

УДК 614.876:001.57

## ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ЭФФЕКТИВНЫХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА В ОСТРОЙ ФАЗЕ АВАРИИ

Крюк Ю.Е., к.б.н., доцент

ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –  
«Сосны» НАН Беларуси

e-mail: yu.kruk@gmail.com

*Рассмотрена необходимость проведения оперативного прогноза эффективных доз облучения персонала с целью повышения готовности к аварийным ситуациям. Приведены математические модели оценки эффективных доз облучения персонала в острой фазе аварии. Определены возможные взаимодействия программного продукта с пользователем, его модульная структура, выбрана среда реализации. Создан программный модуль, позволяющий без специальных навыков работы выполнять прогнозную оценку эффективных доз персонала в острой фазе аварии.*

*The need of the operational forecasting of effective doses to workers in order to improve emergency preparedness was considered. The mathematic models of effective exposure dose assessments of personnel in the emergency situations were given. The possibilities of the use case of the software by the user and its modular structure were defined, the implementation platform was chosen. The program module allows no special skills to perform predictive assessment of effective doses of the personnel in the acute phase of the accident was created.*

(Поступила в редакцию 30 ноября 2013 г.)

### Введение

Современное международное сообщество признает, что, несмотря на все меры предосторожности, принимаемые при проектировании и эксплуатации ядерных установок, а также при осуществлении деятельности в ядерной области, существует возможность того, что авария может приводить к возникновению ядерной или радиационной аварийной ситуации [1]. Три наиболее серьезные аварии, произошедшие на АЭС Три-Майл-Айленд (США, 1979), Чернобыльской АЭС (СССР, 1986) и АЭС «Фукусима-1» (Япония, 2011) продемонстрировали, что всегда существует вероятность развития событий, приводящих к выбросу радиоактивных материалов в окружающую среду, и может потребоваться принятие мер аварийного реагирования для предотвращения или снижения радиационного облучения человека. Следовательно, аварийное планирование является необходимым элементом общей безопасности промышленных объектов и должно обеспечивать дополнительный уровень защиты.

Основное средство предотвращения и смягчения последствий аварийных ситуаций – применение принципа «глубокоэшелонированной защиты». Глубокоэшелонированная защита достигается благодаря комбинации многих последовательных и независимых уровней защиты, которые должны разрушиться прежде, чем вредное воздействие будет оказано на людей или на окружающую среду. Надежная структура аварийной готовности и аварийного реагирования на радиационную аварийную ситуацию образует последний уровень глубокоэшелонированной защиты [2] и должна быть разработана и внедрена с использованием лучших международных практик любыми государствами, приступающими к реализации ядерно-энергетических программ. Следовательно, создание потенциала и механизмов аварийной готовности и реагирования служит достижению общей безопасности станции и является одной из основных задач развития национальной инфраструктуры ядерной энергетики.

Общая цель аварийного реагирования состоит в том, чтобы «обеспечить наличие мер для своевременного, управляемого, контролируемого, скоординированного и эффективного реагирования на месте событий, а также на местном, региональном, национальном и международном уровне, на любую ядерную или радиологическую аварийную ситуацию» [1]. Для достижения этой цели требования в отношении готовности должны применяться в процессе планирования и подготовки. Необходимость организации мероприятий по аварийному реагированию заблаговременно и в соответствии с потенциальной величиной и характером угрозы отмечена как один из главных уроков мирового опыта реагирования на аварийные ситуации в течение 1945-2010 годов [3].

Проведенные международные исследования и опыт показывают, что выбросы в атмосферу во время серьезных аварийных ситуаций до конца непредсказуемы [3]. Они могут происходить по неконтролируемым путям и начинаться в течение нескольких минут после повреждения активной зоны. Поэтому невозможно с уверенностью прогнозировать возникновение, величину и продолжительность крупного выброса радиоактивного материала. Вместе с тем, доказано, что проведение предупредительных мероприятий позволяет значительно уменьшить его радиологические последствия [3]. В основополагающих принципах безопасности отмечено, что меры аварийной готовности и реагирования включают заблаговременную выработку критериев, определяющих, когда должны предприниматься различные защитные меры [4]. В качестве таких критериев рекомендовано использование значений эффективных доз облучения человека, превышение которых в случае аварии обеспечивает [1]:

- предотвращение серьезных детерминированных эффектов;
- разумное снижение риска стохастических эффектов;
- безопасность аварийных работников при выполнении заданий.

