

А.В.Безносков¹, Т.А.Бокова¹, В.И.Рачков²

Нижегородский государственный технический университет, г.Нижний Новгород, Россия (1)
Управление атомной энергетики Федеральное агентство по атомной энергии, г.Москва, Россия (2)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ: ТЯЖЕЛЫЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ – ГАЗ, ВОДЯНОЙ ПАР, ПАРОВОДЯНАЯ СМЕСЬ, КОНДЕНСАТ

АННОТАЦИЯ

Излагаются результаты экспериментальных исследований характеристик двухкомпонентных потоков жидкий металл – «легкая» фаза. Двухкомпонентные потоки тяжелые жидкометаллические теплоносители (свинец, эвтектики свинец-висмут) – газовые смеси реализуются в энергетических контурах реакторов деления ядер, термоядерных реакторов и ускорительно-управляемых систем в процессе технологических обработок контура (формирование и доформирование защитных и электроизолирующих покрытий на поверхностях контура) и в режиме дегазации контура. Двухкомпонентные потоки теплоноситель – водяной пар, пароводяная смесь, конденсат формируются в этих контурах, содержащих парогенератор, при аварийной неплотности в последнем. Приводятся экспериментальные результаты структуры таких потоков, размеров и скоростей следования пузырей «легкой» фазы при ее объемных содержаниях до 10%, температурах теплоносителя 400-550⁰С, скоростях потока от 0,1 до 3,5 м/с, при движении в трубах и всплывании «легкой» фазы в свободных и затесненных объемах.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Обязательным условием нормальной эксплуатации энергетических контуров со свинцовым, свинец-висмутовым и свинец-литиевым теплоносителями является проведение технологических обработок газовыми смесями. Операции по обработкам контура кислородосодержащими газовыми смесями проводятся для создания на поверхностях материалов контура защитных покрытий, обеспечивающих стойкость сталей при рабочих условиях. Для условий бланкетов токамаков такие операции необходимы для формирования и поддержания электроизолирующих покрытий на поверхностях каналов, находящихся в мощном (до 5 тесла) поперечном магнитном поле. Электроизолирующие покрытия позволяют снизить на один - два порядка гидродинамическое сопротивление однокомпонентного потока жидкого металла в поперечном магнитном поле. Для очистки теплоносителя и контура от отложений и взвешенных частиц примесей необходима обработка контуров двухкомпонентными потоками теплоноситель – защитный газ с объемным газосодержанием до 10%, а применительно к свинцовому и свинец-висмутовому теплоносителям для очистки от их оксидов – потоками жидкий металл – восстановительная водородосодержащие газовые смеси.

Одной из потенциально опасных аварийных ситуаций в контурах со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями является межконтурная неплотность парогенератора. При этой аварии в контур жидкого металла поступает пар, пароводяная смесь, конденсат под перепадом давления от 60 до 240 кгс/см². В Нижегородском государственном техническом университете исследуются характеристики указанных процессов и сопутствующих им двухкомпонентных течений ТЖМТ – «легкая» фаза.

При движении газовых пузырей в потоке тяжелого жидкометаллического теплоносителя реакторного контура изменение распределения размеров пузырей и значение мгновенного распределения числа пузырей в поперечном сечении потока возможно за счет следующих основных механизмов:

- дробление пузырей при взаимодействии двухкомпонентного потока с элементами контура (препятствиями) в виде дистанционирующих решеток в трубной системе парогенераторов и в сборке твэлов, в ячейках ТВС и ПГ и др.;

- дробление пузырей под действием турбулентных пульсаций в ядре потока и в пристенной области за счет вязкостных касательных напряжений и касательных напряжений, обусловленных вихревыми движениями в турбулентном потоке;

- изменение (увеличение или уменьшение) размера пузыря за счет изменения величин статической и динамической составляющих давления в двухкомпонентном потоке в локальных точках контура при перемещении пузыря по тракту основного циркуляционного контура, а также за счет изменения температуры газа в пузыре;

- агломерация пузырей (их слияние) с образованием пузырей более крупных размеров за счет относительного движения пузырей под действием турбулентного переноса пузырей вдоль и поперек потока, вследствие различных скоростей всплывания крупных и мелких, деформированных и недеформированных пузырей, эффекта Магнуса и др.;

- агломерация пузырей, обусловленная локализацией их в отдельных участках контура за счет движения двухкомпонентных потоков в поле массовых сил (гравитационных, центробежных и др.);

