

УДК 621.039.534

А.В. Безносков, П.А. Боков, О.О. Новожилова, Т.А. Бокова, А.О. Соловьев

**ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА СВИНЦА
НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ ФТ-4 НГТУ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предмет, тема, цель работы: В данной статье предлагается использовать для отвода тепла от контуров и систем с ТЖМТ эффективный теплообменник (ПГ) с водо-воздушной смесью, работающей при давлении, близком к атмосферному.

Метод или методологию проведения работы: В охладителе расплава жидкометаллического теплоносителя для исследовательских, испытательных стендов и установок, содержащем корпус с патрубками подвода и отвода жидкометаллического теплоносителя, трубную теплообменную систему с патрубками подвода воды и отвода воздушно-паровой смеси, перед патрубком подвода охлаждающей воды установлен регулятор её расхода, а перед ним – задатчик температуры, вход которого соединен с выходом термопреобразователя, установленного на патрубке отвода жидкометаллического теплоносителя, на входном участке труб теплообменной системы установлено устройство ввода капель воды в поток воздуха.

Результаты и область их применения: Предлагаемая для использования в составе экспериментального стенда конструкция теплообменника обеспечивает давление в полости охлаждающей среды, близкое к атмосферному и исключает возможность его существенного повышения на величину, большую гидравлического сопротивления отводящей трассы. Регулирование количества тепла, отводимого теплообменником, обеспечивается достаточно просто изменением расхода воды, поступающей из расходной ёмкости через регулирующие вентили низкого давления в камеру смешения и диспергирования струйки воды с расходом несколько дм^3 в час в воздушно-капельную эмульсию. При реализации такой конструкции возможно накопление отложений солей в районе отбойника – разбрызгивателя на выходе из внутренней трубы и на внутренних стенках нижней части внешней трубы. Эти отложения солей предполагается удалять водяной промывкой внутренних полостей труб в «холодном» состоянии при сдrenированном теплоносителе.

Выводы: Устройство охладителя (ПГ) может быть рекомендовано для стендов и ЯЭУ для регулируемого отвода тепла при давлении охлаждающей среды, близком к атмосферному.

Ключевые слова: теплоотвод, охладитель, свинцовый теплоноситель, модель, парогенератор.

Одной из проблем, возникающих при создании исследовательских и промышленных стендов с ТЖМТ, является отвод тепла от теплоносителя. Такая же проблема возникает при разработке стационарных режимов ЯЭУ с этим теплоносителем.

При создании охладителей расплавов свинца и его сплавов всегда необходимо разрешать противоречие, заключающееся в следующем. Необходимо, с одной стороны, обеспечивать отвод от высокотемпературного расплава жидкого металла задаваемое варьируемое количество тепла, поддерживая необходимую температуру расплава на выходе из охладителя. С другой стороны, необходимо исключить возможность замерзания расплава жидкого свинца (температура плавления свинца – $326\text{ }^\circ\text{C}$, эвтектики свинец-висмут – $125\text{ }^\circ\text{C}$) при всех изменениях температуры и расхода жидкометаллического теплоносителя на входе в охладитель.

Применение в охладителях расплава жидкометаллического теплоносителя традиционной теплоотводящей среды – воды – возможно только при ее давлении существенно выше атмосферного; для охлаждения воды и для исключения застывания расплава свинца давление воды должно быть более 200 кгс/см^2 , что существенно усложняет конструкцию охладителя и контура его циркуляции. Применение в охладителе другой традиционной теплоотводящей среды – воздуха, учитывая его теплофизические свойства, требует значительных поверхностей теплообмена, что существенно увеличивает массогабаритные характеристики охладителя и его стоимость, сложнее решается проблема первоначального разогрева охладителя до температуры выше температуры плавления жидкометаллического теплоносителя перед вводом охладителя в работу. Поддержание постоянной температуры жидкого металла

при варьируемых расходе и температуре теплоносителя на входе в охладитель возможно только за счет широкого диапазона расходов воздуха и, соответственно, изменения аэродинамического сопротивления охладителя, что существенно усложняет его конструкцию и контур циркуляции.