Следовательно, величины эффективных доз облучения, прогнозируемые в рамках повышения аварийной готовности и эффективности реагирования, должны лежать в основе разработки превентивных защитных мер и принятий решений по их применению.

Целью данного научного исследования являлось создание прикладного программного приложения для оперативной оценки прогнозируемых эффективных доз облучения персонала в острой фазе аварии.

### **Модель прогнозных оценок доз**

В основу разработки программного приложения для прогнозной оценки доз облучения человека в первые часы после выброса была положена математическая модель источника, в форме полубесконечного пространства с равномерно распределенной по объему активностью [5]. В соответствии с принципом консерватизма и большой неопределенностью в модели приняты следующие допущения:

- краткосрочность облучения, когда ожидаются постоянные условия и состав выбросов, т. е. расчет выполняется без учета изменения направления ветра в течение периода облучения (обычно не более 4 часов);
- не учитывается уменьшение облучения из-за частичного пребывания в укрытии;
- облучаемый персонал – взрослые люди (возраст больше 18 лет), с объемом дыхания 1,2 м<sup>3</sup>/час, выполняющие легкую физическую работу, не употребляющие загрязненные продукты питания.

Для этих условий моделирование прогнозной оценки общей эффективной дозы выполняется с учетом внешнего облучения от облака и выпадений на поверхность площадки и внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления [6]:

$$E_T = (E_a + E_g) + E_{inh}, \quad (1)$$

где  $E_T$  – общая эффективная доза;

$E_a$  – эффективная доза от радионуклидов в воздухе (в облаке), мЗв;

$E_g$  – эффективная доза от радионуклидов в выпадениях, мЗв;

$E_{inh}$  – ожидаемая эффективная доза от ингаляции, мЗв.

Оценка вклада в эквивалентную дозу содержащихся в воздухе и выпадениях радионуклидов ( $E_a + E_g$ ) проводится на основе значений мощности AMBIENTНОЙ эквивалентной дозы (МЭД) на расстоянии 1 м от поверхности земли:

$$(E_a + E_g) = \bar{A} \times T_e, \quad (2)$$

где  $\bar{A}$  – среднее значение МЭД от облака или выпадений, мЗв/ч;

$T_e$  – продолжительность облучения, ч.

В случае отсутствия прямых измерений мощность AMBIENTНОЙ эквивалентной дозы  $\bar{A}$ , создаваемая в поверхностном приземном слое на открытой местности, рассчитывается следующим образом [7]:

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^n C_i \times e_i, \quad (3)$$

где  $C_i$  – концентрация радионуклида  $i$  в приземном слое воздуха, кБк/м<sup>3</sup>;

$e_i$  – коэффициент перехода от концентрации  $i$ -того радионуклида в приземном слое воздуха к создаваемой мощности эквивалентной дозы в воздухе на высоте 1 м над подстилающей поверхностью, (мЗв/ч)/(кБк/м<sup>3</sup>).

Доза облучения щитовидной железы и эффективная ингаляционная доза от вдыхания загрязненного радионуклидами воздуха рассчитывается согласно следующим формулам [6]:

$$E_{thy} = \sum_{i=1}^n (C_i \times CF_{2,i}) \times T_e, \quad (4)$$

$$E_{inh} = \sum_{i=1}^n (C_i \times CF_{1,i}) \times T_e, \quad (5)$$

где  $E_{thy}$  – доза облучения щитовидной железы, мЗв;

$CF_{2,i}$  – коэффициент перехода к мощности ингаляционной дозы в щитовидной железе от концентрации радионуклида  $i$  в воздухе, (мЗв/ч)/(кБк/м<sup>3</sup>);

$CF_{1,i}$  – коэффициент перехода к мощности эффективной ингаляционной дозы от концентрации радионуклида  $i$  в воздухе, (мЗв/ч)/(кБк/м<sup>3</sup>);

$C_i$  – концентрация радионуклида  $i$  в облаке, кБк/м<sup>3</sup>.

