

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ОХЛАЖДЕНИЯ КОРПУСА ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

А.Ю. Легких, Р.Ш. Асхадуллин, П.Н. Мартынов, В.П. Мельников,

А.Н. Стороженко

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1*

**Р**

Дан концептуальный анализ возможности применения свинцово-висмутового теплоносителя для охлаждения стального корпуса плавильного агрегата, предназначенного для реализации нового эффективного технологического способа переработки радиоактивных отходов. В обоснование целесообразности рассмотрения свинцово-висмутового теплоносителя представлены основные преимущества и особенности его применения с учетом имеющегося в России значительного опыта работы с этим теплоносителем (реакторные установки АПЛ, циркуляционные стенды), наличия отработанных методов и средств управления его качеством, свойств теплоносителя, обеспечивающих взрыво- и пожаробезопасность и способность отводить тепло при высоких температурах и низких давлениях. Выполнены предварительные расчетные оценки распределения температур при охлаждении стального корпуса плавильного агрегата свинцово-висмутовым теплоносителем. Расчеты выполнялись для нормального режима работы плавильного агрегата, при котором на внутренней поверхности корпуса имеется огнеупорная обмазка и образован слой шлакового гарнисажа заданной толщины.

Из результатов расчетных оценок следует, что при охлаждении стального корпуса плавильного агрегата свинцово-висмутовым теплоносителем обеспечивается принципиальная возможность поддержания температур стальных поверхностей, не превышающих предельные значения при приемлемом расходе. Представленные результаты получены впервые, и могут быть полезны при разработке конструкций плавильных агрегатов для переработки радиоактивных отходов.

**Ключевые слова:** жидкометаллический теплоноситель, стальной корпус, отвод тепла, плавильный агрегат, поверхность, расчет, свинец-висмут, температура.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России ведутся разработки новых более эффективных технологических схем переработки радиоактивных отходов. Одним из направлений разработок является создание плавильных агрегатов для переработки металлических радиоактивных отходов низкой и средней степени загрязненности [1 – 2]. В плавильном агрегате предполагается использовать стальной корпус плавильной камеры, охлаждаемый жидкометаллическим теплоносителем. В статье рассматриваются концептуальные аспекты применения свинцово-висмутового теплоносителя для

© *А.Ю. Легких, Р.Ш. Асхадуллин, П.Н. Мартынов,  
В.П. Мельников, А.Н. Стороженко, 2016*

охлаждения корпуса плавильного агрегата.

Свинцово-висмутовый теплоноситель является эффективным теплоносителем, позволяющим отводить тепло при высоких температурах и малых давлениях. При его использовании за счет высокой температуры кипения (~ 1670 °С) практически исключены кризис теплосъема и опасные ситуации, связанные с паровыми взрывами. Свинцово-висмутовый теплоноситель взрыво- и пожаробезопасен ввиду его химической инертности по отношению к воде и воздуху, имеет сравнительно невысокую температуру плавления (~ 125 °С).

Технология обращения со свинцово-висмутовым теплоносителем на сегодня освоена, что подтверждается имеющимся в России значительным опытом безопасной эксплуатации реакторных установок АПЛ со свинцово-висмутовым теплоносителем и их наземных прототипов [3, 4], многолетней эксплуатацией исследовательских неизотермических циркуляционных стендов, выбором данного теплоносителя для ядерных реакторов на быстрых нейтронах нового поколения [5, 6].

На основании имеющегося опыта работы со свинцово-висмутовым теплоносителем, наличия методов и средств управления его качеством, с точки зрения авторов, является крайне целесообразным рассматривать свинцово-висмутовое охлаждение стального корпуса плавильной камеры в проектах перспективных плавильных агрегатов.

### **ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Одним из основных преимуществ свинцово-висмутового теплоносителя является отсутствие выделения энергии при химическом взаимодействии теплоносителя с воздухом и водой. Известно, что тяжелые жидкометаллические теплоносители, к которым относится свинец-висмут, обладают наименьшей запасенной потенциальной энергией в сравнении с другими теплоносителями [7]. При прочих равных условиях, чем выше значение запасенной потенциальной энергии теплоносителя, тем больше вероятность тяжелой аварии и значительней ее последствия. Таким образом, при использовании свинцово-висмутового теплоносителя обеспечивается безопасность установки за счет устранения самих причин возникновения тяжелых аварий, связанных с теплоносителем.

