

УДК 621.039

А.В. Безносков, П.А. Боков, Н.С. Волков, О.Р. Журавлева

КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ЗА СЧЁТ ПАДАЮЩИХ СТРУЙ И КАПЕЛЬ НА ЕГО СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предмет, тема, цель работы: В НГТУ проводятся теоретические и экспериментальные исследования, направленные на создание устройств контроля концентрации кислорода в свинцовом теплоносителе за счёт падающих струй и капель на его свободную поверхность.

Метод или методологию проведения работы: В целях создания экспериментального исследования макетного образца массообменного аппарата была разработана программа испытаний, направленная на определение разряжения, создаваемого газовым массообменным аппаратом, расхода эжектируемого газа, динамики раскисления теплоносителя в циркуляционном контуре с использованием массообменного аппарата и характеристик динамики увеличения содержания кислорода в свинцовом теплоносителе в циркуляционном контуре.

Результаты и область их применения: Рассматриваемый метод формирования двухкомпонентных газовых смесей в объеме свинец-висмутового теплоносителя использовался и используется на всех стендах с ТЖМТ, в которых имеются элементы, создающие струи ТЖМТ, падающие на его свободную поверхность.

Выводы: Метод показал себя достаточно эффективным и простым в эксплуатации и может рекомендоваться в комплексе с устройствами в ТЖМТ, реализующими другие методы, а также в виде единых комплексных систем обработки контуров с ТЖМТ двухкомпонентными потоками ТЖМТ – окислительная или восстановительная газовая смесь.

Ключевые слова: ТЖМТ, массообменник, эжекция, восстановительная газовая смесь, падающие струи, окислительная газовая смесь.

При создании установок и стендов со свинец-висмутовым теплоносителем, а также стендов и проектируемых реакторных установок со свинцовым теплоносителем в части технологии ТЖМТ всегда приходится решать две взаимно дополняющих задачи:

- 1 – очистка контуров и теплоносителя от его оксидов;
- 2 – контролирование регулирования содержания термодинамически активного кислорода в ТЖМТ для формирования и доформирования оксидных защитных покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура, контактирующих с ТЖМТ.

Предлагалась и отработывалась значительное количество методов и устройств, направленных на решение указанной проблемы.

Специалистами НГТУ им. Р.Е. Алексеева было предложено использовать для ее решения энергию струй ТЖМТ, падающих на свободную поверхность теплоносителя. Сущность варианта устройства для очистки и регулирования содержания кислорода путем ввода водородосодержащих или кислородосодержащих газовых смесей в объем ТЖМТ за счет энергии падающих струй заключается в следующем.

В НГТУ проводились исследования по регулированию окислительного потенциала ТЖМТ с подачей в трассу эжектируемого газа смеси инертного газа с кислородом, водородом и их смесью, генерируемыми электролизом. При вводе кислородосодержащей смеси и смеси инертного газа с продуктами электролиза (кислородом и водородом) из полостей электролизера фиксировалось более эффективное увеличение термодинамической активности кислорода в эвтектике свинец-висмут, чем при подаче газа того же состава из баллона, вероятно, вследствие того, что кислород в смеси находился в ионизированном состоянии. Наличие водорода (продукта электролиза) в газовой смеси от электролизера практически не сказывалось на характере увеличения содержания кислорода в свинец-висмутовом теплоносителе.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева были предложены и исследовались метод и устройство ввода кислородосодержащих газовых смесей в так называемом газовом массообменнике.

Конструктивная схема газового массообменника представлена на рис. 1. В верхней части массообменника расположена цилиндрическая напорная камера со штуцером подвода ТЖМТ от главного циркуляционного или вспомогательного насоса. Нижняя часть напорной камеры ограничена перфорированной решеткой, отверстия в которой сообщают напорную камеру с камерой разрежения. Струи ТЖМТ, поступающие через отверстия в камеру разрежения, дробятся на отдельные капли и падают на свободный уровень ТЖМТ в камере разрежения устройства.

