



XA0201151

- 78 -

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ОГРАНИЧЕНИЯ ВЫХОДА
АЭРОЗОЛЕЙ ЩЕЛОЧНОГО МЕТАЛЛА ИЗ ГЕРМЕТИЧНОГО
ПОМЕЩЕНИЯ

Дробышев А.В., Бураков Б.Г., Куликов Е.В.

СССР

Совещание специалистов МАГАТЭ

"Натриевые пожары"

1983 г.

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе представлены результаты экспериментов по улавливанию аэрозолей щелочного металла с помощью барботера искруббера Вентури. Загрязненный воздух пропусклся через воду, пенообразователь, бутилцеллозоль, в которые добавлялись различные твердые фракции.

Эффективность улавливания аэрозолей с помощью барботера при небольших расходах воздуха достигала 99,8%.

В обоснование безопасности окружающей среды при работе АЭС на натриевом (натрий-калиевом) теплоносителе рассматриваются различные гипотетические аварии и, анализируя их развитие, выбирают те или иные способы и устройства защиты внешней среды. В частности, ранее рассматривалась авария с проливом щелочного металла до сотни литров и его возгорании в замкнутом помещении /1/.

Чтобы уменьшить выбросы аэрозолей в смежные помещения АЭС и во внешнюю среду, по сигналу о течи и загорании натрия автоматически закрываются клапана приточной вентиляции, а вытяжная вентиляция переключается на аварийную систему, снабженную фильтрами для улавливания натриевых аэрозолей. Производительность и емкость фильтров достаточна для работы в течение 30 мин. при температуре воздуха до 400 К. В качестве основного средства очистки воздуха от аэрозолей применяются фильтры на основе специальных тонковолокнистых материалов типа ФШ и ФПА. Эти фильтрующие ткани применяются для очистки воздуха, температура которого менее 423 К /2/. Так как емкость тонковолокнистых фильтров мала (примерно 400 г/м^2), то рекомендуется воздух подвергнуть вначале грубой очистке с помощью циклонов, скрубберов или барботеров. Однако, все эти мероприятия увеличивают гидравлическое сопротивление слоев.

Как показали эксперименты, при этих условиях развития аварии выхода аэрозолей за пределы бокса не наблюдалось, если внутри бокса поддерживалось разряжение 50-100 Па.

Рассмотренный способ и устройства очистки аэрозолей применимы только для малых пожаров, при которых не происходит значительного роста давления и температуры воздуха в помещении. Кроме того, закрытие клапанов приточной вентиляции и переключение на аварийную вентиляцию происходит с запаздыванием относительно пролива металла и, следовательно, имеется период "неконтролируемой" аварии.

Повышение требований к безопасности работы на АЭС на всех режимах ее работы и повышение их единичных мощностей ставит вопрос о рассмотрении гипотетических аварий с проливом и возгоранием больших количеств щелочного металла (10^3 кг), а также аварий, связанных с "пределным" горением в виде капелек разбрызгиваемого факела из щелочного металла. Рассматриваемая модель аварии характеризуется резким нагревом воздуха в помещении и повышением его давления. В воздухе наряду с окислами щелочного металла имеются капельки несгоревшего металла. При попадании жидкого металла на тканевые фильтры типа ФПП или стекловолоконистые, которые применяются для очистки в современных условиях, происходит их разрушение. При высоких концентрациях щелочного металла и их окислов в воздухе описанный выше способ и устройство очистки воздуха не позволит предотвратить выбросы в окружающую среду именно на первоначальной стадии развития аварии, когда происходит резкий рост давления в помещении.

Для предотвращения выхода аэрозолей в этот период аварии экспериментально исследовался способ очистки воздуха пассивный. Для этого воздух при росте внутреннего давления в помещении пропускался через сухие или влажные фильтрующие слои. Как показал опыт, фильтрующие слои должны обладать большой эффективной поверхностью, чтобы происходила достаточная очистка воздуха при небольших скоростях фильтрации. После того как давление внутри помещения сравняется с наружным и произойдет гашение щелочного металла, очистку воздуха необходимо вести штатным способом.

Расчетно-аналитическая оценка давления и температуры газа в помещении при горении в нем щелочного металла проводилась по упрощенной одномерной модели. В модели и программе расчета последствий пролива щелочного металла в боксе использованы следующие предпосылки и допущения:

1. Температура фронта горения (пламени) постоянна. Указанное допущение может не выполняться на последней стадии горения жидкого металла, когда его поверхность покрыта коркой окислов.