К особенностям применения свинцово-висмутового теплоносителя в циркуляционных контурах относятся

- поддержание заданного кислородного потенциала в теплоносителе для предотвращения коррозионно-эрозионных повреждений конструкционной стали при длительном ресурсе эксплуатации (десяtkи тысяч часов);
- обеспечение чистоты поверхностей контура циркуляции и теплоносителя с целью поддержания проектных теплогидравлических характеристик в течение всего периода эксплуатации.

На сегодня освоенными температурами применения свинцово-висмутового теплоносителя являются температуры до 650 °С, при которых многолетними экспериментальными исследованиями доказана возможность обеспечения коррозионной стойкости сталей, контактирующих с теплоносителем [8].

В ГНЦ РФ-ФЭИ разработана технология обеспечения противокоррозионной защиты сталей и создано оборудование для ее реализации в различных циркуляционных контурах, включая контура ядерных реакторных установок [9, 10]. Технология заключается в обеспечении в теплоносителе условий формирования на поверхностях конструкционной стали защитных покрытий и их целостности в процессе эксплуатации. Это достигается путем поддержания заданного кислородного потенциала в теплоносителе.

При наличии в свинцово-висмутовом теплоносителе растворенного кислорода на поверхностях конструкционных сталей жидкометаллического контура и оборудования

формируются защитные оксидные пленки в связи с меньшим сродством к кислороду свинца и висмута, чем основных компонентов стали (железа, хрома). Оксидные пленки имеют структуру  $Me_xO_y$ , где Me – Fe, Cr и другие компоненты стали.

Ввиду инертности защитной оксидной пленки относительно теплоносителя, хороше-го сцепления с поверхностью стали, способности к «залечиванию» дефектов при наличии растворенного кислорода в теплоносителе она защищает поверхность конструкционных сталей от прямого контакта с жидкометаллическим теплоносителем, обеспечивая коррозионную стойкость стали при длительном ресурсе эксплуатации. В связи с этим современная «кислородная» технология, разработанная в ГНЦ РФ-ФЭИ, является основным методом противокоррозионной защиты конструкционных сталей в среде тяжелого жидкометаллического теплоносителя, в том числе и в проектах перспективных ядерных реакторов на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями.

Для контроля кислорода, растворенного в теплоносителе, в ГНЦ РФ-ФЭИ разработаны датчики на основе твердого оксидного электролита [11], которые характеризуются высоким быстродействием, высокой чувствительностью, способностью работать длительное время в условиях повышенных температур и термоударов, надежностью и стабильностью проводящих и механических свойств в широком интервале температур и парциальных давлений кислорода.

Оптимальным методом для регулирования ТДА кислорода в теплоносителе является так называемый твердофазный метод регулирования, также разработанный специалистами ГНЦ РФ-ФЭИ [10]. Техническая реализация твердофазного метода регулирования осуществляется с помощью специальных устройств – массообменных аппаратов с твердофазным источником кислорода. В настоящее время накоплен значительный опыт по длительной эксплуатации различных конструкций массообменных аппаратов на исследовательских стендах со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями, который свидетельствует об их надежности, возможности тонкого регулирования скорости ввода кислорода и отсутствии отрицательного воздействия на контур в целом [12].

Свойства свинцово-висмутового теплоносителя таковы, что при наличии его контакта с кислородом воздуха (при заполнении, негерметичности газовой системы, ремонтах оборудования) возможно образование твердофазных отложений на основе оксидов теплоносителя.

Для ликвидации отложений на основе оксидов теплоносителя применяется специальная технологическое мероприятие – водородная очистка [13], результатом которой является извлечение компонентов эвтектики из отложений. При этом отложения разрушаются, а свинец и висмут возвращаются в теплоноситель. Водородная очистка проводится при помощи газовых смесей «водород – водяной пар – инертный газ (аргон или гелий)». При водородной очистке водородсодержащая газовая смесь вводится в поток теплоносителя, при этом восстановление шлака происходит одновременно с механическим воздействием двухкомпонентного потока теплоносителя, что полностью решает задачу по эффективной очистке поверхностей циркуляционного контура. Метод водородной очистки циркуляционных контуров с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем и оборудование для его реализации были разработаны в ГНЦ РФ-ФЭИ.

Эффективность очистки теплоносителя и поверхностей контура от отложений водородсодержащими газовыми смесями была многократно доказана как на реакторных установках АПЛ, так и на многих исследовательских циркуляционных стендах с теплоносителями свинец и свинец-висмут. К настоящему времени разработаны несколько типов устройств ввода газовой смеси в поток тяжелого жидкометаллического теплоносителя, с использованием которых можно обеспечить эффективную очистку циркуляционных контуров различных конструкций и схем организации циркуляции теплоносителя.

