

И.В. КОВАЛЕЦ, А.В. ХАЛЧЕНКОВ, Е.А. ЕВДИН, М.И. ЖЕЛЕЗНЯК

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДУЛЯ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА СИСТЕМЫ РОДОС НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ АРГОНА

***Анотація.** Представлені результати верифікації модуля атмосферного переносу системи ядерного реагування РОДОС. Використана нещодавно розроблена Java-версія цієї системи. Моделювання експериментів з викидами Аргону (^{41}Ar), проведених у 2001 р. в Молі, Бельгія, показало перевагу параметризації граничного шару атмосфери, заснованої на теорії подібності, у порівнянні з простішою параметризацією, що використовується в системі РОДОС за замовчуванням, в якій висота граничного шару є функцією категорії стійкості атмосфери.*

***Ключові слова:** турбулентна дифузія радіонуклідів, валідація моделей, ядерне аварійне реагування.*

***Аннотация.** Представлены результаты верификации модуля атмосферного переноса системы ядерного реагирования РОДОС. Использована недавно разработанная Java-версия этой системы. Моделирование экспериментов с выбросами Аргона (^{41}Ar), проведенных в 2001 г. в Моле, Бельгия, показало преимущество параметризации пограничного слоя атмосферы, основанной на теории подобия, по сравнению с более простой параметризацией, используемой в системе РОДОС по умолчанию, в которой высота пограничного слоя является функцией категории устойчивости атмосферы.*

***Ключевые слова:** турбулентная диффузия радионуклидов, валидация моделей, ядерное аварийное реагирование.*

***Abstract.** The results of the verification of the atmospheric dispersion module of nuclear emergency response system RODOS are presented. The recently developed Java-version of the system was used. Simulation of the experiments with emissions of Argon (^{41}Ar), held in 2001 in Mol, Belgium had been performed. We demonstrate the advantage of the atmospheric boundary layer parameterization based on similarity theory as compared with the simpler parameterization currently used in RODOS by default, in which the height of the boundary layer is a function of atmospheric stability category.*

***Key words:** turbulent diffusion of radionuclides, model validation, nuclear emergency response.*

1. Введение

Европейская Комиссия в рамках 3-й, 4-й, 5-й и 6-й Рамочных программ поддерживала и координировала разработку комплексной системы реального времени аварийного реагирования на радиационные аварии – РОДОС [1]. За последние 10 лет система РОДОС была внедрена в большинстве европейских стран.

Модуль атмосферного переноса системы РОДОС состоит из метеорологического препроцессора (МПП) [2] и трех альтернативных моделей атмосферного переноса (МАП) – АТСТЕП [3], РИМПАФ [4] и ДИПКОТ [5]. Перечисленные выше модели были разработаны в различных организациях, и их тестирование и верификация на экспериментальных данных проводились разработчиками в основном с использованием автономных версий этих моделей, не интегрированных в систему РОДОС в целом [6–8]. При всей ценности этих работ подобная верификация представляется недостаточной в силу следующих причин.

Во-первых, интеграция каждой модели в систему РОДОС требовала разработки специальной версии соответствующей модели. Набор возможных входных данных интегрируемых моделей ограничен функциональными возможностями интерфейса системы РОДОС. Подобных ограничений нет у разработчиков и пользователя автономных версий моделей. Например, в системе РОДОС нельзя ввести в качестве входного параметра высоту пограничного слоя. Следовательно, в МПП она вычисляется из эмпирических соотно-

шений. Одновременно во многих экспериментах проводились прямые измерения этого параметра, которые использовались в соответствующих расчетах автономных версий МАП. Во-вторых, результаты, полученные различными авторами с помощью автономных версий МАП даже для одних и тех же экспериментов, практически невозможно сравнивать из-за различных метеорологических препроцессоров, используемых в этих работах (тогда как в системе РОДОС только один МПП). В-третьих, в различных работах представлены различные наборы выходных данных (например, различные виды статистических характеристик ошибок модели), которые порой трудно согласовать между собой. Верификация МАП, интегрированных в системе РОДОС на основе натурных экспериментов, проводилась лишь в немногих работах (например, [9]). При этом даже в таких работах сравнение моделей между собой не проводилось (например, в [9] представлены результаты только ATSTEP, интегрированного в систему РОДОС).

