

## ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ ИСТОЧНИКА ВЫБРОСА В АТМОСФЕРУ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ И АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ДЕМОНТАЖЕ ИЛИ РАЗРУШЕНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Р. И. Бакин, А. В. Зарянов, Е. А. Ильичев, А. А. Киселев, С. Н. Красноперов,  
В. П. Меркушов, Д. А. Припачкин, А. В. Шикин

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 27 июня 2019 г.

*В статье представлены основные результаты разработки программного средства для оценки источника выброса в атмосферу радиоактивных веществ, образующегося на этапе разрушения или сноса загрязненных зданий и сооружений. Оно позволяет учитывать некоторые физические особенности формирования источника выброса для фактических сценариев технологического процесса сноса или разрушения. К таким физическим особенностям относятся образование аэрозолей и пыли при падении материалов, образование аэрозолей в процессе резки загрязненных материалов, подавление выброса фиксаторами и др. Результатом работы программы является количество вышедшей в окружающую среду активности, а также характеристики спектра частиц в зависимости от диаметра, которые могут быть использованы в качестве входных данных для транспортного модуля расчетно-прогностических комплексов, предназначенных для решения задач по обеспечению радиационной безопасности объектов использования атомной энергии как в период их функционирования, так и при выводе из эксплуатации, включая оценку параметров атмосферного выброса, моделирование атмосферного переноса радиоактивных веществ, оценку параметров радиационной обстановки и определение необходимости и эффективности контрмер.*

**Ключевые слова:** оценка источника выброса, демонтаж и разрушение зданий, радиационная обстановка, модели атмосферного переноса, обоснование безопасности объектов использования атомной энергии.

### Введение

Одной из главных задач при анализе возможных последствий аварийных событий радиационного характера является оценка источника выброса радионуклидов в окружающую среду. Наличие информации об источнике выброса обеспечивает возможность расчетного определения параметров радиационной обстановки с помощью моделирования атмосферного переноса, на основании которых принимаются решения о реализации тех или иных контрмер.

Рассматриваемое в данной статье программное средство (ПС) предназначено для оценки

источника выброса в случае демонтажа или разрушения выведенных из эксплуатации объектов использования атомной энергии (в том числе и объектов ядерного наследия), а также может использоваться для решения подобных задач в сфере обращения с радиоактивными отходами (РАО). Его создание является попыткой инженерного решения задач в этом направлении исследований и практической деятельности.

Анализ современных практик [1, 2, 3] проведения оценок параметров атмосферного выброса при проведении работ по сносу (демонтажу)

зданий и сооружений, загрязненных радиоактивными веществами, показал, что, кроме использования немногочисленных эмпирических данных по формированию, выходу и подавлению аэрозольных выбросов, на данный момент отсутствуют подходы, полностью обеспеченные константной базой. Это объясняется малым количеством исследований в этой области и, соответственно, недостатком данных измерений на промплощадках при проведении практических работ, большой вариативностью условий их проведения и конструктивными и технологическими особенностями каждого демонтируемого (сносимого) объекта. С учетом этого для оценки источника выброса был выбран подход с использованием пятифакторной формулы [3]. Все компоненты этой формулы зависят от особенностей технологического процесса разрушения/демонтажа, включая порядок проводимых операций (например, резка материала, удаление образовавшихся отходов (далее — уборка)). Для всех рассматриваемых сценариев разрушения в ПС реализована возможность включения инструментов и операций для снижения выбросов, которые задаются модификаторами сценария, влияющими на общий выход радиоактивных веществ в атмосферу. Модификаторы позволяют учитывать влияние на выброс активности в атмосферу дополнительных условий сноса здания, например, таких как использование фиксаторов загрязнений, водяного тумана и др.

Созданное ПС позволяет учитывать методы демонтажа и вид строительного материала объектов при оценках величины выброса радиоактивных веществ в атмосферу как с учетом, так и без учета мер по пылеподавлению. Программная реализация с использованием технологии скриптования дает возможность в рамках одного сценария по общему шаблону дорабатывать, модифицировать и создавать новые инструменты и сценарии без их перекомпиляции, а также описывать параметры образовавшихся аэрозолей путем последовательного наложения модификаторов сценариев и учитывать нелинейные действия этих модификаторов на параметры аэрозоли. ПС может быть адаптировано для решения задач, связанных с другими, отличными от рассмотренных в нем, методами сноса/демонтажа зданий и сооружений любого типа при соответствующем экспериментальном или экспертном параметрическом обеспечении таких методов, а также использоваться в составе более сложных расчетно-прогностических комплексов в качестве модуля препроцессинга, обеспечивающего модели атмосферного переноса примесей входными данными о параметрах источника выброса.

Ниже представлено описание разработанного ПС и механизмов его расширения (добавление/модификация инструментов и сценариев). Часть выбранных для первой версии ПС параметризаций основана на эмпирических данных работы [1], в которой рассматривалась задача оценки выброса в атмосферу радиоактивных веществ при демонтаже завода по производству плутония (далее — PFP) в США.

### Подход к оценке источника выброса

Как было отмечено выше, величина атмосферного выброса ST (source term) радиоактивных веществ определяется пятифакторной формулой, предложенной в [3]:

