

УДК 621.039.542

А.В. Безносков, А.С. Черныш, Р.А. Метринский, М.Ю. Котоврасов

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМАХ С ДАВЛЕНИЕМ, БЛИЗКИМ К АТМОСФЕРНОМУ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНТУРАМ, ОХЛАЖДАЕМЫМ СВИНЦОМ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрена проблема отвода тепла при переходных процессах в ЯЭУ и стендовых контурах, охлаждаемых свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем. Доказана эффективность применения теплообменного оборудования низкого давления для решения проблем теплоотвода.

Исследования проводились в неизотермическом контуре с циркуляцией свинцового теплоносителя при температуре 450 – 500°C, средней скорости теплоносителя в узком сечении зазора, при продольном обтекании теплообменной поверхности 0,1 – 1,05 м/с, числе Пекле 300 – 3300, термодинамической активности кислорода в свинце $1 - 10^{-3}$. Процессы в неизотермическом жидкометаллическом контуре с охладительным экспериментальным участком моделируют зависимость характеристик теплообмена от массопереноса примесей в контуре.

Ключевые слова: теплоноситель, теплообменник, теплоотвод, форсунка, свинец, циркуляция, конденсат воды, воздух, мощность, давление.

Обеспечение безопасного и эффективного отвода тепла остаточных тепловыделений зоны в стояночных и аварийных режимах реакторных установок с тяжелыми теплоносителями (ТЖМТ) необходимо при разработке проекта и для эксплуатации таких установок. Температура застывания (плавления) свинцового (326°C) и свинец-висмутового (125°C) теплоносителей (в этих условиях), при традиционном для водяных и газовых реакторных установок отводе тепла водой при давлении близком к атмосферному (при температуре до 100°C), приводит к застыванию ТЖМТ в теплообменнике и прекращению циркуляции через него теплоносителя.

В стояночных режимах в РУ с ТЖМТ при наличии остаточных тепловыделений в активной зоне, отвод этого тепла может производиться в парогенераторах или других теплообменниках только в случае их осушения и замены воды на пар, при соответствующем снижении давления в их водяных полостях для исключения застывания теплоносителя.

Перевод контуров и систем РУ с ТЖМТ в стояночные режимы и отвод остаточных тепловыделений активной зоны требует выполнения достаточно сложных и потенциально опасных операций, как и операций при их последующем вводе в действие.

В испытательных и сдаточных стендах, с главными циркуляционными насосами РУ с ТЖМТ, всегда необходимо отводить тепло, адиабатически вводимое в свинцовый или свинец-висмутовый теплоноситель при работе насосного агрегата, что традиционно требует введения в состав стенда сложных и потенциально опасных единиц оборудования. При создании таких теплообменников необходимо решить две задачи:

- разогрев до температуры, большей температуры плавления теплоносителя и поддержание его в теплообменнике при этой температуре (326°C и более для Pb);
- отвода тепла от теплоносителя, мощностью от нескольких сотен киловатт до мегаватта, при работе контура по прямому назначению.

Отвод тепла от ТЖМТ эффективным, традиционным теплоносителем-водой, во всем диапазоне её давлений до критического, может привести к застыванию свинца в теплообменнике. Для эвтектики свинец-висмут, для этого, необходима вода с давлением около десяти атмосфер для гарантированного исключения застывания ТЖМТ в полости теплообменника. Отвод тепла от ТЖМТ водой требует введения в состав стенда потенциально опасных систем циркуляции воды высокого давления.

Отвод тепла от ТЖМТ другим традиционным теплоносителем-воздухом, требует существенно больших поверхностей теплообмена ввиду не высокой его эффективности и соответственно, существенного увеличения объема жидкого металла в теплообменнике. Теплообменник должен иметь одновременно разветвленную систему электрообогрева или др. систему, обеспечивающую разогрев оборудования до температуры, гарантированно превышающую температуру плавления (застывания) ТЖМТ и поддержание его в разогретом состоянии, в режимах без адиабатического ввода тепла испытуемыми циркуляционными насосами.