2. В модели не учитывался способ разлива металла в бокс, то есть предполагалось, что металл загорается мгновенно на всей площади горения, которая неизменна со временем.

3. Газ в помещении термодинамически идеален, то есть описывается уравнением состояния Клайперона-Менделеева.

4. Предполагается, что газ в помещении перемешивается достаточно быстро, то есть имеет одинаковую температуру и давление во всех точках. Последнее предположение позволяет интегрировать уравнение сохранения энергии по всему объему и рассчитывать изменение средних величин (давление и концентрацию газа, температуру газа и стен) в зависимости от времени.

5. Скорость горения щелочного металла зависит только от концентрации кислорода в газе и площади горения и не зависит от общего давления воздуха.

Эксперименты для определения параметров горения щелочного металла проводились в квазигерметичном помещении и герметичной емкости. В экспериментах варьировались условия и количество заливаемого металла. Помещение с площадью $8,3 \times 5,3 \text{ м}^2$ и высотой 4,75 м, объемом 210 м^3 , в котором проводились эксперименты, сооружено из высококачественного железобетона, оштукатурено слоем $\sim 10 \text{ мм}$ и на высоту 2 м от пола обшито стальными нержавеющими листами Х18Н10Т толщиной 5-8 мм. Пол бокса покрыт листовой нержавеющей сталью, имеются три сливных отверстия, закрытых решетками, через которые раствор щелочи попадает в сливные баки. В наружной стене помещения для сброса избыточного давления установлены шесть клапанов (КИД) с диаметром условного прохода 300 мм. КИДы пропускают

смесь из помещения наружу при наличии перепада давления не менее 30 КПа, что соответствует расходу перепускаемой смеси $400 \text{ м}^3/\text{ч}$ (степень негерметичности). Бокс рассчитан на избыточное внутреннее давление (0,5 ати) 0,05 МПа.

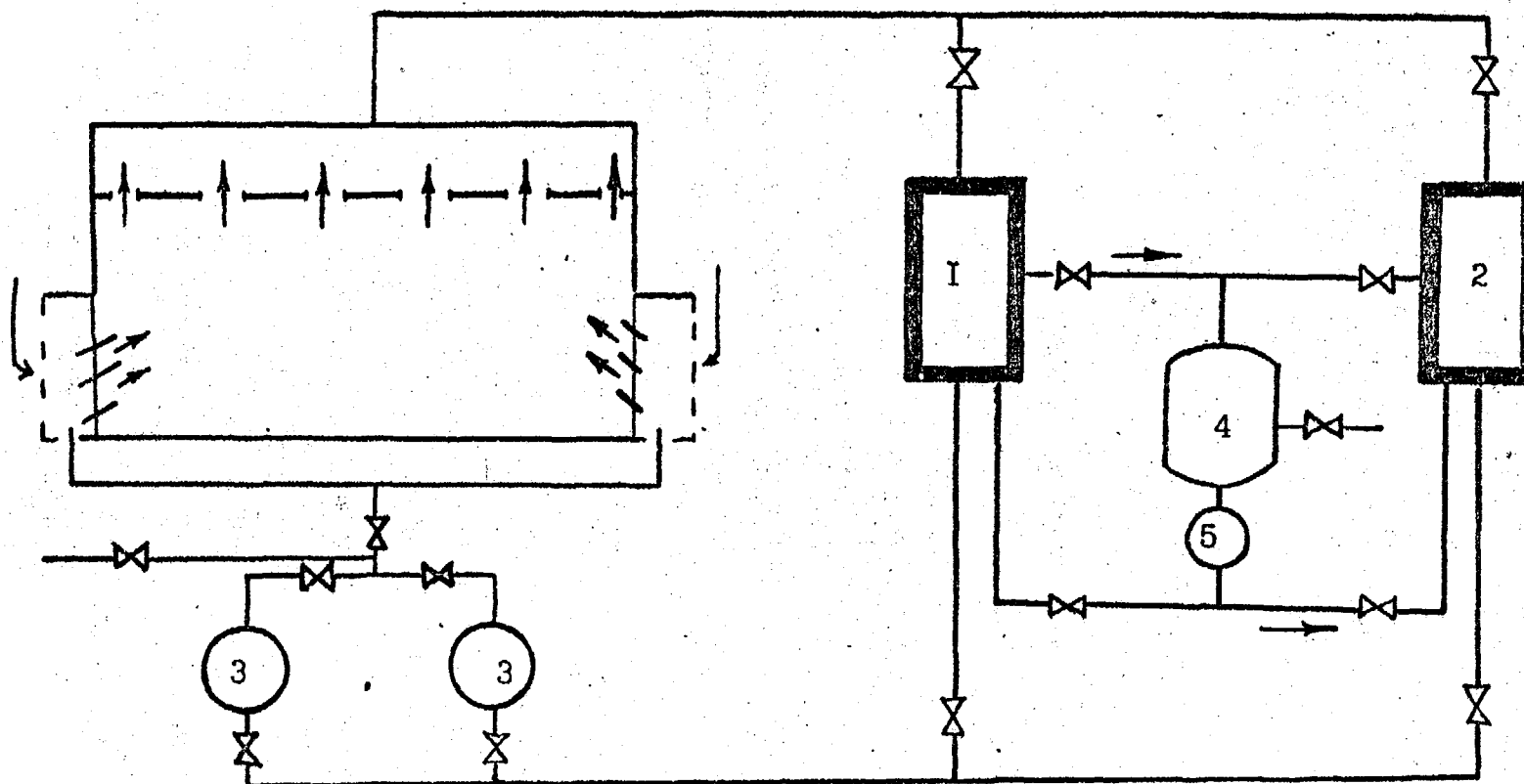
Газоочистка бокса предназначена для предотвращения выброса аэрозолей щелочного металла в окружающую среду (рис. I). Загрязненный воздух из бокса забирается через верхнее отверстие в стене бокса диаметром 200 мм по воздуховодам поступает в скруббер Вентури или в СШН-2-штатный для влажной очистки. Далее воздух поступает в аппарат сухой очистки - туманоуловитель, откуда - на два вентилятора (ВВД-8) и по воздуховоду обратно в бокс в отверстие одного из клапанов избыточного давления. Таким образом, осуществляется рециркуляционный принцип очистки воздуха с расходом $1,6 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Для осуществления необходимого воздухообмена в боксе предусмотрен воздуховод естественной приточной вентиляции - три трубы внутренним диаметром 100 мм. В случае падения давления в боксе ниже наружного через них поступает извне воздух. Бокс имеет герметичную дверь и защитное окно, выполненное из пяти слоев оргстекла с толщиной каждого слоя 12 мм (60 мм - общая толщина).