$$ST = MAR \times DR \times ARF \times RF \times LPF, \quad (1)$$

где MAR (material at risk) — максимальное или ожидаемое количество радиоактивных веществ, которое может быть подвергнуто заданному физическому воздействию; DR (damage ratio) — доля от MAR, реально подвергшаяся воздействию при операциях по сносу (демонтажу) строительных конструкций. Оценивается на основе реакции конструкционных материалов на тип и уровень воздействия. Значения, принятые для объекта PFP [1]: 0,1–0,9 — при резке ножницами, 0,5 — для взрывного метода; ARF (airborne release fraction) — доля DR, попавшая в воздух в виде аэрозолей, доступных для последующего переноса в атмосфере. В работе [2] было определено, что величина ARF может находиться в диапазоне значений от  $6 \cdot 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$ ; LPF (leak path factor) — доля ARF (радионуклидов в виде воздушных аэрозолей), прошедшая через системы осаждения (воздуховоды, производственные помещения), уменьшения выбросов (распыление воды, фиксаторы загрязнений), улавливания и фильтрации (HEPA-фильтры, песочные фильтры) и вышедшая за пределы технологических помещений, емкостей и защитных оболочек. Этот параметр является результатом расчета, экспериментальных измерений или экспертной оценки и зависит от материала, механизма воздушного переноса, потерь за счет осаждения и эффективности методов пылеподавления и фильтрации. Например, значение, принятое в [1] для объекта PFP, составляло 0,1; RF (respirable fraction) — доля радиоактивного материала в виде частиц в воздухе, переносимого воздушным путем и вдыхаемого человеком. Обычно предполагается, что эквивалентный аэродинамический диаметр для респираторной фракции частиц составляет 10 мкм и менее [3]. При внешнем физическом воздействии

этот параметр зависит от большого количества факторов. В данной работе для учета размеров частиц значение интегрального параметра RF заменено на соответствующие распределения (таблица 1) массы частиц в выбросе по аэродинамическим эквивалентным диаметрам, отвечающим полидисперсному распределению.

**Таблица 1. Распределение массы частиц по диапазонам их диаметров**

| Диапазон диаметров частиц, мкм | Доля от общей массы частиц в выбросе* (стадия сноса здания) | Доля от общей массы частиц в выбросе [1] (стадия уборки отходов, образовавшихся после стадии сноса) |
|--------------------------------|---|---|
| 0–2,5                          | 0,807   | 0,11  |
| 2,5–5,0                        | 0,129   | 0,09  |
| 5,0–10,0                       | 0,049   | 0,15  |
| 10,0–15,0                      | 0,010   | 0,13  |
| 15,0–30,0                      | 0,0044  | 0,26  |
| > 30,0                         | 0,0006  | 0,26  |

\*Распределение массы частиц по диаметрам вычисляется на основании гипотезы, что масса частиц относительно их размера описывается логнормальным распределением с медианой, равной 1 мкм.

Опираясь на приведенный спектр радиоактивных частиц в воздухе (таблица 1), для учета влияния средств пылеподавления и полидисперсности в разработанном ПС используется модифицированная формула:

$$ST(MR) = MAR \times (\text{damage}MAR(MR) + \text{notDamage}MAR(MR)). \quad (2)$$

Здесь:

damageMAR — поврежденная часть материала, которая может быть представлена в виде:

$$\text{damage}MAR(MR) = DR \times ARF \times MR \times LPF; \quad (3)$$

notDamageMAR — доля материала, которая не испытывает на себе непосредственного воздействия от метода сноса, а подвергается лишь сопутствующим вибрационным воздействиям тяжелого оборудования, сотрясению, перемещению и т. д. Эта величина может быть записана в виде:

$$\text{notDamage}MAR(MR) = (1 - DR) \times ARF \times MR \times LPF. \quad (4)$$

В приведенных формулах (3) и (4): DR, ARF, LPF — определены выше, но с учетом модификаторов сценария, влияющих на общий выход радиоактивных веществ в атмосферу;

MR (Mass Ratio) — отношение массы частиц из заданного диапазона диаметров частиц к полной массе частиц в выбросе с учетом модификаторов сценария;

(1 - DR) — доля материала, не подвергающаяся прямому воздействию во время этапа сноса.

Начальные значения коэффициентов DR, ARF, LPF, MR задаются во входном файле ПС. В процессе работы ПС эти коэффициенты модифицируются в соответствии с выбранным сценарием разрушения/демонтажа.

### Описание входного файла

Входной файл представляет собой описание набора стадий сноса и следующих за ними стадий уборки. Формат входного файла — XML. В качестве ключевых слов используются названия сценариев, перечень которых может расширяться.

При заполнении входного файла вводится требуемое для расчета распределение частиц по размерам, последовательно описываются стадии сноса и, если требуется, то после одной или нескольких стадий сноса вводится стадия уборки.

В распределении частиц по размерам вводимые значения границ интервалов описывают диаметр частиц пыли в микрометрах. Значения границ интервалов (в мкм), устанавливаемые по умолчанию, приведены в таблице 1 (первый столбец). Для стадии сноса указываются: продолжительность стадии сноса (в часах), список радионуклидов и их активность в материалах конструкции, которая подвергается физическому воздействию, а также набор доступных модификаторов для текущего сценария. Сценарий сноса определяют ключевые слова: Shears — для сноса с использованием ножниц (гидравлических, механических), Explosive — для сноса с использованием взрывного метода, Storage — для хранения поврежденного материала. Ключевыми словами, задающими возможные модификаторы сценария, являются: Fixative\_xxx для фиксаторов загрязнения (xxx — количество слоев фиксаторов: 0 — отсутствие фиксаторов, 1 — один слой или 2 — двойной слой), Misting — для водяного тумана и Coolant — для охлаждения режущего инструмента.

Для сценария хранения материалов, образовавшихся после сноса объекта, предусмотрено два варианта: на улице и в помещении. В обоих вариантах реализована возможность учета механизма вторичного пылеподъема, для которого используются специальные значения доли попавшего в воздух материала (ARF). В противном случае для вычислений используется базовый параметр ARF, указанный во входном файле.

Во входном файле также задаются начальные значения параметров уравнения (2), которые впоследствии могут быть изменены (преобразованы, заменены на другое эмпирическое

значение или обнулены в некоторых случаях) в зависимости от наличия и типа модификаторов сценария. При этом параметр LPF (доля материала, прошедшая через системы осаждения, уменьшения выбросов, улавливания и фильтрации и вышедшая за пределы технологических помещений, емкостей и защитных оболочек) задается в виде набора значений, каждое из которых соответствует своему интервалу диапазона размеров частиц, вышедших в атмосферу во время работ по сносу (демонтажу) здания. По умолчанию значения LPF принимаются равными единице из соображений консервативности, но при наличии данных измерений или экспертных оценок значения могут быть перепределены. При задании спектра частиц (MR), характеризующего отношения массы частиц данного размера к общей массе частиц, попавших в воздух на стадии сноса здания, доля частиц в каждом интервале размеров вычисляется на основании гипотезы о том, что масса образованных частиц относительно их размера описывается логнормальным распределением с медианой, равной 1 мкм (табл. 1, второй столбец). Указанное распределение также может быть заменено на пользовательское.