Следует отметить, что водородная очистка является достаточно редкой процедурой

и требуется только после загрязнения циркуляционного контура твердофазными отложениями. В периоды эксплуатации контура с герметичной газовой системой, отсутствия слива теплоносителя из контура и ремонтов оборудования водородная очистка не нужна.

### РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СТАЛЬНОГО КОРПУСА ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА СВИНЦОВО-ВИСМУТОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Для оценки уровня температур корпуса плавильного агрегата при охлаждении свинцово-висмутовым теплоносителем были выполнены предварительные расчеты с использованием простой одномерной модели теплообмена.

При выполнении расчетных оценок рассматривалась схема охлаждения корпуса плавильного агрегата, представленная на рис. 1. Предполагалось, что циркуляция теплоносителя является принудительной и осуществляется насосом следующим образом: насос → корпус плавильного агрегата → теплообменник → насос.

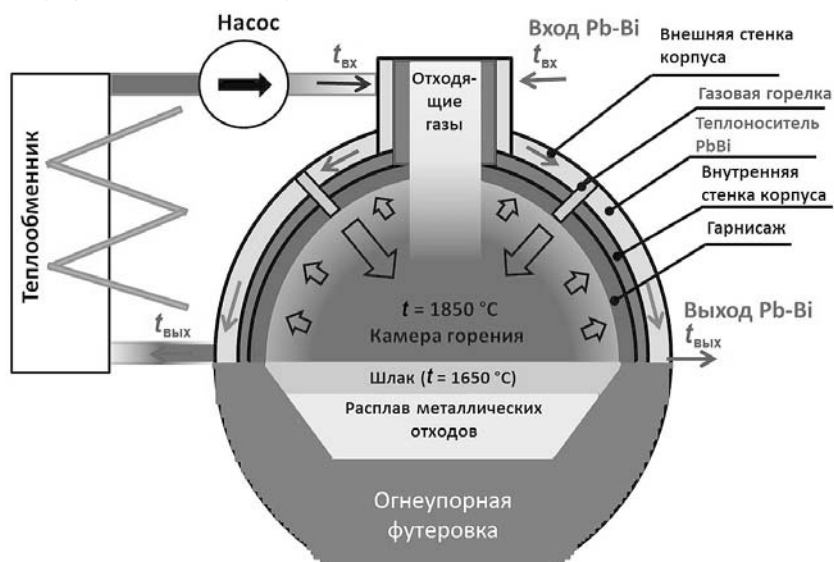


Рис. 1. Схема охлаждения стального корпуса плавильного агрегата свинцово-висмутовым теплоносителем

#### Принятые допущения:

- движение теплоносителя в корпусе плавильного агрегата осуществляется по зазору между внутренней и внешней стенками сверху вниз;
- поток свинцово-висмутового теплоносителя равномерно распределяется по зазору;
- тепловой поток на стенки корпуса постоянный;
- в теплоносителе отсутствуют твердофазные примеси, способные повлиять на теплообмен (соблюдается технология свинцово-висмутового теплоносителя);
- толщина межкорпусного пространства равна 10 мм;
- внешняя стенка теплоизолирована с наружной стороны (односторонний обогрев);
- все передаваемое жидкометаллическому теплоносителю тепло отводится на теплообменнике (без уточнения способа отвода), и на входе в межкорпусное пространство постоянная температура теплоносителя равна 300 °C;
- температура газовой среды в камере горения равна 1850 °C;
- температура шлакового гарнисажа равна 1650 °C;
- на внутренней поверхности стенки корпуса со стороны камеры горения имеются слой шлакового гарнисажа (на основании параметров плавильного агрегата [1, 14]) и огнеупорная обмазка;

– средняя теплопроводность шлакового гарнисажа и обмазки составляет 5 и 3,5 Вт/(м·°С) соответственно;

– толщины стали, слоя шлакового гарнисажа и обмазки приняты в соответствии с рис. 2.

При выполнении расчетов использовались свойства свинцово-висмутового теплоносителя из работы [15], свойства газовой среды и методика оценки потока теплового излучения из [16].