Следовательно, целью настоящей работы является верификация МАП, интегрированных в систему РОДОС, на данных натурных экспериментов и их сравнение между собой. Система РОДОС предоставляет прекрасную возможность для сравнения и верификации различных МАП при полностью одинаковых наборах входных параметров. В настоящей работе использовалась полностью новая Java-версия системы РОДОС (JРОДОС), разработанная в последнее время по желанию пользователей [10, 11]. Все расчеты проводились только моделями, интегрированными в систему РОДОС, без привлечения автономных версий этих моделей.

2. Модуль атмосферного переноса системы РОДОС

2.1. Метеорологический препроцессор

МПП системы РОДОС [2, 12] является диагностической метеорологической моделью. МПП интерполирует и экстраполирует имеющиеся измерения по горизонтали и вертикали в узлы вычислительной сетки, используя полуэмпирические соотношения, описывающие атмосферный пограничный слой. Учет неоднородностей рельефа производится с помощью метода массосохраняющей интерполяции, который реализован с использованием эффективных численных алгоритмов [13].

Параметр шероховатости z_0 в вычислениях МПП зависит от категории землепользования подстилающей поверхности. В системе РОДОС используются 5 категорий землепользования: водная поверхность, городская застройка, лес, сельскохозяйственная территория, травяной покров с соответствующими значениями параметра шероховатости 1,5 м, 1,5 м, 0,2 м, 0,1 м и 0,01 м. Пользовательский интерфейс РОДОС не позволяет изменять эти значения.

МПП использует значения категорий устойчивости, введенные пользователем, либо значения, которые предоставляются вместе с другими измерениями. В случае отсутствия такой информации в файлах с измерениями для определения категории устойчивости используются несколько вариантов полуэмпирических соотношений, связывающих этот параметр с имеющимися измерениями.

Следующие виды измерений могут быть использованы для вычисления категорий устойчивости: средние значения горизонтальной и вертикальной составляющих флуктуаций скорости ветра, измерения температуры на двух вертикальных уровнях и скорости ветра на одном уровне, облачность, баланс коротковолнового и длинноволнового излучения. Из этих же измерений вычисляются турбулентные потоки тепла и импульса в приземном слое, на основе которых вычисляется масштаб Монина-Обухова L .

Высота пограничного слоя вычисляется с использованием полученных значений для турбулентных потоков тепла и импульса и не может быть ни введена пользователем, ни взята из измерений. По умолчанию в МПП РОДОС используется параметризация, в ко-

торой высота пограничного слоя определяется как табличная функция категории устойчивости.

2.2. Модель АТСТЕП

В модели АТСТЕП [3] зависящая от времени мощность непрерывного выброса загрязнителя аппроксимируется ступенчатой функцией, в которой длины временных промежутков постоянства функции одинаковы и равны $\Delta t \approx 600$ с. Решение задачи атмосферной диффузии с выбросом, функция источника которого совпадает с функцией источника исходной задачи на i -м промежутке постоянства ступенчатой функции, аппроксимируется трехмерным распределением (пуфом). Это Гауссово распределение в вертикальном и поперечном по отношению к вектору скорости ветра сечении и вытянуто в продольном сечении. Начальный размер пуфа (ширина продольного распределения) в момент времени t_i^0 , соответствующем окончанию i -го интервала постоянства функции источника, приблизительно равен $L_i^0 \approx u\Delta t$.

Поле ветра переносит каждый пуф, а также деформирует и поворачивает его. Параметры Гауссового распределения, характеризующие размер пуфа в поперечном и вертикальном направлениях σ_y, σ_z , изменяются со временем за счет процессов турбулентного перемешивания. Размер продольного распределения также увеличивается со временем за счет турбулентного перемешивания на величину $\sigma_x(t)$: $L_i(t) = L_i^0 + \sigma_x(t) + d(t)$. Здесь последний член формально учитывает упомянутую выше возможную деформацию пуфа в горизонтально неоднородном потоке.

