

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ДОЗИМЕТРИИ КОРПУСА РЕАКТОРА

В. Н. Буканов, В. Л. Демехин, И. И. Липский

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Рассмотрены и проанализированы современные подходы к процедуре верификации программных средств. Показано, что процедура верификации должна включать три стадии: квалификацию, верификацию и валидацию. Разработаны основные положения процедуры верификации программного средства, являющегося составной частью методики определения условий облучения корпуса ВВЭР.

Введение

Обеспечение безопасной работы энергоблока АЭС требует контроля текущего состояния корпуса реактора (КР) – одного из главных элементов первого контура реакторной установки. Необходимым условием такого контроля является знание функционалов нейтронного потока (ФНП), воздействующего на КР в процессе его эксплуатации.

Конструкционные особенности реакторов корпусного типа практически исключают возможность экспериментального определения ФНП, характеризующих условия облучения КР [1, 2]. Для решения этой задачи необходимо применение специальных методик. Как правило, составной частью такой методики является программное средство (ПС), с помощью которого осуществляются численные расчеты переноса нейтронов от активной зоны на КР.

Реализация мероприятий по управлению сроком службы КР требует знания не только условия облучения корпуса, но и погрешностей, с которыми они определены [3 - 5]. В то же время на сегодняшний день фактически ни одна из существующих методик дозиметрии КР не позволяет получить погрешности ФНП, характеризующих условия облучения корпуса. Поэтому руководящими документами, действующими в атомно-энергетических комплексах, например России [4] и США [5] (в Украине аналогичный документ, к сожалению, отсутствует), допускается применение методик, для которых в достаточной степени обосновано, что они обеспечивают получение данных об условиях облучения КР с точностью не хуже заданной. Обоснование точности достигается путем проведения процедуры верификации как всей методики в целом, так и ее составных частей.

Основные положения процедуры верификации методики

Любая методика по определению есть установленная совокупность операций и правил, вы-

полнение которых обеспечивает получение необходимых результатов. Вне зависимости от того, какой инструмент (например, расчеты на ЭВМ, измерения с помощью приборов и др.) в ней применяется, необходимым условием пригодности методики является обоснованная уверенность в том, что получаемые в области ее применения результаты достаточно хорошо соответствуют реальной картине. Это предполагает экспериментальное или теоретическое подтверждение как отдельных операций и правил, составляющих методику, так и концептуальной модели, положенной в ее основу. В настоящее время наиболее тщательно общая процедура такого подтверждения и требования к ней разработаны для ПС, которые, как правило, являются составными частями методик, в том числе методик дозиметрии КР. Объективные причины этого факта будут раскрыты несколько ниже.

При рассмотрении вопросов, связанных с процедурой подтверждения, необходимо сразу же обратить внимание на два важных момента. Оба эти момента обусловлены тем, что теоретические основы общих подходов и принципов этой процедуры, по сути, начали закладываться относительно недавно – в конце прошлого века. Поэтому, во-первых, в настоящее время отсутствует единая терминология для описания процедуры подтверждения. Например, в российском руководящем документе [6] предлагается процедуру "подтверждения в установленном порядке результатов расчетов по ПС путем сопоставления их с экспериментальными данными" называть "верификацией". Аналогичная процедура в американском стандарте [7] называется "валидацией", а "верификация" определяется как процесс подтверждения того, что реализация модели, положенной в основу методики, точно соответствует ее концептуальному описанию. Аналогичным образом предлагается трактовать эти термины как в ряде работ российских специалистов, непосредственно относящихся к проблеме расчета переноса нейтронов [8, 9], так и в документах МАГАТЭ [10]. Поэтому в данной работе

принято именно такое толкование, а вся процедура подтверждения, как правило, называется "процедура верификации", учитывая традицию использования слова "верификация" в большинстве русскоязычных литературных источников. Отметим, что в англоязычной литературе более широкое употребление имеет термин "процедура верификации-валидации" ("ВВ-процедура"). И речь при этом часто идет не о ПС, а о концептуальной модели, что связано с особенностями теоретического рассмотрения всего процесса получения тех данных о реальности, которые по тем или иным причинам не могут быть получены прямым экспериментальным путем.

Во-вторых, общая теория процедуры верификации сегодня все еще находится в стадии разработки и достаточно далека от своего завершения. В связи с тем, что основное внимание в ней уделяется проблеме верификации ПС, интенсивность ее разработки тем выше, чем выше степень компьютеризации общества.

Процедура верификации программного средства

Наибольший вклад в существующую на сегодняшний день теорию процедуры верификации внесены учеными Сиракузского университета США [11, 12]. В качестве ее базового положения они приняли, что в действительности существует не две основные научно-технических сферы – эксперимент и теория, а три – эксперимент, теория и расчет. Первая занимается, прежде всего, получением экспериментальных данных о реальном мире, вторая – созданием теоретических моделей, третья – расчетной имитацией моделей. В таком случае, взаимосвязь между научно-техническими сферами, представленная на рис. 1, является строго односторонней, а именно:

на основании анализа некоторого набора экспериментальных данных создается концептуальная модель, которую в науке обычно называют теорией. При этом необходимо отметить, что такая модель предполагает изначальное задание ограниченной области ее применения;

исходя из созданной теории, разрабатывается программное описание модели (по сути, алгоритм) и затем само ПС;

использование ПС приводит к получению информации о реальности, которую по объективным причинам (или вообще, или на сегодняшний день) невозможно получить в экспериментальных исследованиях.

