

серьезных экологических проблем связана с устаревшей технологией обращения с отходами, в особенности относящейся к очистке дымовых газов.

Значительный вклад в приведенный ущерб от энергетики на ископаемом топливе могут внести платежи за выбросы «парниковых» газов.

К расчетным данным об экономических показателях риска от рассматриваемых видов энергопроизводства следует добавить такие виды ущерба окружающей среде, как расход природных ресурсов (земля, вода), возможное воздействие на флору и фауну на земле и в водоемах. Эти компоненты ущерба требуют отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин В.Ф., Васильев А.П., Крылов Д.А. Процедуры и методы сравнительной оценки экологического риска для разных способов производства электроэнергии. — В сб.: Проблемы оценки риска загрязнения поверхностных и подземных вод в структуре ТЭК, ОАО «Газпром», ООО «ВНИИГаз». М., 2001, с. 135—145.
2. Абалкина И.Л., Демин В.Ф., Иванов С.И. и др. Экономические параметры оценки риска для расчета ущерба, обусловленного воздействием на здоровье населения разных факторов вреда. — Проблемы анализа риска, 2005, т. 2, № 2, с. 132—138.
3. Крылов Д., Крылов Е., Путинцева В. Оценки выбросов в атмосферу SO_2 , NO_x , твердых частиц и тяжелых металлов при работе ТЭС, использующих кузнецкий и канско-ачинский угли. — Бюл. по атомной энергии, 2005, № 4, с. 32—36.
4. Крылов Д.А. Оценки удельных выбросов CO_2 и метана в атмосферу для существующих электростанций России, сжигающих кузнецкий и канско-ачинский угли, с учетом всей энергетической цепочки: от добычи этих углей до потребления их на ТЭС: Препринт Межд. центра по экологической безопасности Минатома России. М., 2001. 40 с.
5. Externalities of Fuel Cycles: ExternE Project. V. 1—8. European Commission, 1994—1998.
6. Крылов Д.А., Сидорова Г.П. Радиоактивность угля и золошлаковых отходов ТЭС. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 1, с. 43—46.
7. UNSCEAR Report 2008 Sources and Effects of Ionizing Radiation. V. I. Annex B, Exposures from Natural Radiation Sources. UN, New York, 2011, p. 84—141.
8. Демин В.Ф., Кузнецов В.П., Макаров В.И. и др. Вопросы страхования гражданской ответственности за ядерные риски от атомных станций малой мощности. — В сб.: Атомэкспо-2012. М., 2012, с. 99—119.

Поступила в Редакцию 14.08.13

УДК 621.039.58

РЕКОНСТРУКЦИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА ПРИ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА-1» (ЯПОНИЯ) С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ СОКРАТ/ВЗ И ПРОЛОГ

*Арутюнян Р.В., Бакин Р.И., Долганов К.С., Киселев А.А., Ткаченко А.В., Томащук Д.Ю., Цаун С.В.
(ИБРАЭ РАН, г. Москва)*

В соответствии с нормативными документами при обосновании безопасности объектов, в частности, при вероятностном анализе безопасности 3-го уровня рассчитывают последствия проектных и запроектных аварий на АЭС. Аналогичные расчеты проводят при противоаварийных тренировках и в случае реальных аварий для определения защитных мероприятий. Во всех случаях фактически моделируются физические процессы аварийной ядерной установки, распространение радиоактивных веществ в атмосфере и их выпадение на местности. Для решения перечисленных задач в ИБРАЭ ис-

пользуется связанная система ПРОЛОГ—СОКРАТ/ВЗ, основной функцией которой является многовариантный анализ параметров радиационной обстановки и дозы ионизирующего облучения населения с учетом и без учета контрмер [1, 2].

В настоящей статье с помощью системы ПРОЛОГ—СОКРАТ/ВЗ реконструируется северо-западный радиоактивный след, сформировавшийся при аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония), в основном 15 марта 2011 г., тем самым демонстрируется возможность ее применения для расчета последствий тяжелых аварий с