В результате проведенных расчетов и экспериментов установлено, что максимальное давление, которое развивается в помещении, зависит от степени герметичности. Наблюдались две фазы развития давления в боксе: вначале давление росло за счет интенсивного горения и превышало атмосферное, затем падало за счет выгорания кислорода и уменьшения скорости горения. При высокой степени герметичности и интенсивной работе вентиляции давление внутри бокса было меньше наружного.

Оценка максимального давления (абсолютного), которое развивается в боксе при разливе различных объемов щелочного металла, приведена в таблице. Из таблицы следует, что допустимое избыточное давление

СИСТЕМА ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ АЭРОЗОЛЕЙ НАТРИЯ



- 1 - штатная система очистки;
- 2 - экспериментальная система очистки;
- 3 - вентилятор;
- 4 - ёмкость для рециркуляционной жидкости / воды с различными присадками /;
- 5 - центробежный насос производительностью $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ при $P=0,6 \text{ МПа}$

Рис. 1

было достигнуто при изливе $2,5 \text{ м}^3$ натрия на площади $2,5 \text{ м}^2$ с выключенной вентиляцией и закрытыми клапанами избыточного давления. Следует отметить, что объем кислорода в помещении, который вступает в реакцию с натрием, составляет $33,4 \text{ м}^3$, следовательно, в полностью герметичном боксе может прореагировать $0,17 \text{ м}^3$ (143 кг) натрия с образованием окиси натрия.

Оценка максимального давления в боксе

$V = 209 \text{ м}^3$ при изливе натрия в герметичный и негерметичный объем

№ п/п	Объем излившегося металла, м^3	Площадь горения, м^2	Утечка через вентиляцию, об/ч	Утечка из-за негерметичности, об/ч	Максимальное абсолютное давление, МПа
1	0,05	0,5	0	0	0,105
2	0,05	0,5	0	2	0,100 опыт
3	0,05	0,5	8	2	0,099 опыт
4	2,5	2,5	0	0	0,150
5	2,5	2,5	0	2	0,130

Из приведенной таблицы следует, что при больших площадях горения возможен выход аэрозолей из бокса. Утечка газа из открытого бокса составит до 2 объемов в час.