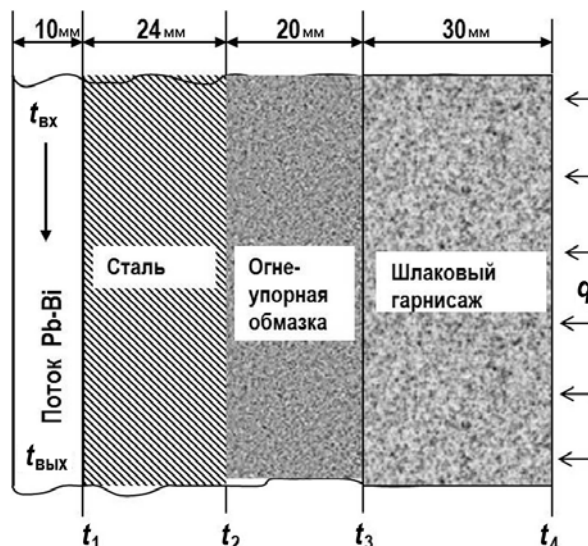


Рис. 2. Основные толщины слоев стенки теплообменного корпуса

**Основные положения расчетной методики.** Методика расчета основывалась на уравнениях

– теплового баланса

$$N = G \cdot C_p \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $C_p$  – теплоемкость, Дж/(кг·град);  $\Delta t$  – подогрев теплоносителя, °С;

– теплопередачи

$$q_{\text{тепл}} = k \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где  $q_{\text{тепл}}$  – тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $\Delta t$  – подогрев теплоносителя, °С;

– закона Стефана-Больцмана

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $q_{\text{изл}}$  – плотность потока теплового излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $T$  – температура, К;  $\varepsilon$  – интегральная степень черноты.

В расчетах предполагалось, что газ в камере горения является селективно черной средой, а внутренняя стенка – черной поверхностью. При таком предположении тепловой поток излучения, передаваемый от газовой среды к внутренней стенке корпуса, может быть определен по формуле

$$q_{\text{изл}} = \sigma_0 \cdot (\varepsilon_g \cdot T_g^4 - \varepsilon_{г,с} \cdot T_c^4), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_g$  и  $\varepsilon_{г,с}$  – степень черноты газа при температурах газа и стенки соответственно;  $T_g$  – температура газа, К;  $T_c$  – температура внутренней стенки корпуса (со стороны камеры горения), К.

При расчетах степени черноты газовой среды учитывалась поправка на взаимное перекрытие полос поглощения  $\text{CO}_2$  и водяного пара. Аналогично вычислялся поток от поверхности шлака к поверхности шлакового гарнисажа (см. рис. 1).

Расчет эквивалентной длины канала  $L$  выполнялся по формуле

$$L = F/(\pi \cdot R_1), \quad (5)$$

где  $F$  – площадь внутренней поверхности стенки корпуса, охлаждаемой жидким металлом,  $\text{м}^2$ ;  $R_1$  – радиус внутренней стенки корпуса,  $\text{м}$ .

Исходя из геометрии плавильного агрегата, разрабатываемого ПК «Технология металлов», в расчетах было принято  $F = 24 \text{ м}^2$ ;  $R_1 = 1,5 \text{ м}$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  к жидкометаллическому теплоносителю вычислялся по соотношению

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda_{\text{тепл}} / d_g, \quad (6)$$

где  $\lambda_{\text{тепл}}$  – коэффициент теплопроводности свинцово-висмутового теплоносителя,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $d_g$  – гидравлический диаметр,  $\text{м}$ ;  $\text{Nu}$  – критерий Нуссельта.

Для вычисления критерия Нуссельта в расчетах использовалась формула

$$\text{Nu} = A + 0,008 \cdot \text{Re}^{0,87} \cdot [1 + B \cdot \exp(-4/R)], \quad (7)$$

где  $A = [6,4 - 3/\lg(\text{Re})] \cdot R^{0,24}$ ;  $B = 0,5$ ;  $R = R_2/R_1$  – отношение радиусов внешней и внутренней стенок корпуса.

Средняя скорость потока жидкометаллического теплоносителя в межкорпусном зазоре плавильного агрегата оценивалась из соотношения

$$w = G/(2 \cdot S \cdot \rho), \quad (8)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $S$  – площадь сечения межкорпусного зазора,  $\text{м}^2$ ;  $\rho$  – плотность теплоносителя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Оценки температур стенок корпуса и других элементов выполнялись исходя из уравнения теплопередачи

$$\Delta t_\alpha = q/\alpha, \quad (9)$$

$$\Delta t_s = q \cdot \delta_s / \lambda_s, \quad (10)$$

где  $\Delta t_\alpha$  – перепад температуры между стенкой и потоком жидкометаллического теплоносителя;  $\Delta t_s$  – перепад температуры в слое толщиной  $\delta_s$  с теплопроводностью  $\lambda_s$  (см. рис. 2).

