

7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. IV. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
8. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984.

9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

Поступила в Редакцию 6.12.16

УДК 536.12+544.772

ОЦЕНКА ОСАЖДЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПАРОВОДЯНЫХ КОММУНИКАЦИЙ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЯХ НА АЭС С РБМК

Афремов Д.А., Жуков И.В. (АО «НИКИЭТ», г. Москва), Припачкин Д.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва), Будыка А.К. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

Минимизация последствий радиационных аварий для человека и окружающей среды является необходимым условием дальнейшего использования атомной энергии. Последствия аварий на АЭС напрямую зависят от выброса радиоактивных веществ в окружающую среду. Причем основную опасность при этом несут радиоактивные аэрозоли. При формировании аварийного выброса радиоактивные аэрозоли проходят путь от активной зоны реактора до атмосферы через контур циркуляции теплоносителя. В процессе этого происходит их осаждение на внутренние поверхности трубопроводов и оборудование контура циркуляции.

В РБМК система трубопроводов и оборудования представляет собой развитую структуру, в составе которой особо следует выделить пароводяные коммуникации с площадью поверхности ~ 10 тыс. м^2 .

Перенос, образование аэрозолей, осаждение на поверхности, повторная возгонка, вымывание влагой продуктов деления в контуре циркуляции зависят от многих факторов, в том числе и температуры внутренней поверхности оборудования контура циркуляции. Эффективность осаждения аэрозолей на поверхности, которая зависит от температуры и ее площади, а также линейной скорости потока пара, переносящего аэрозоли, определяет количество радиоактивных аэрозолей, выходящих за пределы контура циркуляции и поступающих в окружающую среду.

Основной целью статьи является оценка осаждения аэрозолей в условиях теплофизических режимов, возникающих в пароводяных коммуникациях при запроектных авариях на

АЭС с РБМК, с помощью интегрального кода MELCOR [1]. Предварительный анализ показал, что моделирование массопереноса цезия и йода хорошо описывает осаждение аэрозолей на внутренней поверхности термоградиентной трубы в условиях эксперимента FAL-ISP 1 [2, 3]. Поскольку условия эксперимента FAL-ISP 1 схожи с возникающими при запроектных авариях на АЭС с РБМК, представляется корректным моделировать с помощью кода MELCOR перенос и осаждение радиоактивных аэрозолей цезия и йода на внутренних поверхностях пароводяных коммуникаций в РБМК.

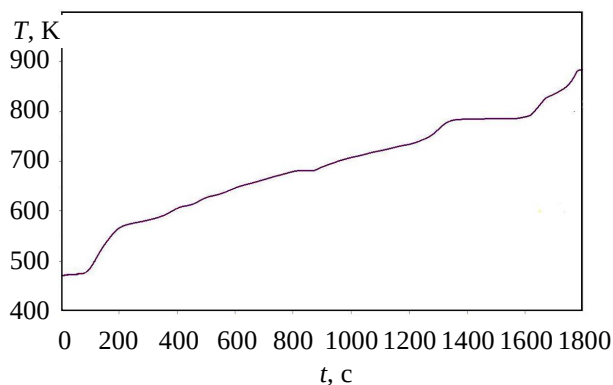
В статье приведены результаты анализа двух запроектных аварий — разрыв раздаточного группового коллектора до обратного клапана с дополнительным отказом в поступлении воды из системы аварийного охлаждения реактора в аварийный раздаточный групповой коллектор и полное длительное обесточивание собственных нужд энергоблока АЭС с отказом на включение дизель-генераторов аварийного энергоснабжения. Дисперсный состав аэрозолей на стадии выхода из-под оболочки твэла при анализе аварий определяется в соответствии с моделями кода MELCOR, описывающими процессы агломерации и коагуляции в атмосфере технологического канала. Температура поверхностей и расход пара в технологическом канале и пароводяных коммуникациях рассчитаны с помощью кода RELAP5/Mod3.2.

Авария с разрывом раздаточного группового коллектора до обратного клапана без подачи воды САОР приводит к осушению зоны тепловыделения в активной зоне, что вызывает рост температуры оболочек твэлов во всех каналах