Цель эксперимента

Цель испытаний, составной частью которых является настоящая работа – определение характеристик теплообмена и температуры свинцового теплоносителя, подтверждение возможности и целесообразности применения теплообменного оборудования низкого давления в стендовых и реакторных контурах. На данном этапе работ проводятся оценка эффективности данного вида теплообменного оборудования, применительно к исследовательским и промышленным стендам со свинцовым теплоносителем, а также выбор оптимального режима обтекания и конструктивной схемы теплообменной поверхности.

Экспериментальное определение локальных характеристик теплоотвода водо-воздушной смесью от высокотемпературного свинцового теплоносителя на стенде ФТ-7 НГТУ

Локальные характеристики теплоотвода измеряли при давлении, близком к атмосферному, температуре теплоносителя 450–480°C, расходе свинца 0,7–3,6 м³/ч (7–36 т/ч), средней скорости 0,1–1,05 м/с, что соответствовало числу Пекле $Re=320-3000$, при содержании термодинамически активного кислорода в свинце $10^{-3}-10^{-1}$ и наличии твердой фазы оксидов свинца. Расход охлаждающего воздуха составлял 3,1–6,3 м³/ч, что соответствовало средней скорости потока в теплообменном элементе 9–18,7 м/с. Расход воды, вводимой в дисперсном состоянии (в виде капель), составлял до 0,03 м³/ч, размер капель 0,1–1 мм.

Экспериментальный участок был выполнен в виде коаксиально расположенных труб ($d1/d2=2,35$). Внешняя труба длиной 1350 мм, диаметром 45 мм, толщиной 2,5 мм изготовлена из стали 12X18H10T. Внутренняя труба длиной 1674 мм, диаметром 17 мм, толщиной 3 мм изготовлена из ферритно-мартенситной стали 10X9HСМФБ. Движение свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре сверху вниз. Движение водо-воздушной смеси осуществлялось по центральной трубке. Перед вводом воздуха в экспериментальный участок установлена форсунка, в которой диспергируется вода и перемешиваются капли конденсата с воздухом. Выходной конец трубы с потоком водо-воздушной смеси сообщен без арматуры и гидрозатвора с атмосферой, в которую отводится образующаяся воздушно-паровая смесь.

Температуру свинцового теплоносителя на входе и выходе из экспериментального участка и смеси воздуха с водой и паром измеряли термомпарами ТМПК-ХА-1-18-500-2500-НН с диаметром спая 3 мм с индивидуальной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки $\pm 0,2^\circ\text{C}$). На расстоянии 1034 мм от входа свинца в кольцевом зазоре установлен термозонд, состоящий из восьми закрепленных на дистанционирующих пластинах микротермопар типа ТМПК-ХА-1-27-30-1500-2500-НН с диаметром спая 1.0 мм в капилляре из аустенитной стали с индивидуальной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки – $\pm 0,2^\circ\text{C}$) для измерения температуры в потоке теплоносителя.

В двух сечения по высоте на внутренней и внешней трубе, (на расстоянии от входа свинца в кольцевом зазоре 713 мм ("горячее" сечение) и 1013 мм ("холодное" сечение) соответственно) установлены две микротермопары на наружной поверхности трубы через 180° по периметру и две микротермопары на внутренней поверхности трубы для определения локального теплового потока. На наружной и внутренней поверхностях труб в указанных сечениях в пазы шириной $0,5\pm 0,03$ мм и глубиной $0,5\pm 0,1$ мм уложены и затем зачеканены с последующей металлизацией участка поверхности микротермопреобразователи.

Конструкция экспериментального стенда с циркуляционным контуром высокотемпературного свинцового теплоносителя выполнена согласно традиционным решениям.

Методика эксперимента

Эксперимент по определению локальных характеристик теплоотвода заключался в следующем. После разогрева и заполнения стенда рабочей средой устанавливалась циркуляция свинцового теплоносителя с требуемыми режимными параметрами. В экспериментальный участок подавали воздух, после чего фиксировались параметры стенда. Поэтапно в поток воздуха вводился конденсат воды с фиксацией параметров стенда. Характеристики теплообмена определялись в экспериментальном участке при фиксированных режимных параметрах стенда. Движение сред в контуре было противоточным, где свинец поступал сверху – вниз. Данный режим движения сред был выбран оптимальным с точки зрения законов теплообмена.