Для расчета выхода аэрозолей в зависимости от степени герметичности помещения (рис.1) вычисляется концентрация аэрозолей в боксе и объемная скорость выхода газов из бокса. Расчет концентрации аэрозолей, температуры и давления в боксе приводился с учетом изменения концентрации кислорода и осаждения аэрозолей на пол и стены помещения по методике, аналогичной той, которая предложена в /3/.

Объемная скорость выхода газов вычисляется по формуле

$$G_B = K \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P R T}{\rho}}$$

где ΔP , P - расчетные избыточное и абсолютное давления в боксе,

T - расчетная температура в боксе,

K - коэффициент, учитывающий сопротивление выхода газов из бокса.

Коэффициент сопротивления K определялся экспериментально по измеренному перепаду давления при включенной вентиляции с известным расходом. Учитывая недостаточную герметичность помещения, более точное определение степени роста давления и температуры воздуха в условиях предельного (капельного) горения натрия, была применена экспериментальная установка, которая представляла герметичную, стальную емкость объемом $8,5 \text{ м}^3$, оборудованную клапаном избыточного давления. Проектное рабочее давление газа в емкости составляло 10 ат . Щелочной металл подавался в емкость через различные насадки.

Были проведены четыре эксперимента по исследованию горения щелочного металла в герметичной емкости. Щелочной металл объемом 2 л , нагретый до температуры $600 + 700^\circ\text{C}$, впрыскивался в емкость через насадки диаметром 15 , 10 мм и через трубку, в которой имелись отверстия диаметром 3 мм . В опытах фиксировалась температура в различных точках емкости и давление газа. Максимальное избыточное давление, которое было зафиксировано в опыте, составило $0,05 \text{ МПа}$. На последней стадии горения приток тепла от горящего металла был меньше чем отток тепла к стенкам сосуда, что приводило к падению давления газа в емкости.

При расчете поведения давления газа во времени было получено, что среднесмешанная температура газа не позволяет достаточно точно оценить теплоотдачу воздуха к стенкам сосуда. Поэтому расчетная модель должна позволять определять локальные температуры воздуха,

для чего необходимо решать двумерное или трехмерное уравнение энергии.

Очистка воздуха от летучих продуктов горения щелочных теплоносителей может быть осуществлена (аэрозоль Me_2O , Me_2O_2) аналогично очистке воздуха как от растворимых, так и нерастворимых примесей. Однако, экспериментальные исследования показали и существенную специфику поведения аэрозолей в очистительных аппаратах. Основным фактором - это низкая активность к коагуляции. В результате в воздухе, выходящем из очистительного аппарата, концентрация частиц аэрозолей размером 5 - 15 мкм уменьшается очень медленно и кратность прокачки воздуха через очистительный аппарат может составлять 5 - 6 раз.

Очистка воздуха от различных загрязнений осуществляется "сухим" и "мокрым" методами с использованием центробежных и инерционных сил.

При очистке воздуха от аэрозолей щелочных теплоносителей следует учитывать, что удельный вес аэрозолей щелочных теплоносителей составляет $2,5 \text{ г/см}^3$ и обладает высокой растворимостью в воде и других жидкостях. Например, в 100 г воды при температуре 20°C можно растворить 109 г гидроокиси натрия или калия. Учитывать следует и тот факт, что концентрация аэрозолей в воздухе может достигать 50 г/см^3 , а выгорание щелочного теплоносителя в обычных условиях (доступ кислорода не ограничен и тушение не производится) достигает 40%. Это приводит к тому, что сухие пористые фильтры, в том числе при использовании в качестве фильтрующих материалов различных адсорбентов, практически забиваются мгновенно, так как на наружную поверхность пористого материала высаживаются частицы, размеры которых превышают размер пор фильтрующего материала (спектр частиц 0,5 - 60 мкм).

При применении "мокрого" способа на основе пенных скрубберов, циклонов, барботеров, скрубберов Вентури, ротокланов и т.п. обнаруживается недостаточная степень очистки воздуха по двум основным причинам: первая - недостаточная плотность жидкости (струй, капель, ту-

мана) в рабочей полости аппарата (для случая различных скрубберов); вторая - за счет невозможности раздробления воздушных пузырей, содержащих аэрозоли (для случая барботирующих устройств).