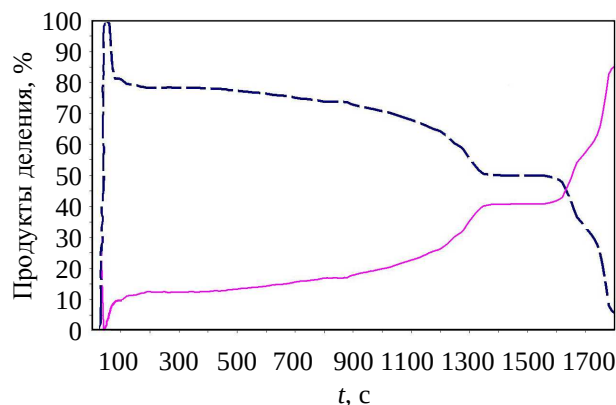
аварийного раздаточного группового коллектора. Оболочки твэлов повреждаются после 1400-й с с начала исходного события только в канале мощностью выше 2,4 МВт. Перенос продуктов деления начинается с 1800-й с. Это связано с тем, что в первые 400 с наблюдается стагнация расхода пара. Продукты деления, которые выходят из поврежденных твэлов в технологический канал, вместе с паром переносятся по пароводяным коммуникациям в барабан-сепаратор и частично осаждаются на внутренних поверхностях пароводяных коммуникаций. Время стабильного удержания осажденных продуктов деления на поверхности в пароводяной коммуникации составляет ~400 с, при этом максимальная доля аэрозолей продуктов деления CsOH и CsI на поверхности в пароводяных коммуникациях достигает ~86% вышедших из ТВС.

При разогреве пароводяных коммуникаций в зависимости от удаленности участка от активной зоны с начальной температуры 473 до 700 К и выше доля аэрозолей на поверхности начинает уменьшаться, поскольку начинается переход аэрозолей в пар с последующей возгонкой с поверхности (рис. 1). Общее количество аэрозолей цезия и иода, вышедших из пароводяных коммуникаций в барабан-сепаратор, за время моделирования 30 мин достигает ~85% аварийного источника (рис. 2).

Авария с полным длительным обесточиванием энергоблока приводит к осушению активной зоны, что вызывает рост температуры оболочек твэлов всех технологических каналов. При использовании запаса воды в гидробаллонах САОР, деаэраторах и отсутствии воздушного охлаждения пароводяных коммуникаций повреждение оболочек твэлов и поступление



Р и с. 1. Динамика температуры участка пароводяной коммуникации



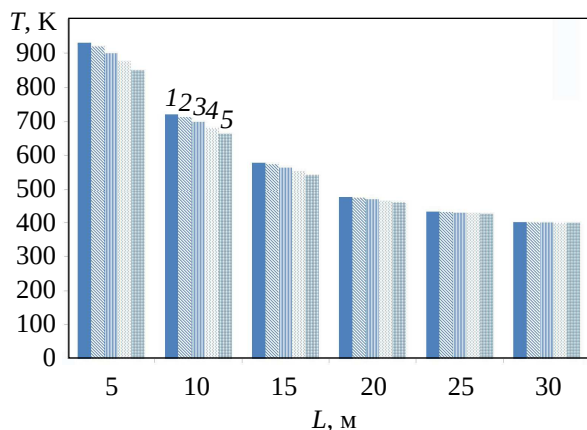
Р и с. 2. Распределение продуктов деления на поверхности пароводяных коммуникаций (---) и в барабане-сепараторе (—)

продуктов деления в объем канала возможно примерно через 1 сут. Продукты деления, которые выходят из поврежденных твэлов в каналы, вместе с паром переносятся по пароводяным коммуникациям в барабан-сепаратор и частично осаждаются на внутренних поверхностях пароводяных коммуникаций.

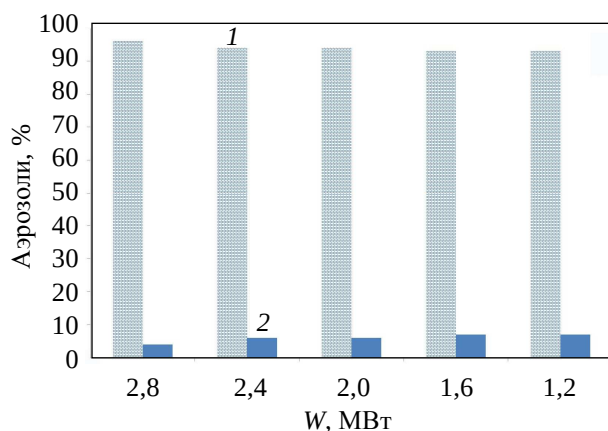
Степень прогрева пароводяных коммуникаций определяет количество продуктов деления, поступающих в барабан-сепаратор, т.е. чем выше температура поверхности коммуникаций, тем меньше продуктов деления осаждается. Распределение температуры на участках пароводяных коммуникаций от активной зоны до барабана-сепаратора определяет поведение продуктов деления на этих участках контура циркуляции. Прогрев участков коммуникаций для различных каналов через ~1 сут после начала аварии слабо зависит от их начальной мощности, т.е. можно предположить, что в этом случае механизм осаждения продуктов деления на поверхности пароводяных коммуникаций один и тот же для всех технологических каналов (рис. 3).