Параметры распределения $\sigma_x(t), \sigma_y(t), \sigma_z(t)$ изменяются вместе с пройденным пуфом расстоянием по степенной зависимости в соответствии с параметризацией Карлсруэ. На верхней и нижней границах области ставятся условия полного отражения. Начальные подъем и смещение облака относительно источника в случае теплового выброса вычисляются в зависимости от начальных температуры и скорости выброса с помощью формул Бригса в предположениях о постоянстве скорости и градиента температуры по высоте. При этом не учитывается начальное разбавление выброса на стадии теплового подъема.

2.3. Модель РИМПАФ

В модели РИМПАФ [4] непрерывный выброс вещества представляется в виде последовательности мгновенных выбросов – пуфов. Пуфы переносятся ветром и растут за счет турбулентного перемешивания. В отличие от модели АТСТЕП распределение вещества в каждом пуфе Гауссово во всех трех направлениях. Скорость роста параметров распределения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ рассчитывается с использованием параметризации Карузера, описанной в [4] и основанной на соображениях подобия. Согласно этой параметризации, скорость роста параметров $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ определяется локальными свойствами турбулентных пульсаций в месте нахождения пуфа, которые, в свою очередь, определяются масштабом Монина-Обухова, высотой пограничного слоя и высотой над уровнем Земли.

Таким образом, от АТСТЕП в РИМПАФ скорость роста $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ непрерывно зависит от параметров задачи, что является существенным преимуществом РИМПАФ по сравнению с АТСТЕП. Однако применение параметризаций РИМПАФ требует аккуратного определения всех необходимых параметров, что является задачей МПП. Однако комбинация модели РИМПАФ с МПП РОДОС до сих пор не была проверена на экспериментальных данных. Остальные важные для настоящей работы детали модели РИМПАФ полностью аналогичны модели АТСТЕП.

2.4. Модель ДИПКОТ

ДИПКОТ [5] является стохастической лагранжевой моделью. Аналогично модели РИМПАФ непрерывный выброс в ДИПКОТ представлен в виде последовательности мгновенных выбросов. Однако, в отличие от РИМПАФ, пуфы в ДИПКОТ не только переносятся полем ветра, но и совершают случайные блуждания. Еще одним важным отличием модели ДИПКОТ от предыдущих моделей является то, что тепловой выброс параметризуется с помощью решений уравнений Бригса, учитывающих изменение с высотой скорости и градиента температуры, а также начальное разбавление выброса.

2.5. Интегрирование моделей в систему РОДОС

В системе РОДОС данные, введенные пользователем через пользовательский интерфейс и извлеченные из баз данных РОДОС, передаются МАП через промежуточные (совместно используемые моделями РИМПАФ, ДИПКОТ и АТСТЕП) массивы. Поэтому интеграцию моделей, условно говоря, можно разбить на два этапа (рис. 1): 1) разработчики моделей создают специальные версии кода модели, которые компилируются как библиотеки и включают подпрограммы инициализации переменных модели на основе данных, хранящихся в совместно используемых массивах; 2) разработчики системы создают интегрирующий код (model wrapper), который инициализирует совместно используемые массивы на основе данных, введенных через пользовательский интерфейс ЯРОДОС, а также данных, хранящихся в базах данных ЯРОДОС.

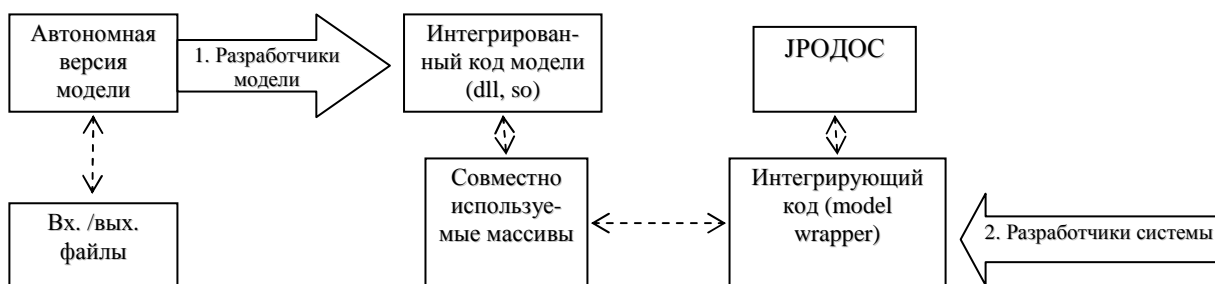


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая процесс интеграции вычислительных моделей в ЯРОДОС разработчиками моделей и системы