Нами предлагается использовать для отвода тепла от контуров и систем с ТЖМТ эффективный теплообменник (ПГ) с водо-воздушной смесью, работающей при давлении, близком к атмосферному.

Решаемая задача – создание конструкции охладителя расплава жидкометаллического теплоносителя для исследовательских, испытательных стендов и установок и режимов их эксплуатации, эффективности регулирования теплообмена и исключения замерзания тяжелого жидкометаллического теплоносителя при всех возможных режимах работы охладителя.

Технический результат – повышение эффективности регулирования теплообмена, поддержание заданной температуры жидкометаллического теплоносителя при всех возможных изменениях его расхода и температуры на входе в охладитель, исключение замерзания тяжелого жидкометаллического теплоносителя при всех возможных режимах его работы.

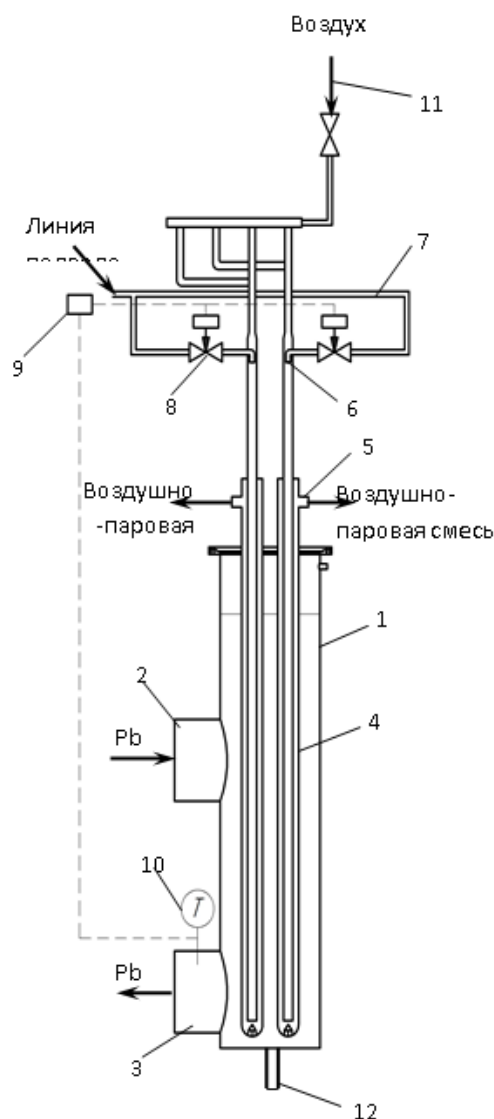


Рис. 1. Охладитель расплава жидкометаллического теплоносителя

Технический результат достигается тем, что в охладителе расплава жидкометаллического теплоносителя для исследовательских, испытательных стендов и установок, содержа-

щем корпус с патрубками подвода и отвода жидкометаллического теплоносителя, трубную теплообменную систему с патрубками подвода воды и отвода воздушно-паровой смеси, перед патрубком подвода охлаждающей воды установлен регулятор её расхода, а перед ним – задатчик температуры, вход которого соединен с выходом термопреобразователя, установленного на патрубке отвода жидкометаллического теплоносителя, на входном участке труб теплообменной системы установлено устройство ввода капель воды в поток воздуха.

Охладитель расплава жидкометаллического теплоносителя содержит теплообменный модуль, состоящий из корпуса 1 с крышкой, патрубка 2 подвода и патрубка 3 отвода тяжелого жидкометаллического теплоносителя, содержащего трубную теплообменную систему 4 в виде трубок Фильда; выходные патрубки 5 линии отвода воздушно-паровой смеси, сообщенные с атмосферой, устройство 6 ввода капель воды в поток воздуха, компрессор и подводящие патрубки, линию 7 подвода охлаждающей жидкости, на которой установлен регулятор 8 расхода воды, управляемый от задатчика 9 температуры и сигнала термопреобразователя 10, установленного в выходном потоке жидкометаллического теплоносителя в патрубке 3 отвода теплоносителя. Вход задатчика 9 температуры соединен с выходом термопреобразователя 10.

