

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ПУЧКА ТРУБ В ОБОСНОВАНИЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА РУ БРЕСТ-ОД-300

### АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты экспериментального изучения теплообмена при поперечном обтекании коридорного пучка труб модели парогенератора жидким металлом – сплавом свинца с висмутом. Выполнено сравнение экспериментальных значений коэффициентов теплообмена с расчётными. Показано, что расчётные формулы дают более высокие значения коэффициентов теплообмена по сравнению с экспериментом в области чисел Пекле от 150 до 450. Даны рекомендации по расчёту теплообмена при поперечном обтекании теплопередающих труб жидким металлом в рассмотренном диапазоне чисел Пекле. Данные при поперечном обтекании сплавом свинца с висмутом коридорного пучка теплопередающих трубок получены впервые.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В проекте реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 использован ряд новых, не опробованных ранее в практике ядерной энергетики систем, одной из которых является парогенерирующая установка при сверхкритических давлениях воды прямооточного типа без промежуточных смесительных устройств с использованием свинца в качестве теплоносителя [1]. Никогда ранее исследование теплообмена при сверхкритических давлениях воды в пучке труб такой сложной геометрии, омываемых жидким металлом, не проводились. Поэтому возникла необходимость в проведении экспериментальных работ на модели парогенератора в обоснование натурального парогенератора.

Для проведения экспериментальных исследований режимов работы парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 при номинальной и частичных нагрузках в ГНЦ РФ – ФЭИ создан стенд. Состав стенда обеспечивает структурное подобие моделируемых элементов установки.

В реальной конструкции движение греющего теплоносителя опускное – поток свинца с противоточным течением поперечно обтекает трубный пучок из витых коаксиально размещенных пакетов теплопередающих труб, в которых на выходе образуется перегретый пар требуемой температуры. Поскольку экспериментальная база не позволяет проводить опыты на модели трубного пучка поперечным обтеканием теплоносителя, было решено проводить эксперименты на модели парогенератора, состоящей из двух идентичных трехтрубных моделей с продольным обтеканием теплопередающих

трубок, навитых в виде змеевика с тем же углом подъема, что и в проекте натурального парогенератора. На участке труб с опускным движением питательной воды поток свинца продольно обтекает трубы. Этот поток свинца с расходом ~ 4 % основного потока поступает с напора циркуляционного насоса до нагревателя.

Поскольку движение свинца в модели парогенератора продольное, возникла проблема, связанная с переносом экспериментальных данных, полученных на модели, на натуральный парогенератор. Для уточнения влияния характера обтекания теплопередающей поверхности на теплообмен были изготовлены две методические модели – одна с продольным обтеканием теплопередающей трубки, другая – с поперечным обтеканием змеевика, [2]. Проведенные исследования по изучению коэффициента теплообмена со стороны свинца при продольном обтекании трубки и поперечном обтекании змеевика свинцом показали удовлетворительное согласие экспериментальных данных, полученных на модели при продольном обтекании, с расчетными рекомендациями и сильное расхождение экспериментальных данных, полученных на модели при поперечном обтекании змеевика свинцом.

Полученные в [2] результаты привели к необходимости проведения работ по поперечному обтеканию экспериментальной модели, состоящей из трех горизонтальных и пяти вертикальных рядов труб, соединенных общим коллектором. В силу ряда объективных причин в качестве греющего теплоносителя в данной модели использовался сплав свинца с висмутом, а не свинец, как в экспериментах [2].

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Эксперименты по исследованию теплообмена со стороны сплава свинца с висмутом проводились на стенде, технологическая схема которого представлена на рис.1. Установка состоит из двух циркуляционных контуров: со свинцово-висмутовым контуром, предназначенным для обогрева экспериментальной модели, и контура воды высокого давления. Давление в водяном контуре – до 25 МПа, температура воды – пара может изменяться от 150 до 500 °С. Подробное описание основных элементов контуров (насосы, подогреватели, компенсаторы объема и др.) можно найти в [3].