3. Результаты расчетов

3.1. Тестирование интегрированных моделей

Проверка правильности интеграции моделей является непростым заданием. Ошибки интеграции могут появиться как на стадии 1, со стороны самих разработчиков моделей, так и на стадии 2, со стороны разработчиков системы. Поэтому проверка правильности интеграции моделей требует активного взаимодействия со стороны разработчиков моделей и разработчиков системы. В настоящей работе правильность интеграции моделей проверялась путем сравнения результатов модели АТСТЕП, интегрированной в ЯРОДОС с АТСТЕП в старой версии РОДОС (РОДОС-6). Выбор именно модели АТСТЕП для проверки правильности интеграции был обусловлен тем, что эта модель была интегрирована в старых версиях системы РОДОС уже давно (с 1999 года АТСТЕП был интегрирован в РОДОС-3), тогда как другие две модели (РИМПАФ и ДИПКОТ) были интегрированы в РОДОС-6 только около двух лет тому назад. Во-вторых, как РОДОС-6, так и АТСТЕП, были разработаны в одной и той же организации (Институт технологий Карлсруэ – КИТ), поэтому можно ожидать, что качество интеграции этой модели в РОДОС-6 наиболее высокое. Были проведены серии тестов по сравнению с АТСТЕП, интегрированного в старый РОДОС и с ЯРОДОС, которые показали близость результатов АТСТЕП, рассчитанных в этих двух

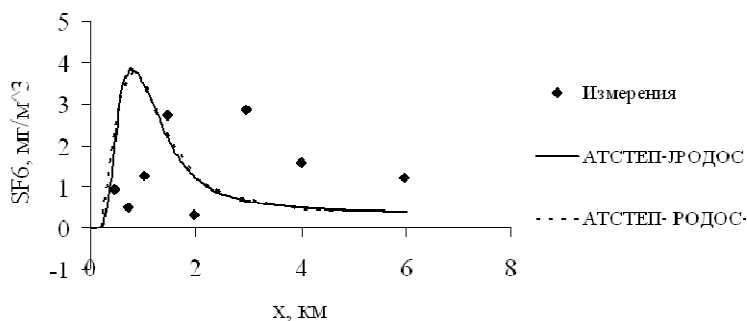


Рис. 2. Максимальные концентрации на оси симметрии облака в зависимости от расстояния до источника, рассчитанные в настоящей работе с использованием АТСТЕП-ПРОДОС и рассчитанные в работе [9] с помощью АТСТЕП-РОДОС-6 для условий эксперимента в Индианаполисе [14], 16.09.1985, 11 ч.

несколько модели АТСТЕП, РИМПАФ и ДИПКОТ работают с одними и теми же совместно используемыми массивами, то правильность интеграции на стадии 2 модели АТСТЕП автоматически влечет за собой правильность интеграции на стадии 2 остальных моделей – РИМПАФ и ДИПКОТ. Однако ошибки интеграции моделей РИМПАФ и ДИПКОТ на стадии 1 не исключены.

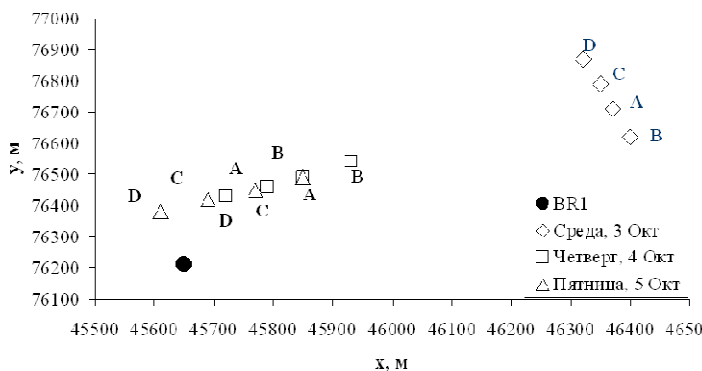


Рис. 3. Карта расположения датчиков для разных дней экспериментов [15]

сией ^{41}Ar через трубу реактора, высота которой равна 60 м; б) измерения температуры и скорости ветра на двух уровнях (69 и 78 м) метеорологической вышки, осредненные в течение 10-минутных интервалов, а также категории устойчивости; в) измерения плотности потока фотонов (fluence rate) за счет радиоактивного распада ^{41}Ar . Средняя скорость выброса была $\approx 1,5 \times 10^{11}$ Бк/ч. Расположение датчиков в разные дни экспериментов показаны на рис. 3.