- агломерация газовой фазы, формирующей прослойку газа на несмачиваемых свинцом поверхностях конструкционных материалов (за счет работы сил поверхностного натяжения) с выведением части газа из потока ТЖМТ и последующим возвратом газа в поток при изменении локальных гидродина-

мических характеристик вблизи поверхности конструкционного материала;

- сепарация газовой фазы на свободной поверхности свинца с выведением газа из двухкомпонентного потока в систему газа. Очевидно, что первые два механизма вызывают уменьшение размеров пузырей и их гомогенизацию в потоке ТЖМТ, а агломерация пузырей в потоке приводит к их укрупнению и локализации в отдельных участках контура.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ ПРИ БАРБОТАЖЕ «ЛЕГКОЙ» ФАЗЫ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ТЖМТ

Экспериментальные исследования проводились на стендах со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем при температурах свинца 400-600⁰С. В качестве «легкой фазы» использовался аргон, водород, водяной пар, конденсат. Заглубление сопловых устройств подачи «легкой» фазы под уровень свинца – до 3500 мм. Температура газов, подаваемых на барботажа – 20-50⁰С, и пара конденсата – 200-300⁰С, давление пара и конденсата перед соплами 4-240 кгс/см². Диаметр сопла истечения 0,6 – 10 мм. Исследования проводились как при начальной скорости свинца, близкой к нулю, так и при развитом газлифте. Контроль за размерами пу-

зырей, скоростями всплытия и частотами следования осуществлялся трехэлектродными электроконтактными датчиками, перемещаемыми по высоте слоя свинца и в четырех радиальных направлениях от оси емкости. Обработка сигналов от датчиков – компьютерная. Моменты отрыва пузырей от сопла и разрыва на поверхности осуществляется акустическими датчиками. Проводилась видеосъемка поверхности жидкого металла в процессе барботажа (рис. 1).

Исследования проводились при подаче «легкой» фазы в «свободный» объем теплоносителя, между витками труб змеевика, погруженного в свинец и в зазор между внутренней и внешней трубками, имитирующими ячейку парогенератора. На рис. 2 представлены примеры гистограмм размеров и скоростей всплытия пузырей. Результаты проведенных испытаний позволяют сделать следующие основные выводы. Характер двухкомпонентных потоков при барботаже газов и водяного пара аналогичен и отличается от условий барботажа конденсата. Основная доля пузырей при отверстиях истечения ϕ 0,6-1,0 мм имела размер ϕ 1,0-15,0 мм. Наиболее вероятный диаметр 1,0-4,0 мм, что близко к пределу чувствительности датчика (0,5-1,0 мм). Скорость всплытия пузырей на начальном этапе – 0,1 – 0,3 м/с. При развитом газлифте (движении двухкомпонентного потока) скорость всплытия пузырей достигала 0,8 м/с и более.