Работа системы теплообмена в технологическом режиме осуществляется следующим образом:

Начинается подача воды из линии 7 подвода воды в устройство 6 ввода капель воды в поток воздуха, куда одновременно начинается подача воздуха из компрессора в линию 11 подачи воздуха. В устройстве 6 ввода капель воды образуется водо-воздушный поток с мелкодисперсной водной средой, взвешенной в потоке, который поступает теплообменную систему 4 в виде трубок Фильда и, пройдя цикл нагревания, паровая смесь через патрубки 5 отвода воздушно-паровой смеси отводится в атмосферу. При изменении расхода жидкометаллического теплоносителя или при изменении температуры теплоносителя на выходе из охладителя, происходит регулирование подачи воды с помощью регулятора 8 расхода воды управляемого от задатчика 9 температуры и сигнала термопреобразователя 10, установленного в выходном потоке жидкометаллического теплоносителя. При выводе охладителя из действия прекращают подачу воды, затем отключают линию 11 подачи воздуха от компрессора. Остатки жидкометаллического теплоносителя дренируют через патрубок 12.

Основные технические характеристики

1. Расход свинцового теплоносителя через теплообменный модуль: до 1500 – 2000 т/час;
2. Температура свинца на входе в теплообменный модуль: до 550 °С;
3. Тепловая мощность теплообменного модуля, максимальная до ок. 50 кВт;
4. Число теплообменных трубок Фильда в модуле – 4 шт.;
5. Расход воды, подаваемой в трубки Фильда теплообменного модуля: $4 \times 10 = 40 \text{ дм}^3/\text{час}$;
6. Расход воздуха, подаваемого в трубки Фильда теплообменного модуля: $4 \times 30 = 120 \text{ м}^3/\text{час}$;
7. Гидравлическое сопротивление трубки Фильда по воздушнопаровой среде: 8 кгс/см²;

Давление в воздушнопаровой полости трубки Фильда (не более): 1,5–2,0 кгс/см² (атм).

Опыт создания таких теплообменников с жидкометаллическими теплоносителями отсутствует. Введение в проект стенда подобного теплообменника обусловлено следующим. При использовании «чисто» воздушного теплообменника его поверхность должна быть очень сильно развита с соответствующим увеличением габаритов и массы свинца в стенде; регулировать величину отводимого тепла затруднительно; сложно решаются вопросы разогрева и поддержания температуры теплообменника во всех случаях (разогрев, заполнение, стоянка без циркуляции и др.) без циркуляции «горячего» теплоносителя через теплообменник.

