

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ (05.14.03)

УДК 621.039.51

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-19-25

Экспериментальное исследование теплогидравлических процессов в модели тепловыделяющих сборок с микротвэлами

А.В. Захаренков, И.А. Тупотилов, К.В. Журавлев

Выполнены разработка конструкции рабочего участка (РУ) и модернизация гидравлического контура экспериментального стенда ТВС-МЭИ для исследования гидродинамики и теплообмена в тепловыделяющей сборке с микротвэлами. Технологические характеристики стенда соответствуют эксплуатационным параметрам установок с реакторами типа ВВЭР-1000 (давление — до 16 МПа, температура теплоносителя — до 350 °С). Внутреннее тепловыделение в засыпке металлических шариков обеспечено высокочастотным индукционным нагревом. Созданы технология уплотнения рабочего участка, выполненного из высокопрочной алундовой керамики, и специальное прижимное устройство для удержания засыпки. Тепловыделяющие сборки с микротвэлами по внешним геометрическим параметрам полностью соответствуют традиционным сборкам со стержневыми тепловыделяющими элементами. Разработана технология монтажа, вывода и герметизации термопар (ТП) на рабочем участке. Проведены экспериментальные исследования по определению потерь давления и коэффициента гидравлического сопротивления цилиндрической шаровой засыпки при следующих режимных параметрах теплоносителя: $P = 2 \dots 7$ МПа, $G = 0,05 \dots 0,50$ кг/с. В ходе обработки выявлены и построены зависимости потерь давления от массовой скорости теплоносителя, а также гидравлического сопротивления засыпки шаровых элементов от числа Рейнольдса. Получены первые экспериментальные данные о распределении температуры внутри шаровой засыпки. Основная цель поставленных экспериментов заключалась в возможности нагрева данного рабочего участка выбранным методом.

Ключевые слова: микротвэлы, температурное поле, потери давления, коэффициент гидравлического сопротивления.

Для цитирования: Захаренков А.В., Тупотилов И.А., Журавлев К.В. Экспериментальное исследование теплогидравлических процессов в модели тепловыделяющих сборок с микротвэлами // Вестник МЭИ. 2021. № 3. С. 19—25. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-19-25.

An Experimental Study of Thermohydraulic Processes in the Model of a Fuel Assembly with Micro Fuel Elements

A.V. Zakharenkov, I.A. Tupotilov, K.V. Zhuravlev

The test section design of the TVS-MEI experimental setup intended for studying the hydrodynamics and heat transfer in a fuel assembly with micro fuel elements is developed, and the setup hydraulic circuit is modernized. The setup process characteristics correspond to the operational parameters of VVER-1000 reactor plants (a pressure up to 16 MPa and coolant temperature up to 350°C). The internal heat release in the bed of metal pebbles is obtained by high-frequency induction heating. A technology for compacting the test section made of high-strength alundum ceramics and a special clamping device for holding the bed were developed. The fuel assemblies with micro fuel elements have the outer geometrical parameters fully identical with those of the conventional assemblies with fuel rods. A technology for installing, wiring, and sealing thermocouples in the test section has been developed. Experimental studies aimed at determining the pressure loss and flow friction coefficient for a cylindrical pebble bed were carried with the following coolant operating parameters: $P = (2 \dots 7)$ MPa and $G = (0.05 \dots 0.5)$ kg/s. In processing the obtained experimental results, the dependences of pressure loss on the coolant mass velocity and the pebble bed flow friction on the Reynolds number were identified and plotted. The first experimental data on the temperature distribution in the pebble bed are obtained. The main objective of the experiments was to determine the possibility of heating the considered test section by using the chosen method.

Key words: micro fuel elements, temperature field, pressure loss, flow friction coefficient.

For citation: Zakharenkov A.V., Tupotilov I.A., Zhuravlev K.V. An Experimental Study of Thermohydraulic Processes in the Model of a Fuel Assembly with Micro Fuel Elements. Bulletin of MPEI. 2021;3:19—25. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-19-25.

Введение

Все более актуальным становится создание энергоэффективных ядерных установок с повышенным уровнем безопасности. В большинстве реакторных установок атомных электрических станций (АЭС) используются стержневые тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы). Основной недостаток данных тепловыделяющих сборок (ТВС) заключается в сравнительно низких значениях удельной объёмной мощности реакторных установок и высоких температурах в центре ТВЭЛов. Практически все имеющиеся возможности для повышения удельной мощности рабочего участка (РУ) и понижения температуры топлива (повышения безопасности АЭС) при использовании традиционных ТВС исчерпаны.