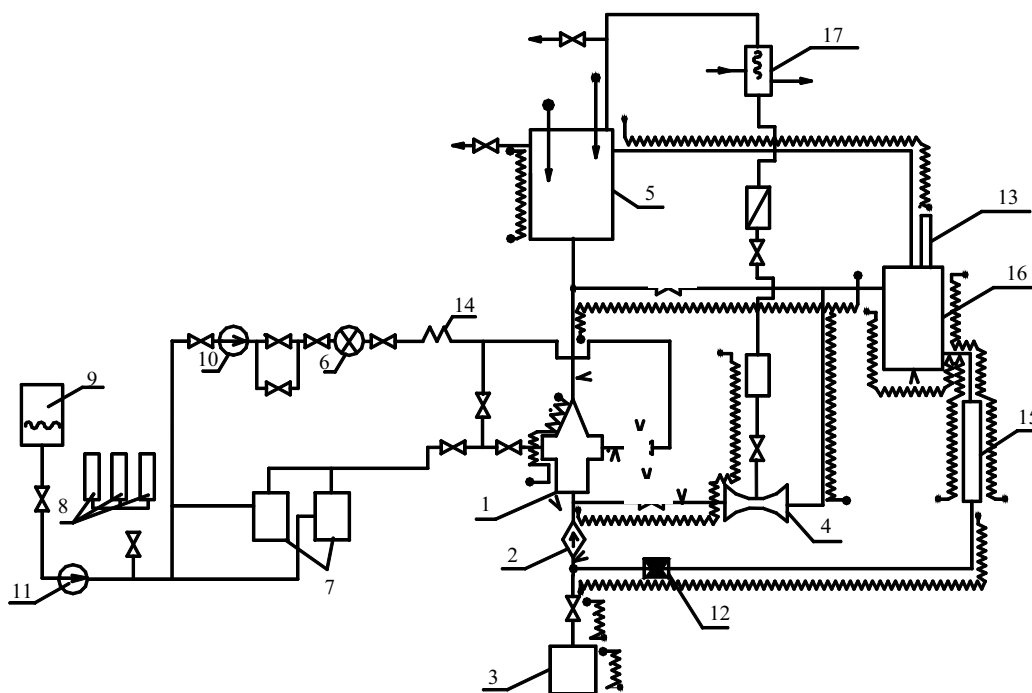


Рис.1. Схема экспериментального стенда:

1 – рабочий участок; 2 – электромагнитный насос ЭЦН-142; 3 – сливной бак Рв-В1; 4 – эжектор; 5 – мерный бак; 6 – расходомерная шайба; 7 – конденсаторы; 8 – компенсаторы; 9 – подпиточный бак; 10 – насос ЦН-2; 11 – подпиточный насос; 12 – магнитный расходомер; 13 – ДАК; 14 – петля подогрева; 15 – нагревательный элемент; 16 – регенератор сплава; 17 – конденсатор в системе регенерации сплава

Экспериментальная модель представляет собой пучок, состоящий из пяти рядов теплопередающих трубок диаметром 17х3 мм, сталь 10Х9НСМФБ, что соответствует натурной трубке, заложенной в проект парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300. Осевой (по высоте) шаг расположения трубок соответствует проектному и равен 25 мм. В радиальном направлении с шагом 32 мм установлены три ряда теплопередающих трубок. По проекту угол наклона теплопередающих трубок  $8^{\circ}$ , в данной модели принято горизонтальное расположение трубок, что идет в запас при теплогидравлических расчетах. Поскольку длина теплопередающих трубок 250 мм, дистанционирующие решётки в модели отсутствуют. Дистанционирование осуществляется трубными досками, в которых заделаны теплопередающие трубки. Схематично чертеж модели (вид спереди) показан на рис. 2. Первоначально входной участок (по тракту жидкого металла) был коротким. Для выравнивания профиля скорости теплоносителя была установлена специальная решётка, конструкция которой (диаметр отверстий, число отверстий, их взаиморасположение) была выбрана на основании оптимизационных расчетов. В последствии, оценив влияние этой решётки на гидравлические характеристики, было решено существенно, на 700 мм увеличить входной участок, т.е. протяженность зоны от входной решётки до первого ряда трубок.