Температура внутренней поверхности шлакового гарнисажа (со стороны камеры горения) вычислялась методом последовательных приближений из условия равенства тепловых потоков

$$q_{\text{изл}} = q_{\text{тепл}}.$$

**Результаты расчетных оценок.** Результаты расчетов температур поверхностей стального корпуса и средних тепловых потоков на стенку при заданных параметрах и разных расходах теплоносителя из диапазона от 25 до 50  $\text{м}^3/\text{ч}$  как наиболее приемлемых с точки зрения технической реализации представлены в табл. 1.

На рисунке 3 представлено распределение температур по слоям корпуса плавильного агрегата на выходе теплоносителя из корпуса при крайних значениях рассматриваемого диапазона расходов теплоносителя. Расчеты были выполнены для нормального режима работы плавильного агрегата – наличия огнеупорной обмазки и гарнисажа на внутренней поверхности корпуса.

Исходя из выполненных расчетных оценок следует, что свинцово-висмутовый теплоноситель при наличии обмазки и шлакового гарнисажа на внутренней поверхности потенциально позволяет обеспечить среднюю температуру на поверхности ста-

ли со стороны теплоносителя не более 600 °С в рассматриваемом диапазоне расходов теплоносителя.

Таблица 1

**Результаты расчетов температур теплоносителя и стали при разных расходах теплоносителя**

Q, м <sup>3</sup> /ч	w, м/с	Δt, °С	q <sub>вых</sub> , кВт/м <sup>2</sup>	t <sub>1 вых</sub> , °С	t <sub>2 вых</sub> , °С	t <sub>3 вых</sub> , °С	t <sub>4 вых</sub> , °С
50	0,14	107	93,5	428	530	1092	1626
40	0,11	132	91,7	453	553	1103	1627
30	0,08	171	88,8	491	588	1121	1629
20	0,05	240	83,5	562	653	1154	1631

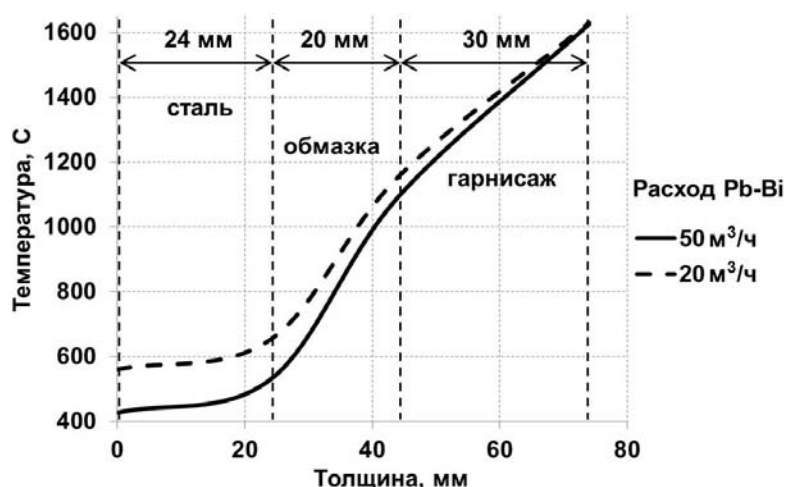


Рис. 3. Расчетные распределения температур по слоям корпуса на выходе теплоносителя (при разных расходах)

Кроме того, при наличии на внутренней поверхности корпуса обмазки и гарнисажа уменьшение расхода теплоносителя в 2,5 раза (с 50 до 20 м<sup>3</sup>/ч) приводит к повышению подогрева теплоносителя на ~ 133 °С, при этом температура внутренней поверхности корпуса (гарнисажа со стороны камеры горения) повышается незначительно, всего на ~ 5 °С.

При расходе теплоносителя 50 м<sup>3</sup>/ч расчетная температура поверхности стали со стороны теплоносителя не превышает 450 °С. Как упоминалось выше, освоенными температурами применения свинцово-висмутового теплоносителя для сталей аустенитного класса являются температуры до 650 °С, следовательно, вопрос коррозионной стойкости сталей не является проблемным.