Приведенные модельные оценки позволяют выполнять расчеты для двух режимов прогноза аварийных доз: для поддержки принятия решений в ситуации реагирования и с целью повышения готовности к аварийным ситуациям. Исходными данными для прогнозирования в ситуации реагирования служат значения концентрации радионуклидов в воздухе и значения МЭД. В режиме повышения готовности значение вклада в эквивалентную дозу содержащихся в воздухе и выпадениях радионуклидов может быть пересчитано по данным концентрации радионуклидов в облаке. В результате

представленных модельных расчетов определяются общая эффективная доза облучения и доза облучения щитовидной железы, прогнозные значения которых могут использоваться как критерии поддержки принятия решений в выборе защитных мероприятий [4].

### Реализация программного модуля

Программный модуль «Прогнозная оценка аварийных доз персонала» создавался для работы под управлением операционной системы Windows, и для его реализации был использован стандартный подход при написании приложения с применением графического интерфейса. Средой реализации была выбрана современная платформа Microsoft dotNet, предоставляющая широкие возможности для создания приложений различных типов, работающих под управлением операционной системы Microsoft Windows [8].

С учетом исходных требований к продукту возможные взаимодействия приложения и пользователя представлены по средствам нотаций унифицированного языка моделирования UML ([9]) диаграммой вариантов использования (рис. 1).

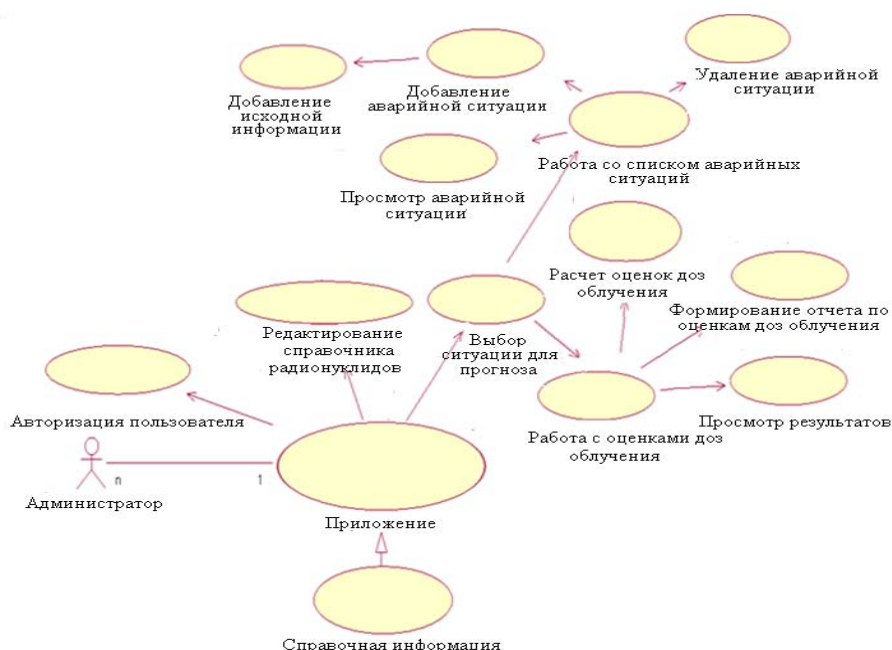


Рисунок 1 – Диаграмма вариантов использования продукта

Прецеденты, отраженные в диаграмме, соответствуют осуществлению стоящих перед разрабатываемым программным средством задач. Показано, что приложение реализует следующие возможности:

- редактирование справочной информации по радионуклидам, в частности по добавлению и удалению, внесению дополнительной информации по коэффициентам перехода;
- выбор ситуации для прогноза: аварийное планирование или реагирование;
- внесение, удаление и просмотр информации по аварийной ситуации, в частности ее описание и внесение исходной информации;
- непосредственное выполнение прогнозных оценок в выбранной ситуации, их просмотр и подготовку отчета для вывода на печать.

Принятый подход позволил применить модульный принцип для разработки программного кода с использованием объектно-ориентированного языка программирования

С# [8]. На диаграмме компонентов показана архитектура продукта с установленными зависимостями между программными компонентами (рис. 2).