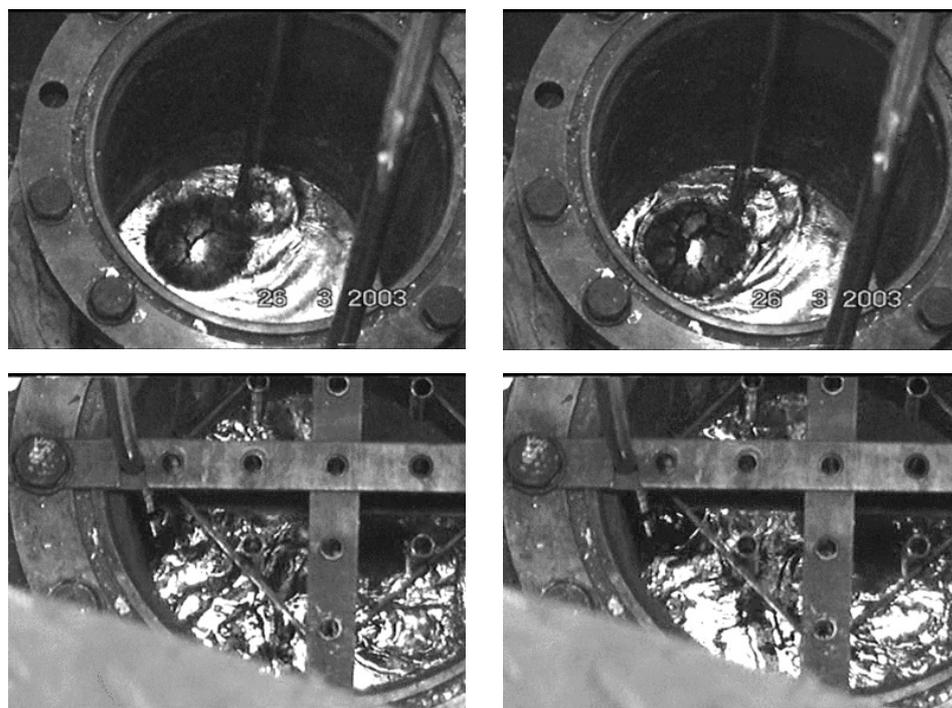
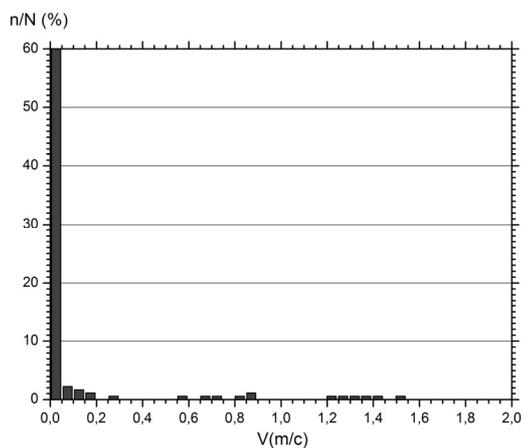
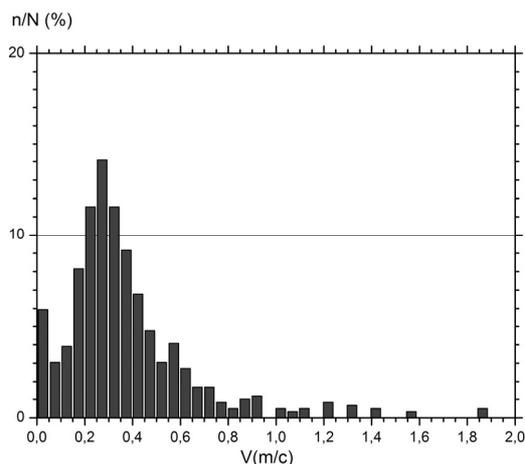


Рис. 1. Последовательные кадры вида свободной поверхности свинца при барботаже пароводяной смеси при следующих рабочих параметрах:

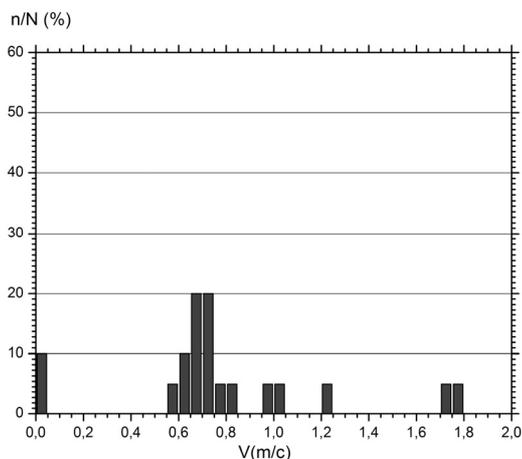
Расход рабочего тела	100 дм ³ /ч
Барботажная нагрузка	6 дм ³ /ч·дм ²
Давление рабочего тела перед соплом	11 кг/см ² (ати)
Заглубление сопла	2700 мм
Диаметр сопла	0,6 мм
Температура свинцового теплоносителя	400°С



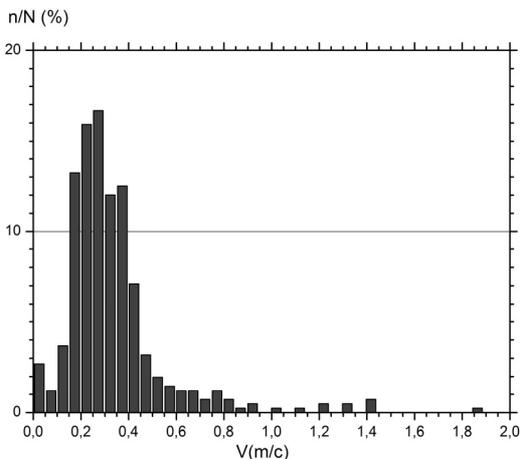
H=100, Точка №1



H=100, Точка №1



H=900, Точка №1



H=900, Точка №1

Рис. 2. Гистограммы распределения длин хорд пузырей и скоростей всплывающих пузырей при барботаже аргона Н (мм) – глубина установки зонда. Точка 1 – периферийное расположение датчика

