

М.В. Кочерыгин, А.В. Лачугин, С.В. Павлов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОСАЖДЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В СИСТЕМАХ ПРОБООТБОРА НА ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

ООО Научно-производственная фирма «Сосны», Димитровград

Контактное лицо: Михаил Владимирович Кочерыгин: kmv@sosny.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Анализ существующих расчетных методов оценки аэрозольных потерь в системах пробоотбора на объектах использования атомной энергии, представленных в отечественной и зарубежной нормативной документации и технической литературе, с целью формирования предложений по практической оптимизации применения расчетных алгоритмов.

Результаты: Рассмотрены методы расчетной оценки потерь аэрозольных частиц в системах пробоотбора воздуха из труб, вентиляционных систем и помещений объектов использования атомной энергии. Выполнен сравнительный анализ методов оценки аэрозольных потерь, рассматриваемых в российской и зарубежной нормативной и технической документации. Кратко рассмотрены основы механики аэрозолей. На основании проведенного исследования рассмотрены возможные варианты применения рассматриваемых методов оценки аэрозольных потерь при проектировании систем пробоотбора для различных исходных ситуаций. Рассмотрена целесообразность и перспективность выработки четких расчетных алгоритмов для использования при проектировании и эксплуатации пробоотборных систем.

Ключевые слова: радиоактивные аэрозоли, потери аэрозолей, изокинетичность, гравитационное осаждение, седиментация, инерционное осаждение, турбулентное осаждение, диффузионное осаждение, системы отбора проб

Для цитирования: Кочерыгин М.В., Лачугин А.В., Павлов С.В. Сравнительный анализ методов оценки осаждения радиоактивных аэрозолей в системах пробоотбора на объектах использования атомной энергии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 1. С. 33–38. DOI: 10.12737/1024-6177-2022-6-1-33-38

Comparative Analysis of Methods for Estimating the Deposition of Radioactive Aerosols in Sampling Systems at Nuclear Power Facilities

M.V. Kocherygin, A.V. Lachugin, S.V. Pavlov

Sosny Research&Development Company, Dimitrovgrad, Russia

Contact person: Mikhail Vladimirovich Kocherygin: kmv@sosny.ru

ABSTRACT

Purpose: To analyze the existing computational methods for estimating aerosol losses in sampling systems at nuclear energy use facilities, presented in domestic and foreign regulatory documentation and technical literature, in order to form proposals for practical optimization of the use of these computational algorithms.

Results: Methods for calculating the loss of aerosol particles in air sampling systems from pipes, ventilation systems and premises of nuclear energy facilities are considered. A comparative analysis of methods for estimating aerosol losses considered in Russian and foreign regulatory and technical documentation is performed. The basics of aerosol mechanics are briefly considered. On the basis of the conducted research, the possible applications of the considered methods for estimating aerosol losses in the design for various initial situations are considered. The expediency and prospects of developing clear computational algorithms for use in the design and operation of sampling systems are considered

Keywords: sampling system, radioactive aerosols, aerosol losses, isokinetics, gravitational deposition, sedimentation, inertial deposition, turbulent deposition, diffusion deposition

For citation: Kocherygin MV, Lachugin AV, Pavlov SV. Comparative Analysis of Methods for Estimating the Deposition of Radioactive Aerosols in Sampling Systems at Nuclear Power Facilities. Medical Radiology and Radiation Safety. 2022;67(1):33-38. DOI: 10.12737/1024-6177-2022-67-1-33-38

Введение

Контроль поступления радиоактивных аэрозолей в помещения объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) и окружающую среду является важной составляющей обеспечения радиационной безопасности персонала и населения, характеризующей перенос, распространение радиоактивных веществ и формирование внутреннего облучения человека. Качественно спроектированные системы отбора проб аэрозолей из воздуховодов вентиляционных систем и технологических помещений ОИАЭ позволяют эффективно и достоверно контролировать содержание радионуклидов в воздухе рабочих зон и оценивать величины выбросов радиационных

веществ в атмосферу для обеспечения непревышения установленных нормативов [1, 2].

Основной целью проектирования системы пробоотбора является получение репрезентативной пробы аэрозолей на устройстве детектирования, снижение неопределенности измерения. Для достижения данной цели необходимо выполнение следующих основных задач:

- выбор представительных точек пробоотбора;
- обеспечение требований к аспирации аэрозолей (условие изокинетичности пробоотбора);
- минимизация осаждения аэрозолей при доставке их к устройствам детектирования (накопления).