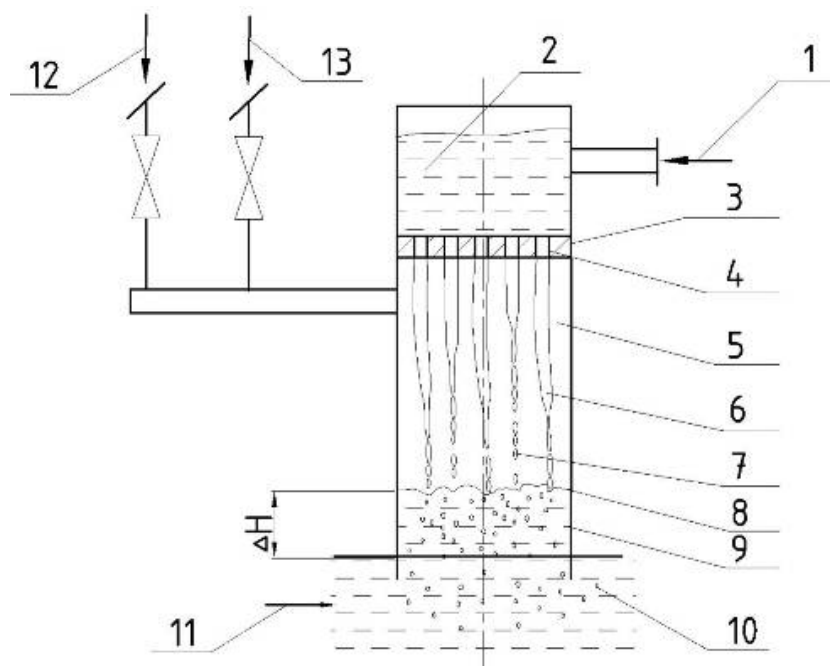


Рис. 1. Конструктивная схема газового массообменника:

1 – подача ТЖМТ; 2 – напорная камера; 3 – перфорированная решетка; 4 – отверстие истечения; 5 – камера разрежения; 6 – струя ТЖМТ; 7 – капли ТЖМТ; 8 – возможные положения свободного уровня ТЖМТ; 9 – цилиндрический корпус; 10 – газ, эжектируемый падающими каплями воды; 11 – поток ТЖМТ в контуре; 12 – газ из газового объема реакторного блока; 13 – газовые смеси из системы газа

При падении капли ТЖМТ захватывают газовые пузыри, размер которых определяется размерами падающих капель и их энергией (высотой падения). Расход эжектируемого газа зависит от указанных параметров и количества струй (расхода ТЖМТ через устройство). Образовавшийся двухкомпонентный поток ТЖМТ-газ захватывается потоком в том участке контура, в котором устанавливается газовый массообменник. При изменении свободного уровня ТЖМТ в контуре в месте установки устройства (ΔH), его характеристики изменяются незначительно. Преимуществами газового массообменника являются:

- возможность ввода и диспергизации как окислительной, так и восстановительной газовой фазы;
- возможность формировать поток с размерами пузырей малых размеров (сотни и десятки микрометров);
- возможность подачи газа в массообменник как из объема реакторного блока, так и из газовой системы;
- отсутствие вращающихся частей;
- возможность контроля и проверки работы устройства; простота конструкции.

Газовый массообменник не требует проходок через крышку и другие конструкции реакторного блока, кроме трубопровода газа, конструктивно прост, дешев, имеет малые массогабаритные показатели (в осушенном состоянии).