К сценариям уборки материалов, образовавшихся после сноса объекта относятся: их уборка в общем случае (требуется задать плотность убираемого материала и высоту, с которой возможно падение), уборка на улице (используется при наличии дополнительных данных о скорости ветра и влажности материала), уборка стальных листов на улице и уборка бетонных блоков на улице.

Для каждого сценария уборки входными являются продолжительность выполнения работ (в часах), используемые модификаторы сценария и параметры LPF и MR (по аналогии со стадией сноса). Значения LPF по умолчанию принимаются равными единице из соображений консервативности. Спектр частиц MR, характеризующий отношения массы частиц данного размера к общей массе частиц, попавших в воздух в результате стадии уборки, задается в соответствии с данными работы [1], представленными в таблице 1 (третий столбец). Указанные распределения также могут быть изменены пользователем.

### Реализованные сценарии сноса (демонтажа) зданий

За реализацию каждого из сценариев (методов сноса) отвечает отдельный внешний файл, что позволяет пользователю самостоятельно формировать сценарии сноса, вносить изменения

в существующие и добавлять новые сценарии без перекомпиляции программы. Внутри файла, описывающего каждый из сценариев, хранятся процедуры вычисления компонентов формулы (2) с учетом влияния модификаторов сценария на конечный результат.

Конкретный сценарий сноса (демонтажа) выбирается по ключевому слову, а его параметры, хранящиеся во внешнем файле, передаются в общий шаблон. Для каждого сценария определяется массив возможных модификаторов сценария, корректирующих параметры формулы (2). Параметры сценария позволяют учесть применимость и влияние конкретного модификатора для рассматриваемого этапа сноса. Например, охлаждение режущего инструмента невозможно использовать при взрывном методе.

Общий шаблон содержит значения параметров DR, ARF, MR, LPF, а также длительность стадии сноса или уборки образовавшихся материалов и диаметр частиц, которые устанавливаются с учетом применения всех доступных модификаторов сценария в соответствующих процедурах шаблона. Кроме того, шаблон содержит специальный логический индикатор, в зависимости от значения которого материал либо испытывает непосредственное воздействие во время сноса, либо испытывает лишь сопутствующие вибрационные воздействия тяжелого оборудования, сотрясение, перемещение и т. д.). Значение этого индикатора также устанавливается в отдельной процедуре.

### Реализация сценария сноса с использованием гидравлических ножниц

Для выбора во входном файле сценария сноса с использованием ножниц ключевым словом является «Shears».

Для установки значений параметров DR, ARF, MR и LPF и их модификации, в том числе за счет применения всех доступных модификаторов сценария из входного файла, предназначены соответствующие процедуры. Пользователь имеет возможность изменения процедур с учетом имеющихся у него эмпирических данных для этих параметров.

В процедуре установки и модификации значения доли разрушаемого материала (DR) все модификаторы учитываются в качестве множителя к значению, взятому из входного файла или введенному пользователем.

В процедуре установки и модификации величины доли материала, попавшего в воздух (ARF), значение, передаваемое модификатором сценария для учета вторичного пылеподъема (например, через введение эффективности системы пылеподавления), прибавляется к текущему

значению параметра ARF, взятому из входного файла или введенному пользователем. Остальные модификаторы учитываются в качестве множителя.

В процедуре установки и модификации отношения массы частиц из заданного диапазона диаметров ко всей массе (MR) модификаторы влияют на каждый диапазон диаметров частиц по-разному, при этом модификаторы учитываются в качестве множителя.

В процедуре установки и модификации значения доли материала, прошедшего через системы пылеподавления (LPF), все модификаторы также учитываются в качестве множителя.

#### *Реализация сценария сноса взрывным методом*

Для выбора сценария сноса взрывным методом ключевым словом во входном файле является «Explosive».

При сносе взрывным методом модификатор сценария «Охлаждение режущего инструмента» неприменим. Поэтому для взрывного метода влияние этого модификатора игнорируется с выдачей предупреждения о невозможности его использования. В остальном процедуры установки и модификации параметров DR, ARF, MR и LPF аналогичны инструментам сценария сноса с помощью ножниц, приведенном ранее.

#### *Реализация сценария хранения поврежденных материалов*

Ключевым словом для выбора сценария хранения поврежденных материалов во входном файле является «Storage». При этом каждая процедура установки и модификации значений параметров проходит проверку на поврежденность материалов через логический индикатор. Если рассматривается неповрежденная часть материалов, то все коэффициенты уравнения (4) равны 0, так как аэродинамическому захвату и вторичному пылеподъему подвержена только поврежденная часть материалов.

В остальном процедуры установки и модификации параметров DR, ARF, MR и LPF аналогичны инструментам сценария сноса с помощью ножниц. Что же касается процедуры установки и модификации значения доли материала, попавшего в воздух (ARF), ее особенностью является реализация в ней поиска модификатора хранения материала на улице или в помещении среди всех модификаторов сценария, указанных во входном файле. Если модификатор хранения не находится, то выдается предупреждение о его отсутствии и значение параметра ARF берется из входного файла. Если же модификатор хранения задан, то значения ARF устанавливаются этим модификатором.

#### **Реализованные сценарии уборки материалов, образовавшихся в результате сноса объекта**

Для задачи оценки источника при уборке формула (1) принимает вид (5), поскольку в данном случае идет воздействие на весь материал и  $DR = 1$ :

$$ST = MAR \times ARF \times RF \times LPF. \quad (5)$$

Параметры формулы (5) имеют тот же физический смысл, что и в формулах (1)–(4).

