

ТЕПЛОПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЕМ И КОНВЕКЦИЕЙ В ГАЗОВОЙ ПОЛОСТИ УСТРОЙСТВА ЛОКАЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА ВВЭР-1200

Каменская Д.Д., Тарасов О.В., Филиппов А.С., Валетов Д.К. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)

В проектах АЭС с ВВЭР большой мощности для обеспечения безопасности при тяжелой аварии с плавлением активной зоны предусмотрено устройство локализации расплава тигельного типа, которое представляет собой охлаждаемый стальной сосуд большого объема, расположенный в отдельном помещении под реактором, частично заполненный «жертвенным» материалом из оксидов железа и алюминия [1—3]. Этот материал частично поглощает тепло перемещаемого расплава активной зоны, связывает его агрессивные компоненты (свободные уран, цирконий, хром) и увеличивает площадь теплоотдачи в охлаждающую воду, снижая поток тепла до уровня, существенно меньшего критического.

В устройстве локализации теплоперенос излучением осуществляется на вышележащие стенки сосуда. Верхняя часть стальных стен защищена от воздействия теплового излучения экранами. Для снижения теплового воздействия расплава его поверхность заливается водой, и поток тепла излучением становится малым. Вода подается только после выхода большей части расплава, до этого экраны могут плавиться под действием излучения. В случае тепловой эрозии экранов залив расплава водой происходит автоматически по достижении определенной глубины эрозии. Время достижения этой критической глубины служит одним из параметров режима устройства локализации расплава. Его оценка проводится численно с помощью версии кода HEFEST, используемой в коде СОКРАТ для анализа теплового режима этого устройства [4, 5].

В первой части настоящей работы проверяется модель радиационного теплопереноса расчетного кода HEFEST, верифицированная только на простых тестах [6]. Расчет с помощью кода HEFEST сравнивается с расчетом по аналогичной модели кода FLUENT (ANSYS, США). В последующих разделах в рамках кода FLUENT сравниваются результаты теплообмена

излучением, полученные с помощью моделей разного типа, оценивается влияние оптической плотности газа, а также вклад конвективного теплопереноса как одного из механизмов в общий теплообмен в газовой полости.

Задачи и подходы к моделированию теплообмена излучением. Одна из задач настоящей работы — сравнение интенсивности механизмов теплообмена в полости устройства локализации расплава, проводимое методами вычислительной гидродинамики. Вторая задача состоит в оценке степени влияния оптической плотности газа на радиационный теплоперенос, что существенно для корректности соответствующей модели кода HEFEST. В ней радиационный теплообмен в нагретой полости рассчитывается в лучевом приближении с использованием матрицы угловых коэффициентов излучения. До поступления расплава в устройство локализации находящийся в нем газ — это воздух. Он оптически почти прозрачен для проходящего излучения при параметрах газовой среды в устройстве локализации, отвечающих исходному состоянию, — давление $\sim 0,1$ МПа, паросодержание в пределах естественной влажности, температура около 1700 К. Поэтому использование лучевого подхода на начальных этапах правомерно.

Источником водяного пара, который полагается основным поглотителем излучения, может быть связанная вода из бетона нижних ярусов устройства локализации. Расчет образования пара и состава газа не входит в задачи настоящей работы, но отметим, что если парциальное давление пара в полости достигает 0,1 МПа, коэффициент поглощения проходящего излучения в газе может увеличиться до $\sim 0,1 \text{ м}^{-1}$ и влияние поглощения потребует уточнения [7, 8]. Предположение об отсутствии поглощения в атмосфере является консервативным с точки зрения нагрева и разрушения стенок полости тепловым излучением, хотя и менее консервативно с точки зрения бокового теплопереноса из расплава в охлаждающую воду.

Для уточнения влияния условий в полости над расплавом на теплоперенос использовались общие подходы, включенные в расчетный код FLUENT [6]. В настоящей работе приведены расчеты с помощью трех моделей радиационного теплопереноса — S2S для прозрачного газа, аналог которой используется и в коде HEFEST, DTRM, позволяющей проводить расчеты при любой оптической плотности среды, и диффузионной модели Росселанда, учитывающей большую оптическую плотность. В единообразной постановке решаются четыре группы задач, в первых трех учитывался только теплоперенос излучением и молекулярный:

сравнение в однотипной постановке задачи: код FLUENT (S2S) и код HEFEST;

расчеты (FLUENT) с моделью DTRM при разной оптической плотности газовой среды, отвечающей разному парциальному давлению пара, в интервале от 0 до 0,1 МПа;

расчеты (FLUENT) с моделью Росселанда при том же наборе оптической плотности — исследование степени отклонения от точной модели;

расчеты (FLUENT) с моделью DTRM в оптически плотном газе с учетом теплообмена конвекцией газа.