Циркониевый сплав разработан специально для ТВЭЛов реакторов типа ВВЭР и РБМК и обладает очень хорошими нейтронно-физическими характеристиками и высокой коррозионной стойкостью в воде при нормальных условиях эксплуатации. Трубки, выполненные из него, хорошо удерживают продукты деления, что гарантирует высокий уровень радиационной безопасности в нормальном режиме. Однако в аварийных режимах его температура превышает 1000 °С, при этом прочность сплава резко снижается. В результате возможен выход продуктов деления из ТВЭЛов. Последний барьер для радиоактивности в реакторах типа ВВЭР — герметичная защитная оболочка из предварительно напряженного железобетона. Реакторы типа РБМК не имеют такой защитной оболочки, и именно поэтому радиационные последствия чернобыльской катастрофы были столь тяжелыми.

Увеличение требований к системам безопасности ядерных реакторов ведет к росту стоимости АЭС. Довольно давно было разработано решение, существенно повышающее безопасность эксплуатации ядерных реакторов. Оно заключалось в использовании тепловыделяющие сборки с микротвэлами (МТ) [1, 2].

Шаровой микротвэл состоит из топливного ядра, покрытого защитной оболочкой. Оболочка разделяет топливо и теплоноситель и обеспечивает удержание продуктов деления ядер [3, 4]. Микротвэлы из-за малого размера (диаметр 0,6...4,2 мм) обладают высокой удельной площадью поверхности и характеризуются низкой температурой топлива в центре твэла. Шаровые микротвэлы имеют низкую тепловую инерционность, у их оболочки нет швов, они прочные и стойкие, надежно удерживают продукты деления, могут работать при больших степенях выгорания топлива. Микротвэлы можно перегружать без остановки реактора.

Технология изготовления микротвэлов разработана для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов в 1960-е гг. В высокотемпературных реакторах шаровые твэлы в нормальных режимах работают при температуре 1500 °С и при этом эффективно удерживают продукты деления. В аварийных режимах они со-

храняют эту способность и при температуре 2000 °С. Последние исследования показали, что микротвэлы с оболочками из пироуглерода и карбида кремния могут применяться в реакторах типа ВВЭР, поскольку имеют необходимую коррозионную стойкость в водяном и водопаровом теплоносителях в рабочем режиме ВВЭР и аварийных режимах [4, 5], в воде сверхкритических параметров, совместимы с реакторными материалами. Ядерная и радиационная безопасность даже при такой аварии, как отрыв dna корпуса реактора, обеспечивается отводом тепла окружающим воздухом за счет его естественной циркуляции через активную зону.

Исследованию гидродинамики и теплообмена в шаровой засыпке посвящено большое количество работ, но эксперименты проходили в узких интервалах рабочих параметров. Это ведет к необходимости выполнения дополнительных исследований в указанной области.

Тепловыделяющие сборки с микротвэлами по внешним геометрическим параметрам полностью соответствуют традиционным сборкам со стержневыми тепловыделяющими элементами. В [6, 7] продемонстрировано развитие концепции применения микротвэлов в водо-водяных реакторах, а также описаны испытания микротвэлов на прочность и коррозионную стойкость. Результаты анализа гидродинамики и теплообмена через шаровые засыпки при осевом течении жидкости представлены в [8, 9], однако систематизированных работ в широком диапазоне режимных параметров, вплоть до реакторных, в научной литературе крайне мало.

Цель настоящей публикации — экспериментальное определение коэффициентов гидравлического сопротивления и распределения температур в шаровой засыпке в исследуемом диапазоне параметров теплоносителя.

Описание экспериментальной установки

На кафедре общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ» в 2010 г. введен в эксплуатацию экспериментальный стенд для исследования гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках и ТВС. Стенд универсален как по техническим характеристикам, так и возможностям применения для исследования тепло-гидравлических характеристик при течении теплоносителя в каналах различной геометрии и с разными системами нагрева.

На стенде проведена модернизация гидравлического контура с целью установки в нем рабочего участка — масштабной модели шаровой засыпки. Технологические характеристики стенда соответствуют эксплуатационным параметрам установок с реакторами типа ВВЭР-1000 (давление — до 16 МПа, температура теплоносителя — до 350 °С).