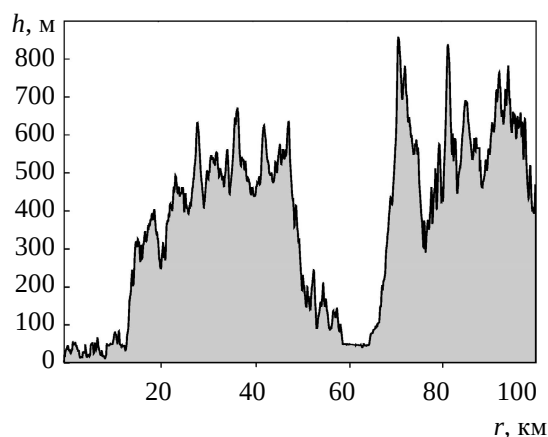
плавлением топлива на АЭС с ВВЭР [3]. С помощью расчетного кода СОКРАТ/ВЗ проанализировано развитие аварии на втором энергоблоке АЭС «Фукусима-1» и получены оценки выхода радионуклидов в атмосферу с учетом фильтрации при барботаже в водном баке защитной оболочки (торе). Результаты расчета с помощью кода СОКРАТ/ВЗ (временные зависимости активности радионуклидов, вышедших в окружающую среду) являлись начальными данными для программного комплекса ПРОЛОГ. С его помощью рассчитан перенос радионуклидов в атмосфере в условиях сложного рельефа местности.

Расчеты базировались на исходных данных, доступных на 2011—2012 гг., поэтому приведенные результаты, вероятно, будут скорректированы в дальнейшем по мере появления более точных данных.

Формирование северо-западного следа.

Значительный вклад в формирование радиационной обстановки при аварии на АЭС «Фукусима-1» обусловлен выбросами 15 марта 2011 г. [4, 5]. Выбросы в первой половине дня 15 марта, произошедшие при вентилировании защитной оболочки на втором энергоблоке, по большей части сформировали южный след, который был первоначально зафиксирован датчиками на промплощадке АЭС «Фукусима-2» и в префектуре Ибараки [5, 6]. Хронология событий на АЭС позволяет связать северо-западный радиоактивный след с выбросами из второго энергоблока в предположении разгерметизации защитной оболочки в период с 12 до 15 ч по японскому времени. Радиоактивные вещества распространялись в северо-западном направлении над сильно неоднородным рельефом, высота которого превышает высоту подъема облака (рис. 1). Пятнистую картину загрязнения сформировало по большей части осаждение за счет вымывания осадками, которые в направлении выброса были неоднородны [5].

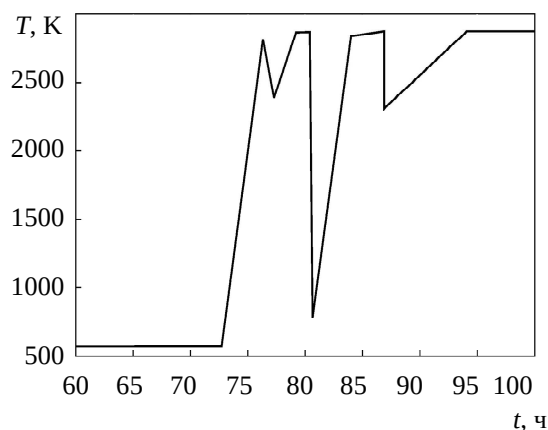
Оценка выхода радионуклидов в атмосферу. Согласно фактическим данным о событиях на втором энергоблоке АЭС «Фукусима-1» после отказа на 69-м часе аварии основной системы высоконапорной подпитки активной зоны давление в реакторе длительное время сохраня-



Р и с. 1. Профиль рельефа по оси следа [7]

лось на уровне 7 МПа в результате периодических срабатываний контрольных предохранительных клапанов. Сброс пара через клапаны постепенно снижал массу воды в реакторе. Моделирование с помощью кода СОКРАТ/ВЗ физических процессов основных стадий развития аварии на втором энергоблоке АЭС «Фукусима-1», начиная с потери функции теплоотвода от активной зоны до выхода радионуклидов в помещения реакторного здания, показало, что примерно на 73-м часе начались осушение и разогрев активной зоны (рис. 2) [8]. Вместе с паром и водородом в водный бак защитной оболочки поступали и продукты деления. К моменту открытия операторами предохранительных клапанов и снижения давления первого контура (76,5 ч) активная зона была почти полностью осушена и частично расплавлена.

Интенсивное парообразование при заливе водой перегретой активной зоны (через 86 ч после начала аварии) вызвало по расчетным оцен-



Р и с. 2. Изменение температуры в активной зоне второго энергоблока АЭС «Фукусима-1» в ходе аварии

кам пик давления в системе реактор—защитная оболочка, что могло привести к частичному разрушению защитной оболочки в области водного бака. Громкий звук, отмеченный операторами, мог означать разрыв его кожуха.