В реальной конструкции плавильного агрегата может наблюдаться неравномерное распределение температур, следовательно актуально проведение трехмерных теплогидравлических расчетов на основании полученных в настоящей работе результатов расчетных оценок тепловых потоков в качестве исходных данных.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Свинцово-висмутовый теплоноситель является эффективным пожаро- и взрывобезопасным теплоносителем, позволяющим отводить тепло при высоких температурах и малых давлениях.
2. Технология обращения со свинцово-висмутовым теплоносителем на сегодня освоена. В результате многолетней эксплуатации исследовательских неизотермических

циркуляционных стенов и реакторных установок АПЛ отработаны методы обеспечения противокоррозионной защиты сталей и проведения очистки теплоносителя от твердофазных шлаков, создано оборудование для их реализации в различных циркуляционных контурах.

3. Впервые выполнены расчетные оценки распределения температур при охлаждении стального корпуса плавильного агрегата свинцово-висмутовым теплоносителем с использованием одномерной модели теплообмена.

4. Из результатов выполненных расчетных оценок распределения температур следует, что при охлаждении стального корпуса плавильного агрегата свинцово-висмутовым теплоносителем в нормальном режиме работы (с обмазкой и шлаковым гарнисажем на внутренней поверхности корпуса) обеспечивается возможность поддержания температуры на внутренней поверхности стали со стороны теплоносителя, не превышающей освоенные температуры применения данного теплоносителя. Следовательно, вопрос коррозионной стойкости сталей не является проблемным.

5. Полученные результаты могут быть полезны при выполнении трехмерных гидравлических расчетов стального корпуса плавильного агрегата, актуальных для выявления неравномерности распределения температур по корпусу при его охлаждении свинцово-висмутовым теплоносителем.

6. Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам кафедры ИАТЭ НИЯУ МИФИ С.Т. Лескину, А.С. Шелегову и В.И. Слободчуку за помощь в разработке методики расчетных оценок и обсуждении результатов расчетов.

7. Исследования выполнены в рамках проекта Минобрнауки России по теме «Разработка технологии утилизации металлических радиоактивных отходов на основе плавильных агрегатов с жидкометаллическим отводом тепла». Уникальный идентификатор ПНИЭР – RFMEFI62614X0002.

### Литература

1. Гудим Ю.А., Голубев А.А., Трегубов И.О. Пирометаллургическая переработка металлических радиоактивных отходов низкой и средней степени загрязненности и плавильный агрегат для ее осуществления // Ярмарка инновационных проектов в области обращения с РАО, вывода из эксплуатации и экологической реабилитации. Атомэко-2008. Материалы конференции. – 2008. – С. 25-27.
2. Патент 2345141 РФ, МПК С21В13/00, С22В7/00. Способ переработки металлических радиоактивных отходов и агрегат для его осуществления / Голубев А.А., Гудим Ю.А. – 2009 г.
3. Ефанов А.Д., Иванов К.Д., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И. Технология свинцово-висмутового теплоносителя на ЯЭУ первого и второго поколений // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. - № 1. – С. 138-144.
4. Тошинский Г.И. А.И. Лейпунский и ядерные энергетические установки с жидкометаллическим теплоносителем свинец-висмут для атомных подводных лодок // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. - № 4. – С. 13-18.
5. Рыжов С.Б., Степанов В.С., Тошинский Г.И. и др. Инновационный проект реакторной установки СВБР-100 // Вопросы атомной науки и техники, серия «Обеспечение безопасности АЭС». – 2009. - № 24. – С. 5 – 7.
6. Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Орлов Ю.И., Стороженко А.Н. Современные вопросы и задачи технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей ЯЭУ (свинец, свинец-висмут) / Сб. докл. международной конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2013)». – Обнинск, 2013. – С. 42-51.
7. Toshinsky G. I., Komlev O. G., Tormyshev I. V., Petrochenko V. V. Effect of Potential Energy Stored in Reactor Facility Coolant on NPP Safety and Economic Parameters // World Journal of Nuclear Science and Technology. – 2013. – № 3. – PP. 59-64.
8. Русанов А.Е., Левин О.Э., Гущина А.Г. Исследование коррозионной стойкости оболочек твэлов из стали ЭП823 после испытаний в потоке Pb-Bi теплоносителя / Сб. докл. международной конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных техно-



логиях (ТЖМТ-2013)», Обнинск, 2013. – С. 287-297.

9. Громов Б.Ф., Ячменев Г.С., Русанов А.Е. Кислородное ингибирование конструкционных материалов в расплавах эвтектики свинец-висмут и свинца // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1999. – №4. – С. 89-96.

10. Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Симаков А.А. и др. Твердофазная технология регулирования кислорода в тяжелых жидкометаллических теплоносителях // Новые промышленные технологии. ЦНИЛОТ. – 2004. – №3. – С. 30-34.