В стенд входят 4 основные системы:

- гидравлический контур, обеспечивающий циркуляцию теплоносителя через рабочий участок;

- система электротехнического оборудования, питающая все элементы стенда;
- система управления стендом как в ручном режиме, так и дистанционно с рабочего места оператора;
- система сбора и обработки информации с датчиками, установленными в различных точках гидравлического контура.

Гидравлический контур (рис. 1) представляет собой замкнутую одноконтурную герметически плотную циркуляционную систему, заполненную дистиллированной водой, с рабочим диапазоном давлений 0,1...16,0 МПа. Контур выполнен из труб, изготовленных из нержавеющей стали, и включает в себя насосы (ТА03D01, остальные не показаны на рис. 1), запорную и регулирующую арматуру (YA02S01, TA02S01, YP02S01), теплообменники (YD01W01, YA02W01, TA02W01), нагреватели (YA01W01, YA01W02, YP01W01) и рабочий участок (YA01B03). Циркуляция воды в контуре осуществляется центробежным насосом ЦЭН-149, обеспечивающим номинальный расход теплоносителя 8 м³/ч.

Рабочий участок представляет собой цилиндрическую засыпку шаровых элементов. Корпус рабочего участка выполнен из высокопрочной алундовой керамики. В данных экспериментах микротвэлы моделировались металлическими шариками диаметром 2 мм, а объемное тепловыделение достигалось за счет индукционного нагрева РУ. Засыпка надежно фиксируется в кассете благодаря специально разработанным прижимным устройствам. Эскиз конструкции рабочего участка представлен на рис. 2.

Расход теплоносителя в контуре регулируется частотным преобразователем, посредством которого осуществляется электропитание привода циркуляционного насоса ЦЭН-149, либо с помощью вентиля, расположенного на байпасной линии. Избыточное давление в контуре контролируется с помощью термокомпенсатора (ТК).

Необходимая температура воды на входе в рабочий участок создается и поддерживается двумя последовательно включенными контурными электронагревателями.

Из напорного патрубка ЦЭН-149 теплоноситель поступает в измерительный участок (ИУ), где измеряется его общий расход. Затем поток разделяется на две части. Заполнение и подпитка контура выполняется насосом-дозатором из бака с запасом дистиллированной воды.

Приведем основные технологические и эксплуатационные параметры теплофизического стенда:

- теплоноситель — дистиллированная вода;
- максимальные давление — 16 МПа и температура теплоносителя — 350 °С;
- номинальная мощность тепловыделения на рабочем участке — 150 кВт;
- массовый расход теплоносителя — 0,005...1,36 кг/с;
- потребляемая электрическая мощность — 450 кВт и общий расход охлаждающей воды — 25,6 м³/ч на максимальных тепловых нагрузках.

Внутреннее тепловыделение в засыпке металлических шариков обеспечивалось высокочастотным индукционным нагревом. Высокочастотная система нагрева строится на базе высокочастотного генератора ВЧГ 9-60/0,44, состоящего из блока питания с тиристорным регулятором и блока с генераторной лампой. Генератор обеспечивает на выходе колебательную мощность 60 кВт при частоте 0,44 МГц.

Для проведения теплофизических измерений подготовлены девять термопар типа ХА, размещенные в различных точках по высоте и радиусу шаровой засыпки. Королек термопары выполнен лазерной сваркой, вследствие чего исходная структура свариваемых металлов получила минимальные повреждения. Внутренние механические напряжения в термоэлектродах после лазерной сварки минимальны. Это приводит к незначительным искажениям номинальной статической характеристики преобразования термопары. Для минимизации возмущений, вносимых в поток, изготовлены термопары с диаметром кабеля 0,3 мм. Температуру теплоносителя внутри шаровой засыпки измеряли пять хромель-алюмелевых кабельных термопар, остальные четыре запаены в стенки металлических шариков, образуя измерительный элемент. Описанный измерительный элемент изготавливали следующим образом: на установке точечной лазерной сварки, оборудованной цифровым микроскопом с большим увеличением, в шарике простреливали сквозное отверстие. В него помещали термопару и запаивали высокотемпературной пайкой с припоем, образуя при этом надежный контакт со стенкой шарика.

Калибровка термопар проходила с помощью промышленного сухоблочного калибратора-термостата FLUKE 9170 по стандартной методике. Для каждой термопары была получена индивидуальная линейная градуировочная характеристика, аппроксимированная линейными уравнениями. Коэффициенты полученных уравнений использованы в программе системы сбора и обработки информации для получения температурных показаний.