Процедуры шаблона уборки аналогичны процедурам шаблона сноса (демонтажа) зданий. Они устанавливают и модифицируют значения основных параметров формулы (5). Процедуры определения и модификации доли материала, прошедшего через системы пылеподавления (LPF), и установки и модификации отношения массы частиц из заданного диапазона диаметров ко всей массе (MR) аналогичны инструментам сценария сноса с помощью ножниц. Приведенные ниже варианты уборки отличаются только процедурой установки и модификации значения доли материала, попавшего в воздух (ARF). Поэтому далее будет сделан акцент только на этой процедуре.

#### *Реализация уборки в общем случае*

Для выбора этого сценария уборки ключевым словом во входном файле является «CollectGarbage\_Common».

Во время работ по сносу (демонтажу) здания часть материалов будет подвержена падению, поднятию в воздух краном или манипулятором и дальнейшему размещению в контейнере в процессе его уборки. При рассмотрении дробления твердых агрегированных веществ (бетон, цемент) за счет хрупкого разрушения при свободном падении материала с высоты для оценки ARF используется выражение (6) из [3] с соответствующими значениями входящих в него параметров:

$$ARF = A \times P \times g \times h, \quad (6)$$

где:  $A$  — эмпирический параметр, равный  $2 \cdot 10^{-11}$   $[\text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{см}^2)/\text{с}^2]$ ;

$P$  — плотность образца  $[\text{г}/\text{см}^3]$ ;

$g$  — ускорение свободного падения на уровне моря,  $980$   $[\text{см}/\text{с}^2]$ ;

$h$  — высота падения  $[\text{см}]$ .

Указанная зависимость реализована в процедуре установки и модификации значения доли материала, попавшего в воздух (ARF). Значения высоты падения материала и его плотности задаются во входном файле.

Для получения более наглядного представления о закономерностях формирования источника

выброса для этого сценария уборки был проведен тестовый расчет. В качестве тестового примера рассматривалась задача уборки загрязненных бетонных блоков (активность 200 МБк, плотность бетона 2,5 г/см<sup>3</sup>) с оценкой параметра ARF по общей формуле (6), при этом использовалось распределение массы частиц по диаметрам, приведенное в таблице 1 (третий столбец). Полученная зависимость вышедшей в окружающую среду активности от высоты подъема манипулятора представлена на рис. 1.

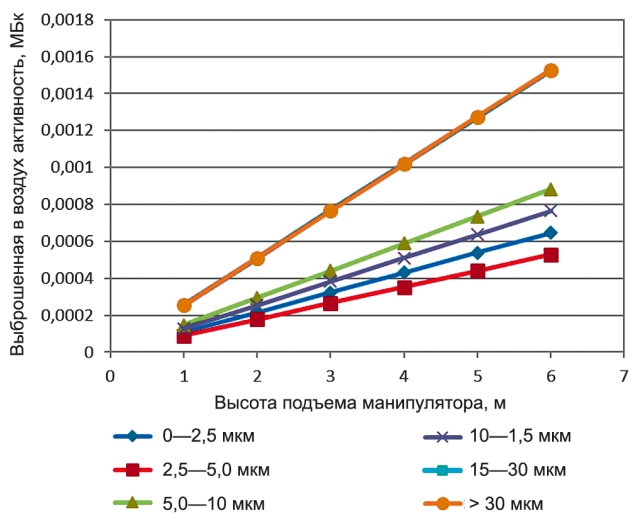


Рис. 1. Зависимость активности источника выброса от высоты подъема манипулятора для рассматриваемых диапазонов диаметров

Реализация уборки на улице

Ключевым словом во входном файле для задания сценария уборки на улице является «CollectGarbage\_Street».

Данный вид уборки материалов используется при наличии сведений о скорости ветра и влажности материала.

Для оценки доли материала, попавшего в воздух (ARF), используется уравнение (7), предложенное в [2] и позволяющее учесть влияние ветра и влажности материала:

$$ARF = 1,6 \cdot 10^{-6} (WS/2,2)^{1,3} / (M/2)^{1,4} \quad (7)$$

Здесь WS — скорость ветра [м/с];

M — влажность материала [%].

Указанная зависимость реализована в процедуре установки и модификации значения доли материала, попавшего в воздух (ARF). Значения скорости ветра и влажности материала задаются во входном файле.

Для этого варианта уборки также был проведен тестовый расчет источника выброса в атмосферу в результате уборки материала с уровнем загрязнения 200 МБк при разных значениях

скорости ветра и влажности материала. На рис. 2 представлены графики зависимости вышедшей в окружающую среду активности в виде аэрозоли от скорости ветра для рассматриваемых диапазонов диаметров частиц при постоянной влажности материала 2%.

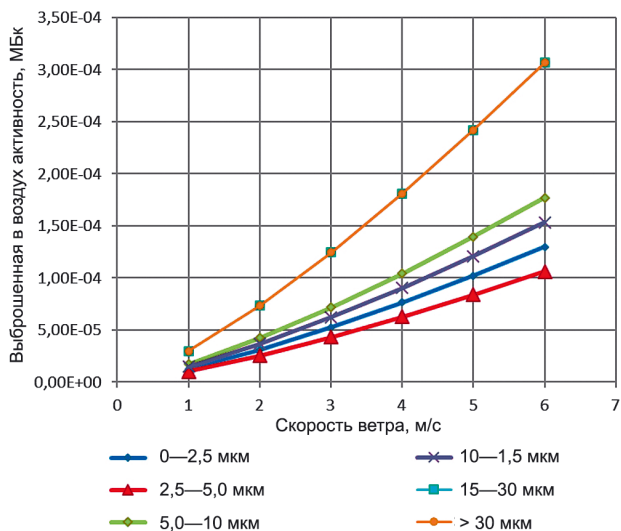


Рис. 2. Зависимость активности источника выброса от скорости ветра при постоянной влажности материала

Работы по сносу и уборке образовавшихся при этом материалов проводятся при скоростях ветра менее 15 миль/час (6,7 м/с) [1], хотя в случае разрушения ветхих зданий и сооружений [5], вследствие воздействия порывов ветра, скорость ветра может быть и больше.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость активности источника выброса от влажности материала при постоянной скорости ветра 3,2 м/с.