Методы контроля активности аэрозольных частиц предусматривают отбор проб аэрозоля с доставкой на аналитические фильтры (ленты) с целью последующего измерения радиационных характеристик. При этом в реальных условиях пробоотбора объемная активность альфа- и бета-излучающих аэрозолей в прокачанном через аналитический фильтр воздухе может отличаться от ее истинного значения в точке отбора в связи с проявлением физико-механических свойств частиц [3] в неоднородном поле скоростей. Неточности получаемых данных есть следствие многообразия механизмов взаимодействия частиц с элементами систем пробоотбора и между собой, которые должны быть оценены количественно на этапе проектирования для минимизации потерь при выборе конструкции и компоновке элементов системы пробоотбора, а также для определения фактических параметров спроектированной системы при эксплуатации. Для снижения данных неопределенностей требуется корректировка измеренных величин.

Причины вносимых неопределенностей условно можно разделить на две основные категории:

- непредставительный пробоотбор вследствие нарушения условий изокINETИЧНОСТИ на входе в пробоотборное устройство;
- осаждение в пробоотборном тракте при доставке к устройству детектирования.

В настоящей публикации не рассматривается учет проскока аэрозольных частиц и эффективности их осаждения на применяемых для улавливания аналитических фильтрах.

Проблемы организации представительного пробоотбора и проектирования изокINETИЧНЫХ систем рассмотрены в [4].

В настоящей работе рассмотрены существующие расчетные методы оценки аэрозольных потерь, представленные в отечественной и зарубежной нормативной документации и технической литературе, с целью формирования предложений по практической оптимизации применения расчетных алгоритмов.

Основная часть

В работах [3, 5, 6] при решении задач расчетного моделирования осаждения аэрозолей принято рассматривать:

- осаждение аэрозолей под действием гравитационных сил (седиментация);
- инерционное осаждение аэрозолей (импакция);
- диффузионное осаждение аэрозолей;
- турбулентное осаждение аэрозолей.

Гравитационное осаждение заключается в том, что аэрозольные частицы во время движения в пробоотборной линии находятся под воздействием силы тяжести, в результате чего они непрерывно ускоряются вниз. Этому движению противодействует трение воздуха. Осевшие на основание (стенку) пробоотборной трубки аэрозоли могут задерживаться там и, как следствие, не доставлены до устройства детектирования. Существенными факторами воздействия на гравитационное осаждение являются скорость потока в трубе, размер и плотность частиц. Для таких потерь существенными являются горизонтальные компоненты пробоотборной линии [3].

Изучение процессов инерционного осаждения сводится к рассмотрению осаждения аэрозольных частиц в коленах (изгибах) пробоотборных линий. В связи с изменением векторов потока в коленах пробоотборных линий в отношении направления и скорости, частицы вследствие своей инерционности транспортируются к основанию (стенке) трубок и, таким образом, могут осажаться там полностью или частично. Данный процесс модели-

руется уравнением движения аэрозольной частицы при ее соударении с каким-либо предметом, что подробно рассмотрено в [3, 5, 7].

Диффузионное осаждение характерно для частиц с диаметром не более 0,1 мкм [3]. В результате броуновского движения такие частицы могут диффундировать в стенки линий пробоотбора и впоследствии оседают там. Вопросы диффузионного осаждения также предметно изучены и рассмотрены в [3, 5, 6].

При типовых параметрах пробоотбора (расход 30 л/мин, внутренний диаметр пробоотборной трубки 14 мм), расчетное число Рейнольдса Re составит порядка 2900. Это обуславливает необходимость дополнительно учитывать турбулентное осаждение частиц. Расчетные формулы для оценки эффективности осаждения частиц в трубках при наличии турбулентности приведены в методических указаниях МУ 34-70-119 [8].

Таким образом, можно заключить, что на данный момент все основные механизмы осаждения аэрозольных частиц при пробоотборе являются достаточно изученными и широко описанными в научно-технической литературе.

С точки зрения отечественных нормативных требований, методы оценки аэрозольных потерь представлены в методических указаниях МУ 34-70-119 [8] и типовой методике МТ 1.1.4.02.002.1388 «Измерение объемной активности аэрозолей в выбросах атомных станций» [9].

Согласно методике [9] потери аэрозолей при их транспортировке из контролируемого трубопровода (точка отбора пробы) до пробоотборного стенда (фильтра) определяются осаждением только в коленах пробоотборных (импульсных) трубок. Суммарная эффективность осаждения частиц в пробоотборной линии определяется регрессионным рядом:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_1 + (1 - \eta_1)\eta_2 + (1 - \eta_1)(1 - \eta_1)\eta_3 + \dots, \quad (1)$$

где η_1, η_2, η_3 – эффективность осаждения на последовательно расположенных коленах пробоотборной линии.