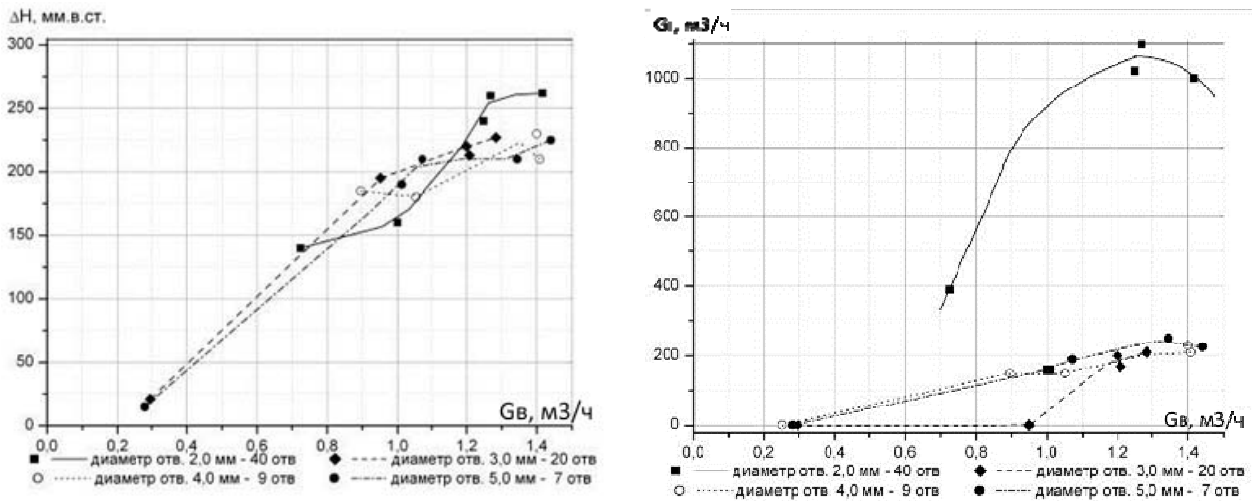


Рис. 2. Зависимости разрежения в газовой камере и расхода эжектируемого газа (воздуха) от расхода эжектирующей жидкости (воды) в макетном образце газового массообменника

На рис. 2 представлены экспериментально определенные зависимости расхода эжектируемого газа от расхода эжектирующей жидкости в макетном образце газового массообменника. Исследования проводились при сменных перфорированных решетках с отверстиями $\varnothing 2,0$ мм (40 отверстий), $\varnothing 3,0$ мм (20 отверстий), $\varnothing 4,0$ мм (9 отверстий), и $\varnothing 5,0$ мм (7 отверстий). Испытания показали, что при расходе эжектирующей среды ок. $1,0$ м³/ч расход эжектируемого газа составлял ок. $0,2$ м³/ч. Размер формируемых пузырей составлял 1–2 мм и менее. При этом же расходе жидкости в безрасходном по газу режиме разрежение в газовой камере массообменника составляло около 200 мм.в.ст.

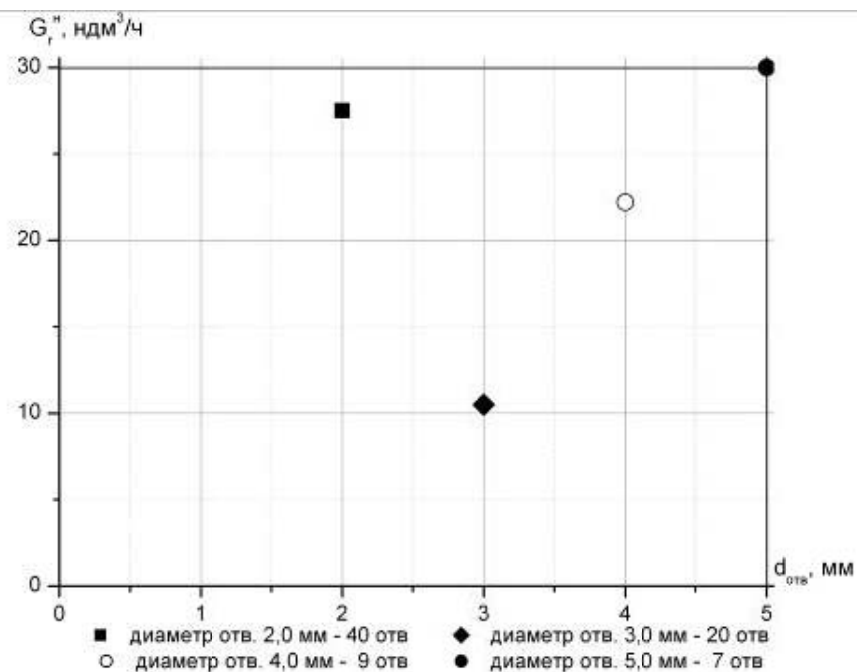


Рис. 3. Зависимость расхода эжектируемого газа (воздуха) одной струей от диаметра отверстий истечения при общем расходе воды ок. $1,3$ м³/ч

На рис. 3 представлена зависимость расхода эжектируемого газа в пересчете на одну струю ($G_{газ} \cdot n_{струи}$) от величины диаметра отверстий истечения при средней скорости жидкости в отверстиях около 2,3 м/с.

Экспериментальные исследования макетного образца массообменного аппарата на стенде ФТ-3

Макетный образец газового массообменника на стенде ФТ-3 предназначен для регулирования содержания примеси кислорода в свинцовом (свинец-висмутовом) теплоносителе, циркулирующем в составе соответствующего высокотемпературного жидкометаллического контура.