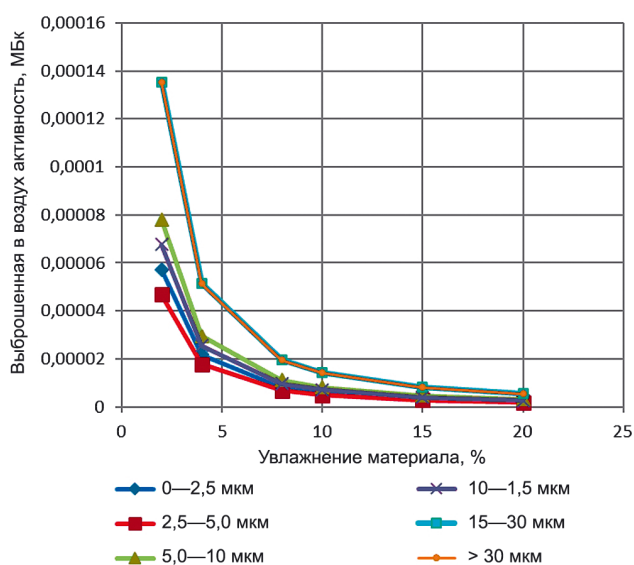


Рис. 3. Зависимость активности источника выброса от влажности материала при постоянном ветре

Графики отражают степенную зависимость параметра ARF от скорости ветра (рис. 2) и обратную степенную зависимость от влажности материала (рис. 3) в соответствии с формулой (7). Аналогично рис. 1, взаимное расположение линий определяется распределением частиц в выбросе по диапазонам диаметров, приведенным в третьем столбце таблицы 1 (уборка после стадии сноса).

#### Реализация уборки бетонных блоков на улице

Ключевым словом для выбора сценария уборки бетонных блоков на улице во входном файле является «CollectGarbage\_Street\_Concrete».

Для падающих материалов, в случае бетонных стен, в процедуре установки доли загрязнителя, попавшего в воздух (ARF), эта величина принимается равной  $2,3 \cdot 10^{-6}$  [1] (для средней скорости ветра 3,2 м/с [4]).

#### Реализация уборки металлических листов на улице

Ключевым словом выбора сценария уборки металлических листов на улице во входном файле является «CollectGarbage\_Street\_Metal».

Металлические конструкции менее подвержены пылеобразованию, чем измельченный бетон или щебень, поэтому в процедуре установки доли материала, попавшего в воздух (ARF), для металла принимается значение, равное  $1 \cdot 10^{-6}$ , в соответствии с рекомендациями из [1].

### Шаблон модификаторов сценария

В данный шаблон включены процедуры, описывающие воздействие модификаторов сценария на параметры DR, ARF, LPF и MR и возвращающие множители, влияющие на эти параметры. Каждый конкретный модификатор сценария описывается в отдельном файле. Модификаторы в общем случае могут оказывать влияние на все 4 параметра (DR, ARF, LPF и MR) из формулы (2). Поскольку в задачах оценки параметров источника выброса, формирующегося в результате демонтажа/разрушения, важным является распределение частиц по диаметрам, дополнительно введена возможность отдельного влияния модификаторов на выход определенной фракции аэрозоля.

Процедуры шаблона модификаторов сценария в качестве аргументов принимают значение диаметра частиц и логический индикатор, показывающий, подвергается ли воздействию рассматриваемая часть материала: если индикатор принимает значение true, то на материал непосредственно действует метод сноса; если false, то материал не испытывает на себе непосредственного воздействия метода сноса, а

подвергается лишь сопутствующим воздействиям (перемещение, сотрясение, вибрационное воздействие от тяжелого оборудования, вибрация от падения крупных фрагментов на поверхность пола).

#### Реализация модификатора сценария «фиксаторы»

Фиксаторы, как следует из их названия, служат для удерживания загрязнений на поверхностях материалов. При этом фиксирующие вещества эффективны для предотвращения миграции загрязнений с поверхностей, испытывающих незначительное перемещение или вообще не испытывающих его [1].

Ключевым словом во входном файле для добавления этого модификатора в список доступных средств пылеподавления для стадии сноса является «Fixative\_xxx», где xxx — тип фиксатора, принимающий значения: 0 — отсутствие фиксатора; 1 — одинарный слой фиксатора; 2 — двойной слой фиксатора.

Ниже рассматривается влияние фиксаторов на входные параметры выброса в виде возвращаемых множителей:

- для параметров DR, MR и LPF возвращается множитель 1, так как фиксаторы не влияют на эти параметры;
- для параметра ARF (доля материала, попавшего в воздух) возвращаются множители 0,001, 0,0001 или 0,00001 [3] для трех типов применения фиксатора (без фиксатора, 1 и 2 слоя фиксаторов соответственно), если рассматривается часть материала, не подверженного прямому воздействию (логический индикатор имеет значение false), а множители 0,9 и 1 — для части материала, попавшего под прямое воздействие (логический индикатор имеет значение true), с нанесенными фиксаторами и без них соответственно [3].

#### Реализация модификатора сценария «охлаждение режущего инструмента»

Охлаждающей режущий инструмент средой в данном модификаторе является вода, которая, как отмечено в [1], может значительно снизить выброс в воздух частиц загрязненного материала, образовавшихся в процессе резки. Ключевым словом для выбора модификатора охлаждения во входном файле является «Coolant».

Влияние охлаждения режущего инструмента на входные параметры выброса в виде возвращаемых множителей заключается в следующем:

- для параметров DR, MR и LPF возвращается множитель 1, так как охлаждение не влияет на эти параметры;
- для параметра ARF (доля материала, попавшего в воздух) возвращается множитель  $2,5 \cdot 10^{-4}$

[1], если рассматривается часть материала, подверженного воздействию (логический индикатор имеет значение true).