Результаты экспериментов

На рис. 1 показано изменение мощности теплоотвода при регулируемом изменении расхода воды в водо-воздушной смеси. Ввод конденсата воды в воздух существенно расширяет диапазон отводимой мощности с сохранением давления внутри теплообменной трубы близкого к атмосферному. Так, при содержании воды около 1% объемного расхода среды, отводимая мощность увеличилась от 0,1 до 4500 Вт.

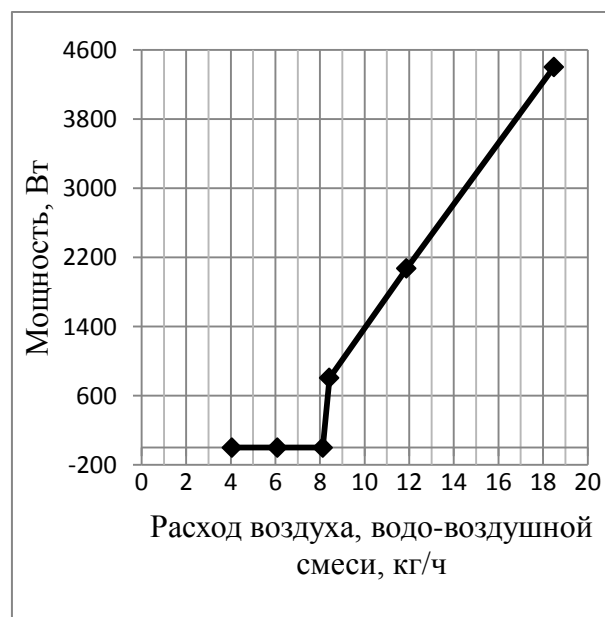


Рис. 1. Зависимость мощности, отводимой от высокотемпературного свинцового теплоносителя с температурой 450–480⁰С

На рис. 2 и рис. 3 показано распределение температур в поперечном (холодном) сечении экспериментального участка при фиксированных режимных параметрах стенда. Было выявлено влияние скорости теплоносителя и состава охлаждающей смеси на температуры вблизи теплообменной поверхности. При большой скорости обтекания профиль температур слабо зависит от перепада температур в стенке, а значит и от состава смеси. Однако при малых скоростях обтекания свинцом теплообменной поверхности, состав смеси достаточно сильно влиял на профиль температур. Эксперимент показал возможность локального замерзания свинца на теплообменную поверхность с числом Пекле $Pe < 600$, что может сказаться на теплоотводе в целом.

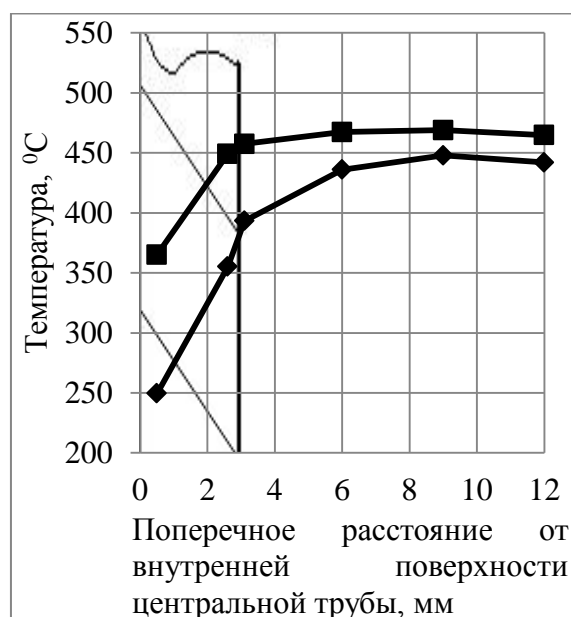


Рис. 2. Распределение температур в поперечном (холодном) сечении экспериментального участка при различных числах Re :
 1 – $Re=300$, $Q_v=0,02$ м³/ч; 2 – $Re=3100$, $Q_v=0,02$ м³/ч

