

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА РАДИОНУКЛИДОВ ДЛЯ РАЗНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБОВ

Н. Н. Талерко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Рассмотрены подходы к проблеме адекватного выбора модели атмосферного переноса радионуклидов для оценки и прогноза радиоактивного загрязнения окружающей среды вследствие крупной коммунальной аварии на АЭС. В качестве основных критериев рассматриваются пространственно-временной масштаб задачи, характеристики источника выброса и физико-географические особенности района расположения АЭС. Детально рассмотрены условия применимости гауссовой модели струи для проведения оценок в ближней зоне источника выброса. Оценены интервалы неопределенности результатов расчетов по гауссовой модели, определяемые погрешностями измерений входных метеорологических параметров модели. Проведен анализ возможных погрешностей результатов, связанных с некорректным использованием модели гауссовой струи за пределами ее применимости. Указаны подходы к модификации модели, позволяющие расширить область ее применения и повысить точность расчетов, реализованные (или планируемые к реализации) в компьютерной системе прогноза радиационной обстановки КАДО, эксплуатируемой на Ровенской АЭС.

Введение

Для диагноза и прогноза влияния радиоактивных выбросов из объектов атомной энергетики как на окружающую среду, так и на здоровье население одним из решающих элементов является оценка распространения радионуклидов в атмосфере и их осаждения на подстилающую поверхность. Это связано с тем, что условия воздушного переноса играют определяющую роль в формировании полей радиоактивного загрязнения воздуха и почвы в случае радиоактивных выбросов из АЭС и, как следствие, величин дозовых нагрузок на население. Математические модели распространения радиоактивности в атмосфере являются важным инструментом оценки радиоактивного загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности при аварийных выбросах с АЭС в период ранней фазы радиационной аварии. Выбор адекватной модели атмосферного переноса, учитывающий особенности как источника выброса, так и территории распространения радиоактивности, имеет определяющее значение при решении этой задачи.

Особенности моделей атмосферного переноса радионуклидов для разных пространственно-временных масштабов

Согласно НРБУ-97 [1], период ранней фазы радиационной аварии включает следующие события:

газо-аэрозольные выбросы радиоактивного материала из аварийного источника;
процессы воздушного переноса и интенсивной наземной миграции радионуклидов;
радиоактивные осадки и формирования радиоактивного следа.

Все виды вмешательств в период ранней фазы аварии носят срочный характер.

В этих условиях наверняка будет ощущаться нехватка времени и инструментальных ресурсов для проведения полномасштабных измерений последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды в зоне влияния источника выброса. Поэтому математические модели распространения примеси в атмосфере и ее осаждения на подстилающую поверхность являются важным инструментом, позволяющим получить первую оценку радиационной ситуации вблизи источника выброса и дать прогноз ее развития на ближайший период. С их помощью могут и должны решаться следующие основные практические задачи:

1) оперативный прогноз распространения выброса и оценка величины радиоактивного загрязнения окружающей среды для организации радиологической разведки во время ранней фазы аварии;

2) восстановление параметров выброса с использованием данных измерений на местности путем решения обратной задачи распространения радиоактивности в атмосфере;

3) реконструкция полей выпадений и динамики объемной активности короткоживущих нуклидов в начальный период аварии (что является особенно важным для ретроспективной дозиметрии населения пострадавших регионов).

Поэтому блок расчета рассеяния радиоактивных примесей в атмосфере, позволяющий оценивать последствия выбросов в атмосферу в оперативном режиме, должен входить составной частью в компьютерные системы поддержки и принятия решений в случае аварийных ситуаций на объектах атомной энергетики.

Модель распространения радионуклидов в атмосфере и их осаждения на подстилающую поверхность, используемая для оценок последствий радиационной аварии в режиме реального времени, прежде всего, должна отвечать на два основных вопроса:

Какие территории (в каком направлении и на каком расстоянии) могут оказаться в зоне радиоактивного загрязнения и когда радиоактивный выброс достигнет их?

Какие дозы облучения могут ожидаться там, исходя из имеющихся оценок активности и нуклидного состава выброса?