Методика [9] не учитывает потери аэрозольных частиц в прямолинейных горизонтальных и вертикальных участках пробоотборных линий. Такой подход, очевидно, может быть применим для пробоотборных линий с незначительной протяженностью, когда устройство детектирования или фильтродержатель расположены в непосредственной близости от точки отбора. Часто при практическом проектировании систем пробоотбора выполнение данного условия крайне затруднительно.

Расчетные зависимости для оценки аэрозольных потерь на горизонтальных и вертикальных участках достаточно информативно представлены в методических указаниях МУ 34-70-119 [8].

Несмотря на то, что в методических указаниях [8] приведены расчетные зависимости для оценки аэрозольных потерь в различных случаях, четкий структурированный алгоритм для практического применения не сформулирован. Кроме того (как и в [9]), в данном документе отсутствует метод количественной оценки потерь частиц непосредственно на входе в пробоотборный зонд – потеря частиц вследствие анизокINETИЧНОСТИ отбора. Несомненно, при выполнении всех условий изокINETИЧНОСТИ пробоотбора в соответствии с ОСТ 95 10171 [10] потери частиц на входе в пробоотборное устройство будут стремиться к нулю. Однако в реальных условиях безусловное выполнение всех требований [10] в части изокINETИЧНОСТИ не всегда осуществимо (например, ввиду различных режимов работы вентиляционной системы). Именно поэтому учет аэрозольных потерь вследствие анизокINETИЧНОСТИ также является важной составляющей.

Кроме того, неясен текущий статус методических указаний [8]. В рамках подготовки настоящей публикации не было обнаружено информации о текущем статусе данного документа.

Рассмотрим зарубежные методические рекомендации по учету аэрозольных потерь. В стандартах ДСТУ ISO 2889 [11], ISO 2889 [12] представлен комплекс расчетных формул для оценки осаждения аэрозолей в системе. Данный комплекс основан на модели, подробно рассмотренной в приложении В американского стандарта ANSI/HPS N13.1 [13]. В данной модели применен дифференцированный подход, заключающийся в последовательном математическом описании всех процессов взаимодействия частиц в системе пробоотбора с возможностью получения на выходе общего коэффициента потерь, учитывающего потери на всех участках пробоотборной системы без исключения. Аналогичный подход изложен в немецком стандарте DIN 25423-1:1999-12 [14].

В приведенных стандартах также рассмотрены алгоритмы оценки аэрозольных потерь при наличии разности линейных скоростей контролируемой среды во входном отверстии зонда и в точке отбора контролируемого воздушного потока вентиляционной системы (анизокINETИЧНЫЙ пробоотбор). Положение зондов соосно ориентировано навстречу вектору потока воздуха в венткоробе, поэтому величину потерь аэрозольных частиц определяют исключительно их аэродинамические свойства, выраженные отношением, определяющим условие изокINETИЧНОСТИ [11, 12]:

$$\varepsilon_v = \frac{v_0}{v_s}, \tag{2}$$

где v_0 – линейная скорость в вытяжном венткоробе, м/с; v_s – линейная скорость на входе в пробоотборный зонд, м/с.

Для различных ε_v можно определить соотношение измеренной концентрации в пробе C к истинной C_0 в исследуемом потоке. В табл. 1 представлены такие соотношения, полученные экспериментальным путем [11, 12]. Вклад становится существенным с увеличением размера частиц и разницы скоростей.

В стандарте [14] учитывается также диффузионное осаждение, которое актуально для высокодисперсных аэрозолей.

Итоговый поправочный коэффициент потерь $k_{\text{пот}}$ радиоактивных аэрозолей при их транспортировке от точки отбора до устройства детектирования в отечественных и зарубежных источниках вычисляют по формуле [9, 14]:

$$k_{\text{пот}} = \frac{1}{1 - \eta_{\Sigma}}, \tag{3}$$

Таким образом, зарубежная нормативная документация дополнительно предполагает учет следующих эффектов в системах пробоотбора:

- потери вследствие анизокINETИЧНОСТИ на входе в пробоотборное устройство;
- потери в импульсной (транспортной) линии при доставке пробы к устройству детектирования за счет диффузионного осаждения.

