бак; 4 – теплообменники;
 5 – нисходящие петли; 6 – участки для подключения измерительных систем;
 7 – горизонтальные участки; 8 – измерители-регуляторы ТРМ-138; 9 – контроллеры;
 10 – система управляемых реле; 11, 12 – баки с теплоносителем второго контура

Fig. 1. Test bench diagram:

- 1 – fuel assembly simulator; 2 – ascending line; 3 – upper tank; 4 – heat exchangers; 5 – descending loops;
 6 – sections for connecting measuring systems; 7 – horizontal sections; 8 – TRM-138 measuring and control devices; 9 – controllers; 10 – controlled relay system; 11, 12 – tanks with second-circuit coolant

Нагретый источником тепла (1) теплоноситель проходит подъемную трубу (2), расширительный бак (3), охлаждающие теплообменники (4), нисходящие участки (5) с измерительными приборами (6) и нижние горизонтальные участки с дросселями (7). Температуры жидкометаллического и охлаждающего контуров измеряются подключенными к измерителям-регуляторам ТРМ-138 (8) термопарами типа *хромель-алюмель*, установленными в потоках. Все элементы стенда соединяются хомутами. Материал стенда – нержавеющая сталь 12Х18Н10. Нагрев и поддержание температуры обеспечивается нагревательным проводом, подключенным к системе реле (10), управляемой контроллерами (9), температура стенок элементов контролируется термопарами. Теплоноситель поступает в источник тепла через боковые входы через патрубки. Поток теплоносителя, поступающего в зону нагрева, распределяется равномерно. Охладители (система отвода тепла) расположены на верхних горизонтальных участках петель. Каждый теплообменник состоит из трубы с внутренним диаметром 35 мм и толщиной стенки 1,5 мм, установленной в кожухе с внешним диаметром 70 мм и толщиной стенки 2 мм, в котором протекает теплоноситель второго контура (рис. 2а).

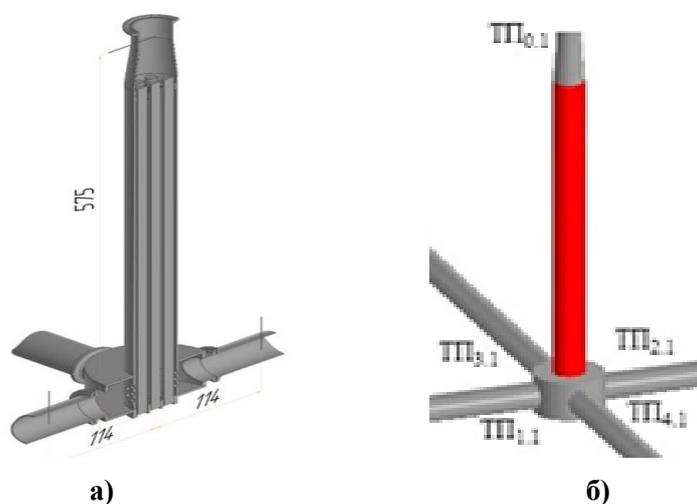


Рис. 2. Схема модели-имитаторе ТВС и места установки термопар

Fig. 2. Diagram of fuel assembly simulator and the installation locations of thermocouples