### Реализация модификатора сценария «водяной туман»

Использование водяного тумана позволяет эффективно удалять из воздуха крупнодисперсные частицы, а для более мелких частиц его эффективность снижается. Ключевым словом для выбора модификатора во входном файле является «Misting».

Влияние водяного тумана на входные параметры выброса в виде возвращаемых множителей заключается в следующем:

- для параметров DR, ARF, MR возвращается множитель 1, так как водяной туман не влияет на эти параметры;
- для параметра LPF (доля нуклидов, прошедших через системы пылеподавления) возвращается доля вещества, прошедшего через водяной туман, в зависимости от размеров частиц в соответствии с данными таблицы 2.

**Таблица 2. Доля частиц, прошедших через водяной туман [1]**

| Диапазон диаметров частиц, мкм | Доля частиц, прошедших через водяной туман |
|--------------------------------|--|
| 0–2,5                          | 0,95                                       |
| 2,5–5,0                        | 0,60                                       |
| 5,0–10,0                       | 0,30                                       |
| 10,0–15,0                      | 0,25                                       |
| 15,0–30,0                      | 0,25                                       |
| >30,0                          | 0,25                                       |

### Реализация модификатора сценария «аэродинамический захват и вторичный подъем»

Загрязненные открытые поверхности негорючих твердых веществ (большие фрагменты конструкций объекта, элементы корпуса или емкости из бетона, металла, стекла и т. д., поверхности которых могут быть твердыми, деформируемыми и даже хрупкими) при воздействии условий окружающей среды в помещении или на открытом воздухе (нормально работающая производственная вентиляция или скорость ветра в атмосфере до 2 м/с с порывами до 20 м/с) могут являться источником вторичного пылеобразования [3].

Ключевыми словами при выборе во входном файле модификаторов сценария для учета пылеподъема в помещении и на улице являются, соответственно, «Storage\_Garbage\_Room» и «Storage\_Garbage\_Street».

Влияние аэродинамического захвата и вторичного пылеподъема на входные параметры

выброса в виде возвращаемых множителей заключается в следующем:

- для параметров DR, MR и LPF возвращается множитель 1 для доли поврежденного материала, так как модификатор не влияет на эти параметры, и возвращается множитель 0 для доли неповрежденного материала;
- для параметра ARF (доля материала, попавшего в воздух за 1 час) для доли поврежденного материала возвращается множитель  $4 \cdot 10^{-5}$  при хранении на улице и  $4 \cdot 10^{-6}$  при хранении в помещении [3]. Для доли неповрежденного материала возвращается 0. В соответствии с данными работы [3], в результате вторичного ветрового подъема формируется выброс с размером частиц не более 10 мкм, т. е. все частицы относятся к респираторной фракции.

### Описание выходного файла

В выходном файле хранятся результаты вычислений средней активности источника за час проведения работ, полученные путем деления вычисленной активности для рассматриваемого этапа работ на продолжительность этого этапа. С точки зрения структуры выходной файл представляет набор активностей для каждой из стадий сноса и уборки, разделенных в соответствии с заданными исходными данными.

Активность, выброшенная в воздух в результате каждой из стадий сноса и уборки, размещается в отдельном для каждой стадии блоке данных, который содержит название радионуклида в качестве атрибута и вычисленную активность, разбитую по диапазонам размеров частиц.

### Примеры результатов расчетов

В качестве примера рассмотрен вариант сноса здания с помощью гидравлических ножниц. Параметры стадии сноса:

- снос производится с помощью гидравлических ножниц;
- при сносе повреждается 10% конструкций;
- доступные для использования модификаторы сценария: фиксаторы; жидкость, охлаждающая режущий инструмент; водяной туман;
- стадия сноса длится 1 час;
- значение ARF для поврежденной части материала с нанесенными фиксаторами — 0,9; без фиксаторов — 1;
- общее загрязнение 200 МБк.

Результаты расчета источника выброса для сценариев с различными комбинациями применяемых инструментов пылеподавления представлены в таблице 3.



**Таблица 3. Результаты расчетов активности (МБк/ч) источника выброса (снос с помощью гидравлических ножниц) при использовании различных способов пылеподавления**

| Диапазон диаметров частиц, мкм | Без использования средств пылеподавления | Одинарный слой фиксатора | Двойной слой фиксатора | Одинарный слой фиксатора и жидкость, охлаждающая режущий инструмент | Одинарный слой фиксатора, жидкость, охлаждающая режущий инструмент и водяной туман | Одинарный слой фиксатора и водяной туман |
|--------------------------------|--|--------------------------|------------------------|---|--|--|
| 0–2,5                          | 16,29                                    | 14,544                   | 14,531                 | 0,0181  | 0,0172   | 13,81                                    |
| 2,5–5,0                        | 2,60                                     | 2,324                    | 2,322                  | 0,0029  | 0,0017   | 1,39                                     |
| 5,0–10,0                       | 0,99                                     | 0,885                    | 0,884                  | 0,0011  | 0,00033  | 0,26                                     |
| 10,0–15,0                      | 0,19                                     | 0,170                    | 0,169                  | 0,0002  | 0,000053   | 0,042                                    |
| 15,0–30,0                      | 0,09                                     | 0,081                    | 0,081                  | 0,00010   | 0,000025   | 0,020                                    |
| > 30,0                         | 0,012                                    | 0,011                    | 0,011                  | 0,000014  | 0,000004   | 0,0029                                   |

Полученные результаты позволяют сделать выводы, что использование двойного слоя фиксаторов не дает существенного снижения выброса по сравнению с одинарным слоем, водяной туман эффективен для частиц размером более 2,5 мкм, а наибольший эффект на снижение выброса оказывает наличие системы охлаждения режущего инструмента за счет малых значений параметра ARF.