Эксперимент [15] рассчитывался в работах [6, 8] автономными версиями моделей ДИПКОТ и РИМПАФ, поэтому в данной работе есть возможность провести сравнение результатов интегрированных и автономных версий моделей.

В табл. 1 представлены характеристики ошибок расчетов моделей АТСТЕП, РИМПАФ и ДИПКОТ для экспериментов [15], проведенных в среду, четверг и пятницу. Представлены нормированная среднеквадратическая (NSME) и систематическая (FB) ошибки поля концентрации [14]:

версиях системы. Хорошим примером могут служить результаты сравнения расчетов АТСТЕП-ПРОДОС, проведенных в настоящей работе, и результатов АТСТЕП-РОДОС6 из работы [9] для условий эксперимента Индианаполис [14], показанных на рис. 2.

Хорошее согласование результатов АТСТЕП-РОДОС-6 и АТСТЕП-ПРОДОС с большой достоверностью могут предполагать отсутствие ошибок интеграции на стадии 2 (рис. 1) со стороны разработчиков системы. Причем, по-

3.1. Верификация МАП на данных эксперимента по атмосферному распространению ^{41}Ar

Эксперимент [15] был проведен на площадке исследовательского реактора BR1 Бельгийского центра ядерных исследований (SCK-CEN) в Моле, Бельгия, в начале октября 2001 года. В этом эксперименте изучался атмосферный перенос ^{41}Ar . Были проведены следующие измерения: а) ежеминутные измерения скорости эмис-

$$NMSE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - C_i^m)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i^m}, FB = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - C_i^m)}{0,5 \left(\sum_{i=1}^N C_i + \sum_{i=1}^N C_i^m \right)}. \quad (1)$$

где N – общее число измерений, C_i – рассчитанные значения концентрации, C_i^m – измеренные значения.

В верхней части таблицы представлены данные, полученные с применением основной конфигурации метеорологического препроцессора, используемой в системе РОДОС по умолчанию. Как видно из представленных данных, ни одна из моделей не обнаруживает решающего преимущества перед остальными. Так, для эксперимента, проведенного в среду, наилучшие результаты дает АТСТЕП (NMSE=0,34), в четверг наилучшие результаты обнаруживает ДИПКОТ (NMSE=0,44), а для эксперимента, проведенного в пятницу, наилучшие результаты показывает РИМПАФ (NMSE=0,35). Одновременно дополнительный анализ показал, что результаты автономной версии РИМПАФ, приведенные в работе [6] для эксперимента, проведенного в четверг, значительно лучше, чем соответствующие результаты, полученные в настоящей работе. Мы связываем эти отличия, в первую очередь, с деталями подготовки метеорологических данных, которые в работе [6] и во многих других работах, касающихся верификации автономных версий моделей атмосферного переноса, не приводятся достаточно полно.

Чтобы подтвердить это предположения, мы провели дополнительные вычисления с измененной параметризацией высоты пограничного слоя атмосферы H_{mix} . Как известно, результаты моделей атмосферного переноса чувствительны к этому параметру. По умолчанию в системе РОДОС используется параметризация, в которой высота пограничного слоя определяется как функция категории устойчивости. Была использована другая параметризация, в которой высота пограничного слоя вычисляется на основании теории подобия. Как известно, в случае нейтральной стратификации теория подобия дает

$$H_{mix} = 0,25 \frac{u_*}{f}, \quad (2)$$

где u_* – динамическая скорость (пропорциональная потоку импульса на поверхности), f – параметр Кориолиса. Остальные детали использованной параметризации описаны в [2].