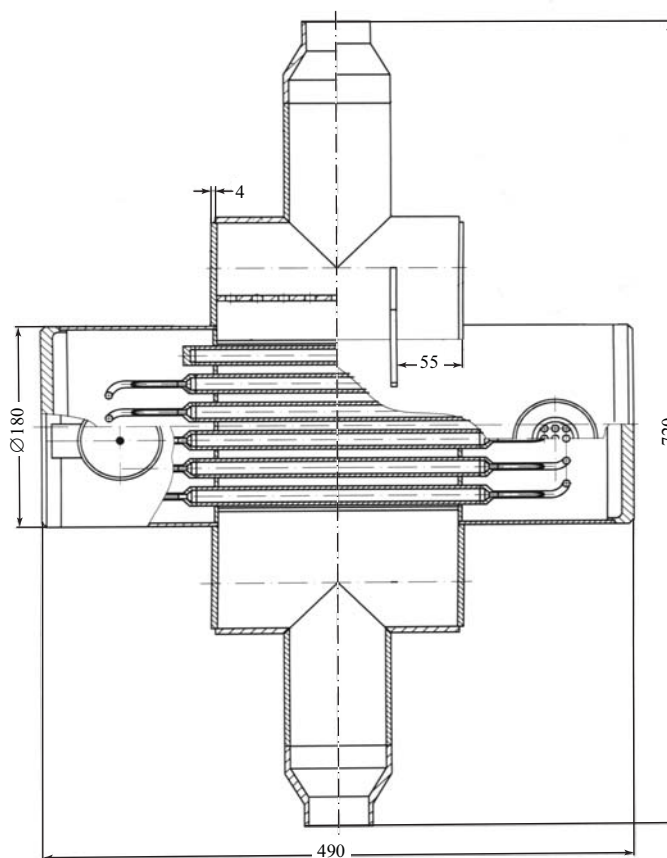


Рис. 2. Модель парогенератора. Вертикальный разрез

Во входной водяной камере температура воды по условиям экспериментов постоянна, для её измерения были установлены две хромель-алюмелевые термопары в чехлах. Для измерения выходной температуры воды в каждую из пятнадцати теплопередающих трубок были установлены хромель-алюмелевые термопары с диаметром королька 1 мм.

На входе и выходе по сплаву установлены по три хромель-алюмелевые термопары. Дублирование сделано на случай выхода из строя одной из термопар. Для измерения температуры в потоке сплава в затеснённом сечении перпендикулярно теплопередающим трубкам в потоке были установлены капилляры диаметром 4x0,5 мм, в которых установлены кабельные термопары диаметром 2 мм.

Циркуляция сплава осуществлялась центробежным насосом ЭЦН-142 напором 1,5 МПа и производительностью до 10 м<sup>3</sup>/час. Регенерация сплава проводилась эжектированием струй через аргоно-водородную смесь. Измерение расхода сплава осуществлялось магнитным расходомером и объёмным способом с помощью мерного бака.

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Перед проведением опытов по определению коэффициентов теплообмена со стороны сплава свинца с висмутом была выполнена серия тарировочных опытов. По результатам тарировки термодатчиков были определены различия в показаниях, которые не превышали 0,6 °С как для термодатчиков по воде, так и по свинцу. Тепловые потери с наружной поверхности модели парогенератора не превышали 0,5 кВт. При определении расхода воды вводилась поправка на показания, регистрируемые расходомерной шайбой, обусловленная тем, что температура воды при тарировке шайбы отличалась от температуры воды в зоне размещения расходомера в экспериментах.

Записи режимных параметров – входные и выходные температуры теплоносителей, давление по водяному тракту на входе и выходе моделей, мощности нагревателей, расходы воды и сплава – велись на жесткий диск компьютера. Подробно система сбора информации изложена в [2].

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование сплава свинца с висмутом в качестве греющего теплоносителя позволило проводить эксперименты при невысоких давлениях со стороны воды. Опыты проводились только при однофазном течении воды. В таком случае, как известно, коэффициент теплообмена со стороны воды рассчитывается с высокой точностью. Параметры по воде определялись, с одной стороны, условием не вскипания воды в теплопередающих трубках, и, с другой стороны, отсутствием замораживания сплава.