Другим примером является задача оценки источника выброса, образующегося за счет вторичного пылеподъема при хранении материала в условиях окружающей среды и в помещении:

- общее загрязнение 200 МБк;
- повреждено 10% материала;
- время хранения 1 час;
- доступные модификаторы сценария: водяной туман.

Полученные результаты представлены в таблице 4. Из данных таблицы 4 видно, что применение водяного тумана при хранении материала снижает поднятую в воздух активность от 1,5 до 3,5 раз для частиц размером больше 2,5 мкм.

**Таблица 4. Результаты расчета активности (кБк/ч) источника выброса за счет вторичного пылеобразования при хранении загрязненных материалов**

| Диапазон диаметров частиц, мкм | Хранение на улице/ в помещении | Хранение на улице/в помещении с использованием водяного тумана |
|--------------------------------|--------------------------------|--|
| 0–2,5                          | 0,65/0,065                     | 0,61/0,061   |
| 2,5–5,0                        | 0,10/0,010                     | 0,06/0,006   |
| 5,0–10,0                       | 0,039/0,0039                   | 0,012/0,0012   |
| 10,0–15,0                      | 0,0/0,0                        | 0,0/0,0  |
| 15,0–30,0                      | 0,0/0,0                        | 0,0/0,0  |
| > 30,0                         | 0,0/0,0                        | 0,0/0,0  |

Частицы с размером более 10 мкм не подвергаются вторичному пылеобразованию.

Последним рассмотренным примером является сценарий уборки образовавшихся материалов активностью 200 МБк. Параметры сценария уборки:

- 50% материалов убирается с использованием общей формулы, 50% убирается на открытом воздухе; продолжительность работ 1 час;
- скорость ветра 3,2 м/с, влажность материала 2%;
- высота, с которой падает убираемый материал, 5 м;
- плотность материала 2 г/см<sup>3</sup> (бетон);
- доступные модификаторы сценария: водяной туман.

Результаты расчета источника выброса для этого сценария приведены в таблице 5.

**Таблица 5. Результаты тестовых расчетов активности (кБк/ч) источника выброса при уборке материалов, образовавшихся в результате сноса объекта**

| Диапазон диаметров частиц, мкм | Уборка материалов | Уборка с использованием водяного тумана |
|--------------------------------|-------------------|---|
| 0–2,5                          | 0,24              | 0,23                                    |
| 2,5–5,0                        | 0,20              | 0,12                                    |
| 5,0–10,0                       | 0,33              | 0,10                                    |
| 10,0–15,0                      | 0,29              | 0,07                                    |
| 15,0–30,0                      | 0,58              | 0,14                                    |
| >30,0                          | 0,58              | 0,14                                    |

Как и в предыдущем примере, в данном случае водяной туман также существенно подавляет выброс крупнодисперсных фракций аэрозолей (диаметр частиц более 5 мкм), что позволяет в 3–4 раза снизить загрязнение в ближней зоне.

### Заключение

Разработанное ПС для оценки источника выброса в атмосферу радиоактивных газов и аэрозолей при демонтаже или разрушении зданий и сооружений, загрязненных радиоактивными веществами, является попыткой создания расчетного инструмента для инженерного решения задач в этой узко специализированной области исследований и практической деятельности. ПС позволяет оценивать выброс радиоактивных аэрозолей в атмосферу при демонтаже объектов с учетом сценария демонтажа (использование гидравлических ножниц, взрывной метод, хранение поврежденных материалов, уборка), вида строительного материала объектов, применения инструментов пылеподавления, таких как фиксаторы загрязнения, охлаждение режущего инструмента и водяной туман.

Ключевой особенностью ПС является возможность подготовки сценария с различными комбинациями видов работ по демонтажу, в результате чего формируется технологический процесс с учетом реально используемых методов пылеподавления.

Основное внимание при разработке ПС было уделено обеспечению гибких возможностей по перенастройке и расширению программы. Поскольку основу ПС составляют полуэмпирические формулы и зависимости, оно позволяет не только использовать имеющиеся, хотя и весьма немногочисленные, литературные данные по определенным технологическим операциям при демонтаже объектов, но и корректировать значения входных параметров либо по результатам их измерений перед проведением демонтажа конкретного объекта, либо на основе экспертных оценок, что повышает достоверность результатов расчета.

Следует отметить, что подобные работы по демонтажу объектов сейчас проводятся и на территории РФ. В частности, ОАО «АЭХК» (Ангарский электролизный химический комбинат) в 2016 году приступил к выводу из эксплуатации производственного здания в рамках

выполнения федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года». В связи с этим необходимо подчеркнуть важность и целесообразность проведения исследований характеристик образующихся аэрозолей и закономерностей формирования источника воздушного выброса в процессе проведения этих реальных практических работ в зависимости от типов и материалов конструкций и методов разрушения/демонтажа.

В ходе дальнейшей работы будут проведены тестирование ПС, его верификация и возможная интеграция в расчетно-прогностические комплексы в качестве блока препроцессинга, формирующего исходные данные для модуля расчета атмосферного переноса примесей.

### Литература

1. Napier B. A., Droppo J. G. Jr, Rishel J. P. 2011. Air Dispersion Modeling of Radioactive Releases During Proposed PFP Complex Demolition Activities. Report to CH2M HILL Plateau Remediation Company. PNNL-20173, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
2. EPA — U.S. Environmental Protection Agency. 1995. Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, Fifth Edition, Volume 1: Stationary Point and Area Sources. Research Triangle Park, North Carolina.
3. DOE. December 1994. Airborne release fractions/rates and respirable fractions for nonreactor nuclear facilities. Volume 1: Analysis of Experimental Data DOE-HDBK 3010-94. U.S. Department of Energy, Washington DC.
4. AlphaTRAC. 2003. Demolition Scenarios and Source Terms for Atmospheric Modeling. AlphaTRAC, Inc., 8670 Wolff Court, Suite 120, Westminster, Colorado.
5. Бакин Р. И., Бирюков Д. В., Илюшкин А. И., Киселев А. А., Ковальчук Д. В., Красноперов С. Н., Линге И. И., Савкин М. Н., Шикин А. В. Ранжирование ядерно и радиационно опасных объектов по потенциальной опасности: Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2014-07. Москва: ИБРАЭ РАН, 2014. — 16 с. — Библиогр.: 14 назв.