Вследствие предполагающейся в расчетах разгерметизации тора и продолжающегося парообразования при заливе водой расплавленной активной зоны произошел выход продуктов деления в помещения реакторного здания. Выход продуктов деления в свободный объем водного бака защитной оболочки рассчитывали в предположении, что продукты деления в процессе барботажа абсорбировались в воде. При этом учитывали распределение по размеру пузырьков парогазовой смеси, содержащей продукты деления. Выход соединений иода из водного бассейна рассчитывали с учетом равновесия концентрации иода в пузырьках и воде. Предполагалось, что после выхода из защитной оболочки продукты деления поступали в окружающую среду, так как в это время на втором энергоблоке наблюдался интенсивный выход пара через разбитую панель в обстройке реакторного здания. Накопление, осаждение и физико-химическое взаимодействие продуктов деления в помещениях реакторного здания не учитывали.

В табл. 1 приведены результаты расчета продуктов деления в корпусе реактора и выброса в атмосферу после барботажа в водном баке защитной оболочки. Оценки удовлетворительно согласуются с другими расчетными исследованиями (табл. 2).

Моделирование переноса радионуклидов в атмосфере. Поскольку программный комплекс ПРОЛОГ основан на гауссовой модели рассеивания загрязняющих веществ, для расчетов диспергирования радионуклидов в атмосфере принимали усредненные данные — скорость ветра на высоте флюгера 2 м/с, направление 137°, категория устойчивости атмосферы С, шероховатость подстилающей поверхности 0,4 м, высота подъема облака 20 м [4, 12]. В связи с тем, что при барботаже через водный бак защитной оболочки аэрозоли термализуются и подъемом за счет сил плавучести можно пренебречь, высоту подъема облака в расчете примем равной 20 м, что примерно соответствует вы-

Таблица 1. Консервативная оценка выхода радионуклидов из водного бака активной зоны и в атмосферу во второй половине дня 15 марта 2011 г., ПБк

Нуклид	Водный бак	Атмосфера
^{127m}Te	36	0,7
^{127}Te	110	2,3
^{129m}Te	110	2,2
^{129}Te	71	1,4
^{131m}Te	39	0,7
^{131}Te	8,7	0,2
^{132}Te	1300	26
^{131}I	1600	32
^{132}I	1300	27
^{133}I	96	1,9
^{134}Cs	830	17
^{136}Cs	110	2,1
^{137}Cs	480	9,6

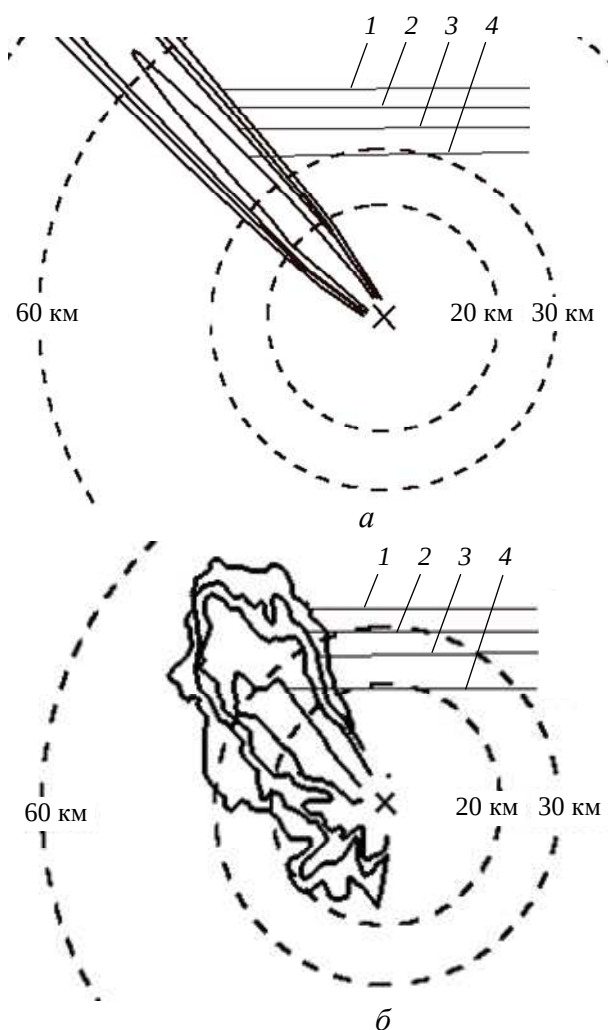
Таблица 2. Сравнение выхода радионуклидов в атмосферу во второй половине дня 15 марта 2011 г. с оценками других расчетных исследований, ПБк

Источник	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
ИБРАЭ РАН	32	17	9,6
[4]	4	0,4	0,4
[9]	10	0,1	0,1
[10]	60	1,0	0,9
[11]	90	10	10

сотной отметке образовавшегося отверстия в обстройке реакторного здания.