Согласно НРБУ, по своим масштабам радиационные аварии разделяются на два больших класса: промышленные и коммунальные. К классу коммунальных относятся радиационные аварии, последствия которых не ограничиваются помещениями объекта и его промплощадкой, а распространяются на окружающие территории, где проживает население. Детальнее коммунальные радиационные аварии разделяются на:

локальные, если в зоне аварии проживает население общей численностью до десяти тысяч человек;

региональные, при которых в зоне аварии оказываются территории нескольких населенных пунктов, один или несколько административных районов и даже областей, а общая численность втянутого в аварию населения превышает десять тысяч человек;

глобальные, в результате которых в загрязненную зону попадает значительная часть (или вся) территории страны и ее населения. К особому типу глобальных радиационных аварий относятся трансграничные, когда зона аварии распространяется за пределы государственных границ.

В зависимости от конкретных условий развития радиационной аварии на АЭС (технических особенностей нарушения нормальных условий эксплуатации реакторной установки или возникновения аварийного режима, действий персонала АЭС и т.п.) возможно радиоактивное загрязнение окружающей среды на пространственных масштабах, варьирующихся в широких пределах – от десятков или сотен метров (на промплощадке АЭС) до тысяч километров (трансграничная авария). Соответствующие временные масштабы острой фазы радиационной аварии могут варьироваться от нескольких часов до одного-двух месяцев [1].

В соответствии с этими масштабами определяется детализация описания основных физических механизмов, определяющих распространение примеси в атмосфере и ее осаждение на подстилающую поверхность, а также выбор соответствующих математических алгоритмов для этого. Поэтому для прогноза последствий выбросов активности в атмосферу при аварийных ситуациях на АЭС необходимо иметь набор нескольких расчетных моделей переноса радионуклидов для разных типов аварий и данных пространственно-временных масштабов, которые также учитывают возможные особенности источника выброса, метеорологических условий распространения выброса и физико-географические условия территории расположения АЭС.

МАГАТЭ определила требования к моделям атмосферного переноса радиоактивных веществ, которые используются в системах поддержки принятия решений в случае радиационной аварии в режиме реального времени, документом [2]. Модели распространения аварийных радиоактивных выбросов в атмосфере классифицированы согласно пространственному масштабу задачи, который определяется классом аварии:

локальный (до 20 км);
 мезомасштаб (от 20 до 200 км);
 региональный масштаб (от 200 до 2000 км);
 трансграничный масштаб (2000 км и более).

Для расчетов распространения в атмосфере радиоактивных выбросов используется широкий спектр подходов: от применения простых методов расчета траекторий перенесения радиоактивного облака, позволяющих оценить направление распространения выброса и сделать полуколичественную оценку последствий и вплоть до расчетов по численным трехмерным моделям турбулентной диффузии.

В ближней зоне источника выброса (локальный масштаб) оценки загрязнения приземного воздуха и подстилающей поверхности выбросами из объектов атомной энергетики преимущественно проводятся с помощью гауссовой модели струи [3].

Для описания дальнего перенесения примеси (на расстоянии порядка тысячи и более километров) преимущественно используются упрощенные модели, с помощью которых можно получить усредненные по пространству характеристики загрязнения атмосферы.

Промежуточными по пространственному масштабу и самыми сложными для моделирования являются процессы диффузии примеси на расстояниях порядка десятков и сотен километров. Это связано с тем, что мезомасштабная модель должна учитывать суточный ход изменчивости турбулентности в пограничном слое атмосферы, орографическую и термическую неоднородность подстилающей поверхности и т.п. Ее особенностью является, с одной стороны, необходимость детального и корректного описания основных физических процессов, которые определяют картину распространения и осаждения примеси на таких масштабах, а с другой - необходимость достижения разумного компромисса с вычислительными возможностями ЭВМ в оперативном режиме использования модели для прогноза развития радиационной обстановки при аварии.

Область применимости гауссовой модели струи и возможные источники погрешностей результатов расчетов на ее основе

Гауссова модель струи является эффективным инструментом для оценок концентрации радионуклидов в приземном воздухе и их плотности их выпадений на подстилающую поверхность выбросов из высотных точечных источников (например, вентиляционных труб АЭС). Широкая применимость этой модели объясняется следующими факторами:

- 1) простота математической формулировки модели и, соответственно, легкость ее реализации в виде программного кода;
- 2) относительно небольшое количество входных параметров модели. В частности, все входные метеорологические параметры могут быть получены из данных измерений стандартной метеорологической станции сети Гидрометслужбы либо оценены по этим данным;
- 3) надежность результатов расчетов, подтвержденная данными многих верификаций модели на основе специальных натуральных диффузионных экспериментов или измерений выбросов от промышленных предприятий.