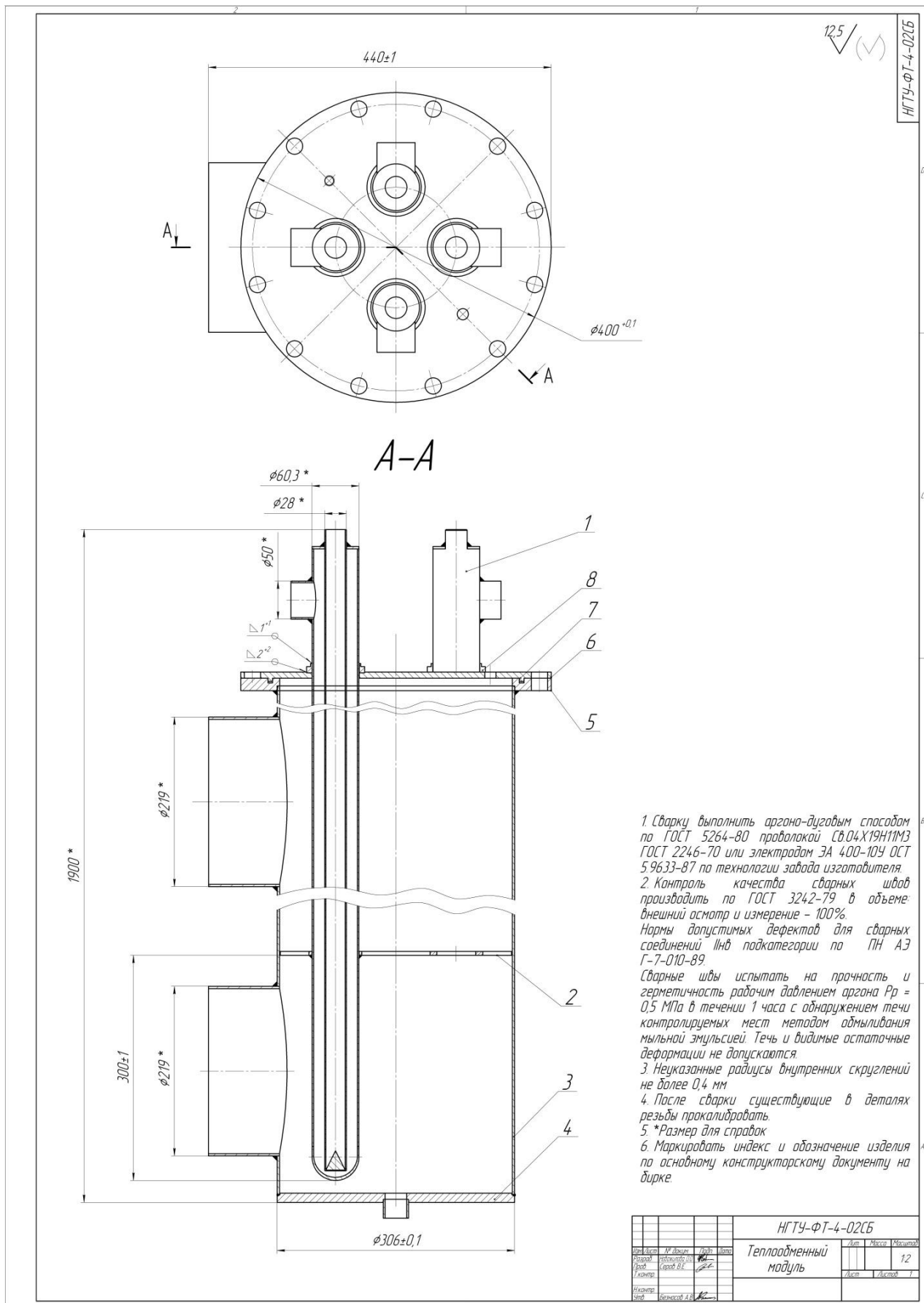


Рис. 2. Теплообменный модуль. Общий вид

При использовании «чисто» водяного теплообменника необходимо поддерживать давление в его водяных полостях исключая кипение воды при температурах, больших температур плавления свинца (более 200 кгс/см^2), что потенциально опасно в эксплуатации и сложно.

Предлагаемая для использования в составе экспериментального стенда конструкция теплообменника обеспечивает давление в полости охлаждающей среды, близкое к атмосферному, и исключает возможность его существенного повышения на величину, большую гидравлического сопротивления отводящей трассы.

Регулирование количества тепла, отводимого теплообменником, обеспечивается достаточно просто изменением расхода воды, поступающей из расходной ёмкости через регулирующие вентили низкого давления в камеру смешения и диспергирования струйки воды с расходом несколько дм^3 в час в воздушно-капельную эмульсию.

При реализации такой конструкции возможно накопление отложений солей в районе отбойника – разбрызгивателя на выходе из внутренней трубы и на внутренних стенках нижней части внешней трубки. Эти отложения солей предполагается удалять водяной промывкой внутренних полостей трубок в «холодном» состоянии при сдrenированном теплоносителе.