Схема измерительного элемента дана на рис. 3.

Результаты экспериментальных исследований

Выполнена серия экспериментов по определению потерь давления на рабочем участке. Высота засыпки составляла 180 мм. Опыты проводили при следующих режимных параметрах теплоносителя:

- давление — $p_{тн} = (2...7)$ МПа;
- массовый расход — $G_b = (0,05...0,5)$ кг/с;
- температура на РУ — $T = (20...150)$ °С.

Цель поставленных экспериментов — получение зависимости коэффициента гидравлического сопротивления шаровой засыпки от параметров потока. На рисунках 4, 5 изображены зависимости потерь давления на РУ от рассчитанной массовой скорости теплоносителя $\Delta p = f(\rho U)$ при 3 и 6 МПа, соответственно.

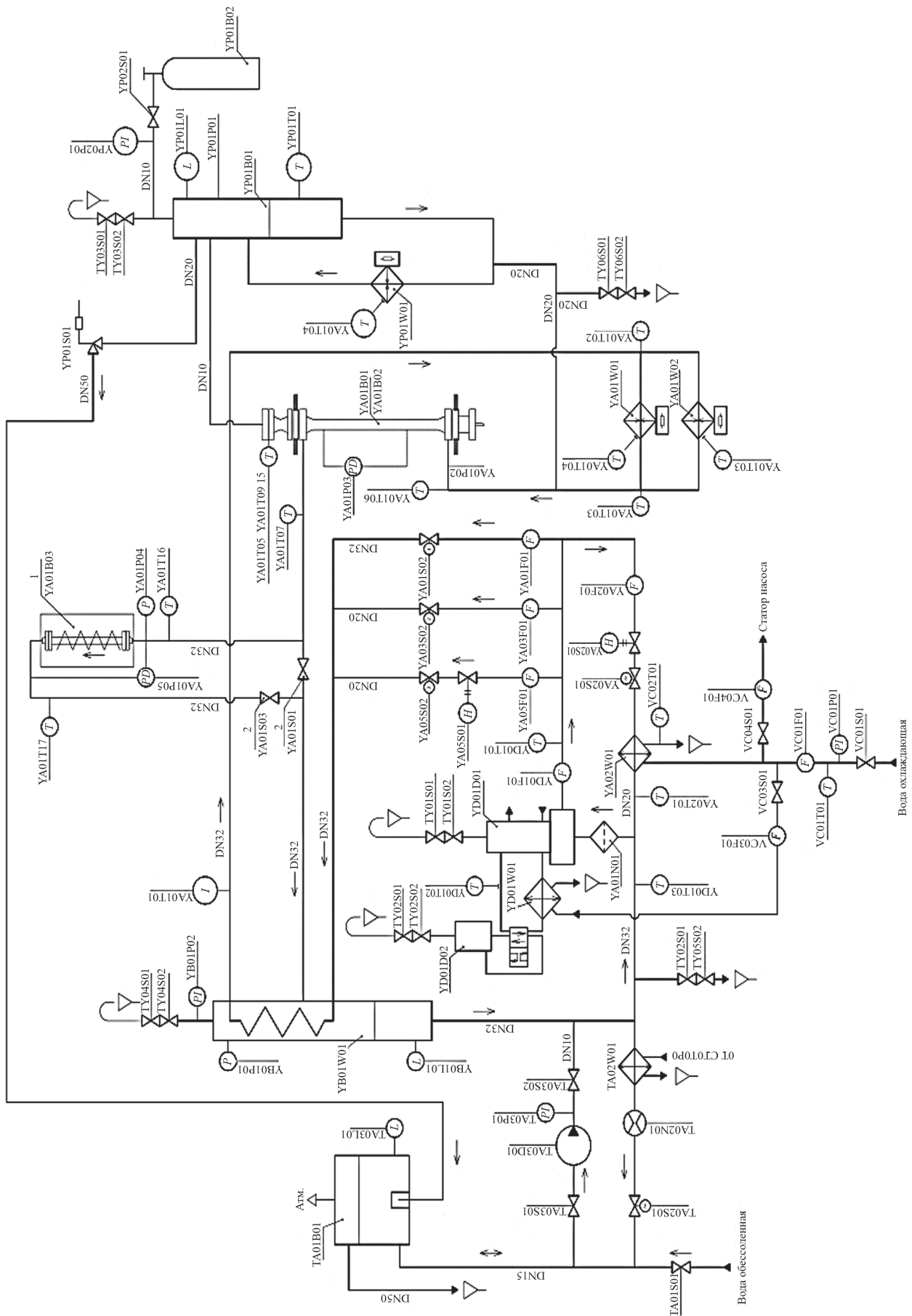


Рис. 1. Принципиальная схема гидравлического контура

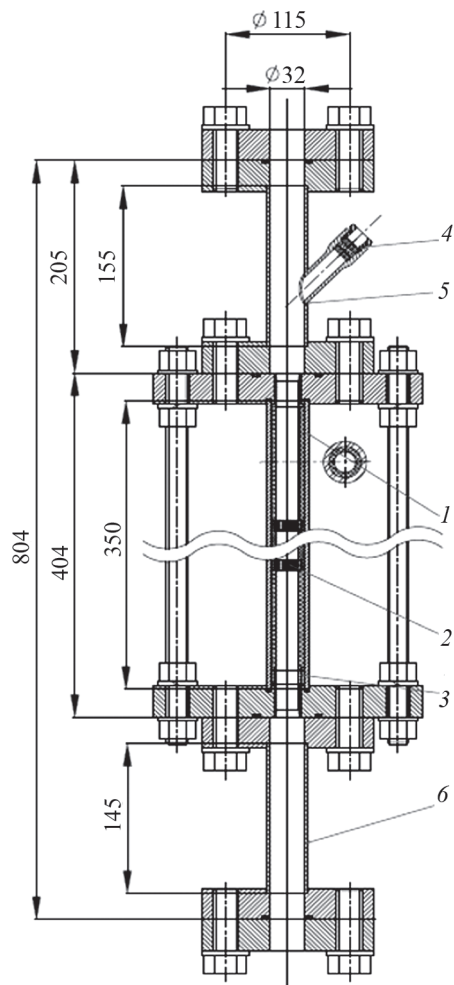


Рис. 2. Эскиз конструкции рабочего участка:

1 — радиопрозрачный керамический корпус РУ; 2 — перфорированная решетка; 3 — прижимная пружина; 4 — уплотнение для ТП; 5 — канал для подвода ТП; 6 — участок канала