Однако такая простота и доступность применения гауссовой модели может иметь и обратную сторону: ее использование за пределами применимости модели, приводящее к значительному увеличению погрешностей рассчитываемых величин вплоть до неправильного определения расположения и размеров области повышенного загрязнения. Поэтому необходимо четкое понимание пределов применимости гауссовой модели и погрешностей оценок, проводимых с ее помощью, как в этих пределах, так и вне их.

Основными ограничениями гауссовой модели МАГАТЭ являются:

- 1) модель может использоваться на расстояниях до 10 км от источника (в зависимости от сложности рельефа). Согласно [3], для оценки возможности использования модели на больших расстояниях в каждом конкретном случае должно быть проведено специальное исследование, учитывающее влияние физико-географических особенностей площадки на

рассеяние примеси в атмосфере. Кроме того, согласно [3], вывод о возможности применения гауссовой модели за пределами 10-километровой зоны в каждом случае должен быть согласован с регулирующим органом;

2) стационарность метеорологических условий в период распространения выброса. При средней скорости переноса $3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ кратковременный выброс выйдет за пределы расчетной области радиусом 10 км примерно за 1 ч, радиусом 30 км - за 3 ч. Такое условие достаточно хорошо выполняется для большей части погодных условий, за исключением расчетов в переходные периоды (утренние и вечерние часы; периоды резкой смены погоды, связанные с прохождением атмосферных фронтов и т.п.);

3) горизонтальная однородность подстилающей поверхности. В пределах зоны наблюдений АЭС такое условие можно считать выполняющимся с приемлемой степенью точности для местности без значительных особенностей рельефа, а также при отсутствии крупных водоемов. Их наличие может существенно изменить турбулентный и ветровой режим нижнего слоя атмосферы и, как следствие, повлиять на распространение выброса в воздухе. Поэтому данное условие, скорее всего, не выполняется для Запорожской и Хмельницкой АЭС;

4) горизонтальная однородность метеорологических условий в пределах расчетной области. В значительной мере данное условие связано с двумя предыдущими. Нарушается в первую очередь при горизонтальной однородности подстилающей поверхности, а также в периоды прохождения атмосферных фронтов над территорией расчетной области;

5) стационарность источника выброса. Гауссова модель является моделью стационарной струи и применима для моделирования длительного (непрерывного) выброса постоянной мощности, выброса конечного времени действия или кратковременного («мгновенного») выброса. В последнем случае модель дает не концентрацию радионуклида в воздухе, а интегральную по времени выброса концентрацию.

Для гауссовой модели необходима следующая входная информация:

данные измерений ближайшей к источнику выброса метеорологической станции или значения величин, которые могут быть получены на основе этих данных: скорость и направление приземного ветра, категория устойчивости, высота слоя перемешивания, интенсивность атмосферных осадков;

параметр шероховатости подстилающей поверхности;

количество или интенсивность выброса;

характеристики выброса (изотопный и физико-химический состав);

скорость сухого осаждения;

высота источника.

В таблице приведены погрешности результатов расчетов концентрации радионуклида и плотности его выпадений на подстилающую поверхность, обусловленные только лишь погрешностями приборных измерений входных для гауссовой модели метеорологических параметров или погрешностями оценок тех параметров, которые определяются косвенным путем по данным метеорологических измерений. Для скорости и направления ветра, а также интенсивности осадков, значения погрешностей взяты согласно характеристикам измерительной аппаратуры, используемой на стандартных метеостанциях сети Гидрометслужбы Украины. Погрешность оценки категории устойчивости предполагается равной ± 1 категория.