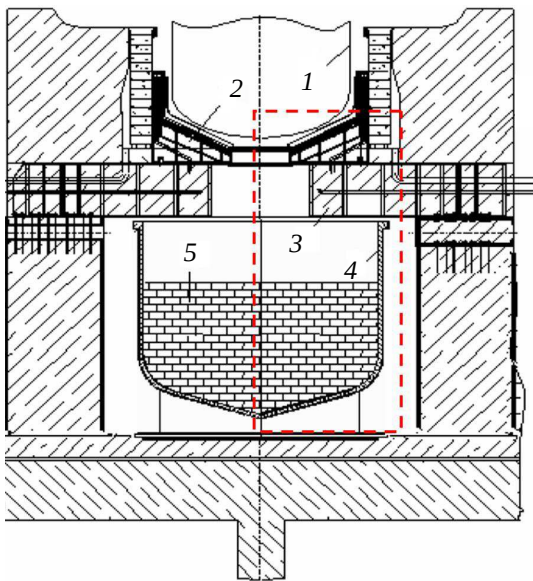
Основа всех моделей излучения одна — уравнение переноса излучения вдоль направления, но подходы к его приближенному решению разные в разных моделях [9]. В модели S2S рассчитывается только теплоперенос между участками границ полости, среда полагается прозрачной, нерассеивающей. Она аналогична применяемой в коде HEFEST, различие состоит в способе построения матрицы угловых коэффициентов излучения. В модели S2S строятся соответствие между всеми парами сегментов границы полости — строятся отрезки, соединяющие их центры. Если влияние среды мало и пространственное разрешение достаточно, этот метод точен. Метод DTRM аналогичен методу S2S — строятся лучи, соединяющие центры сегментов границы, но при переносе энергии вдоль луча учитывается поглощение: решается уравнение переноса излучения. Этот метод универсален относительно оптических свойств среды, но затратен по ресурсам. Для анализа

устройства локализации расплава модель DTRM может быть использована только в эталонных расчетах, при верификации более простых моделей. Модель Росселанда сводит задачу к уравнению диффузионного типа. Это вписывается в процедуру численного решения кода HEFEST, и такая модель может быть внедрена в HEFEST. Основное ограничение здесь связано с неприменимостью при малом и нулевом поглощении.

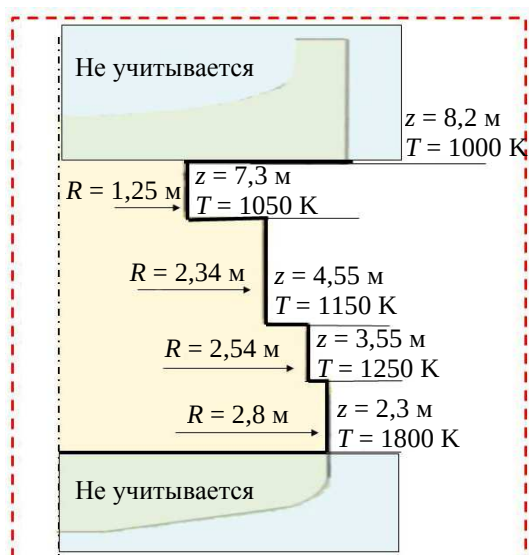
Расчетный код HEFEST предназначен для моделирования взаимодействия расплава с конструкциями на поздней стадии тяжелой аварии АЭС с ВВЭР. Численная реализация основана на двумерном методе конечных элементов. Теплообмен излучением моделируется внутренним граничным условием, основанным на матрице угловых коэффициентов излучения между элементами границы полости [4, 7]. Одна из трудностей расчета устройства локализации расплава — учет переменной геометрии полости, влияющей на коэффициенты этой матрицы. В коде HEFEST матрица для кусочно-цилиндрической области строится и при перемене конфигурации перестраивается по упрощенной методике с использованием аналитических соотношений [9]. Коэффициенты матрицы определяют распределение граничного потока тепла. Степень корректности применения в коде HEFEST упрощенного подхода можно проверить сравнением с расчетом по более общей модели S2S.