Учитываемые физические эффекты при оценке потерь аэрозолей для различных регламентирующих документов представлены в табл. 2.

Рассмотрим количественно вклад основных эффектов в суммарные потери частиц. Для оценки вклада прямолинейных участков в общую величину потерь рассмотрим характерную пробоотборную линию, исходные данные по которой приведены в табл. 3. Предполагаем, что пробоотбор является заведомо изокINETИЧНЫМ, и тем самым, потери вследствие анизокINETИЧНОСТИ на входе в пробо-

Таблица 1

Определение эффективности осаждения частиц η_0 вследствие нарушения условий изокINETИЧНОСТИ пробоотбора
Determination of the efficiency of particle deposition η_0 due to violation of the conditions of isokinetic sampling

ε_v	$\eta_0 (C/C_0)$		
	$d_p=4$ мкм	$d_p=12$ мкм	$d_p=17$ мкм
0,50	1,06	1,14	1,20
0,60	1,03	1,09	1,13
0,70	1,02	1,05	1,08
0,80	1,01	1,02	1,04
0,90	1,00	1,01	1,01
1,00	1,00	1,00	1,00
1,10	0,99	0,98	0,98
1,20	0,98	0,96	0,95
1,30	0,97	0,94	0,94
1,40	0,97	0,92	0,93
1,50	0,96	0,89	0,93
1,60	0,95	0,83	–
1,70	0,94	0,78	–
1,80	0,92	0,72	–
1,90	0,9	0,65	–
2,00	0,86	–	–

Примечание: d_p – среднее значение диаметра частиц в потоке

Таблица 2

Учитываемые физические эффекты при оценке потерь аэрозолей для различных регламентирующих документов
Physical effects taken into account when assessing aerosol losses for various regulatory documents

Физический эффект	Наименование регламентирующего документа				
	МТ 1.1.4.02.002.1388	МУ 34-70-119	ДСТУ ISO 2889–2001 (ISO 2889)	ANSI/HPS N13.1	DIN 25423-1
Седиментация	–	+	+	+	+
Импакция	+	+	+	+	+
Турбулентное осаждение	–	+	+	+	+
Диффузионное осаждение	–	–	+	+	+
АнизокINETИЧНОСТЬ	–	–	+	+	+

Таблица 3

Исходные данные для расчета
Initial data for calculation

Параметр	Значение
Объемный расход пробоотбора, л/мин ($\text{м}^3/\text{с}$)	30 (3,25)
Внутренний диаметр пробоотборной трубки, мм	14
Количество изгибов (90°), шт.	6

отборное устройство не учитываются. Все изгибы транспортной линии соответствуют 90° и выполнены в соответствии с требованиями [10]. Средний диаметр контролируемых частиц будем рассматривать в диапазоне от 1 до 10 мкм при плотности $1 \text{ г}/\text{см}^3$, что также позволяет пренебречь диффузионным осаждением.

Результаты расчетов эффективности осаждения аэрозольных частиц для данной линии при различных длинах горизонтальных и вертикальных участков и средних размерах частиц представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что вклад в осаждение на прямолинейных участках вносят потери за счет гравитационного осаждения на горизонтальных участках. Вклад турбулентного осаждения становится заметным только для крупных частиц диаметром более 10 мкм [15], а также при пара-

Таблица 4

Результаты расчетов эффективности осаждения и коэффициента потерь аэрозольных частиц для различных исходных ситуаций
Calculation results of the deposition efficiency and the loss coefficient of aerosol particles for various initial situations