Газовый массообменник (рис. 4) содержит электрообогреваемый стальной цилиндрический корпус внутренним диаметром 59 мм, высотой 665 мм с жидкометаллическим теплоносителем и вакуумной камерой в объеме которой падают струи жидкого металла, истекающие из сменной пластины с разным количеством отверстий и разными диаметрами отверстий, а так же приемная емкость внутренним диаметром 153 мм, высотой 350 мм, в которую стекает жидкий металл. Сменные пластины имеют отверстия истечения $\varnothing 2, 3, 4, 5$ мм (рис. 5).

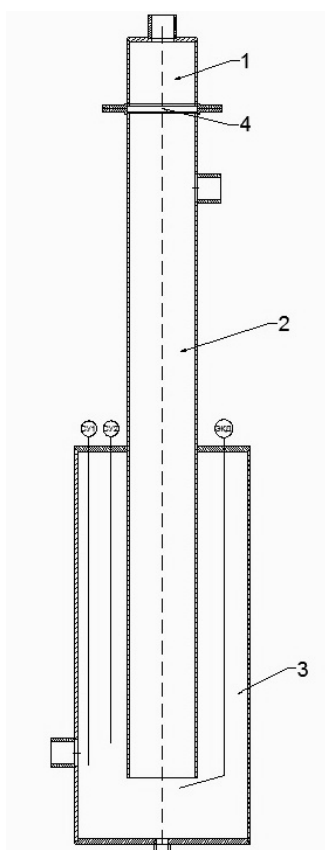


Рис. 4. Модель газового массообменника:

1 – напорная камера; 2 – вакуумная камера; 3 – приемная емкость; 4 – сменные пластины

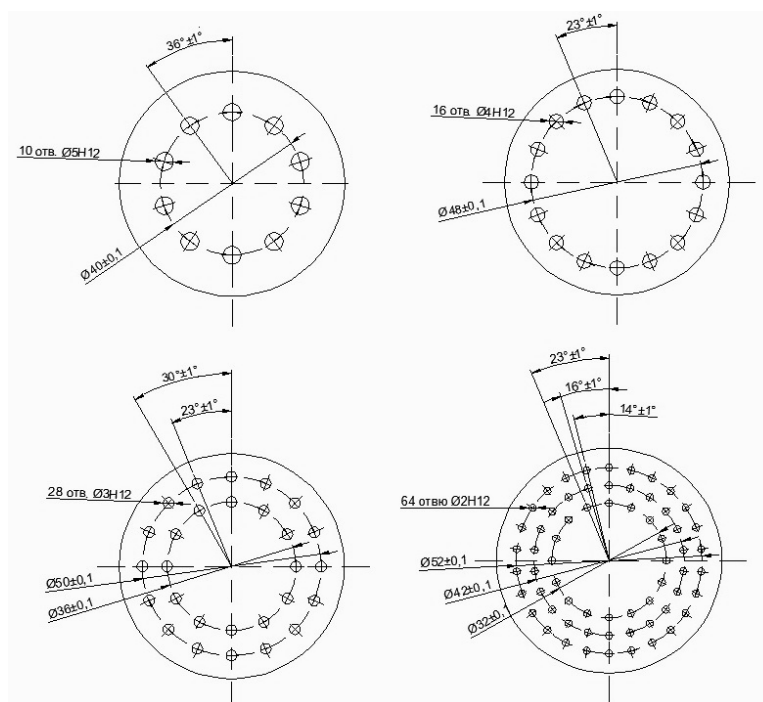


Рис. 5. Сменные пластины

С боку напорной камеры расположен штуцер с трубой $\varnothing 23,0$ мм для подвода газа в вакуумную камеру. В приемной емкости установлены электроконтактные сигнализаторы уровня с подвижным центральным электродом. К напорной камере подключен трубопровод подвода теплоносителя от напора циркуляционного насоса. К приемной емкости подключен трубопровод отвода теплоносителя от газового массообменника к емкости насоса (рис. 6).

Программа испытаний состояла в следующем.

Определение разряжения, создаваемого газовым массообменным аппаратом.