Сравнительный анализ теплообмена излучением в газовой полости. На рис. 1 показана схема устройства локализации расплава и выделена подобласть, обычно моделируемая в расчетах с помощью кода HEFEST. На рис. 2 показаны границы осесимметричной расчетной области газовой полости над расплавом в рассмотренной задаче теплообмена между границами. Эта граница неизменна.

Согласно сценарию аварии расплав, выходящий из разрушенного реактора, взаимодействует с жертвенным материалом. После его плавления расплав достигает стального корпуса, при этом его верхняя граница выполаживается по мере растворения жертвенного материала. Стенки полости над расплавом неоднородно нагреты, но до определенного времени не раз-



Р и с. 1. Расположение устройства локализации расплава [2]: 1 — корпус реактора; 2 — нижняя плита; 3 — ферма-консоль; 4 — корпус устройства локализации расплава; 5 — заполнитель



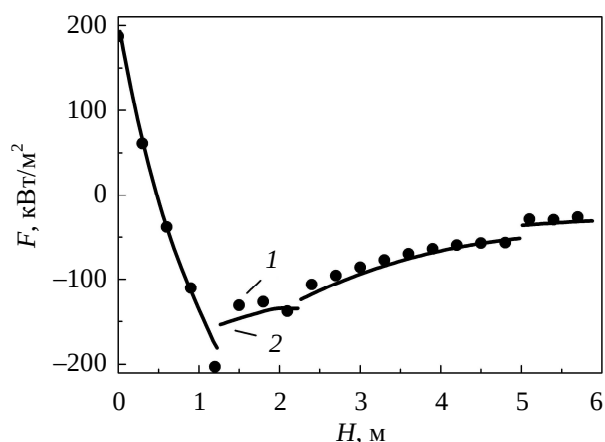
Р и с. 2. Область моделирования устройства локализации расплава и подобласть модели теплообмена в полости над расплавом

рушаются. В расчетах рассмотрен этот этап с неизменной конфигурацией границ полости. Моделировали только область газа, расположенную над уровнем расплава (высота 2,3 м) до верхней границы полости (8,2 м). Решали стационарную задачу с фиксированной температурой границ полости, которую брали на основании расчетов устройства локализации расплава [9]. Расчеты теплового режима в более простой постановке приведены также в работе [10]. В расчетах температура боковой границы моно-

тонно убывает с высотой. Приведенную степень черноты границ полости принимали равной 1.

Расчеты теплообмена в оптически прозрачной среде. Было рассчитано распределение теплового потока на границе расчетной области в задаче 1 с помощью кодов HEFEST и FLUENT. Тепловое излучение с нижней наиболее горячей границы попадает на боковую и верхнюю границы без поглощения в среде. На рис. 3 показано распределение теплового потока вдоль образующей боковых вертикальных участков границы. Положительная величина соответствует испусканию теплового излучения, отрицательная — поглощению. На рис. 3 видно, что расчеты с помощью обоих кодов близки. Вариация числа интервалов углового разбиения границы 20—50 в расчете с помощью кода FLUENT по модели S2S существенно не изменила результаты, поэтому расхождение отчасти может быть объяснено погрешностью упрощенной процедуры кода HEFEST (не учитывалась невыпуклость полости). В целом совпадение результатов удовлетворительное, и упрощенный расчет угловых коэффициентов применим в модели устройства локализации расплава.

Расчет теплообмена в оптически плотном газе. Целью расчетов была оценка влияния выбора модели переноса излучения и коэффициента поглощения газа a . По определению ослабление лучистого теплового потока вдоль пути длиной S пропорционально $\exp(-aS)$. Использовалось приближение серого газа — зависимость коэффициента поглощения от длины волны не



Р и с. 3. Тепловой поток вдоль образующей расчетной области, рассчитанный с помощью кода HEFEST (1) и кода Fluent (2) (отсчет высоты — от поверхности расплава)