По формуле Дарси–Вейсбаха вычислен коэффициент гидравлического сопротивления шаровой засыпки:

$$\xi = \frac{d_{ш}}{H} \frac{2\Delta p}{\rho U^2},$$

где $d_{ш}$ — диаметр моделей шаровых микротвэлов; H — высота засыпки; Δp — потери давления; ρ — плотность; U — скорость потока.

С целью верификации экспериментальных данных сделан расчет коэффициента гидравлического сопротивления по формуле Богоявленского [10]:

$$\xi = \frac{0,54}{\varepsilon^4} \left(1 + \frac{10}{Re_{стр}^{0,7}} + \frac{100}{Re_{стр}} \right),$$

где $Re_{стр} = \frac{0,45Re}{\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)}}$ — число Рейнольдса для струи;

ε — пористость засыпки.

На рисунке 6 представлены зависимости гидравлического сопротивления шаровой засыпки (определенного

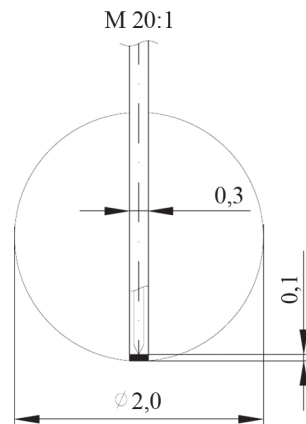


Рис. 3. Схема измерительного элемента

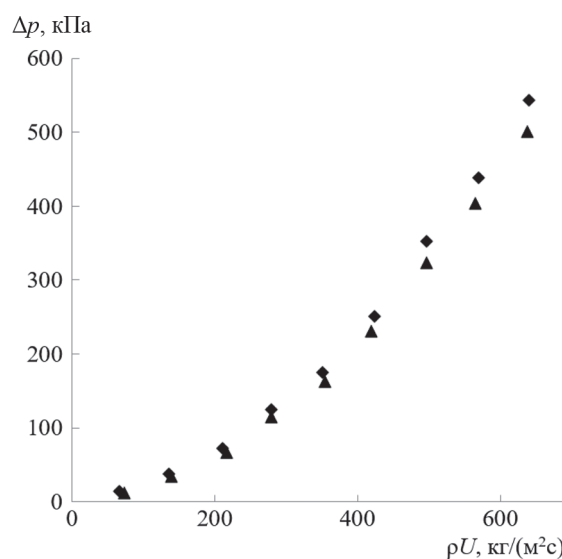


Рис. 4. Зависимость потерь давления от массовой скорости теплоносителя при 3 МПа на входе в РУ:

◆ — $T_{тн} = 30$ °С; ▲ — $T_{тн} = 150$ °С

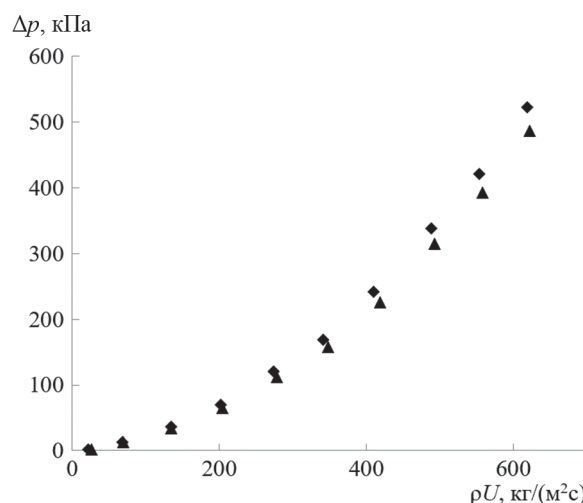


Рис. 5. Зависимость потерь давления от массовой скорости теплоносителя при 6 МПа на входе в РУ:

◆ — $T_{тн} = 30$ °С; ▲ — $T_{тн} = 150$ °С

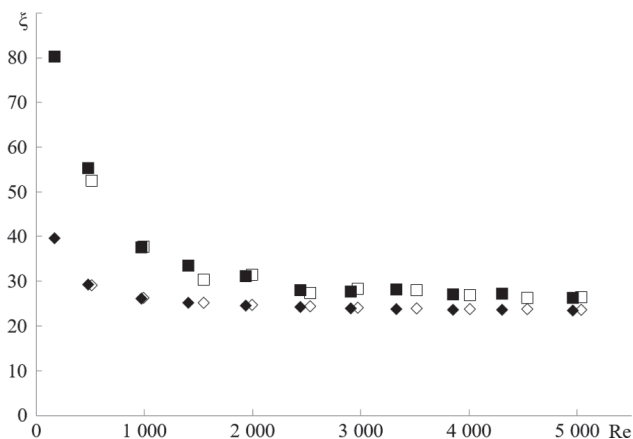


Рис. 6. Зависимость гидравлического сопротивления шаровой засыпки от числа Рейнольдса при 3 (□, ◇) и 6 (■, ◆) МПа: ■, □ — по формуле Богоявленского; ◆, ◇ — из экспериментальных данных

из эксперимента и по формуле Богоявленского) от числа Рейнольдса $\xi = f(Re)$ для одного режима ($T_{тн} = 100\text{ }^\circ\text{C}$). Светлые маркеры соответствуют давлению $p_{тн} = 3\text{ МПа}$, а черные — $p_{тн} = 6\text{ МПа}$.

Как следует из данных рис. 6, влияние давления теплоносителя существенно при течении с малыми скоростями ($Re < 3000$) и последовательно сглаживается при более высоких скоростях потока. В режимах течения с малыми числами Re расчеты по формуле Богоявленского дают значительные завышения к значению гидравлического сопротивления.

На рисунке 7 предложены схема канала с кассетой и сечения рабочего участка с местами закладки термопар. В конструкции установлено по три термопары в каждое сечение. В каждом сечении (A-A и C-C) одна термопара смонтирована в шарик, а две измеряют температуру воды в засыпке. В сечении B-B две термопары смонтированы в шарики, а одна определяет температуру теплоносителя в засыпке.

Проведено несколько экспериментов по теплообмену, их цель — установка возможности нагрева данного рабочего участка выбранным методом. Построена зависимость температуры шариков от координаты расположения термопар в засыпке $T = f(x)$ (рис. 8).

Данные экспериментальных исследований показали устойчивый и равномерный нагрев всего РУ при выбранных режимных параметрах. Некоторая разница в показаниях термопар (сечения B-B) объясняется, в первую очередь, интенсивным обогревом периферийных шариков, в отличие от расположенных в центре. Это является недостатком выбранного средства нагрева.