В этом режиме скорость пузырей в двухкомпонентном потоке складывается из скорости движения потока и скорости движения пузырей относительно жидкого металла. При этом вероятные скорости пузырей относительно жидкого металла при заглублении от 100 до 3000 мм составляют величину 0,05-0,5 м/с, что свидетельствует о значительном количестве пузырей малых размеров, образующихся при дроблении исходных пузырей.

При подаче конденсата на барботаж фиксировались пульсации температур в объеме двухкомпонентного потока. Частоты следования пузырей при подаче конденсата на 3000 мм происходит с частотой более чем в 10 раз значения, полученные при барботаже газов и пароводяной смеси. Часть конденсата при подъеме с этой глубины в составе пузыря испаряется и дробится, а часть испарится не успевает, что фиксируется визуально в виде тумана над свободной поверхностью жидкого металла.

Эксперименты с подачей пара в межтрубный объем змеевиковых и прямотрубных моделей системы парогенератора показали характеристики, близкие к аналогичным при истечении в свободный объем при диаметре сопла истечения до 1,0 мм и перепаде давления на нем до 80-100 кгс/см². При

увеличении давления происходил кризис барботажа с образованием сплошного парового канала до уровня поверхности ТЖМТ с выбросом значительной массы мелкодисперсной фазы свинца в помещение.

Эксперименты с подачей пара через отверстие истечения 10 мм в ячейку ПГ при перепаде давления около 240 кгс/см² (в начальный момент) показали значение средней скорости подъема границы раздела сред на высоте около 1500 – 2000 мм до 50 м/с и более с разрушением элементов стенда. После установки в зазор между трубами под уровнем ТЖМТ дросселя средняя скорость подъема снизилась до ок. 5,0 м/с.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ В ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРАХ

Исследования проводились на стендах со свинец-висмутовым, свинцовым и свинец-литиевым теплоносителями. Ввод газа в поток ТЖМТ осуществлялся через сопловые устройства, захватом газа

падающей струей теплоносителя на свободную поверхность, эжекционными устройствами, а также устройствами ввода и диспергации газа с вращающимися элементами от электродвигателя (диспергатором). Температура теплоносителя – 350-500⁰С, скорость – 0,5-3,5 м/с, объемное газосодержание – до 10%. На рисунке 3 представлен пример зависимости распределения газовых пузырей от их размера при расходе $2,6 \times 10^{-4}$ м³/с и скорости 0,53 м/с при вводе газа через эжектор. При отсутствии прямого контроля газовой фазы в ТЖМТ контроль ее транспортировки с теплоносителем по контуру осуществлялся косвенными методами. К ним относятся изменение показаний датчиков содержания примеси кислорода в теплоносителе и характеристики теплоотдачи и контактного термического сопротивления в теплообменном оборудовании. Во всех случаях устройства ввода газа в поток размещались достаточно далеко от указанных средств контроля и теплообменных поверхностей вдоль трассы контура. На рис. 4 представлены результаты изменения этих характеристик при вводе в контур кислородо-

содержащих и водородосодержащих газовых смесей. Значения содержания кислорода и условия теплообмена синхронно изменяются при вводе соответствующих газовых смесей.

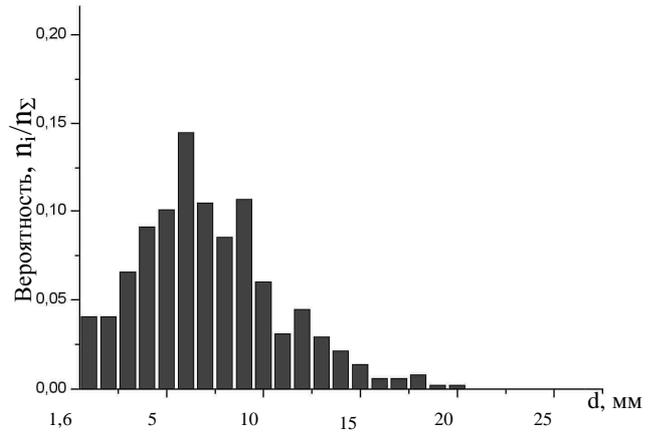


Рис. 3 Гистограмма зависимости распределения газовых пузырей от их размера при расходе $2,6 \times 10^{-4}$ м³/с и скорости 0,53 м/с