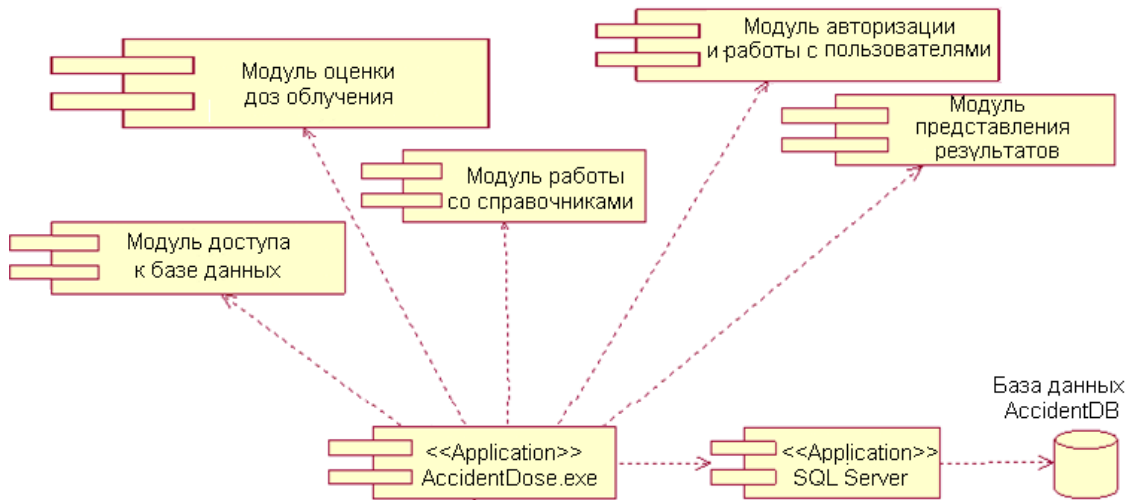


Рисунок 2 – Диаграмма компонентов

Реализованное программное приложение представляет собой набор интерактивных форм, позволяющих пользователю просматривать и заполнять справочную информацию по организациям-пользователям и характеристикам радионуклидов, вводить данные по аварийной ситуации, выполнять непосредственный прогноз доз, выбирая режим оценки: авария или аварийное планирование (рис. 3).

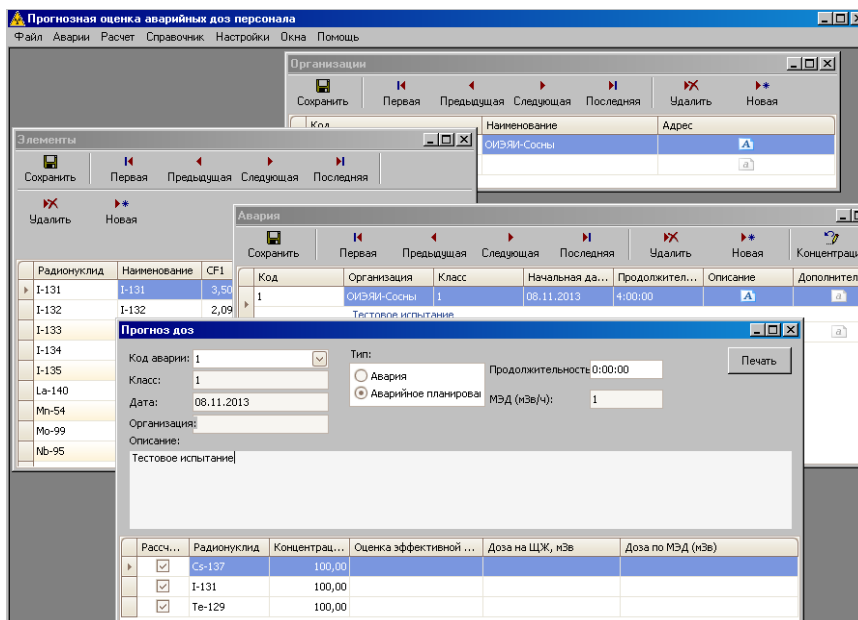


Рисунок 3 – Интерактивные формы программного модуля

Для реализации приведенных форм и возможностей в процессе разработки на основе библиотечных были созданы новые классы:

– описания и доступа к данным (AccidentDataSet.xsd; AccidentDetailDataSet.xsd; AccidentSetDoseData.xsd; NuclideDataSet.xsd; OrgDataSet.xsd);

– отображения данных для визуализации форм взаимодействия с пользователем (FormAccident.cs; FormAccidentDetails.cs; FormDoseCalc.cs; FormNuclide.cs; FormOrganization.cs; MainForm.cs);

– набор классов для выполнения прогнозных оценок (BLL.cs – Business Logic Layer).