Целью испытаний является определение скорости изменения величины разряжения в газовой полости макетного образца массообменника в зависимости от расхода жидкого металла через массообменным аппаратом при варьируемой высоте падения струй жидкого металла на его свободную поверхность.

Сущность данного этапа испытания заключается в последовательном измерении давления в газовой полости макетного образца в базрасходном по газу режиме при последовательно варьируемых расходах и высотах падения его струй.

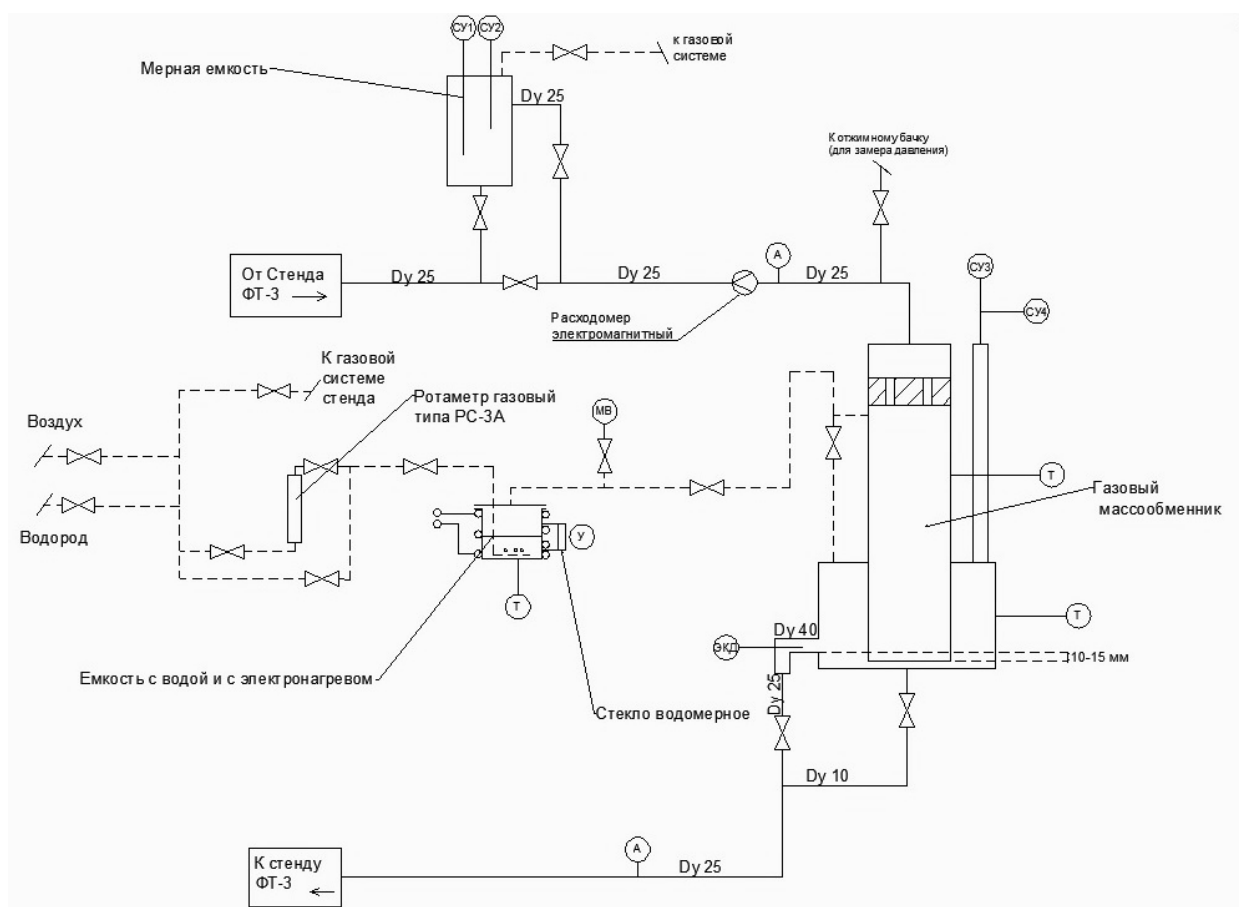


Рис. 6. Петля с экспериментальной моделью газового массообменника

Определение расхода эжектируемого газа

Целью испытаний, согласно настоящему этапу, является определение расхода газа (аргона, водорода) эжектируемого падающими струями жидкого металла в его макетном образце.