Давление в водяном контуре во всех режимах было постоянным и составляло 1,4 МПа. Расход воды в большинстве экспериментов также оставался неизменным и примерно равным 0,18 кг/с. Заметное уменьшение расхода по воде привело бы к переходу от турбулентного режима теплообмена со стороны воды к переходному, что вызвало бы определённые трудности в расчёте коэффициентов теплообмена. Не следует забывать, что в экспериментальном участке имело место отсутствие тепловой стабилизации потока по водяному тракту, ( $l/d$ ) < 20. Переход на существенно повышенные расходы по воде привел бы к заметному уменьшению подогрева по водяному тракту, величина которого в большинстве экспериментов не превышала 30 °С, что повлекло бы к увеличению погрешности в определении среднего температурного напора и соответственно коэффициентов теплообмена со стороны жидкометаллического теплоносителя.

Основной целью экспериментов являлось определение коэффициентов теплообмена при малых расходах жидкого металла, поэтому эксперименты проводились при изменении расхода металла от 3 до 25 кг/с. Входная температура сплава менялась от 178 до 248 °С в большинстве экспериментов, и лишь в тех режимах, когда температура воды на входе была снижена до 130 °С, входная температура металла варьировалась от 260 до 280 °С. Расхождение в тепловом балансе для подавляющего числа экспериментов (более 90 %) не превышало 7 %.

Опытные значения коэффициента теплоотдачи со стороны сплава определялись по соотношению

$$\alpha_{\text{сп}} = \frac{1}{\left( \frac{1}{k_l} - \frac{1}{2\lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} - \frac{1}{\alpha_{\text{в}} d_{\text{вн}}} \right)}, \quad (1)$$

где  $k_l$  – линейный коэффициент теплопередачи, вычисляемый по уравнению теплопередачи.

В рассматриваемых экспериментах имело место перекрестное течение теплоносителей. Поэтому средний температурный напор, входящий в уравнение теплопередачи, определялся с помощью поправочного коэффициента к температурному напору при противотоке, который определяется по графикам из [5] с учётом возможности перемешивания теплоносителя по сечению аппарата в пределах ходов между ними.

Коэффициент теплоотдачи со стороны воды рассчитывался по формуле [4]:

$$\text{Nu}_f = \frac{(\xi/8)\text{Re}_f \text{Pr}_f}{k + 4,5\sqrt{\xi(\text{Pr}_f^{2/3} - 1)}}, \quad (2)$$

где  $k = 1 + 900/\text{Re}$ ,  $\xi = 1/(1,82 \lg \text{Re} - 1,64)^2$ . Данная формула рекомендована для  $(x/d) > 50$ . Поскольку экспериментальный участок имеет обогреваемую длину 200 мм, а внутренний диаметр трубок 11 мм, т.е.  $(l/d) < 20$ , то была введена поправка на начальный термический участок, взятая из [5]:

$$c_x = 1 + 0,48(d/x)^{0,25} (1 + 3600/(\text{Re}(x/d)^{0,25})) \exp(-0,17x/d). \quad (3)$$

Полученные в опытах значения коэффициентов теплообмена являются усредненными по всем рядам пучков. Однако, как отмечается в [6], при поперечном обтекании труб коэффициент теплообмена не зависит от номера ряда пучка, в отличие от пучка с шахматным расположением труб. Поэтому можно полагать, что и в наших экспериментах, несмотря на то, что рабочий участок состоит из пяти рядов теплопередающих трубок, коэффициент теплообмена со стороны сплава не будет зависеть от ряда теплопередающих трубок, тем более что данный пучок раздвинутый (осевой шаг  $s/d > 1,4$ ).

Обработка данных позволила описать их следующей зависимостью:

$$Nu = 2,19 + 0,109 Re^{0,6} \pm 25\%. \quad (4)$$

На рис. 3 приведено сравнение экспериментальных значений коэффициентов теплообмена со стороны сплава с расчетами по формуле (4). Там же нанесена расчётная кривая

$$Nu = Re^{0,5}, \quad (5)$$

рекомендованная авторами [7,8] для расчета теплообмена в коридорном пучке труб.