Таблица 1. Статистические характеристики ошибок различных моделей ДИПКОТ, АТСТЕП и РИМПАФ по сравнению с данными экспериментов [15]

Результаты с параметризацией высоты погранслоя, используемой по умолчанию									
	РИМПАФ	ДИПКОТ	АТСТЕП	РИМПАФ	ДИПКОТ	АТСТЕП	РИМПАФ	ДИПКОТ	АТСТЕП
Date	Среда, 03.10			Четверг, 04.10			Пятница, 05.10		
FB	0,17	0,71	0,11	-0,61	-0,11	-0,43	0,04	0,98	1,5
NMSE	0,5	1,16	0,34	1,14	0,44	0,62	0,35	2,16	>10
Результаты с новой параметризацией высоты погранслоя									
FB	-0,2	0,48	0,23	-0,62	-0,07	-0,25	0,07	0,95	1,5
NMSE	0,31	0,6	0,47	1,18	0,37	0,41	0,32	1,8	>10

Как видно из данных, приведенных в нижней части табл. 1, изменение параметризации высоты пограничного слоя существенно улучшает результаты моделей. Этот же результат подтверждается данными, приведенными на рис. 4. Как видно из приведенных результатов, в случае новой параметризации рассчитанные значения получаются гораздо ближе к измерениям.

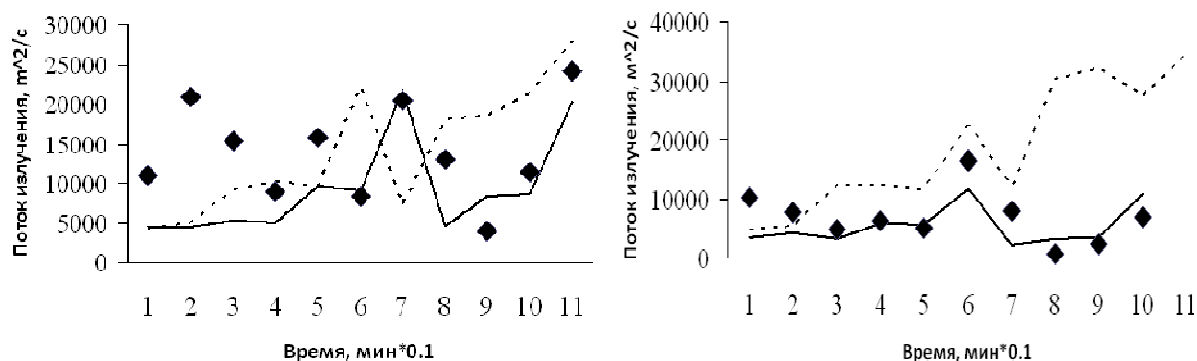


Рис. 4. Сравнение измеренных и рассчитанных потоков излучения для эксперимента, проведенного в среду, 3 октября, и датчиков А (слева) и С (справа). Пунктирная линия – значения, полученные с использованием параметризации пограничного слоя по умолчанию; сплошная линия – значения, полученные с использованием измененной параметризации пограничного слоя

4. Выводы

В настоящей работе представлены результаты верификации модуля атмосферного переноса системы РОДОС на основе сравнения с натурными измерениями, полученными в серии экспериментов [15] с ^{41}Ar . В работе использована недавно разработанная Java-версия этой системы. Проведено сравнение всех трех моделей атмосферного переноса, входящих в РОДОС: РИМПАФ, АТСТЕП и ДИПКОТ. Рассчитаны нормированные среднеквадратические и систематические ошибки. В изученном случае все модели дают удовлетворительные результаты, и ни одна из моделей не обнаруживает существенного преимущества перед остальными. Результаты, полученные в настоящей работе с использованием интегрированных версий моделей, отличаются от опубликованных прежде результатов, полученных автономными версиями моделей. Мы связываем эти отличия с деталями подготовки метеорологических данных, которые в опубликованной литературе редко приводятся достаточно полно. Следовательно, интегрированные атмосферные модели требуют дополнительной верификации и, возможно, настройки. Например, в настоящей работе показано преимущество использования параметризации пограничного слоя атмосферы, основанной на теории подобия, по сравнению с используемой в системе РОДОС по умолчанию более простой параметризацией, в которой высота пограничного слоя является табличной функцией категории устойчивости атмосферы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена в рамках совместного проекта с Atomic Energy of Canada Limited.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raskob W. European approach to nuclear and radiological emergency management and rehabilitation strategies (EURANOS) / W. Raskob // Kerntechnik. – 2007. – Vol. 72 (4). – P. 172 – 175.
2. Andronopoulos S. Model Description of the RODOS meteorological pre-processor [Электронный ресурс] / S. Andronopoulos, J. Bartzis // RODOS report RODOS(RA2)-TN(09)-02. – Athens, Greece: NCSR “Demokritos”, 2009. – 29 p. – Режим доступа: www.rodos.fzk.de.
3. Pasler-Sauer J. Description of the atmospheric dispersion model ATSTEP. Version RODOS PV 6.0. RODOS Report RODOS(RA2)-TN(04)-03 [Электронный ресурс] / J. Pasler-Sauer. – Forschungszentrum, Karlsruhe, Germany, 2004. – 30 P. – Режим доступа: www.rodos.fzk.de.
4. Thykier Nielsen S. Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF. RODOS report WG2_TN98_02 [Электронный ресурс] / Thykier Nielsen S., Deme S., Mikkelsen T. – RISOE National Lab., Roskilde, Denmark, 1998. – 50 p. – Режим доступа: <http://www.rodos.fzk.de>.