№ п/п	L _в , м	L _г , м	d _{ср} , мкм	η _{Σ1}	η _{Σ2}	K _{пот1}	K _{пот2}	A, %
1	0	5	1	0,021	0,017	1,021	1,017	0,41
2	0	10	1	0,025	0,017	1,025	1,017	0,83
3	0	20	1	0,033	0,017	1,034	1,017	1,67
4	0	50	1	0,057	0,017	1,061	1,017	4,30
5	5	0	1	0,017	0,017	1,017	1,017	0
6	10	0	1	0,017	0,017	1,017	1,017	0
7	20	0	1	0,017	0,017	1,017	1,017	0
8	50	0	1	0,017	0,017	1,017	1,017	0
9	0	5	2	0,082	0,067	1,089	1,072	1,67
10	0	10	2	0,098	0,067	1,108	1,072	3,41
11	0	20	2	0,128	0,067	1,147	1,072	7,06
12	0	50	2	0,221	0,067	1,283	1,072	19,75
13	5	0	2	0,067	0,067	1,072	1,072	0
14	10	0	2	0,067	0,067	1,072	1,072	0
15	20	0	2	0,067	0,067	1,072	1,072	0
16	50	0	2	0,067	0,067	1,072	1,072	0
17	0	5	4	0,287	0,237	1,403	1,311	7,06
18	0	10	4	0,337	0,237	1,510	1,311	15,20
19	0	20	4	0,438	0,237	1,780	1,311	35,86
20	0	50	4	0,740	0,237	3,852	1,311	>100
21	5	0	4	0,237	0,237	1,311	1,311	0
22	10	0	4	0,237	0,237	1,311	1,311	0
23	20	0	4	0,237	0,237	1,311	1,311	0
24	50	0	4	0,237	0,237	1,311	1,311	0
25	0	5	10	0,912	0,862	12,33	7,246	70,18
26	0	10	10	→1	0,862	>50	7,246	>100
27	0	20	10	→1	0,862	>50	7,246	>100
28	0	50	10	→1	0,862	>50	7,246	>100
29	5	0	10	→1	0,862	>50	7,246	>100
30	10	0	10	→1	0,862	>50	7,246	>100

Примечание:L_г – длина горизонтальных участков линии, м;L_в – длина вертикальных участков линии, м;d_{ср} – средний диаметр аэрозольных частиц, мкм;η_{Σ1} и K_{пот1} – соответственно, суммарная эффективность осаждения и коэффициент потерь частиц, рассчитанные согласно МУ 34-70-119 [8];

ДСТУ ISO 2889 [11] (ISO 2889 [12]), ANSI/HPS N13.1 [13], DIN 25423-1:1999 [14];

η_{Σ2} и K_{пот2} – соответственно, суммарная эффективность осаждения и коэффициент потерь частиц, рассчитанные согласно МТ 1.1.4.02.002.1388 [9];A – коэффициент, равный 100 %*(K_{пот1} – K_{пот2})/K_{пот2} и показывающий разницу между коэффициентами K_{пот1} и K_{пот2} в %

метрах пробоотбора с большими числами Рейнольдса. Потери за счет осаждения на прямолинейных горизонтальных участках могут возрастать как с увеличением длины горизонтальной составляющей участка, так и с увеличением среднего размера рассматриваемых частиц, а также плотности частиц.

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента A от длин горизонтальных прямолинейных участков для частиц с размерами от 1 до 10 мкм.

В методике МТ 1.1.4.02.002.1388-2017 [9] указано, что основную часть аэрозольных частиц в радиоактивной пробе составляют частицы с размером до 2 мкм. Представленные к практическому применению в [9] значения эффективности осаждения в зависимости от количества колен также рассчитаны для частиц с размером до 2 мкм. Сравнительный анализ полученных данных показывает, что алгоритм [9] показывает приемлемые результаты (A ≈ 5%) при следующих граничных условиях: дисперсность частиц 1-2 мкм, протяженность горизонтальных участков до 15 м, отсутствие выраженного турбулентного течения с высокими числами Рейнольдса (>10⁵).

Однако уже при незначительном превышении данных граничных условий вклад в суммарные аэрозольные потери, обусловленный прямолинейными участками линий, становится ощутимым. Так, например, при увеличении длины горизонтальной составляющей линии с

15 до 25 м и для частиц со средним диаметром 4 мкм соотношение эффективностей гравитационного и инерционного эффектов будет составлять порядка 1,5 (коэффициент A равен 50%). Как известно из практики [16], на действующих ОИАЭ протяженность пробоотборных линий может значительно превышать рассмотренные граничные значения.

В работе [16] при анализе практических исследований дисперсного состава частиц вентиляционных систем АЭС и потерь в пробоотборных линиях приводятся данные, что на аэрозольных частицах размером более 2 мкм может находиться более 50 % активности долгоживущих аэрозолей в пробе, а потери в аэрозольной линии при длине 20 м без изгибов приводят к кратным изменениям активности отобранной пробы. Возможность наличия на ОИАЭ частиц со средним диаметром более 2 мкм также рассматривается в [15].

Заключение

Как показывает представленный сравнительный анализ, удобный упрощенный алгоритм [9] применим для распространенных частных случаев, но не охватывает множества вариантов, встречающихся на практике. Кроме того, как было отмечено, представительность пробоотбора достигается в совокупности выбором точки пробоотбора и изокинетичностью.