Погрешность оценки высоты слоя перемешивания оценить сложнее, поскольку эта величина определяется по данным измерений различных характеристик нижнего слоя атмосферы (вертикальные профили температуры, турбулентного потока тепла, скорости ветра, концентрации примеси, интенсивности отражаемости акустических волн и др.). Соответственно значение этой величины зависит от: 1) выбора параметра атмосферы, по измерениям которой проводится оценка высоты слоя перемешивания; 2) инструментальной погрешности измерений этого параметра; 3) критерия определения высоты слоя перемешивания по этим

данным измерений. Согласно [4], погрешность оценки высоты слоя перемешивания может варьироваться от 10 до 100 % (см. таблицу).

Погрешности результатов расчетов по гауссовой модели, определяемые погрешностями оценок метеорологических параметров

Параметр	Погрешность измерения (оценки)	Погрешность вычисления концентрации, %	Погрешность вычисления плотности выпадений, %
Скорость ветра	0,5 м/с	10 - 25	10 - 25
Направление ветра	5 град	50 - 400	50 - 400
Категория устойчивости	± 1 категория	~50	~50
Интенсивность осадков	0,25 мм/с	-	25
Высота слоя перемешивания		10 - 100	10 - 100

Оценки погрешностей вычисления концентрации и плотности выпадений с помощью гауссовой модели МАГАТЭ, связанные с указанными погрешностями входной метеорологической информацией, приведены в таблице. Наибольшее влияние на значение рассчитываемых концентраций имеет величина направления ветра. При стандартной погрешности измерений, составляющей 5 град, ошибки в вычислении концентрации могут достигать нескольких раз. Аналогичные погрешности будут иметь оценки доз облучения населения в ранней фазе, полученные на основе расчетов концентрации и выпадений радионуклидов по гауссовой модели: дозы внешнего облучения от выпадений и дозы внутреннего облучения от ингаляционного поступления радионуклидов в организм человека. Для дозы внешнего облучения от воздушной компоненты указанные значения являются нижней оценкой (см. ниже).

Наряду с указанными «явными» источниками неопределенности результатов расчетов по гауссовой модели существует ряд «неявных» источников, которые могут быть значительно более важными по своему вкладу в погрешности оценок по гауссовой модели. Под «неявными» источниками погрешностей оценок в данном случае понимается либо использование гауссовой модели фактически за пределами области ее применимости, либо некорректная оценка значений некоторых входных параметров модели.

Основные «неявные» источники погрешностей гауссовой модели:

поворот направления ветра с высотой в пограничном слое;

флуктуации направления ветра;

горизонтальная неоднородность подстилающей поверхности;

рельеф;

нестационарность метеопараметров;

влияние периода пробоотбора на результаты измерений концентрации в струе.

Одним из путей расширения области применения модели атмосферного переноса в ближней зоне источника, не выходя за пределы основных подходов гауссовой модели, была разработка модифицированной модели атмосферного переноса в рамках создания системы поддержки принятия решений в случае радиационной аварии КАДО, разработанной для Ровенской АЭС. Модифицированная модель дает возможность (по сравнению со стандартной моделью МАГАТЭ) учитывать:

нестационарность метеоусловий;

неоднородность параметра шероховатости подстилающей поверхности;

рельеф;

размер аэрозольных частиц выброса;

влияние конечных размеров облака или струи на расчетные значения дозы внешнего облучения.

Заключение

В случае больших радиационных аварий, потенциально способных привести к радиоактивному загрязнению территории на периферии и за пределами зоны наблюдения АЭС, использование модели МАГАТЭ не является корректным, поскольку это может в ряде ситуаций привести к неправильному диагностированию местоположения территории загрязнения продуктами выброса, и значительным ошибкам (на порядок и более) в расчетных значениях концентрации радионуклидов в воздухе и определяемыми ними дозами облучения. Дальнейшая разработка и усовершенствование модели атмосферного переноса в рамках системы КАДО позволит решить ряд проблем применимости гауссовой модели и повысить точность результатов прогнозирования последствий радиационных аварий на АЭС Украины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. ДГН 6.6.1. – 6.5.001-98.* – К.: УЦГСЭН, 1998. – 135 с.
2. *The utilization of real time models as a decision aid following a large release of radionuclides into the atmosphere, IAEA-TECDOC-733, February 1994.*
3. *Atmospheric dispersion in nuclear power plant siting: A safety guide, Safety series No. 50-SG-S3.* - Vienna: IAEA, 1980.

Поступила в редакцию 22.12.08