5. Andronopoulos S. RODOS DIPCOT model description and evaluation. RODOS report RODOS(RA)-TN(09)-01 / Andronopoulos S., Davakis S., Bartzis J. – Athens, Greece: NCSR “Demokritos”, 2009. – 27 p. – Режим доступу: www.rodos.fzk.de.
6. Experimental evaluation of gamma fluence rate predictions from Argon-41 releases to the atmosphere over a nuclear research reactor site / R.C. Palma, H.K. Aage, P. Astrup P. [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 2004. – Vol. 108, N 2. – P. 161 – 168.
7. Validation of the Demokritos dispersion modeling system based on the Indianapolis experiment / E. Davakis, S. Andronopoulos, A. Vlachogiannis M. [et al.] // Int. J. of Environment and Pollution. – 2001. – Vol. 16, N 1–6. – P. 88 – 100.
8. Andronopoulos S. Gamma radiation dose calculation method for Lagrangian-puff atmospheric dispersion models used in real-time emergency response systems / Andronopoulos S., Bartzis J.G. // Journal of Radiological Protection (у друці). – 2010.
9. Pasler Sauer J. Validation Studies with RODOS ATSTEP / Pasler Sauer J. // Proc. of Int. Conf. “Harmonization within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes HARMO-11”, (Cambridge, UK, 2–5 July 2007). – Cambridge, UK, 2007. – P. 78 – 82.
10. Gering F. Experience with the use of RODOS in emergency centers and reasons for the re-design of RODOS / F. Gering, W. Raskob // Proc. Of Int. Conf. Decision Support Systems, (Kiev, Ukraine, 7–27 June 2007). – Kiev, Ukraine. 2007. – P. 26 – 28.
11. Ievdin Y. RODOS re-engineering: aims and implementation details / Ievdin Y., Trybushny D., Zheleznyak M. [et al.] // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45, N 5. – P. S181 – S190.
12. RODOS meteorological pre-processor and atmospheric dispersion model DIPCOT: a model suite for radionuclides dispersion in complex terrain. / S. Andronopoulos, E. Davakis, J.G. Bartzis [et al.] // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45, N 5. – P. S77 – S84.
13. Ковалец И.В. Повышение быстродействия диагностической метеорологической модели системы РОДОС / И.В. Ковалец // Сб. трудов ИПМЭ им. Пухова. – 2010. – № 55. – С. 68 – 75.
14. Olesen H.R. User’s Guide to Model Validation Kit [Електронний ресурс] / Olesen H.R. // Research Notes from NERI. – National Environmental Research Institute, Copenhagen, Denmark, 2005. – N 226. – National Environmental Research Institute, Copenhagen, Denmark. – P. 72. – Режим доступу: <http://research-notes.dmu.dk>.
15. Measurements of plume geometry and Argon-41 radiation field at the BR1 reactor in Mol. Report of NKS project NKS/ВОК-1. Available from the NKS Secretariat [Електронний ресурс] / M. Drews, H. Jorgensen, T. Mikkelsen [et al.]. – Belgium, 2002. – Режим доступу: www.nks.org.

Стаття надійшла до редакції 03.12.2009