### Информация об авторах

Бакин Равиль Ибрагимович, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: ravil@ibrae.ac.ru.

Зарянов Алексей Валентинович, инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: zav@ibrae.ac.ru.

*Ильичев Егор Антонович*, техник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: jvsg6@mail.ru.

*Киселев Алексей Аркадьевич*, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: aak@ibrae.ac.ru.

*Красноперов Сергей Николаевич*, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: rnk@ibrae.ac.ru.

*Меркушов Владимир Петрович*, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: vpm@ibrae.ac.ru.

*Припачкин Дмитрий Александрович*, кандидат физико-математических наук, заведующий отделом, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: prad@ibrae.ac.ru.

*Шикин Александр Васильевич*, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: shi@ibrae.ac.ru.

#### Библиографическое описание статьи

*Бакин Р. И., Зарянов А. В., Ильичев Е. А., Киселев А. А., Красноперов С. Н., Меркушов В. П., Припачкин Д. А., Шикин А. В.* Программное средство для оценки источника выброса в атмосферу радиоактивных газов и аэрозолей при демонтаже или разрушении зданий и сооружений, загрязненных радиоактивными веществами // Радиоактивные отходы. 2019. № 3(8). С. 91–102. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-91-102.

---

## SOURCE TERM ASSESSMENT SOFTWARE FOR ATMOSPHERIC RELEASES OF RADIOACTIVE GASES AND AEROSOLS DURING DISMANTLEMENT OR DEMOLITION OF BUILDINGS AND STRUCTURES WITH RADIOACTIVE CONTAMINATION

**Bakin R. I., Zaryanov A. V., Ilichev E. A., Kiselev A. A., Krasnoperov S. N., Merkushov V. P., Pripachkin D. A., Shikin A. V.**

**Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow, Russia**

Article received on June 27, 2019

*The article summarizes the main results in the development of source term assessment software for atmospheric releases of radioactive substances during dismantlement or demolition of contaminated buildings and structures. The software allows to give consideration to some physical features of the term source formation given some actual scenarios of demolition or dismantlement technological process. These include formation of aerosols and dust caused by dropped materials, formation of aerosols due to contaminated materials cutting, release suppressing by fixatives, etc. The software application allows to calculate the amount of activity released into the environment, as well as the characteristics of the particle spectrum depending on the diameter. This data can be used as input one for the transport module of computational and forecasting software being designed to address the task of ensuring radiation safety of nuclear power facilities both during their operation and decommissioning, including the assessment of*

*atmospheric release parameters, modeling of atmospheric transport of radioactive substances, estimation of radiation situation parameters and the decision making on the necessity and effectiveness of countermeasures.*

**Keywords:** *source term assessment, dismantling and destruction of buildings, radiation situation, atmospheric transport models, safety case for nuclear power facilities.*

### References

1. B. A. Napier, J. G. Droppo Jr, J. P. Rishel. 2011. *Air Dispersion Modeling of Radioactive Releases During Proposed PFP Complex Demolition Activities*. Report to CH2M HILL Plateau Remediation Company. PNNL-20173, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
2. EPA – U.S. Environmental Protection Agency. 1995. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42*, Fifth Edition, Volume 1: Stationary Point and Area Sources. Research Triangle Park, North Carolina.
3. DOE. December 1994. *Airborne release fractions/rates and respirable fractions for nonreactor nuclear facilities*. Volume 1: Analysis of Experimental Data DOE-HDBK 3010-94. U.S. Department of Energy, Washington DC.
4. AlphaTRAC. 2003. *Demolition Scenarios and Source Terms for Atmospheric Modeling*. AlphaTRAC, Inc., 8670 Wolff Court, Suite 120, Westminster, Colorado.
5. Bakin R. I., Biryukov D. V., Ilyushkin A. I., Kiselev A. A., Kovalchuk D. V., Krasnoperov S. N., Linge I. I., Savkin M. N., Shikin A. V. *Ranzhirovanie yaderno i radiacionno opasnyh ob"ektov po potencial'noj opasnosti*. [Ranking of nuclear and radiation hazardous facilities by hypothetical hazards]. *IBRAE Preprint No. IBRAE-2014-07*. Moscow: IBRAE RAN, 2014. 16 p. (In Russian)

---

### Information about the authors

*Bakin Ravil Ibragimovich*, Head of laboratory, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: ravil@ibrae.ac.ru.

*Zaryanov Aleksej Valentinovich*, Engineer, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: zav@ibrae.ac.ru.

*Ilichev Egor Antonovich*, Engineer, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: jvsg6@mail.ru.

*Kiselev Aleksej Arkadevich*, Ph.D., Researcher associate, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: aak@ibrae.ac.ru.

*Krasnoperov Sergej Nikolaevich*, Researcher associate, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: rnk@ibrae.ac.ru.

*Merkushov Vladimir Petrovich*, Senior researcher, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: vpm@ibrae.ac.ru.

*Pripachkin Dmitrij Aleksandrovich*, Ph.D, Head of department, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: prad@ibrae.ac.ru.

*Shikin Aleksandr Vasilevich*, Senior researcher, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: shi@ibrae.ac.ru.

### Bibliographic description

Bakin R. I., Zaryanov A. V., Ilichev E. A., Kiselev A. A., Krasnoperov S. N., Merkushov V. P., Pripachkin D. A., Shikin A. V. Source Term Assessment Software for Atmospheric Releases of Radioactive Gases and Aerosols during Dismantlement or Demolition of Buildings and Structures with Radioactive Contamination. *Radioactive Waste*, 2019, no. 3 (8), pp. 91–102. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-91-102. (In Russian).