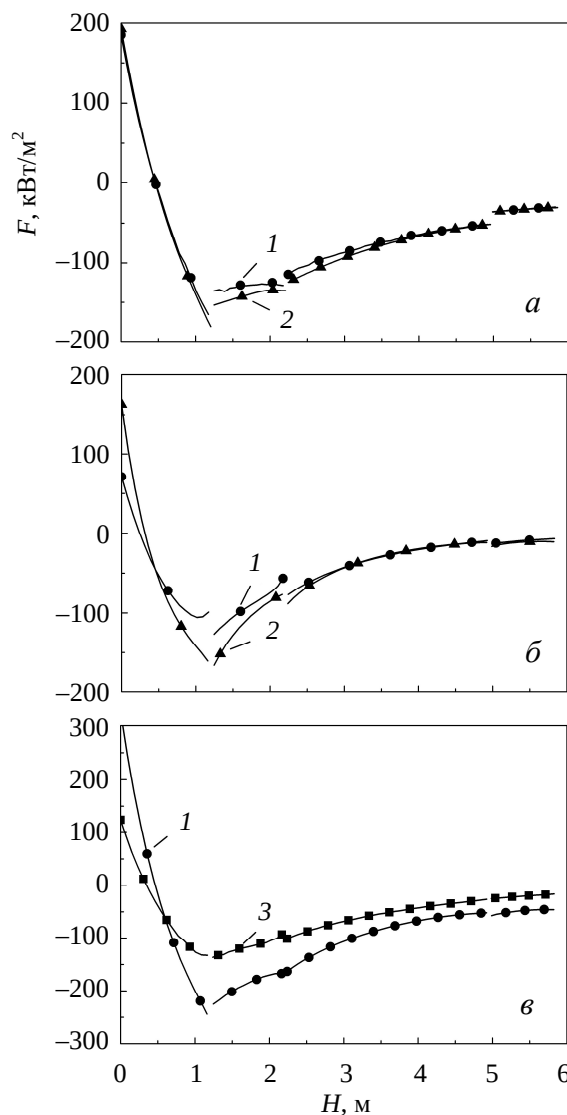
учитывалась. Расчетная область и граничные условия те же, что в задаче 1. Вариантные расчеты проведены с разным сеточным разбиением (проверка аппроксимации) и оптической плотностью: коэффициент поглощения a изменялся от 0 до $0,3 \text{ м}^{-1}$. Исследованные варианты поглощения, которые можно полагать реалистическими при парциальном давлении пара $\sim 0,1 \text{ МПа}$, приведены в таблице. Разбиение проверялось на трех сетках: грубой из 700, средней из 2800 и мелкой из 11 600 ячеек. Характерный размер ячейки средней сетки составляет 10 см.

Варианты численных расчетов и тепловой поток с поверхности расплава

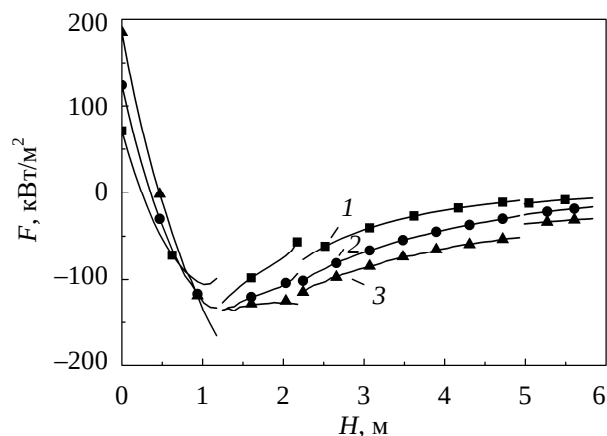
№	$a, \text{ м}^{-1}$	Модель	Интегральный поток, МВт
1	0	S2S	10
2а	0	DTRM	10
2б	0,1	»	9
2в	0,3	»	8
3а	0,1	Росселанда	14
3б	0,3	»	10

При анализе только лучистого теплообмена решалось уравнение энергии с моделью теплообмена излучением. В расчетах группы 4 для оценки вклада конвективного теплообмена вместе с уравнением энергии решались уравнения движения (свободная конвекция) и модели турбулентности $k-\varepsilon$ realizable. Свободная конвекция в заданном поле гравитации возникает вследствие неоднородной температуры границ с максимумом на самом нижнем участке. Для упрощения постановки задачи газ в рамках моделей среды, имеющихся в коде FLUENT, моделировался как несжимаемый, удовлетворяющий закону Шарля. Сообщение полости с окружающей средой через верхнюю границу напрямую не учитывалось. На границах скорость нулевая (условие прилипания).