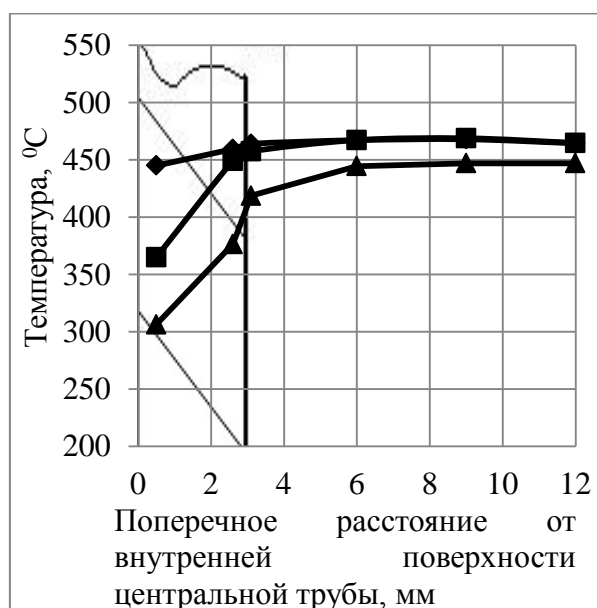


Рис. 3. Распределение температур в поперечном (холодном) сечении экспериментального участка при различном содержании воды в охлаждающей смеси:
 1 – $Re=300$, $Q_v=0,01$ м³/ч; 2 – $Re=300$, $Q_v=0,02$ м³/ч; 3 – $Re=300$, $Q_v=0,03$ м³/ч

На рис. 4 и рис. 5 показаны экспериментальные зависимости $Nu=f(Re)$ при содержании термодинамически активного кислорода в свинце в горячем и холодном сечениях соответственно $10^{-3} < a < 10^{-2}$. Анализ показал, что концентрация воды в смеси влияет на критерий Нуссельта – при повышении концентрации воды теплообмен незначительно ухудшается (рис. 4). Это может быть вызвано увеличением размеров капель воды в смеси и, как следствие – менее равномерное орошение поверхности теплообмена. Увеличение размера капель обусловлено особенностями работы форсунки. Этот эффект возможен также за счет увеличения термического сопротивления со стороны свинца в данной зоне. Теплообмен в холодном сечении оказался несколько хуже. Это различие может быть вызвано образованием от-

ложений дисперсных частиц примесей в пристенной области за счет термодиффузии. Слой отложений примесей в пристенной зоне этого участка поверхности обладает большим термическим сопротивлением, ухудшающим теплообмен.

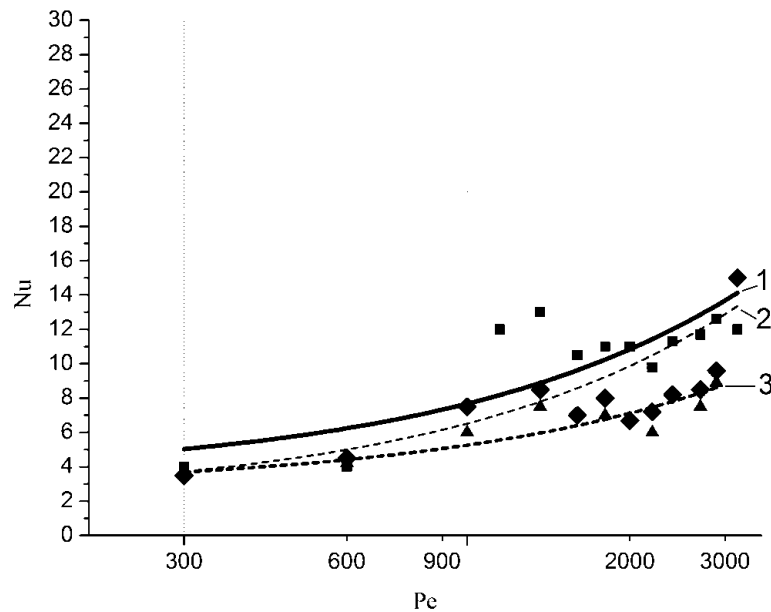


Рис. 4 Локальные характеристики теплообмена в "холодном" сечении.