Литература

1. Пономарев-Степной Н.Н. и др. Перспективы развития микротвэлов в ВВЭР // Атомная энергия. 1999. Т. 86. № 6. С. 443—449.
2. Гребенник В.Н., Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н. Высокотемпературные газоохладяе-

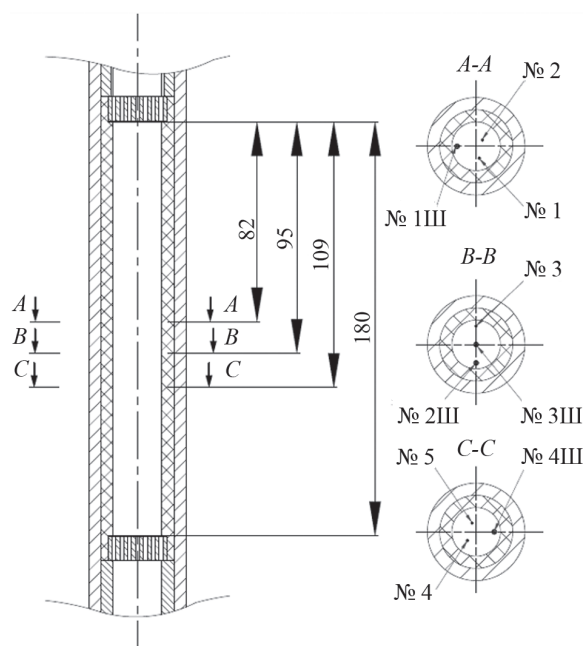


Рис. 7. Схема кассеты и сечения установки термопар

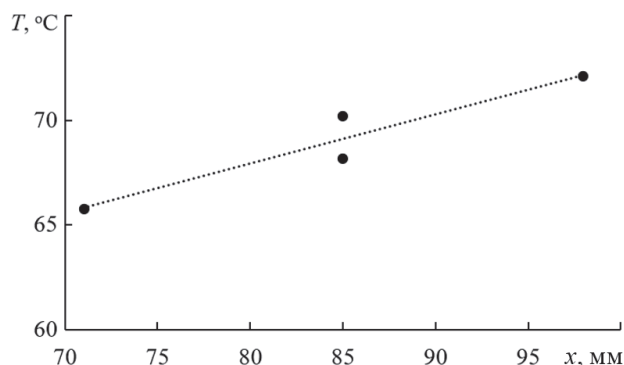


Рис. 8. Зависимость $T = f(x)$ температуры шариков от координаты установки термопар в засыпке

Выводы

Проведена модернизация РУ. Получены экспериментальные данные о коэффициенте гидравлического сопротивления и распределении температур в шаровой засыпке в рассматриваемом диапазоне параметров засыпки и теплоносителя.

В ходе обработки выявлены и построены зависимости потерь давления от массовой скорости теплоносителя, а также гидравлического сопротивления засыпки шаровых элементов от числа Рейнольдса. Созданные конструкция рабочего участка и методики позволяют проводить дальнейшие исследования при более высоких параметрах теплоносителя.

References

1. Ponomarev-Stepnoy N.N. idr. Perspektivy Razvitiya Mikrotvelov v VVER. Atomnaya Energiya. 1999;86;6: 443—449. (in Russian).
2. Grebennik V.N., Kukharkin N.E., Ponomarev-Stepnoy N.N. Vysokotemperaturnye Gazookhlazhdaemye

мые реакторы — инновационное направление развития атомной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 2008. С. 10—47.

3. Гольцев А.О., Кухаркин Н.Е., Мосевичкий И.С., Пономарев-Степной Н.Н. Концепция безопасного корпусного водо-водяного реактора с тепловыделяющими блоками на основе микротвэлов ВТГР // Атомная энергия. 1993. Т. 75. № 6. С. 417—423.

4. Ерохин Б.Т., Лозовецкий В.В. Моделирование тепловых и газодинамических процессов в пористых тепловыделяющих средах при двухфазном течении и кипении // Вестник МГУПИ. Серия «Машиностроение». 2014. № 55. С. 71—82.

5. Пелевин Ф.В., Лозовецкий В.В., Пономарев А.В. Безопасность энергодвигательной ядерной установки с шаровыми микротепловыделяющими элементами // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2017. № 3. С. 45—59.