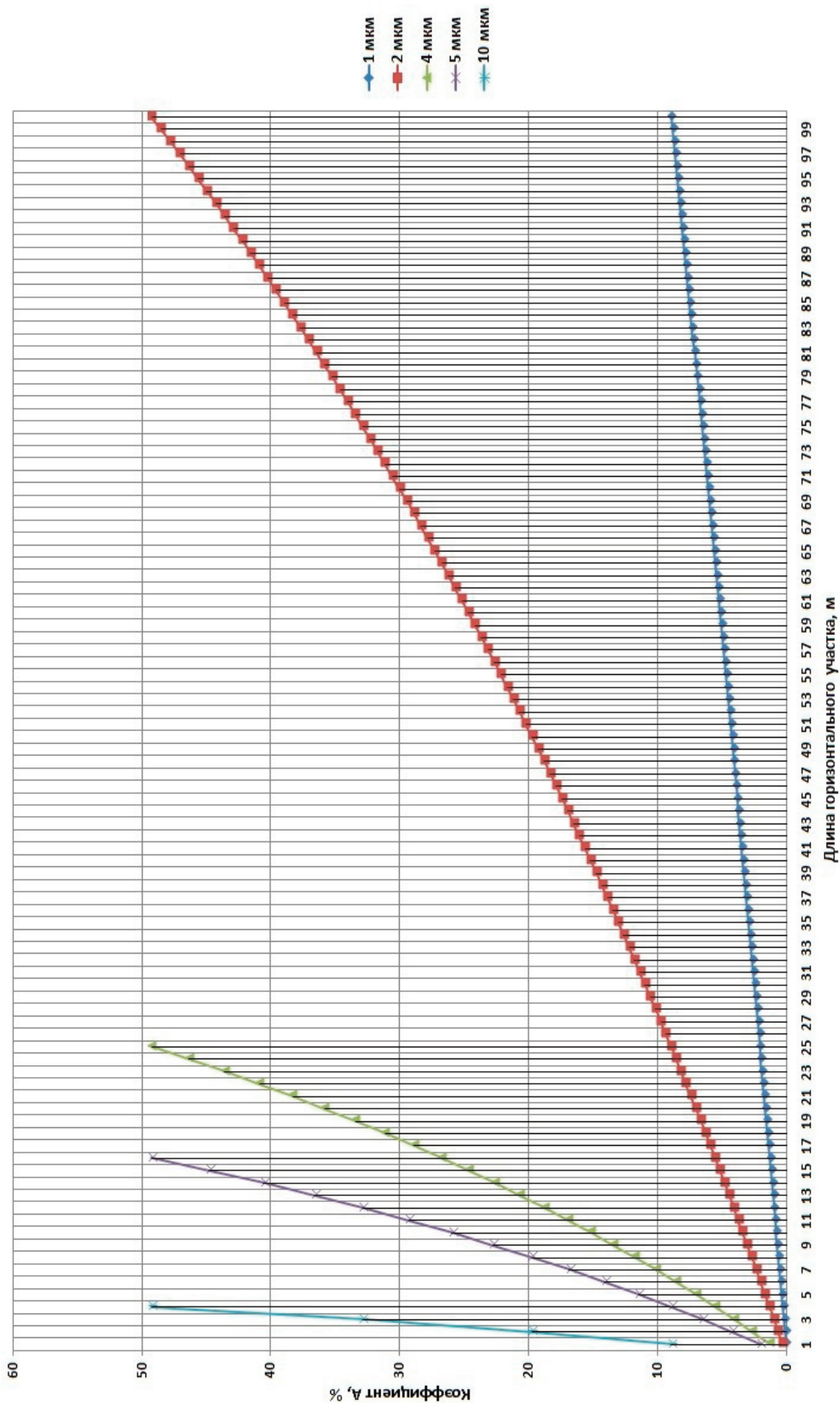


Рис. 1. Зависимость коэффициента A от длин горизонтальных прямолинейных участков для частиц с размерами от 1 до 10 мкм
 Fig. 1. Dependence of the coefficient A on long horizontal straight sections for particles with sizes from 1 to 10 μm

Корректный расчет аэрозольных потерь уже на этапе проектирования системы пробоотбора позволяет оптимизировать конструкционные решения. Качественный выбор компоновочных решений позволяют минимизировать протяженности линий доставки проб. Однако структурированный алгоритм оценки потерь необходим и при эксплуатации, поскольку на практике большинство пробоотборных систем далеки от идеальных параметров.