Сводный график $Nu=f(Pe)$:

- 1 – ■ - $Nu, Q_B=0,01\text{м}^3/\text{ч}$; (—) $Nu=3,4+0,017Pe^{0,8}$;
 2 – ◆ - $Nu, Q_B=0,02\text{м}^3/\text{ч}$; (- -) $Nu=2+0,015Pe^{0,8}$;
 3 – ▲ - $Nu, Q_B=0,03\text{м}^3/\text{ч}$; (- -) $Nu=2,75+0,01Pe^{0,8}$

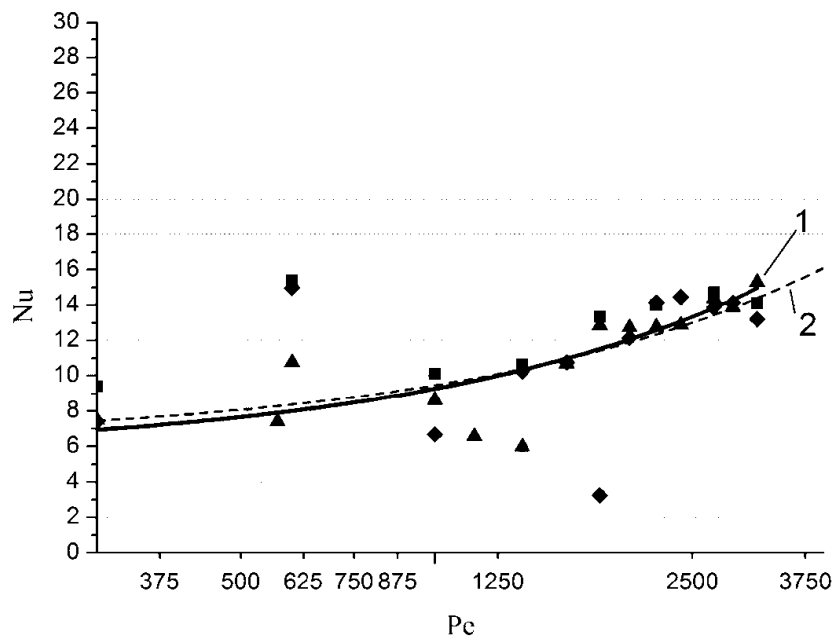


Рис. 5. Локальные характеристики теплообмена в "горячем" сечении.

Сводный график $Nu=f(Pe)$:

- - $Nu, Q_B=0,01\text{м}^3/\text{ч}$, ◆ - $Nu, Q_B=0,02\text{м}^3/\text{ч}$, ▲ - $Nu, Q_B=0,03\text{м}^3/\text{ч}$;
 1 – по формуле $Nu=5,5+0,015Pe^{0,8}$ – результат аппроксимации;
 2 – по формуле $Nu=6,2+0,013Pe^{0,8}$ – предложена ранее

Характеристики теплообмена коррелируют с полученными ранее [1, 2] при аналогичных условиях обтекания теплообменных поверхностей потоком свинцового теплоносителя, что свидетельствует об их достоверности.

Опыт использования теплообменника низкого давления для регулируемого охлаждения свинцового теплоносителя на установке испытаний и отработки моделей проточной части главного циркуляционного насоса реакторной установки БРЕСТ-ОД-300.

Эксплуатирующимся теплообменником данного типа является парогенератор системы отвода тепла на стенде ФТ-4. Его применение необходимо для отвода тепла, адиабатически вносимого осевым электронасосом на установке для испытаний и отработки моделей лопастной системы главного циркуляционного насоса установки БРЕСТ-ОД-300 в масштабе около 1:3. Основные характеристики стенда: расход до 200 м³/ч (до 2000 т/ч), температура свинцового теплоносителя 450–500°С, кратковременно до 550°С, напор осевого электронасоса свинцового контура – до 2,5 м. ст. свинца, контролируемая и регулируемая термодинамическая активность кислорода в свинце 10⁻⁵–100, в том числе при наличии твердой фазы оксидов свинца. Характеристики системы отвода тепла адиабатически, вносимого электронасосом стенда: максимальная мощность 50 кВт, плавно регулируемая температура свинца в контуре 440–550°С при мощности электродвигателя циркуляционного электронасоса стенда до 50 кВт, расход свинца через теплообменник (парогенератор) системы – до 200 м³/час (2000 т/ч), гидравлическое сопротивление парогенератора по свинцовому теплоносителю не более 0,5 м ст. свинца при расходе около 200 м³/ч.