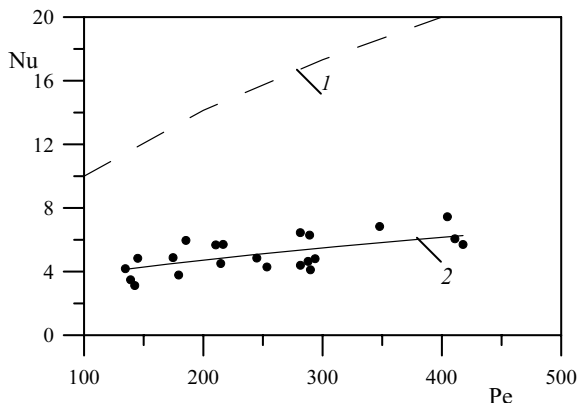


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных чисел Нуссельта: 1 – расчет по (5); 2 – расчет по (4); • – эксперимент

Значения коэффициентов теплообмена, определённые в нашем эксперименте, расположены ниже расчётных значений (5). Существенное отличие, на наш взгляд, обусловлено рядом причин. Во-первых, формула (5) получена для расчёта теплоотдачи при поперечном обтекании пучков труб жидким металлом при  $q = \text{const}$ , т.е. при обогреве трубы либо цилиндра прямым пропусканием тока. Но из литературы известно, например [6], что при  $q = \text{const}$  коэффициенты теплообмена выше, чем при  $t = \text{const}$ . Во-вторых, формула (5) получена для тесных пучков, когда  $s_1/d < 1,23$ , а  $s_2/d < 1,2$ . В наших опытах  $s_1/d = 1,88$  и  $s_2/d = 1,47$ . В-третьих, в экспериментах число Re изменялось от  $4,1 \cdot 10^3$  до  $1,54 \cdot 10^3$ , что относится к области переходного, а не развитого турбулентного течения. В [6] (рис. 7.11) данные, соответствующие малым числам Re, также лежат существенно ниже расчетной кривой (5).

На основе анализа температуры воды на выходе из теплопередающих трубок можно отметить следующее. В первом ряду по ходу сплава температура воды в центральной трубке на  $4 - 6$  °C была выше, чем в боковых трубках. Начиная со второго ряда такого расхождения не наблюдалось. Значения температуры, определённые из показаний термодатчиков, установленных по центру модели, изменялись от сечения к сечению примерно на один градус. Никаких аномалий в распределении температур ни в одном из опытов обнаружено не было.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведено исследование по изучению теплообмена при поперечном обтекании раздвинутого коридорного пучка трубок, в которых осуществлялась циркуляция воды, жидким металлом, представляющим собой сплав свинца с висмутом.

Определены средние значения коэффициентов теплообмена, которые оказались ниже расчётных, определённых по формуле  $Nu = Re^{0,5}$ .

Предложена формула по расчёту коэффициентов теплообмена при поперечном обтекании коридорного пучка труб восходящим потоком жидкого металла в области переходного режима течения при  $Re = 150 - 450$ :

$$Nu = 2,19 + 0,109 Re^{0,6}.$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Adamov E., Orlov V., Leonov V. et. The next generation of fast reactors // Nuclear Engineering and Design. 1997. V. 173. P. 143-150.
- Экспериментальное исследование теплообмена в жидком металле в обоснование парогенератора установки РУ БРЕСТ-ОД-300 / С.Г. Калякин, Н.С. Грачев, В.А. Грабежная и др. // Тр. РНКТ-3. М.: Издательство МЭИ, 2002. Т. 2. С. 159-162.
- Грачев Н.С., Кириллов П.Л., Мартынов П.Н. Парогенераторы с прямым контактом между жидким металлом и водой // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях: Тр. конф. Обнинск: 1999. Т. 2. С. 799-806.
- Петухов Б.С., Кириллов В.В. К вопросу о турбулентном течении жидкости в трубах // Теплоэнергетика. 1958. № 4. С. 63-68.
- Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под ред. П.Л. Кириллова. – 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1990.
- Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкометаллические теплоносители. – 2-е изд. М.: Атомиздат, 1967. С.190.
- Боришанский В.М., Андреевский А.А., Жилкина В.Б., Шнейдерман Л.Л. Теплоотдача при поперечном обтекании пучков труб жидким металлом / Жидкие металлы. Под ред. В.М. Боришанского и др. М.: Госатомиздат, 1963.
- Субботин В.И., Минашин В.Е., Денискин У.И. Теплообмен при поперечном обтекании пучков труб // ТВТ. 1963. Т. 1. № 2. С. 238-246.