Основываясь на результатах расчета выхода радионуклидов в атмосферу, представленных в табл. 1, были проведены оценки распространения веществ в атмосфере, их выпадений на местности и мощности дозы γ -излучения от поверхности.

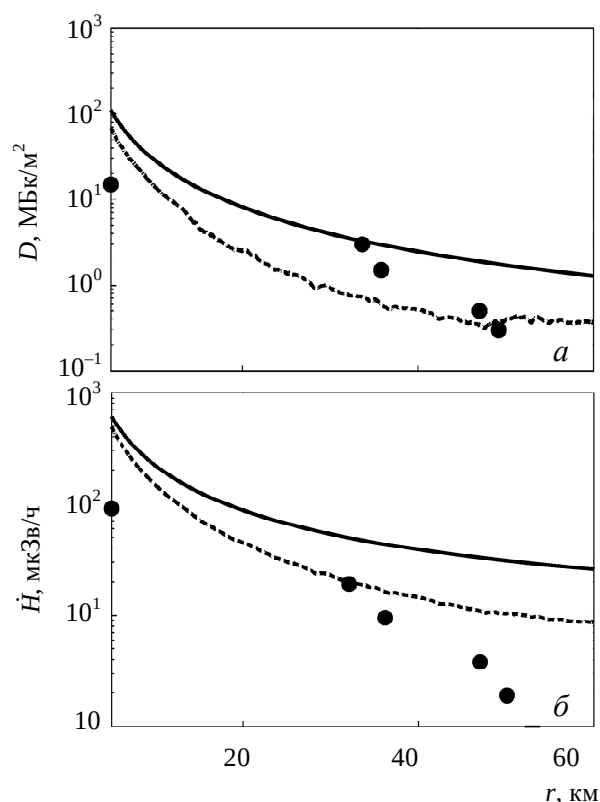
Результаты расчетов диспергирования радионуклидов. В настоящей работе рассчитывали перенос примеси с учетом и без учета топографии местности с усредненными метеорологическими параметрами за рассматриваемый период, плотность выпадений радионуклидов и мощность дозы γ -излучения от поверхности. При использовании классической гауссовой модели (без учета топографии местности) результа-



Р и с. 3. Расчетная (а) и измеренная плотность (б) выпадений ^{137}Cs 0,3 (1), 0,6 (2), 1 (3), 3 МБк/м² (4) [13]

ты расчета плотности поверхностного загрязнения ^{137}Cs превышают измерения (рис. 3). Заложенная в программный комплекс ПРОЛОГ модель сложного рельефа, которая основана на секторной модели диспергирования вещества при прохождении облаком областей с орографической высотой, превышающей высоту подъема облака [14], позволила существенно улучшить оценки (рис. 4, а). С учетом рассчитанной по программе СОКРАТ/ВЗ активности вышедших в окружающую среду радионуклидов с помощью кода ПРОЛОГ была получена оценка мощности дозы в зависимости от расстояния до источника (рис. 4, б). Результаты удовлетворительно согласуются с измерениями с учетом консервативности гауссовой модели.

Выводы. Таким образом, реконструкция с помощью расчетных кодов СОКРАТ/ВЗ и



Р и с. 4. Расчетная с учетом (---) и без учета орографии местности (—) и измеренная плотность (●) выпадений ^{137}Cs (а) и мощность дозы (б) по оси следа на 29 апреля 2011 г.

ПРОЛОГ северо-западного радиоактивного следа, образовавшегося в результате аварии на АЭС «Фукусима-1», удовлетворительно согласуется с измерениями в рамках мероприятий по оценке последствий радиационной аварии. При этом необходимо отметить недостаточную оперативность расчетов выхода радионуклидов из реактора с помощью программного комплекса СОКРАТ/ВЗ, что является необходимым условием при расчетах в случае реальных аварий. Представляется необходимым добиться скорости счета при моделировании физических процессов в тяжелых запроектных авариях уровня реального времени. Как показали расчеты с помощью программного комплекса ПРОЛОГ диспергирования загрязняющих веществ в атмосфере, учет орографии существенным образом повлиял на результаты расчета, поэтому в дальнейшем планируется интеграция более сложных параметрических моделей для описания прохождения облака загрязняющего вещества в случае сильно неоднородной поверхности.