Выходом из сложившейся ситуации может быть разработка универсального алгоритма с вариативностью набора учитываемых физических эффектов в зависимости от исходных параметров. В качестве входных данных могут быть использованы средний размер и плотность аэрозолей, число Рейнольдса, общая протяженность горизонтальных и/или вертикальных участков, количество поворотов и иные параметры системы пробоотбора. Исходя из совокупности исходных данных будет подбираться набор физических эффектов, которые следует учитывать. Универсальный алгоритм может быть оформлен в виде методических указаний (рекомендаций) и дополнен следующими общими данными:

- характерные распределения дисперсности (среднего размера, плотности) частиц для различных типов ОИАЭ и источников аэрозолей;
- порядок выбора точки отбора пробы и построения

изокинетичного пробоотбора [4];

- теоретические данные по физическим эффектам, которые следует учитывать при оценке аэрозольных потерь, с указанием однозначных математических зависимостей [8, 10–12, 14];
- примеры расчета и справочные данные для наиболее характерных параметров элементов пробоотборных систем;
- методические основы экспериментального определения показателей эффективности спроектированной системы пробоотбора.

Формирование теоретической базы может совокупно основываться на рассмотренных алгоритмах [8, 10, 11, 12, 14] с созданием расчетной справочной базы, подкрепленной практическими исследованиями (в том числе проведенными ранее [15]).

Внедрение универсального алгоритма в перспективе может привести к следующим эффектам:

- повышение качества проектирования пробоотборных систем на вновь создаваемых ОИАЭ и, как следствие, достоверности результатов радиационного контроля в целом;
- введение обоснованно-консервативного подхода к учету неопределенностей, обусловленных потерями в пробоотборном тракте, при расчете выбросов радиоактивных веществ в атмосферу и лучевых нагрузок на персонал.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. Утв. Мин-вом здравоохранения РФ 07.07.2009. Введ. 01.09.2009. М.: Роспотребнадзор, 2009. 68 с.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Взамен СП 2.6.1.799-99. Утв. Министерством юстиции РФ. Введ. 26.04.2010. М., 61 с.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей / Под ред. Фука Н.А. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 351 с.
4. Кочерыгин М.В., Павлов С.В., Лачугин А.В. О выборе точек отбора проб при проектировании автоматизированных систем для контроля объемной активности радиоактивных аэрозолей из вентиляционных труб на объектах атомной // АНРИ. Аппаратура и новости радиационных измерений. 2018. № 2. С. 2–11.
5. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию / Под ред. Райст П. М.: Мир, 1987. 278 с.
6. Спурный К., Йех Ч., Седлачек Б., Шторк О. Аэрозоли. М.: Атомиздат, 1964.
7. Математические модели аспирации аэрозолей в тонкостенные пробоотборники / Под ред. А.К. Гильфанов, Ш.Х. Зарипов. Казань: Казан. ун-т, 2012. 120 с.
8. Методические указания по отбору проб радиоактивных аэрозолей на атомных станциях. Требования к проектированию: Методические указания МУ 34-70-119-85. Главное научно-техническое управление энергетики и электрификации. Введ. 1985-07-01. М., 1986. 18 с.
9. МТ 1.1.4.02.002.1388-2017. Измерение объемной активности аэрозолей в выбросах атомных станций: приказ АО «Концерн Росэнергоатом» от 01.02.2018г. № 9/123-П. М., 2017. 33 с.
10. ОСТ 95 10171-86. Охрана природы. Атмосфера. Отбор проб газоаэрозольных выбросов АЭС на содержание радионуклидов: Требования к условиям отбора проб. Введ. 20.09.1986. М., 1986. 13 с.
11. ДСТУ ISO 2889-2001 Загальні принципи відбирання проб радіоактивних речовин із повітря (ISO 2889:1975, IDT): національний стандарт України. Київ: ДЕРЖСПОЖИВ СТАНДАРТ, 2003. 37 с.
12. ISO 2889:2010. Sampling Airborne Radioactive Materials from the Stacks and Ducts of Nuclear Facilities. Start Date 29-Jan-2010. 2010. 103 p.
13. ANSI/HPS N13.1-1999. Sampling and Monitoring Releases of Airborne Radioactive Substances from and Ducts of Nuclear Facilities. American National Standard, New York, Approved 12 January 1999 American National Standards Institute, Inc. 2011. 111 p.
14. DIN 25423-1:1999-12. Probeentnahme bei der Radioaktivitätsüberwachung der Luft. Teil 1-3. Allgemeine Anforderungen. Berlin, 2000.
15. Довыдьков С.А., Огородников Б.И. Оценка осаждения радиоактивных аэрозолей в пробоотборном канале системы «Байпас» объекта «Укрытие». // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля вип. 2007. № 7. С. 110-116.
16. Полянцева С.С., Пырков И.В., Григорьев Е.И. Актуальные вопросы контроля газоаэрозольных выбросов на АЭС. // АНРИ. Аппаратура и новости радиационных измерений 2009. №2. С. 37-46.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 17.06.2021. Принята к публикации: 05.09.2021.