Охладитель (ПГ) предлагаемой конструкции позволяет повысить безопасность эксплуатации и эффективность регулирования теплоотвода от тяжелого жидкометаллического теплоносителя за счет испарения мелкодисперсной фазы воды в системе теплообмена в виде трубки Фильда, а также исключить замерзание высокотемпературного теплоносителя при операциях ввода и вывода охладителя из действия. Применение данной системы позволит уменьшить массогабаритные характеристики охладителя по сравнению с известными воздушными теплообменниками за счет уменьшения теплообменных поверхностей, необходимых для обеспечения охлаждения жидкометаллического теплоносителя, обеспечит удобство и простоту эксплуатации.

Эффективность работы рассматриваемой конструкции была проверена в процессе испытаний модели проточной части главного циркуляционного насоса БРЕСТ-ОД-300 на стенде ФТ-4 НГТУ летом этого года. До ввода в работу рассматриваемого теплообменника температура свинца в циркуляционном контуре стенда массой 10 тонн поднялась до 550°C за счет работы электронасоса $N=45 \text{ кВт}$ при n около 2000 об/мин. После ввода в работу устройства с водо-воздушной средой температура свинца в контуре снижалась со скоростью 50°C за 10 минут до температуры 480°C , после чего подача воды в поток воздуха уменьшилась и обеспечивалось поддержание температуры около 480°C при работе электронасоса стенда в том же режиме. Подобное устройство охладителя (ПГ) может быть рекомендовано для стендов и ЯЭУ для регулируемого отвода тепла при давлении охлаждающей среды, близком к атмосферному.

Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Характеристики теплообмена моделей поверхностей активной зоны и парогенератора при регулировании содержания примесей в контуре со свинцовым теплоносителем А.В. Безносков [и др.] // Атомная энергия. – М., 2008. Т. 104. Вып. 2. С. 74–0.
2. **Безносков, А. В.** Оборудование, компоновка и режимы эксплуатации контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова; НГТУ. – Н. Новгород. 2011.
3. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАт, 2007. – 434 с.

Дата поступления
в редакцию 20.11.2014

A.V. Beznosov, P.A.Bokov, O.O.Novozhilova, T.A.Bokova, A.O. Soloviev

**PROBLEMS OF REGULATION MELT TEMPERATURE
OF LEAD ON THE EXPERIMENTAL STAND FT-4 NSTU**

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

Purpose: In this article we propose to use to remove heat from the circuits and systems with HLMC efficient heat exchanger with a water-air mixture, operating at a pressure close to atmospheric.

Design/methodology/approach: In cooler molten liquid metal coolant for research, test benches and plants comprising a housing having inlet and outlet pipes of liquid metal coolant pipe heat exchanger system with pipes of water supply and discharge of air-vapor mixture, before the nozzle cooling water flow regulator is installed it, and before it - temperature adjuster having an input connected to the output of thermocouple mounted on the nozzle outlet the liquid metal coolant at the inlet portion of the heat exchange tubes of the input device set water droplets in the air stream.

Findings: Suggested for use in experimental stand the heat exchanger design provides the pressure in the cavity of the cooling medium, close to the atmospheric and eliminates the possibility of a significant increase in an amount greater than the hydraulic resistance of the escaping route.

Adjusting the amount of heat removed exchanger provided simply changing the flow of water coming from the tank through the flow control valves in a low-pressure mixing chamber, and dispersing the water streams at a rate of several dm^3 of air per hour in an emulsion droplet.

When implementing such a structure may buildup of salts in the impingement area - the sprinkler outlet of the inner tube and the inner walls of the lower portion of the outer tube. These salt deposits is supposed to remove the water purge the inside of the tubes in the "cold" state when drained coolant.

Research limitations/implications: The efficiency of the considered design has been verified in the process of testing a model of the flow of the main circulation pump BREST-OD-300 on the bench FT-4 NGTU this summer.

Originality/value: Cooler device can be recommended for stands and nuclear power systems for the controlled removal of heat at the pressure of the cooling medium, close to atmospheric.

Key words: heat extraction, cooler, lead cooled, model, steam generator.