Все трубы покрыты теплоизоляцией, подвод и отвод теплоносителя второго контура к теплообменнику осуществлялся через патрубки, между ними и трубами установлены термопары во втулках. Температура элементов стенда во время эксперимента поддерживается постоянной, для этого использовалось 19 нагревательных линий и 21 термопара для контроля температуры. Все элементы восходящей линии стенда покрыты базальтовой теплоизоляцией толщиной 0,2 м с коэффициентом теплопроводности 0,30-0,48 Вт/(м·°С)). Теплообменники и возвратные петли изолировались высокотемпературной каучуковой изоляцией толщиной 0,13 м и коэффициентом теплопроводности 0,032-0,040 Вт/(м·°С). Установленные на входе и выходе модели ТВС термопары (ТП_{0,1}, ТП_{1,1}, ТП_{1,2}, ТП_{1,3}, ТП_{1,1}, ТП_{1,4}) измеряют температуру теплоносителя в центре сечения (рис. 2б). Термопара, измеряющая температуру теплоносителя на выходе из источника тепла, установлена на расстоянии 575 мм от его нижней части. Температура теплоносителя во входных патрубках измерялась на расстоянии 114 мм от оси источника тепла. Для измерения скорости теплоносителя были использованы двухсенсорные корреляционные датчики, установленные по центру каждой из возвратных петель (конструкция и принцип работы их работы приведены в [10]). До заполнения труб свинцово-висмутым теплоносителем подающая магистраль предварительно нагревалась до 150 °С с последующей стабилизацией температуры. После достижения всеми элементами стенда, теплоносителем в установленном сверху плавильном баке и подающей магистралью заданных температур открывался подающий вентиль, и стенд заполнялся до необходимого уровня.

После стабилизации температуры теплоносителя во всех контурах начинал проводиться эксперимент. Первым этапом было плавное увеличение подачи тепла от источника к теплоносителю для формирования циркуляционного потока.

Результаты тестирования

Основные эксперименты были проведены в двух- и четырехпетлевых режимах работы циркуляционного контура. Так, на рис. 3 показано изменение температуры на входе и выходе из источника тепла, при работе двух петель, энерговыделение составляло 1,8 кВт. После включения тепловыделения примерно 25 мин наблюдается колебательный процесс, связанный с формированием течения свинцово-висмутового теплоносителя, после чего работа контура стабилизируется. Поток теплоносителя разделяется после расширительного бака, проходит через теплообменники стока тепла и попадает в нисходящие линии. Температура в каждой нисходящей линии становится ниже, чем на выходе из источника тепла. Температуры в обеих нисходящих линиях практически одинаковы (рис. 3). При установившемся режиме естественной циркуляции температура на выходе из модели ТВС составляет 175 °С, на входах в источник тепла колеблется в диапазоне 150-152 °С.

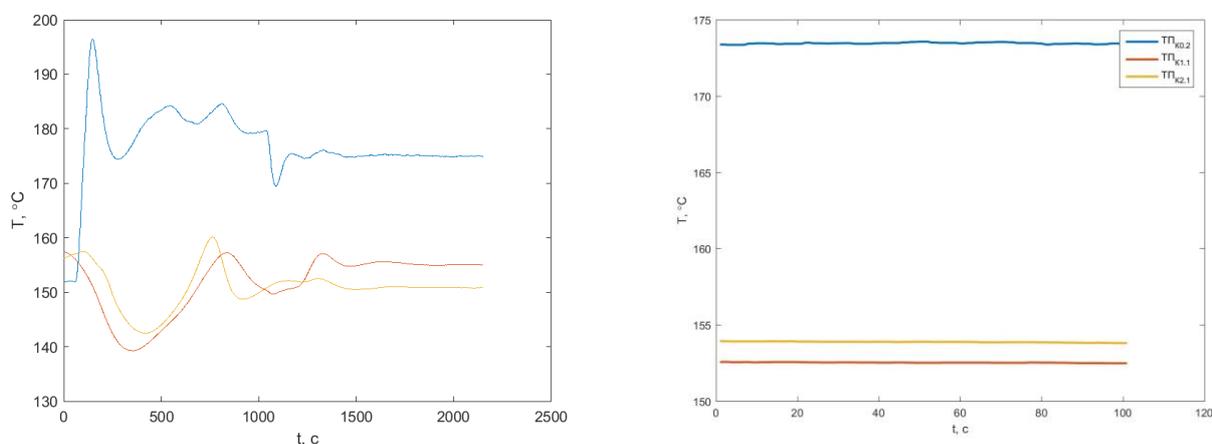


Рис. 3. Изменение температуры теплоносителя на выходе и входе в модель ТВС при использовании двух циркуляционных петель:

- a) включение источника тепловыделения и выход на стационарное состояние;*
b) изменение температуры при стационарном режиме ЕЦ. Подводимая мощность 1,8 кВт

Fig. 3. Change in the coolant temperature at the outlet and inlet of the fuel assembly model using two circulation loops:

- a) switching on the heat source and reaching a steady state;*
b) change in temperature during the steady state of the EC. Supplied power 1.8 kW

При увеличении мощности тепловыделения до 2,7 кВт температура на выходе из источника тепла составляет 195 °С. Температуры на входах в ТВС составляют значения, колеблющиеся в диапазоне 163-164 °С (рис. 4а). На рис. 4б показана зависимость от времени температур теплоносителя после источника теплоты и на выходе из обеих петель при мощности энерговыделения в ТВС равной 3,6 кВт. Сохраняется период установления циркуляционного течения длительностью около 25 мин. В установившемся режиме температура на выходе из обеих петель находится в диапазоне 173-175 °С, на выходе из источника теплоты: 212 °С.

Скорость теплоносителя в каждой из циркуляционных петель помимо ее измерений оценивалась по тепловому балансу, учитывая физические свойства свинцово-висмутового теплоносителя. С увеличением подводимой мощности увеличивается средняя скорость циркуляции теплоносителя, что подтверждается измерениями.

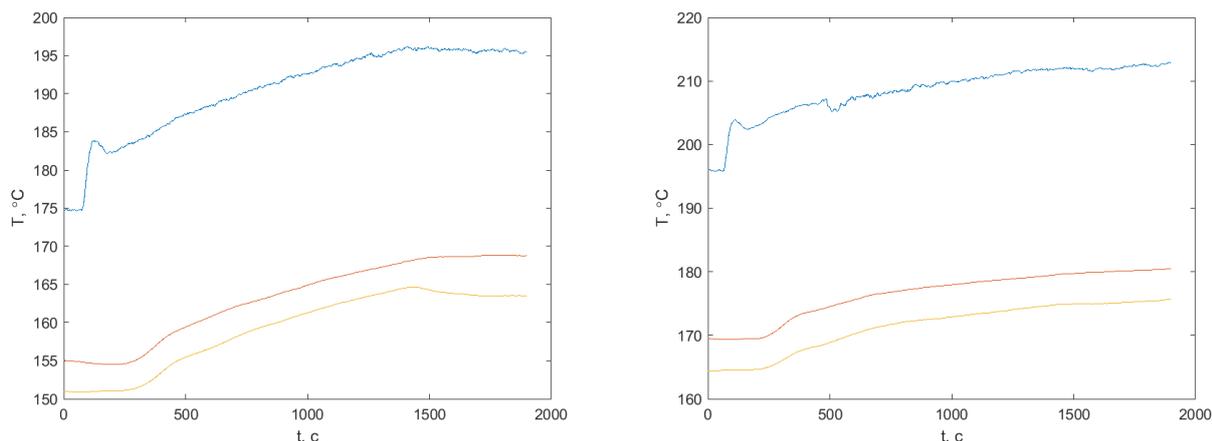


Рис. 4. Тестирование двухпетлевой конфигурации контура, режимы включения тепловыделения и выхода на стационарное состояние ЕЦ:
Подводимая мощность: а) 2,7 кВт, б) 3,6 кВт

Fig. 4. Testing of the two-loop circuit configuration, modes of switching on heat release and reaching the steady state of the natural circulation:
Supplied power: a) 2.7 kW, b) 3.6 kW