REFERENCES

1. Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). Sanitary Rules and Regulations SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the Ministry of Health of the Russian Federation 07.07.2009; Introduction 01.09.2009. Moscow Publ., 2009. 68 p. (In Russ.).
2. Basic Sanitary Rules for Ensuring Radiation Safety (OSPORB 99/2010). Sanitary Rules and Regulations SP 2.6.1.2612-10. Instead of SP 2.6.1.799-99. Approved. The Ministry of Justice of the Russian Federation. Introduction 26.04. Moscow Publ., 2010. 61 p. (In Russ.).
3. Fuks N.A. Mechanics of Aerosols / Ed. Fuks N.A. Moscow, AN USSR Publ., 1955 351 p. (In Russ.).
4. Kocherygin M.V., Pavlov S.V., Lachugin A.V. On the Selection of Sampling Points in the Design of Automated Systems for Monitoring the Volume Activity of Radioactive Aerosols from Ventilation Pipes at Nuclear Power Facilities. ANRI. 2018;2:2-11 (In Russ.).
5. Raist P. Aerosols. Introduction to the Theory / Ed. Raist P. Moscow, Mir Publ., 1987. 278 p. (In Russ.).
6. Spurny K., Yekh Ch., Sedlachek B., Shtorkh O. Aerosols. Moscow, Atomizdat Publ., 1964 (In Russ.).
7. Ed. Gilfanov A.K., Zaripov Sh.Kh. Mathematical Models of Aerosol Aspiration into Thin-Walled Samplers. Kazan Publ., 2012. 120 p. (In Russ.).
8. Methodological Guidelines for Sampling Radioactive Aerosols at Nuclear Power Plants. Design Requirements. Methodological Guidelines: MU 34-70-119-85. Main Scientific and Technical Department of Energy and Electrification. Introduction 1985-07-01. Moscow Publ., 1986. 18 p. (In Russ.).
9. МТ 1.1.4.02.002.1388-2017. Measurement of the Volume Activity of Aerosols in the Emissions of Nuclear Power Plants. Put into Effect by the Order of JSC "Concern Rosenergoatom" Dated 01.02.2018 No. 9/123-P. Moscow Publ., 2017. 33 p. (In Russ.).
10. OST 95 10171-86. Nature Protection. Atmosphere. Sampling of Gas-Aerosol Emissions of Nuclear Power Plants for the Content of Radionuclides. Requirements for Sampling Conditions. Introduction 20.09.1986. Moscow Publ., 1986. 13 p. (In Russ.).
11. DSTU ISO 2889-2001 Official Principles of the Selection of Samples of Radioactive Speech iz Povitrya (ISO 2889:1975, IDT), the National Standard of Ukraine. Kiiv, DERZHSPZHIV STANDARD, 2003. 37 p. (In Ukr.).
12. ISO 2889:2010. Sampling Airborne Radioactive Materials from the Stacks and Ducts of Nuclear Facilities. Start Date 29-Jan-2010. 2010. 103 p.
13. ANSI/HPS N13.1-1999. Sampling and Monitoring Releases of Airborne Radioactive Substances from and Ducts of Nuclear Facilities. American National Standard, New York, Approved 12 January 1999 American National Standards Institute, Inc. 2011. 111 p.
14. DIN 25423-1:1999-12. Probeentnahme bei der Radioaktivitätsüberwachung der Luft Teil 1-3. Allgemeine Anforderungen. Berlin, 2000 (In Deutsch).
15. Dovydkov S.A., Ogorodnikov B.I. Assessment of the Deposition of Radioactive Aerosols in the Sampling Channel of the Bypass System of the Shelter Object. Problemi bezpeki atomnih elektrostansii i chornobilya vip. 2007;7:110-116 (In Ukr.).
16. Polyantsev S.S., Pyrkov I.V., Grigoriev E.I. Current Issues of Control of Gas-Aerosol Emissions at Nuclear Power Plants. ANRI. 2009;2:37-46 (In Russ.).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 17.06.2021. Accepted for publication: 05.09.2021