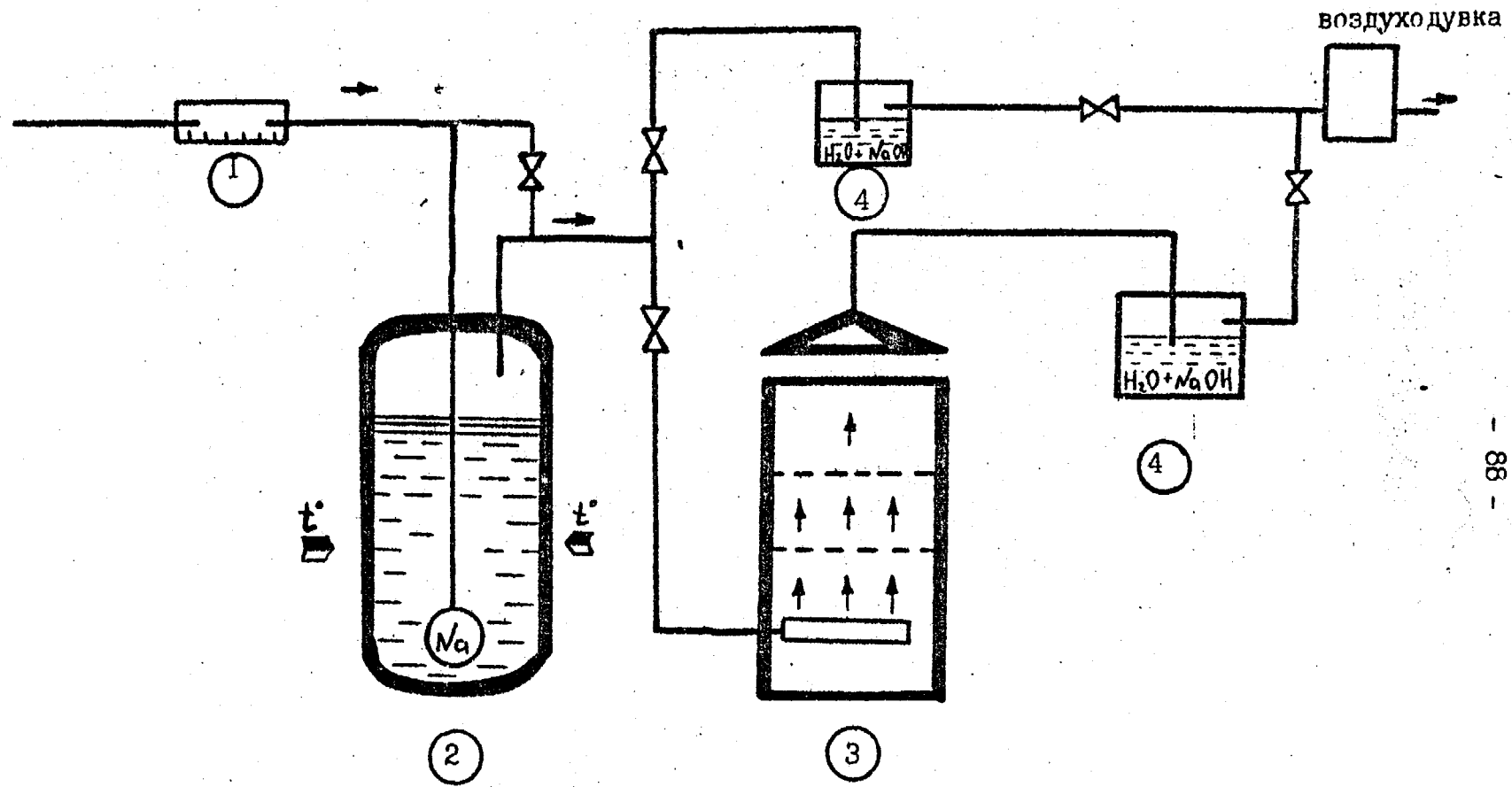
Экспериментальная апробация различных фильтров проводилась на установке, схема которой представлена на рис. 2. Установка включает генератор аэрозолей, очиститель различной конструкции, расходомер и анализаторы концентрации аэрозолей. Воздух подавался под уровень предварительно нагретого натрия и затем поступал в очиститель. Анализ концентрации аэрозолей проводился до и после очистителя.

Для улавливания аэрозольных продуктов сгорания натрия барботажного типа были испытаны следующие растворители: вода, растворы бутилцеллозоля в воде, раствор этилового спирта в воде и пенообразователь ПО-1. Состав пенообразователя: керосиновый контакт - 84%, клей костный - 4-5%, этиловый спирт.