Для хранения данных была разработана и реализована в свободно распространяемой среде MS SQL Server ([10]) база данных «Accident».

Результат прогноза аварийных доз реализован в форме отчета с возможностью вывода на печать (рис. 4).

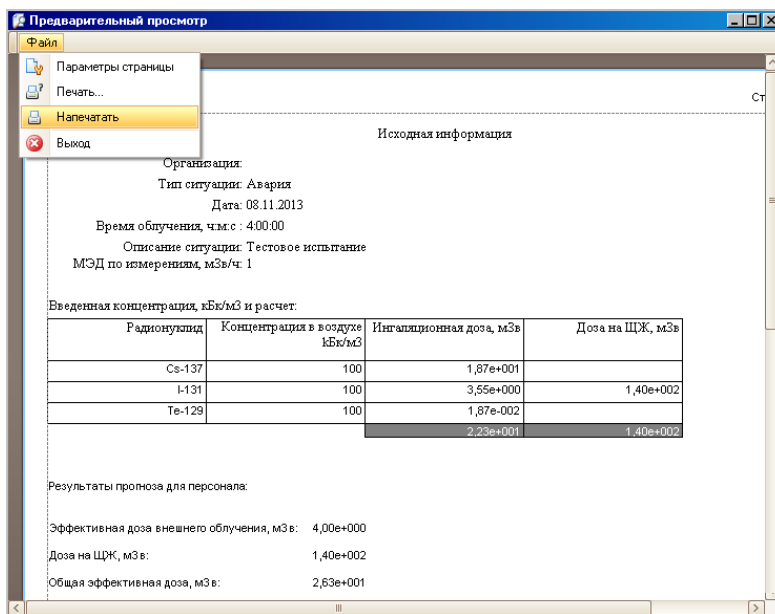


Рисунок 4 – Итоговый отчет

### Заключение

С целью повышения аварийной готовности и эффективности реагирования решена задача по созданию программного приложения для оперативной оценки прогнозируемых эффективных доз облучения персонала в острой фазе аварии. В ходе исследования выполнен анализ предметной области, позволивший определить требования к программному продукту, описать входные и выходные данные, модели для их математического преобразования. Были определены возможные взаимодействия программного продукта с пользователем, его модульная структура, выбрана среда реализации. Разработанное приложение имеет стандартный интерфейс Windows приложений, с учетом рекомендаций *Microsoft* и не требует специальных навыков для работы, что является существенным аспектом в повышении эффективности аварийной готовности и реагирования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Готовность и реагирование в случае ядерной и радиационной аварийной ситуации: требования безопасности № GS-R-2. – Вена: МАГАТЭ, 2004. – 92 с.
2. Соображения относительно аварийной готовности и аварийного реагирования для государств, приступающих к осуществлению ядерно-энергетических программ: EPR-EMBARKING 2012. – Вена: МАГАТЭ, 2013. – 98 с.

3. Уроки реагирования на радиационные аварийные ситуации (1945–2010 годы): EPR-LESSONS LEARNED 2012. – Вена: МАГАТЭ, 2013. – 161 с.
4. Критерии для использования при обеспечении готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации: общее руководство по безопасности № GSG-2. – Вена: МАГАТЭ, 2012. – 108 с.
5. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 60. – Oxford: Pergamon Press, 1991. – 201 p.
6. Руководство по радиационной защите при аварии ядерных реакторов: TECDOC-0955. – Вена: МАГАТЭ, 1998. – 255 с.
7. Оперативная оценка доз облучения населения при радиоактивном загрязнении территории воздушным путем: Методические указания МУ 2.6.1. 2153-06. – Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия, 2007. – 45 с.
8. Троелсен, Э. Язык программирования C# 2010 и платформа .NET 4: Пер. с англ./ Э. Троелсен. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. – 1392 с.
9. Боггс, У. UML и Rational Rose® 2002: Пер. с англ./ У. Боггс, М. Боггс. — М.: Издательство «ЛОРИ», 2004. – 509 с.
10. Грабер, М. SQL: Пер. с англ./ М. Грабер. – М.: ЛОРИ, 2007. – 672 с.