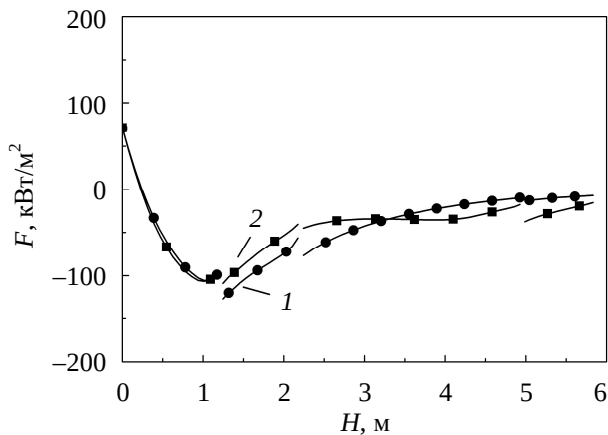
Результаты расчетов. Как показала проверка, сеточное разбиение расчетной области почти не влияет на результаты, поэтому расчеты приведены для средней сетки. На рис. 4—6 показан теплоперенос вдоль вертикальных участков боковой границы, аналогичный приведенному на рис. 3.



Р и с. 4. Тепловой поток, рассчитанный по моделям DTRM (1), S2S (2), Росселанда (3) при коэффициенте поглощения газа 0 (а), 1 (б), $0,3 \text{ м}^{-1}$ (в)



Р и с. 5. Тепловой поток, рассчитанный по модели DTRM при коэффициенте поглощения газа 1 (1), $0,3$ (2), 0 м^{-1} (3)



Р и с. 6. Тепловой поток, рассчитанный по модели DTRM при коэффициенте поглощения газа 1 м^{-1} без учета (1) и с учетом конвекции (2)

Разрывы линий связаны с изломами границ и пропуском горизонтальных обращенных вниз участков. Вследствие спада заданной граничной температуры по высоте тепловой поток уже на небольшой высоте меняет знак — граница начинает поглощать, а не излучать энергию. В верхней части полости тепловой поток становится малым, как и интеграл по этим границам. Следует отметить, что расчеты по модели DTRM выполнены также с моделью дискретных ординат, имеющейся в наборе расчетного кода. Результаты оказались близкими.

Обсуждение. Прежде всего отметим близость расчетов по моделям S2S и DTRM при стремлении поглощения к нулю, что показывает корректность модели DTRM (см. рис. 4, а). Вклад конвекции внутри газовой полости в граничный тепловой поток по сравнению с вкладом лучистого теплообмена относительно мал (см. рис. 6 и таблицу). Отметим, что конвективный теплообмен зависит от движения потока газа, которое определяется циркуляцией не только в газовой полости, но и во всем устройстве локализации расплава. Исследование этого требует более общей модели шахты реактора и помещений АЭС.

Влияние коэффициента поглощения теплового потока излучением в газе видно на рис. 5 и в таблице. Интегральный поток теплоты с нижней границы немного уменьшается при росте поглощения в газе. Это уменьшение теплового потока с поверхности расплава можно охарактеризовать как экранировку — нагретый излучением газ над расплавом начинает переизлучать

обратно на расплав. В реальности мощность нагрева и температура расплава должны при этом увеличиться. Влияние экранировки на состояние расплава, как и возможность большого количества пара над расплавом, требует расчета по полной модели устройства локализации расплава.

Погрешность расчета по модели Росселанда относительно расчета с более точной моделью DTRM при малом коэффициенте поглощения велика, но при росте поглощения она снижается до приемлемого уровня. Для внутрикорпусной стадии тяжелой аварии диффузионное приближение может быть пригодным, поскольку при этом газ в первом контуре в основном состоит из водяного пара при давлении более 0,1 МПа.

Закключение. Пространственное распределение теплового потока излучением в неравномерно нагретой полости со ступенчатой границей, рассчитанное в приближении прозрачного газа с помощью кода HEFEST и по более общей модели кода FLUENT, близко. Это дает основание применять эффективную упрощенную процедуру кода HEFEST для расчета переноса излучения в кусочно-цилиндрической полости с меняющимися границами. Оптически плотный газ в полости над расплавом может влиять на теплоперенос на границах, но эффект относительно мал при коэффициентах поглощения теплового потока излучением в газе, отвечающих реалистическим условиям по количеству пара в атмосфере. Возможность высокого паросодержания в устройстве локализации расплава до залива водой требует дополнительных исследований. Это относится и к плотности других поглощающих компонентов (туман, аэрозоли). Учет поглощения излучения в среде по общим моделям требует больших ресурсов, простая модель Росселанда при малой оптической плотности ($a \sim 0,1 \text{ м}^{-1}$) неудовлетворительна. Но при большем коэффициенте поглощения погрешность уменьшается, что позволяет использовать эту модель как консервативную оценку (относительно влияния излучения на стены полости) в сложной конфигурации границ при давлении пара 0,1 МПа и более. При тяжелой аварии это возможно в случае взаимодействия расплава со стенкой корпуса реактора на внутриреакторной