Условия, которые создаются в пароводяных коммуникациях в рассмотренном режиме, обеспечивают эффективную задержку аэрозолей продуктов деления на ~24 ч со времени повреждения оболочек твэлов (рис. 4). На поверхности коммуникаций удерживаются около 95% продуктов деления, поступивших в технологический канал при разгерметизации твэлов, и только около 5% поступает в воздушный объем барабана-сепаратора.

Дополнительно к интегральным оценкам исследовали локальное распределение осевших

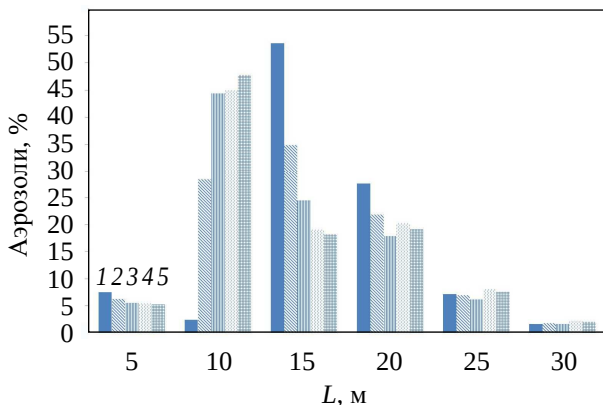


Р и с. 3. Температура по длине пароводяной коммуникации от активной зоны до барабана-сепаратора для канала мощностью 2,8 (1), 2,4 (2), 2 (3), 1,6 (4), 1,2 МВт (5)



Р и с. 4. Распределение аэрозолей продуктов деления между пароводяными коммуникациями (1) и барабаном-сепаратором (2)

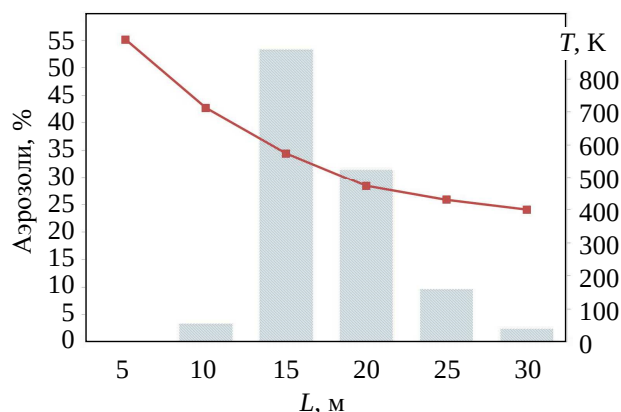
аэрозолей продуктов деления по длине пароводяных коммуникаций, т.е. зависимость осаждения от температуры разных участков поверхности коммуникации (рис. 5). Для каналов мощностью 2,8 и 2,4 МВт максимум осаждения аэрозолей приходится на участок пароводяной



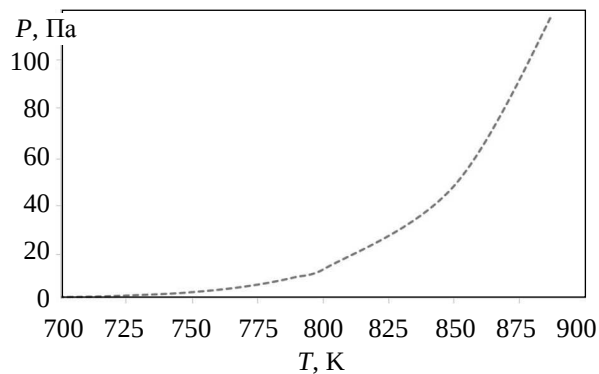
Р и с. 5. Распределение аэрозолей продуктов деления по длине пароводяной коммуникации для канала мощностью 2,8 (1), 2,4 (2), 2 (3), 1,6 (4), 1,2 МВт (5)

коммуникации, удаленный на 15 м от активной зоны. Для каналов мощностью 2, 1,6 и 1,2 МВт максимум смещается ближе к активной зоне и приходится на участок, удаленный на 10 м от активной зоны. Это свидетельствует о том, что аэрозоли продуктов деления, вышедшие из канала с меньшим начальным остаточным энерговыделением, локализуются на поверхностях пароводяных коммуникаций ближе к активной зоне по сравнению с каналами с большим остаточным энерговыделением.