Сущность данного этапа испытаний заключается в последовательном измерении расхода аргона и водорода по газовому ротаметру при варьируемом измерении расхода теплоносителя через массообменный аппарат.

Определение динамики раскисления теплоносителя в циркуляционном контуре с использованием массообменного аппарата

При вводе восстановительной газовой смеси (аргон + водород) в объем теплоносителя происходит его раскисление – уменьшение содержания кислорода, в том числе и находящегося в виде шлаков – оксидов теплоносителя за счет химической реакции $PbO + H_2 \rightarrow Pb + H_2O$ с образованием водяного пара.

Сущность данного этапа испытаний заключается в вводе водородосодержащей газовой смеси в объем теплоносителя за счет ее эжекции падающими струями жидкого металла. Продуктом реакции является водяной пар, в последующем транспортируемый потоком газопаровой смеси в конденсатор пара, откуда конденсат периодически сливается в мерную емкость. Контроль за ходом процесса осуществляется по показаниям датчика содержания кислорода в жидком металле и количеству конденсата сливаемого из конденсатора пара, при варьируемом расходе теплоносителя через массообменный аппарат.

Определение характеристик динамики увеличения содержания кислорода в свинцовом теплоносителе в циркуляционном контуре

При вводе кислорода (в составе воздуха) в газовую систему далее в смеси с инертным газом в газовый объем макетного массообменника жидкий металл будет окисляться, в том числе, образуя оксиды теплоносителя. Реакция будет происходить на поверхности падающих струй и свободной поверхности жидкого металла и, возможно, в его объеме при эжекции пузырей кислородосодержащей газопаровой смеси в объем жидкого металла.

Сущность данного этапа испытаний заключается во вводе кислородосодержащей газовой смеси в газовый объем макетного образца массообменника при варьируемом расходе теплоносителя. Контроль за ходом процесса осуществляется по показаниям датчика содержания кислорода в жидком металле.

Этот метод отработывался и использовался в процессе испытаний и отработки макетов проточной части ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300 на стенде ФТ-4 НГТУ.

Следует отметить, что рассматриваемый метод формирования двухкомпонентных газовых смесей в объеме свинец-висмутового теплоносителя использовался и используется на всех стендах с ТЖМТ, в которых имеются элементы содержащие струи ТЖМТ, падающие на его свободную поверхность. Этот метод в неявном виде использовался в реакторных установках АПЛ пр.705 и стенде КМ-1.

Выводы

Метод показал себя достаточно эффективным и простым в эксплуатации и может рекомендоваться в комплексе с устройствами в ТЖМТ, реализующими другие методы, а также в виде единых комплексных систем обработки контуров с ТЖМТ двухкомпонентными потоками ТЖМТ – окислительная или восстановительная газовая смесь.

1. **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.

*Дата поступления
в редакцию 31.10.2017*

A.V. Beznosov, P. A. Bokov, N.S.Volkov, O.R. Zhuravleva

CONTROL OF OXYGEN CONCENTRATION IN A LEAD COOLANT DUE TO FALLING JETS AND DROPS ON ITS FREE SURFACE

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

Purpose: NNSTU conducts experimental and theoretical studies on the regulation of the oxidation potential of the HMLC with the injection of an inert gas mixture with oxygen, hydrogen and their mixture generated by electrolysis.

Design/methodology/approach: Specialists of the NNSTU offer gas mass transfer for the introduction of oxidizing or reducing gas mixtures into the lead or lead-bismuth coolant. The principle of the gas mass exchanger is based on the capture of gas jets on the surface of the liquid.

Findings: The method is efficient and easy to operate and can be recommended in conjunction with devices in HMLC that implement other methods, and also in the form of unified complex systems for processing contours with HMLC two-component streams HMLC - oxidizing or reducing gas mixture.

Research limitations/implications: The use of a mass exchanger will allow maintaining the quality of the coolant and does not require penetration through the lid and other structures of the reactor unit, except for the gas pipeline, which is structurally simple, cheap, and has small weight and size indicators (in drained state).

Originality/value: The proposed method for the formation of two-component gas mixtures in the volume of lead and lead-bismuth coolants can be used both at research facilities and at reactor facilities with HMLC.

Key words: HMLC, mass-exchange equipment, ejection, falling jet, oxidizing gas mixture, restoration gas mixture.