11. Патент 2298176 РФ, МПК G01N 27/46. Твердоэлектролитный датчик концентрации кислорода и способы его изготовления / Мартынов П.Н., Чернов М.Е., Гулевский В.А. 2007.

12. Асхадуллин Р.Ш., Симаков А.А., Легких А.Ю. Твердофазные окислители теплоносителей Pb-Bi и Pb для формирования и сохранения противокоррозионных пленок на сталях / Новые промышленные технологии. ЦНИЛОТ. – 2011. – №1. – С. 33-39.

13. Ульянов В.В., Мартынов П.Н., Гулевский В.А. и др. Вопросы применения смесей «водород - водяной пар - инертный газ» в технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей // Сб. докл. научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (Теплофизика-2013)». – Обнинск, 2013. – С. 507-510.

14. Гудим Ю.А., Голубев А.А., Овчинников С.Г., Зинуров И.Ю. Перспективная технология производства стали с использованием лома и металлургического сырья // Металлург. – 2009. – № 4. – С. 32-35.

15. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. / Под общей ред. П.Л. Кириллова; 2-е изд. – М.: ИздАТ. – 2010. – 200 с.

16. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. / Справочник. – М.: Энергоатомиздат. – 1991.

Поступила в редакцию 01.02.2016 г.

#### Авторы

Легких Александр Юрьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник  
E-mail: alegkikh@ippe.ru.

Асхадуллин Радомир Шамильевич, канд. техн. наук, доцент, заместитель директора  
отделения физико-химических технологий  
E-mail: raskhadullin@ippe.ru.

Мартынов Петр Никифорович, доктор техн. наук, профессор.

Мельников Валерий Петрович, канд. техн. наук, исполняющий обязанности заместителя генерального директора – директора отделения физико-химических технологий

Стороженко Алексей Николаевич, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории.

UDC 621.039.73

### CONCEPTUAL ASPECTS OF MELTING UNIT VESSEL COOLING BY HEAVY LIQUID METAL COOLANT

Legkikh A.Yu., Askhadullin R.Sh., Martynov P.N., Mel'nikov V.P., Storozhenko A.N.

JSC «SSC RF-IPPE», 1 Bondarenko sq., Obnnsk, Kaluga reg., 249033, Russia

#### ABSTRACT

The goal of the article is to present conceptual analysis of feasibility of lead-bismuth coolant application for cooling steel vessel of melting unit designed for implementation of the new effective technology of radwaste reprocessing. In support of lead-bismuth coolant feasibility, the main advantages and specific features of its application are presented, taking into account significant experience gained in Russia in handling this

coolant (nuclear submarines reactor units and test facilities), availability of job-proved methods and equipment for the coolant quality control, and coolant properties assuring fire and explosion safety and heat removal capability under high temperature and low pressure conditions. The preliminary evaluations were made on temperature distribution in the mode of cooling of the melting unit steel vessel by the liquid lead-bismuth using simple one-dimensional heat transfer model. Forced coolant flow provided by the pump was considered in the analytical model. It was assumed that the coolant was flowing within the gap between the external and internal steel walls to cool the melting unit, while the excess heat was removed by the external heat exchanger. Radiation heat flux from gas in the burning chamber, heat flux from the slag to the inner wall surface of the vessel, and heat removed by the liquid metal coolant were taken into account in the analysis. Emissivity factor of gas in the burning chamber was calculated taking into account correction for mutual interference of CO<sub>2</sub> and evaporated water absorption bands. Calculations were made for the normal operation mode of the melting unit, assuming presence of refractory coating and slag lining of certain thickness formed on the inner surface of the vessel.

As follows from the results of evaluations, lead-bismuth coolant is capable of maintaining melting unit vessel surface temperature within permissible limits with the reasonable coolant flow rate under normal operating conditions. Data presented in this article have been obtained for the first time and may be useful in designing melting units for radwaste reprocessing.