Распределение аэрозолей цезия для канала мощностью 2,4 МВт по длине пароводяной коммуникации обладает максимумом, расположенным на расстоянии 15 м от активной зоны при температуре этого участка ниже 600 К (рис. 6). Это связано с тем, что только при 700 К и выше осевшие аэрозоли цезия начинают переходить в пар с последующим уносом в направлении барабана-сепаратора (рис. 7). Действительно, на рис. 6 видно, что на начальных от активной зоны участках коммуникаций с температурой выше 700 К аэрозоли продуктов деления не осаждаются.



Р и с. 6. Распределение аэрозолей цезия (гистограмма) и температуры по длине пароводяной коммуникации (—) для канала мощностью 2,4 МВт



Р и с. 7. Зависимость парциального давления паров цезия от температуры пароводяной коммуникации

Исследования показали, что при рассмотренных сценариях протекания аварий с полным длительным обесточиванием и разрывом раздаточного группового коллектора эффективность осаждения аэрозолей на поверхностях пароводяных коммуникаций определяется температурным режимом и составляет не менее 95% в течение 24 ч и не более 15% в течение 30 мин.

Для более реалистичной оценки выброса радиоактивных аэрозолей в атмосферу при авариях на АЭС с РБМК необходимо для конкретных сценариев протекания аварий определять задержку аэрозолей не только в пароводяных

коммуникациях, но и во всей системе трубопроводов и оборудования контура циркуляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MELCOR Computer Code Manuals. NUREG/CR-6119, SAND93-2185, 1994.
2. Beard A., Bennet P. CSNI ISP 34 (FALCON), FAL/ISP (92), 1992.
3. Афремов Д.А., Жуков И.В., Журавлева Ю.В., Припачкин Д.А. Моделирование переноса цезия и иода в эксперименте FAL-ISP 1. — Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 5, с. 297—299.

Поступила в Редакцию 13.12.16

УДК 621.039.746

ОЦЕНКА НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫХ ЗОН ИЗНОСА ОТВОДОВ ТРУБОПРОВОДА ИМПУЛЬСНОГО ПНЕВМОТРАНСПОРТА ЗАВОДА РТ-1

Истомин В.Л., Воронин Д.В., Хлебус К.А. (Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск), Патока Д.Б. (ПО «Маяк», г. Озерск)

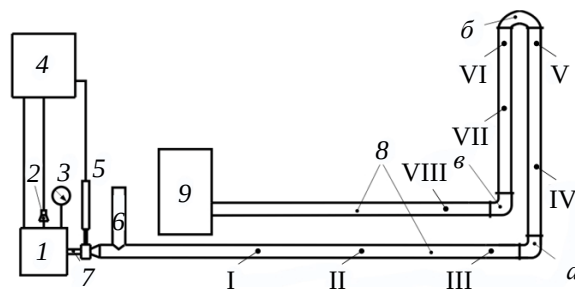
Образующиеся при переработке отработавшего ядерного топлива твердые отходы — нерастворимые в кислотных растворах металлические оболочки твэлов и мелкие металлические частицы-шлам на захоронение транспортируются по трубопроводам системы импульсного пневмотранспорта [1]. Ультразвуковая толщинометрия, проводимая в заводских условиях, показывает, что интенсивному износу подвергаются отводы трубопровода с углом поворота на 90°. Интенсивность изнашивания, как и всей системы транспортирующих трубопроводов, зависит от многих факторов: скорости движения потока, угла, образованного направлением скорости потока и поверхностью (угла атаки), концентрации твердой фазы в потоке, механических свойств транспортируемого материала и трубопровода и др. [2—4].

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования и численного моделирования наиболее вероятных зон повышенного износа отвода на 90° импульсным потоком транспортируемой среды при постоянных радиусе изгиба и диаметре трубопровода.

Экспериментальные исследования проводили на макете, включающем ресивер 1, предохранительный клапан 2, манометр 3, пульт управления подачи импульса газа 4, сопло 7, которое соединяет ресивер и дозирующий кла-

пан 5, присоединенный к началу загрузочного устройства 6 трубопровода 8 (рис. 1). Транспортируемый материал накапливается в приемнике 9. Трубопровод изготовлен из стеклянных труб диаметром 36 мм, соединяющие элементы труб — отводы на 90° — из стали 12Х18Н10Т того же диаметра с радиусом изгиба 65 мм (рис. 2). Отвод состоит из корпуса 1 и восьми вставных элементов — образцов 2, 3, первые четыре расположены по внутреннему, вторые — по внешнему радиусу корпуса. Такая конструкция отвода позволяет оценить зоны, наиболее подверженные истиранию, а также определить углы, в которых возникают наибольшие локальные очаги износа.

Транспортируемым в исследованиях был абразивный материал — электрокорунд 14А № 25 ГОСТ 3647—80 зернистостью 250—315 мкм, обладающий высокими абразивными



Р и с. 1. Макет импульсного пневмотранспорта