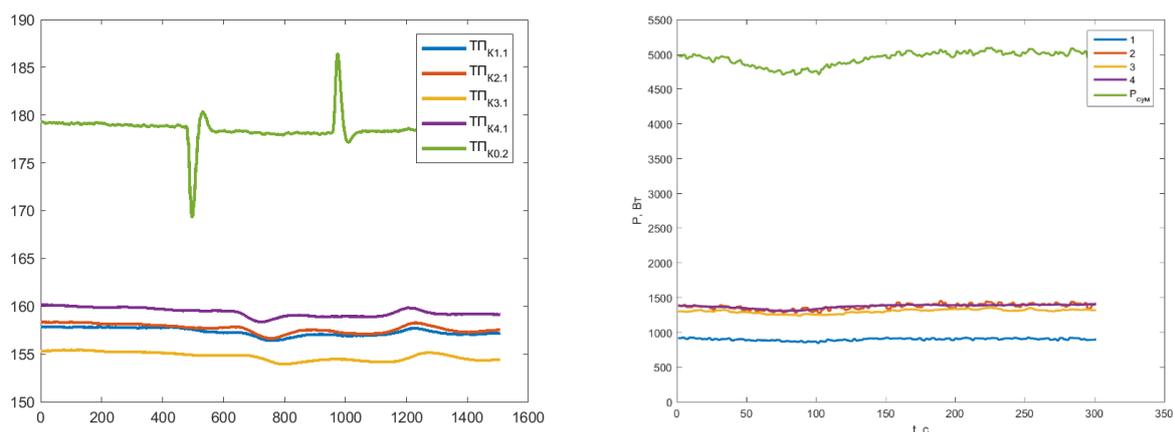


Рис. 5. Стационарная работа четырехпетлевого контура:
а) температуры теплоносителя на выходе и входе в модель ТВС, подводимая мощность 3,6 кВт;
б) мощность, снимаемая с каждой петли и суммарная отводимая мощность, подводимая мощность 5 кВт

Fig. 5. Stationary operation of a four-loop circuit:
a) coolant temperatures at the outlet and inlet of the fuel assembly model, supplied power 3.6 kW;
b) power removed from each loop and the total removed power, supplied power 5 kW

Для создания устойчивой циркуляции теплоносителя во всех четырех петлях подводимая энергия была соответственно увеличена в два раза. Циркуляция формировалась при минимальной мощности 3,6 кВт (рис. 5а). Температура теплоносителя на выходе из источника тепла составляла около 180 °С. Температуры теплоносителя на входе в модель ТВС (соответственно на выходе из четырех нисходящих участков) находились в диапазоне 155-158 °С. С повышением количества подведенного тепла к теплоносителю, наблюдалась устойчивая работа контура при этом наблюдался и рост температур теплоносителя во всех четырех циркуляционных петлях (рис. 6). Необходимо отметить, что баланс подводимого и отводимого от каждой петли тепла всегда сохранялся (рис. 5б). При увеличении подводимой мощности до 6,4 кВт (рис. 6) температуры на входе источник тепла повышались до 170-175 °С, а разница температур на входе и выходе из модели ТВС составляла около 30 °С.