На примере аварии на втором энергоблоке АЭС «Фукусима-1» показана возможность использования связанной системы, включающей расчетный код для анализа тяжелых запроектных аварий СОКРАТ/ВЗ и программный комплекс для оценки радиационных последствий при диспергировании загрязняющих веществ в атмосфере ПРОЛОГ в целях прогнозирования последствий радиационных аварий для населения. Сравнение данных измерений и результатов расчетов показало хорошее совпадение. Полученные результаты показывают возможность эффективного использования рассматриваемых программ в едином комплексе для детерминистических расчетов при вероятностном анализе безопасности 2-го и 3-го уровней, а также для поддержки принятия решений по минимизации последствий для населения при реальных авариях на объектах ядерной энергетики в концепции глубокоэшелонированной защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакумов А.В., Алипченков В.М., Зайчик Л.И. и др. Верификация расчетного комплекса СОКРАТ/ВЗ. — В сб.: Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Подольск, ОКБ «Гидропресс», 2009, с. 1—21.
2. Богатов С.А., Киселев А.А., Шведов А.М. Методические подходы для оценок радиационной обстановки, ожидаемого облучения и эффективности контрмер при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу в модели ПРОЛОГ: Препринт № IBRAE-2011-02, 2011.
3. Radiation Dose Measured in the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station. TEPCO, 2011.
4. Katata G., Terada H., Nagai H., Chino M. Numerical reconstruction of high dose rate zones due to the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. — J. Environmental Radioactivity, 2012, v. 111, p. 2—12.
5. Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки. Труды ИБРАЭ РАН. Вып. 13. Научн. ред. Р.В. Арутюнян. М.: Наука, 2013. 246 с.
6. Korsakissok I., Mathieu A., Didier D. Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima nuclear power plant accident: a local-scale simulation and sensitivity study. — Atmospheric Environment, 2013, v. 70, p. 267—279.
7. Farr T., Hensley S., Rodriguez E. e.a. The shuttle radar topography mission. — In: CEOS SAR Workshop. Toulouse, 26—29 Oct. 1999. Noordwijk, 2000, p. 361—363.
8. Долганов К.С., Капустин А.В., Киселев А.Е. и др. Оперативный расчет аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония) с помощью кода СОКРАТ. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 3, с. 133—139.
9. Chino M., Nakayama H., Nagai H. e.a. Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant into atmosphere. — J. Nucl. Sci. Technol., 2011, v. 48, p. 1129—1134.
10. Estimation of Radioactive Material Released to the Atmosphere during the Fukushima Dai-ichi NPS Accident. TEPCO, 2012.
11. Assessments of Radioactivity Released by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (Fukushima I). IRSN, 2011.
12. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. РД 52.18.717—2009. Обнинск, ООО «ПРИНТ-СЕРВИС», 2009.
13. Distribution Map of Radiation Dose. MEXT, 2011.
14. User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. V. II. Description of Model Algorithms. US Environmental Protection Agency EPA-454/B-95-003b, 1995.

Поступила в Редакцию 20.01.14

Рефераты статей

УДК 621.039.5

Алексеев С.В., Выбыванец В.И., Гонтарь А.С., Нелидов М.В. Методы отработки и обоснования длительного ресурса ЭГК. — Атомная энергия, 2014, т. 116, вып. 3, с. 123—131.

Применительно к режимам работы ЭГК с длительным сроком функционирования (≥ 7 лет) рассмотрены методы и результаты ускоренных испытаний топливных и конструкционных материалов, узлов и ЭГК в целом для расчетно-экспериментального обоснования ресурсно-энергетических

характеристик. Результаты таких исследований обеспечивают необходимыми исходными данными разработанную комплексную компьютерную программу КИМ, моделирующую ресурсное поведение ЭГК и учитывающую взаимное влияние основных ресурсопределяющих процессов.

По результатам комплексных расчетно-экспериментальных исследований показана возможность сократить сроки реакторных испытаний ЭГК для обоснования длительного ресурса, в том числе при двухрежимной эксплуатации в составе ЯЭУ. Рис. 6, список лит. 21 назв.