Парогенератор включает четыре параллельно омываемых свинцом элемента в виде трубок Фильда. Воздух подается компрессором с расходом до 200 м³/ч, вода из расходных баков поступает самотеком в каждый из диспергаторов четырех элементов теплообменника через регулирующие вентили. Паровоздушная смесь из каждого теплообменного элемента поступает в коллектор, из которого без арматуры и гидрозатвора направляется в атмосферу воздуха за пределами помещений стенда.

Работа системы отвода тепла, адиабатически вносимого в контур электронасосом стенда ФТ-4 заключается в следующем. При циркуляции свинца для поддержания заданной температуры осуществляет теплоотвод водо-воздушной смесью. Свинец охлаждается от температуры на входе в теплообменник до температуры, заданной в программе испытаний (440–450°С). Температура на входе в теплообменник определяется адиабатически вносимой мощностью, соответствующей скорости вращения электронасоса, его напору и подаче

Длительная, более трех лет эксплуатация системы в составе стенда ФТ-4 подтвердила эффективную работу в диапазоне регулируемой температуры свинца 440–550°С при мощности электронасоса до 50 кВт, давлении воздушно-водяной (паровой) смеси, близком к атмосферному.

Выводы

Таким образом, экспериментально полученные характеристики теплообмена, зависимость $Nu=f(Re)$, коррелирующая с ранее полученной, подтверждают работоспособность экспериментальной установки и представительность данных. Экспериментальные исследования теплоотвода от свинцового теплоносителя водо-воздушным потоком с диспергированными до 1 мм и менее каплями воды в воздушном потоке, а также работа системы теплоотвода подтвердила эффективность, простоту, безопасность и экономичность данного метода теплоотвода.

Возможность тонкого регулирования отводимой мощности при сохранении безопасности установки расширяет область применения данного типа теплообменного оборудования.

Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Экспериментальные исследования характеристик контактного теплообмена свинцовый теплоноситель – рабочее тело / А.В. Безносков [и др.] // Атомная энергия. – М., 2005. – Т. 98. – Вып. 3. – С. 182–191.
2. **Безносков, А.В.** Теплоотдача от свинцового теплоносителя к продольно обтекаемой трубе / А.В. Безносков [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2006. – Вып. 3. – С. 83–90.

*Дата поступления
в редакцию 30.10.2016*

A.V. Beznosov, A.S. Chernysh, R.A. Metrinsky, M.Y. Kotovrasov

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN THE HEAT EXCHANGER WITH PRESSURE CLOSE TO ATMOSPHERIC PRESSURE, IN RELATION TO THE CIRCUIT, COOLED LEAD

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

Purpose: The purpose of the test, which is an integral part of the present work - definition of heat transfer and temperature characteristics in the lead coolant, confirmation of the possibility and feasibility of using heat exchange equipment of low pressure in the bench and reactor circuits.

Approach: The studies were conducted in non-isothermal loop circulation lead coolant at a temperature of 450–500°C, the average rate of the coolant in the narrow section of the gap, the longitudinal flow heat exchange surface 0,1–1,05 m/s, including Peclet 300 - 3300, the thermodynamic activity of oxygen in lead 1 - 3.10. Processes in a non-isothermal liquid metal loop with a cooling portion experimental model the dependence of heat transfer characteristics of the mass transfer of impurities in the circuit. Fig. 5 pieces, references 2.

Findings: The problem of heat removal during transients in nuclear power and bench circuits cooled lead and lead-bismuth coolant. The efficiency of the use of heat exchange equipment of low pressure to solve the heat dissipation problems.

Key words: coolant, a heat exchanger, heat sink, nozzle, lead, circulation, condensation water, air, power, pressure.