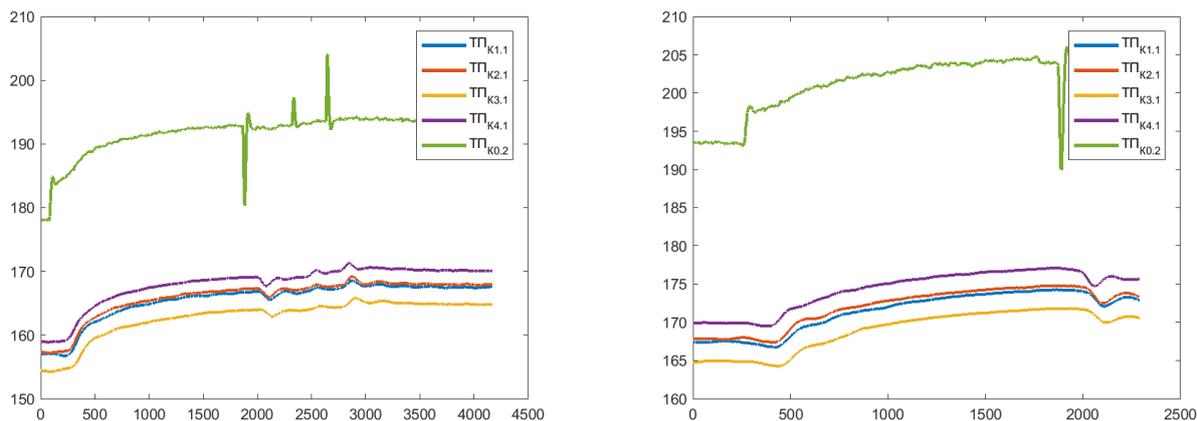


Рис. 6. Тестирование четырехпетлевой конфигурации контура, режимы включения тепловыделения и выхода на стационарное состояние ЕЦ: подводимая мощность: а) 5 кВт, б) 6,4 кВт

Fig. 6. Testing of the four-loop circuit configuration, modes of switching on heat release and reaching the steady state of the natural circulation: Supplied power: a) 5 kW, b) 6.4 kW

Было проведено тестирование особенностей развития естественной циркуляции теплоносителя в условиях неравномерного теплосъема на разных циркуляционных петлях. Для создания такого режима создавалось условие отвода меньшего количества тепла от одной из циркуляционных петель по сравнению с другими. Обеспечение неравномерных условий создавалось с помощью управления начальной температурой теплоносителя второго контура.

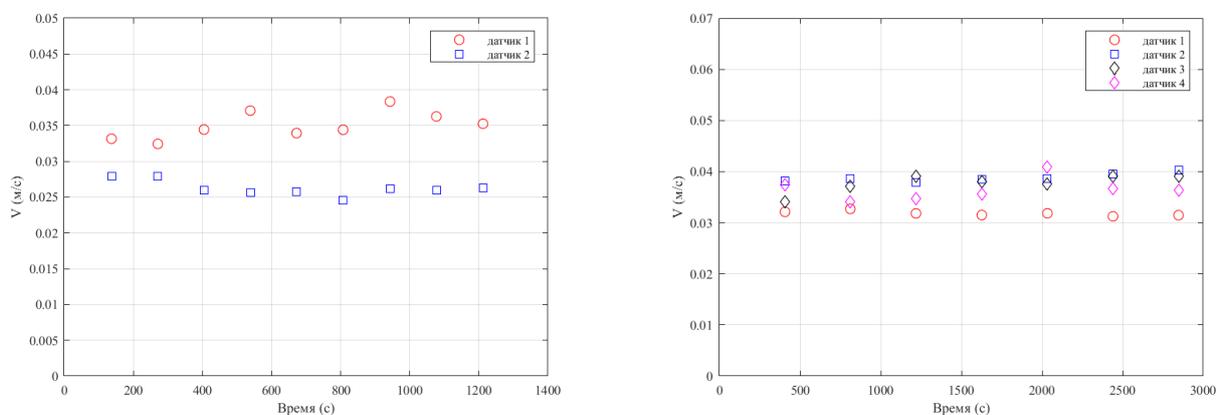


Рис. 7. Скорости теплоносителя в каждой петле: а) двухпетлевая схема циркуляции, мощность энерговыделения 1,8 кВт; б) четырехпетлевая схема циркуляции, мощность энерговыделения 5 кВт

Fig. 7. Speeds of the coolant in each loop: а) two-loop circulation scheme, energy release of 1.8 kW; б) four-loop circulation scheme, energy release of 5 kW

В режиме с перекосом отвода тепла в двухпетлевом режиме мощность, выделяемая в модели-имитаторе ТВС, составляла 1,8 кВт. Снимаемая с первой петли мощность составляла около 1100 Вт, снимаемая со второй – около 800 Вт. Это приводило к образованию различия температуры на входах в ТВС с первой и второй петлей на величину порядка 2-3 °С. Изменялась и скорость теплоносителя в петлях: при установившемся режиме течения скорость теплоносителя в первой циркуляционной петле составляла 0,035 м/с, во второй петле – 0,025 м/с

(рис. 7). При проведении тестирования в четырехпетлевом режиме мощность энерговыделения составляла 5 кВт, теплосъем в одной из петель был равен 1000 Вт, для остальных петель 1300 Вт. Результаты распределения скорости теплоносителя при перекосе снимаемой мощности в четырехпетлевой конфигурации приведены на рис. 7б. Для петли с ухудшенным теплосъемом в стационарном режиме наблюдается снижение скорости циркуляции жидкометаллического теплоносителя до величины порядка 0,03 м/с. Для петель без вынужденного ухудшения теплообмена скорость потока на оси нисходящих линий выше примерно на 30 %.