Барботирующее устройство заполнялось вышеперечисленными веществами и через них пропусклся воздух с аэрозолями. Эффективность удерживания аэрозолей определяли по отношению количества продуктов сгорания натрия, поглощенных в очиститель, к их общему количеству. Эксперименты проводились при содержании аэрозолей в воздушном потоке на входе в барботер 28-30 г/м³, расход воздуха 0,6 м³/ч, сечение барботера 0,06 м². На выходе из барботера концентрация аэрозолей составила для воды, ПО-1 и пятипроцентного водяного раствора спирта (42-43) · 10⁻³ г/м³. Таким образом, в пределах точности измерений вышеперечисленные растворители приблизительно обладают одинаковой очистительной способностью.

Существенно более низкой очистительной способностью обладает бутилцеллозоль и его раствор в воде (1:5). Малая очистительная способность бутилцеллозоля связана с низкой скоростью растворения гидроксида щелочного металла по сравнению со скоростью растворения гидроксида в воде.

СИСТЕМА ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ АЭРОЗОЛЕЙ БАРЕОТАЖНОГО ТИПА



1 - расходомер ;
2 - генератор аэрозолей ;

3 - барботер ;
4 - анализатор концентрации

Рис. 2

При больших расходах воздуха барботер работал неустойчиво, так как в слое очистителя образовывались крупные пузыри воздуха. Кроме того, подъемное движение воздуха приводило к замкнутому подъемно-опускному циркуляционному движению воды, которое, в свою очередь, усиливало слияние пузырей, образованию зон, свободных от газа, и уменьшению эффективности очистительных свойств.

Для предотвращения слияния пузырей воздуха внутри барботера между сетками засыпалась галька, металлическая стружка и электроизоляционные бусы. Если размер твердых фракций был более 5 мм, они почти не препятствовали слиянию пузырей. При более мелких фракциях слияние пузырей не наблюдалось, но увеличивалось гидравлическое сопротивление слоя, что выражалось в росте воздушной прослойки под входной сеткой. С ростом скорости воздушного потока твердая фракция начинает двигаться ("витать"), что уменьшает очистительную способность слоя. По-видимому, существуют оптимальные размеры фракций для каждой скорости теплоносителя.

В качестве штатного устройства для очистки воздуха в помещении был испытан типовой скруббер Вентури. В боксе сжигалось 0,5 кг натрия. После получасовой выдержки для выравнивания концентрации аэрозолей в объеме бокса включалась вентиляция. Очищаемый воздух проходил через скруббер, затем через туманоуловитель и выбрасывался в атмосферу (рис. I). Всего было проведено четыре опыта с расходом воздуха 855, 990, 1180, 1600 м³/ч. Расход воды в скруббере во всех опытах составлял 6 м³/ч. Контроль степени очистки проводился по росту освещенности в боксе. Так проводился замер концентрации аэрозолей в боксе и в точке выброса в атмосферу. Эффективность очистки падала по мере уменьшения концентрации окислов на входе в скруббер (например, 3,52 г/м³ на входе и 1,5 г/м³ на выходе). Таким образом,

для очистки воздуха до необходимых предельно допустимых концентраций скруббером необходимо использовать рециркуляционную систему очистки (рис. 1). При реализации рециркуляционной системы (рис. 1) было обнаружено, что, если не происходит частичный сброс очищенного воздуха в атмосферу, то в боксе устанавливается небольшое избыточное давление 20-30 Па, которое приводит к выходу аэрозолей за пределы помещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование пенообразователя типа ПО-1, спиртового раствора, раствора бутилцеллозоля в воде для очистки воздуха от аэрозолей щелочного металла не дает заметного эффекта по сравнению с водой.

2. Для предотвращения выхода аэрозолей из бокса при горении в нем щелочного металла необходимо поддерживать в нем разрежение порядка 50 - 100 Па.

3. При разливе значительной массы щелочного металла для сброса избыточного давления воздуха в боксе можно использовать пассивный способ очистки воздуха.

4. Необходимы дальнейшие эксперименты и расчеты по оптимизации параметров системы очистки воздуха от аэрозолей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов В.М. Техника работы с натрием на АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986.

2. Чечеткин Ю.В. и др. Очистка радиоактивных газообразных отходов АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986.

3. Чечеткин Ю.В. и др. Радиационная безопасность АЭС с быстрыми реакторами и натриевым теплоносителем. М.: Энергоатомиздат, 1983.