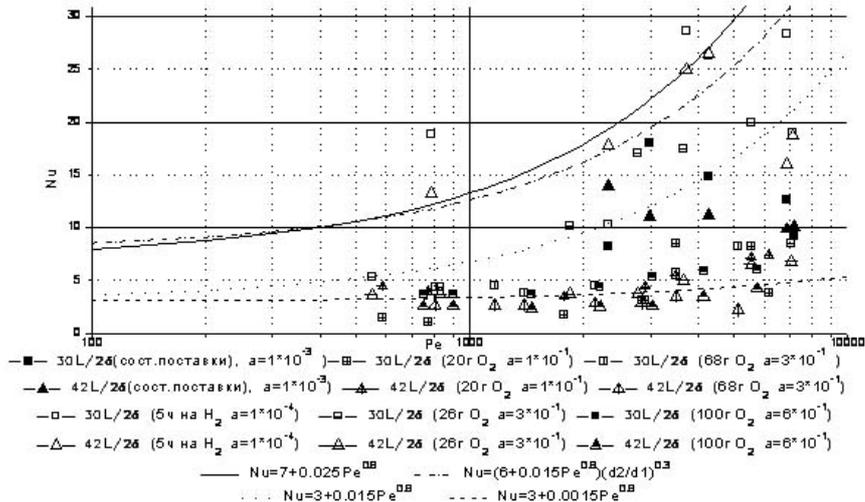


Рис. 4. Локальные характеристики теплообмена, сводный график

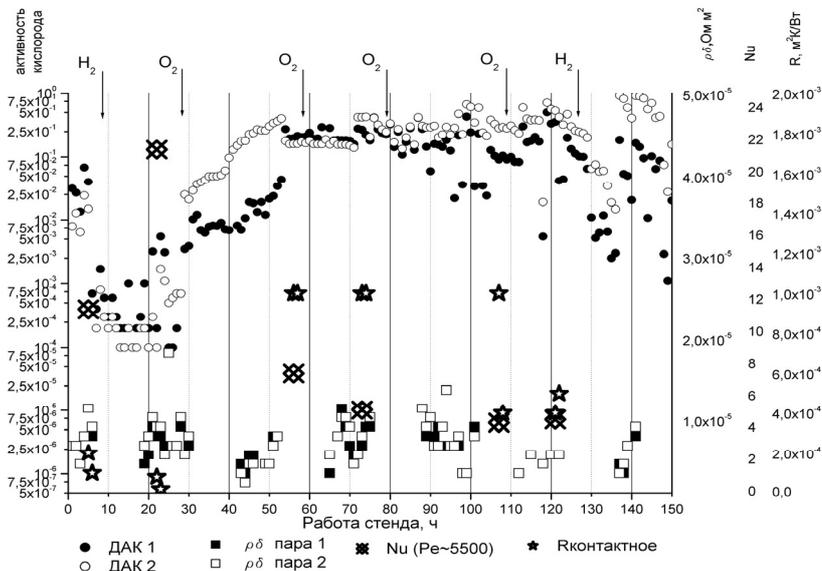


Рис. 5. Сводные данные проведенных исследований

Независимо от устройства ввода газа в поток и исходных размеров формируемых пузырей в горизонтальных протяженных трубах через 10-20 диаметров формируется поток с характеристиками, определяемыми скоростью и газосодержанием потока. При наличии местных сопротивлений (угольников, тройников, вентилях и др.) дополнительно структура потока зависит от характеристик потока и расстояния от него до точки замера. В потоке практически всегда присутствует мелкодисперсная фаза восстановительной (окислительной) газовой смеси, циркулирующая по контуру, определяемая по косвенным признакам. Этими признаками является, прежде всего, интенсивное образование и удаление

отложений частиц примесей, после ввода соответствующих газовых смесей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований позволяют обоснованно разрабатывать проектную и эксплуатационную документацию устройств и режимов технологических обработок контура, а также разрабатывать алгоритм действий при потенциально-опасных аварийных ситуациях «межконтурная неплотность парогенератора».