Заключение

Выполнено тестирование работы гидродинамического контура, имеющего четыре циркуляционные петли, соединенных в верхней камере – баке с теплоносителем: источник тепловыделения в виде имитатора ТВС и четыре теплообменника, отводящие тепло в режиме ЕЦ. Конструкция контура позволяла проводить тестирования при разном количестве подключений циркуляционных петель и нарушении теплосъема в одной из них.

Установлено, что если теплоноситель циркулирует по нескольким петлям, то сохраняется температурный напор, необходимый для поддержания естественной циркуляции в общем контуре. Суммарное тепло, отводимое через петли, соответствует общему теплоподводу. Зависимости расхода теплоносителя и температурного напора от мощности нагрева в случае многопетлевой системы близки к линейным.

Библиографический список

1. **C. Bertani**, A. Bersano, M. De Salve, G. Sobrero. Experimental analysis of the start-up of a natural circulation loop in single and two-phase flow. Nuclear Engineering and Design, V. 385, № 15 December 2021, 111532.
2. **A. Borgohain**, et. al. Natural circulation studies in a LBE loop for a wide range of temperature. Nuclear Engineering and Design, V. 300. 2016, Pp. 358-375.
3. **Leitai Shi**, et.al. Experimental study on the natural circulation capability and heat transfer characteristic of liquid lead bismuth eutectic. Progress in Nuclear Energy. V. 115. 2019, Pp. 99-106.
4. **D. Grishchenko**, M. Jeltsov, K. Kööp, A. Karbojian, W. Villanueva, P. Kudinov. The TALL-3D facility design and commissioning tests for validation of coupled STH and CFD codes. Nuclear Engineering and Design. V. 290, 15 August 2015, Pages 144-153.
5. **K. Kööp**, M. Jeltsov, D. Grishchenko, P. Kudinov. Pre-test analysis for identification of natural circulation instabilities in TALL-3D facility // Nuclear Engineering and Design 314 (2017) 110-120.
6. **D. Grishchenko**, A. Papukchiev, C. Liud, C. Geffrayc, M. Polidorie, K. Кр, M. Jeltsov, P. Kudinov. TALL-3D open and blind benchmark on natural circulation instability. Nuclear Engineering and Design 358 (2020) 110386
7. **Chen-Ch. Yue**, Liu-Li Chen, Ke-Feng Lyu, Yang Li, Sheng Gao, Yue-Jing Liu, Qun-Ying Huang. Flow characteristics of natural circulation in a lead-bismuth eutectic loop. Nucl. Sci. Ttch. (2017) 28:39.
8. **L. Shi**, G.H. Su, F. Zhu, T. Bing, Y. Hou, Sh. Wei, Ch. Wang, W. Tian, S. Qiu, J. Wu. Experimental study on the natural circulation capability and heat transfer characteristic of liquid lead bismuth eutectic. Progress in Nuclear Energy 115 (2019) 99-106.
9. **Xin Wang**, Bo Kuang, Wenjun Hu, Pengrui Qiao, Jieming Hou. Natural circulation with LBE as a working substance // Progress in Nuclear Energy, Volume 153, November 2022, 104428.
10. **Прибатурин Н.А.** Экспериментально – расчетное исследование естественной циркуляции свинцово – висмутового теплоносителя / Н.А. Прибатурин и др. // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 4 (143). С. 72-81.

*Дата поступления
в редакцию: 10.01.2025*

*Дата принятия
к публикации: 20.02.2025*