6. Филиппов Г.А. и др. Оценка стойкости защитных покрытий микротвэлов в парогазовой среде при взаимодействии с конструкционными материалами // Атомная энергия. 2009. Т. 106. Вып. 3. С. 153—158.

7. Фонарев Б.И. и др. Возможные пути создания одноконтурного энергоблока АЭС с легководным теплоносителем сверхкритического давления и активной зоной на основе микротопливных элементов // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Обеспечение безопасности АЭС». 2011. Вып. 30. С. 146—158.

8. Авдеев А.А. и др. Гидродинамическое сопротивление при течении двухфазной смеси в шаровой засыпке // ТВТ. 2003. Т. 41. № 3. С. 432—438.

9. Xianke Meng, Zhongning Sun, Guangzhan Xu. Singlephase Convection Heat Transfer Characteristics of Pebblebed Channels with Internal Heat Generation // Nuclear Eng. and Design. 2012. V. 252. Pp. 121—127.

10. Богоявленский Р.С. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978.

Реакторы — Innovatsionnoe Napravlenie Razvitiya Atomnoy Energetiki. M.: Energoatomizdat, 2008:10—47. (in Russian).

3. Gol'tsev A.O., Kukharkin N.E., Mosevitskiy I.S., Ponomarev-Stepnoy N.N. Kontsepsiya Bezopasnogo Korpusnogo Vodo-vodyanogo Reaktora s Teplovydelyayushchimi Blokami na Osnove Mikrotvelov VTGR. Atomnaya Energiya. 1993;75:6:417—423. (in Russian).

4. Erokhin B.T., Lozovetskiy V.V. Modelirovanie Teplovykh i Gazodinamicheskikh Protseessov v Poristykh Teplovydelyayushchikh Sredakh pri Dvukhfaznom Tечenii i Kipenii. Vestnik MGUPI. Seriya «Mashinostroenie». 2014;55:71—82. (in Russian).

5. Pelevin F.V., Lozovetskiy V.V., Ponomarev A.V. Bezopasnost' Energodvigatel'noy Yadernoy Ustanovki s Sharovymi Mikroteplovydelyayushchimi Elementami. Problemy Bezopasnosti i Chrezvychaynykh Situatsiy. 2017;3:45—59. (in Russian).

6. Filippov G.A. i dr. Otsenka Stoykosti Zashchitnykh Pokrytiy Mikrotvelov v Parogazovoy Srede pri Vzaimodeystvii s Konstruktsionnymi Materialami. Atomnaya Energiya. 2009;106:3:153—158. (in Russian).

7. Fonarev B.I. i dr. Vozmozhnye Puti Sozdaniya Odnokonturnogo Energobloka AES s Legkovodnym Teplositelem Sverkhkriticheskogo Davleniya i Aktivnoy Zonoy na Osnove Mikrotoplivnykh Elementov. Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Obespechenie Bezopasnosti AES». 2011;30:146—158. (in Russian).

8. Avdeev A.A. i dr. Gidrodinamicheskoe Soprotivlenie pri Tечenii Dvukhfaznoy Smesi v Sharovoy Zasypke. TVT. 2003;41;3:432—438. (in Russian).

9. Xianke Meng, Zhongning Sun, Guangzhan Xu. Singlephase Convection Heat Transfer Characteristics of Pebblebed Channels with Internal Heat Generation. Nuclear Eng. and Design. 2012;252:121—127.

10. Bogoyavlenskiy R.S. Gidrodinamika i Teploobmen v Vysokotemperaturnykh Yadernykh Reaktorakh s Sharovymi Tvelami. M.: Atomizdat, 1978. (in Russian).

Сведения об авторах:

Захаренков Александр Валентинович — кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: zaharenkov.alex@mail.ru

Тупотилов Иван Андреевич — инженер факультета довузовской подготовки НИУ «МЭИ», e-mail: ivan.tupotilov@yandex.ru

Журавлев Кирилл Вячеславович — студент второго курса магистратуры Института тепловой и атомной энергетики НИУ «МЭИ», e-mail: a24317@yandex.ru

Information about authors:

Zakharenkov Aleksandr V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: zaharenkov.alex@mail.ru

Tupotilov Ivan A. — Engineer of the Pre-university Training Faculty, NRU MPEI, e-mail: ivan.tupotilov@yandex.ru

Zhuravlev Kirill V. — Second-year Master's Student of Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering, NRU MPEI, e-mail: a24317@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 23.03.2020

The article received to the editor: 23.03.2020