стадии аварии и с бетоном шахты. Конвекция вносит малый вклад в теплообмен между границами газовой полости над расплавом, основной вклад вносит перенос излучением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asmolov V.G., Bechta S.V., Berkovich V.M. e.a. Crucible type core catcher for VVER-1000 reactor. — In: Proc. of ICAPP'05. Seoul, Korea, 15—19 May 2005, p. 5328.
2. Khabensky V.B., Granovsky V.S., Bechta S.V., Gusarov V.V. Severe accident management concept of the VVER-1000 and the justification of corium retention in a crucible-type core catcher. — Nucl. Engng Technol., 2009, v. 41, № 5, p. 561—574.
3. Сидоров А.С. Устройство локализации расплава для АЭС с ВВЭР-1200. — В сб.: 7-я Межд. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, ОКБ «Гидропресс», 17—20 мая 2011 г., с. 80—93.
4. Филиппов А.С. Разработка, верификация, применение программных средств расчетного анализа поздней стадии тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР. Дис. на соискание ученой степени д.т.н. М., ИБРАЭ РАН, 2013.
5. Bolshov L.I., Strizhov V.F. SOCRAT — the system of codes for realistic analysis of severe accidents. — In: ICAPP'06. USA, 4—8 June 2006, p. 6439.
6. Мосунова Н.А., Сапегин С.А., Филиппов А.С. Верификация моделей теплопередачи программного модуля HEFEST. — Изв. РАН, Энергетика, 2010, № 3, с. 43—82.
7. Каменская Д.Д., Филиппов А.С. Численное моделирование теплообмена в газовой полости устройства локализации расплава. — В сб.: 10-я Межд. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, ОКБ «Гидропресс», 16—19 мая 2017 г., с. 31—40.
8. Filippov A.S., Grigoryev S.Yu., Tarasov O.V. On the possible role of thermal radiation in containment thermal-hydraulics experiments by the example of CFD analysis of TOSQAN T114 air-He test. — Nucl. Engng Design, 2016, v. 310, p. 175—186.
9. Siegel R., Howell J. Thermal Radiation Heat Transfer. Washington: Hemisphere, 1992.
10. Звонарев Ю.А., Цуриков Д.Ф., Кобзарь В.Л. и др. Расчетный анализ эффективности работы устройства локализации расплава для ВВЭР-1200. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и методы расчета ядерных реакторов, 2010, вып. 1, с. 68—78.

Поступила в Редакцию 12.09.17

УДК 539.164+543.42

ВЛИЯНИЕ КОЛЛИМАТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО АЛЬФА-СПЕКТРОМЕТРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

*Припачкин Д.А., Арон Д.В. (ИБРАЭ РАН, г. Москва),
Будыка А.К., Хусейн Ю.Н. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)*

При выбросе радиоактивных аэрозолей в приземный слой атмосферы, а также производственные помещения или газовый объем технологических систем необходимо оперативно в течение не более нескольких часов измерять активность отдельных радионуклидов для проведения защитных мероприятий. Аэрозоли контролируют, как правило, двумя группами устройств. С помощью первой группы отбирают пробы, т.е. концентрируют необходимую для достоверных измерений активность на накопителе (фильтрах или каскадах импактора). Вторая группа устройств (спектрометры) позволяет измерять активность радионуклидов в лабораторных условиях. Активность α -излучающих аэрозолей, как правило, измеряют в условиях

вакуума. Для этого предварительно выделяют радионуклиды из отобранной пробы радиохимическими методами с последующим электроосаждением на подложке [1]. Временной масштаб полного цикла таких спектрометрических измерений для отдельных радионуклидов может достигать нескольких суток [2]. Поэтому такая схема измерений не позволяет оперативно оценивать активность каждого α -излучающего нуклида.

Имеются спектрометрические устройства, с помощью которых можно измерять активность без предварительной подготовки пробы. Например, для мониторинга загрязненных поверхностей используется портативный альфа/бета-спектрометр (Германия) или промышленный