**Key words:** liquid metal coolant, steel vessel, heat removal, melting unit, surface, calculation, lead-bismuth, temperature

#### REFERENCES

1. Gudim Yu.A., Golubev A.A., Tregubov I.O. *Pyrometallurgical reprocessing of low and medium metal radwaste and melting unit for its implementation*. Fair of innovative projects in the area of radwaste management, decommissioning and ecological rehabilitation. Atomeco-2008. Proceedings of the conference. 2008, pp. 25-27 (in Russian).
2. Golubev A.A., Gudim Yu.A. *Method of reprocessing of metal radioactive waste and the unit for its implementation*. Patent 2345141 RF, MPK S21V13/00, S22V7/00, 2009 (in Russian).
3. Efanov A.D., Ivanov K.D., Martynov P.N., Orlov Yu.I. Lead-bismuth coolant technology in the first and the second generation NPP. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2007, no. 1, pp. 138-144 (in Russian).
4. Toshinsky G.I. A.I. Leypunsky and nuclear power plants with lead-bismuth liquid metal coolant for nuclear submarines. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2003, no. 4, pp. 13-18 (in Russian).
5. Ryzhov S.B., Stepanov V.S., Toshinsky G.I., Klimov N.N., Zrodnikov A.V., Komlev O.G. Innovative design of SVBR-100 reactor. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tehniki. Ser. Obespechenie bezopasnosti AES*. 2009, iss. 24, pp. 5-7 (in Russian).
6. Martynov P.N., Askhadullin R.Sh., Orlov Yu.I., Storozhenko A.N. Current issues and problems of technology of NPP heavy liquid metal coolants (lead and lead-bismuth). *Proceedings of International conference «Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies (HLMC-2013)»*. Obninsk, 2013, pp. 42-51 (in Russian).
7. Toshinsky G.I., Komlev O.G., Tormyshev I.V., Petrochenko V.V. Effect of Potential Energy Stored in Reactor Facility Coolant on NPP Safety and Economic Parameters. *World Journal of Nuclear Science and Technology*. 2013, no. 3. pp. 59-64.
8. Rusanov A.E., Levin O.E., Gushchina A.G. Studies on corrosion resistance of fuel element claddings made of EP823 steel after their tests in Pb-Bi coolant flow. *Proceedings of International conference «Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies (HLMC-2013)»*. Obninsk, 2013, pp. 287-297 (in Russian).
9. Gromov B.F., Yachmenyov G.S., Rusanov A.E. Oxygen inhibition of structural materials in liquid lead-bismuth eutectic and lead. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 1999, no. 4, pp. 89-96 (in Russian).

10. Martynov P.N., Askhadullin R.Sh., Simakov A.A., Lanskikh V.S., Gulevsky G.V. Solid phase technology of oxygen control in heavy liquid metal coolants. *Novye Promyshlennye Tehnologii. CNILOT*. 2004, no. 3, pp. 30-34 (in Russian).
11. Martynov P.N., Chernov M.E., Gulevsky V.A. *Solid electrolyte sensor of oxygen content and methods of its fabrication*. Patent 2298176 RF, MPK G01N 27/46, 2007 (in Russian).
12. Askhadullin R.Sh., Simakov A.A., Legkikh A.Yu. Solid phase oxidizers of Pb-Bi and Pb coolants for creating and maintaining corrosion-resistant films on the steels. *Novye Promyshlennye Tehnologii. CNILOT*. 2011, no. 1, pp. 33-39 (in Russian).
13. Ulyanov V.V., Martynov P.N., Gulevsky V.A., Teplyakov Yu.A., Fomin A.S. Issues of application of «hydrogen - water steam - inert gas» mixtures in the liquid heavy metal coolant technology. *Proceedings of Scientific and Technical Conference on Thermal Physics of Fast Neutron Reactors (Thermal Physics-2013)*, Obninsk. 2013, pp. 507-510 (in Russian).
14. Gudim Yu.A., Golubev A.A., Ovchinnikov S.G., Zinurov I.Yu. Advanced technology of steel production using metal junk and metallized raw materials. *Mettallurg*. 2009, no. 4, pp. 32-35 (in Russian).
15. Kirillov P.L., Terentyeva M.I., Deniskina N.B. Thermophysical properties of nuclear engineering materials, under the general editorship of P.L. Kirillov; 2-nd Edition. Moscow, IzdAT Publ., 2010, 200 p. (in Russian).
16. Blokh A.G., Zhuravlyov Yu.A., Ryzhkov L.N. Handbook: Radiation Heat Transfer. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1991 (in Russian).

#### Authors

Legkikh Aleksandr Yur'evich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: alegkikh@ippe.ru

Askhadullin Radomir Shamil'evich, Deputy Director, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: raskhadullin@ippe.ru

Martynov Pyotr Nikiforovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

Meľnikov Valerij Petrovich, Deputy Director, Cand. Sci. (Engineering)

Storozhenko Aleksej Nikolaevich, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Phys.-Math.)