Подтверждение и обоснование правильности каждого из указанных переходов от одной научно-технической сферы к другой и есть главной задачей всей процедуры верификации, которая в

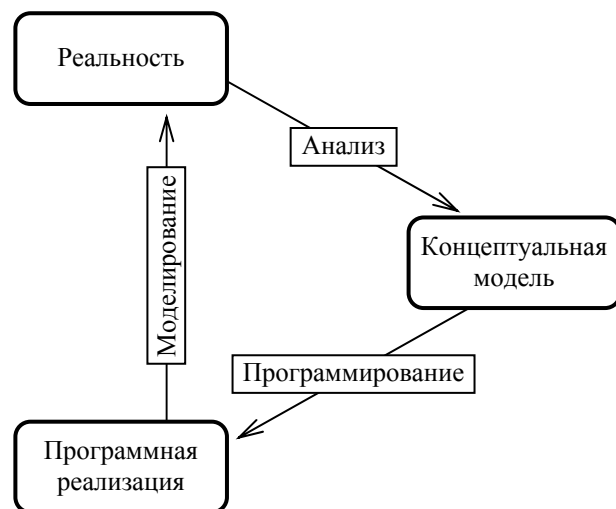


Рис. 1. Модель взаимосвязи между научно-техническими сферами (согласно [11, 12]).

таком случае естественным образом подразделяется на три стадии (рис. 2):

квалификацию – процесс определения адекватности реальности концептуальной модели в области ее применения;

верификацию – процесс оценки результатов разработки ПС, обеспечивающий гарантию того, что оно соответствует требованиям, определенным концептуальной моделью;

валидацию – оценку точности компьютерного моделирования путем сравнения с экспериментальными данными.

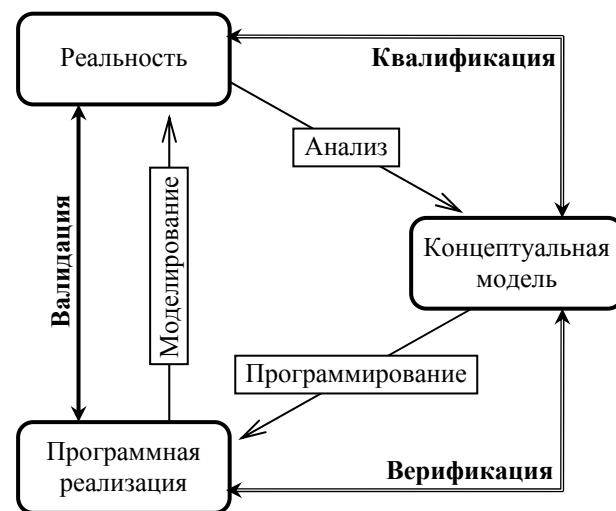


Рис. 2. Три стадии процедуры верификации (согласно [11, 12]).

Прежде, чем переходить к рассмотрению каждой из трех стадий процедуры верификации в отдельности, представляется необходимым обратить внимание на общие важные моменты.

Выяснение того факта, что переход от одной научно-технической сферы к другой является абсолютно адекватным, требует слишком боль-

ших затрат времени и ресурсов, а часто может оказаться вообще до конца не решаемой задачей. При этом увеличение степени доверия к модели растет не пропорционально увеличению этих затрат, а все медленнее и медленнее [12, 13]. Поэтому проводить проверки оправдано лишь до тех пор, пока не получена обоснованная уверенность в том, что переход осуществлен верно. Использование расплывчатого словосочетания "обоснованная уверенность" в указанном контексте является прямым следствием невозможности математически строго и однозначно сформулировать некий общий подход к процедуре верификации для того, чтобы можно было использовать такие строгие математические категории, как "вероятность" и/или "достоверность".

Следовательно, с одной стороны, процедура верификации не может быть абсолютной и однозначно объективной, а решение об объеме тестов и проверок ПС должно приниматься отдельно для каждого конкретного случая на основе достаточно субъективного мнения. А с другой стороны, в связи с общим развитием науки и техники процедура верификации, по сути, является процессом постоянным и непрерывным даже для неизменного ПС. Рассмотрение процедуры верификации и ее результатов должно допускать, что ПС содержит ошибки даже после того, как все возможные проверки проведены и все обнаруженные дефекты исправлены. Отсутствие очевидного свидетельства того, что имеет место какая-либо ошибка, не означает, что она, действительно, отсутствует: "ошибка существует, пока не доказано, что ее нет!" [14].

В случае же любого, пусть и незначительного, изменения ПС, оно должно быть в обязательном порядке подвергнуто процедуре фактически повторной верификации. При этом под "изменением ПС" подразумевается не только изменение самой программы, но также и ее внутренних констант, т.е. величин, которые остаются неизменными во всей области применения концептуальной модели. Повторную процедуру верификации также необходимо проводить и при изменении (расширении) области применения ПС.

Для выяснения, являются ли результаты, получаемые с помощью ПС, адекватными и достоверными или нет, используется два подхода. Необходимо отметить, что в силу причин, указанных выше, каждому из них присуща определенная доля субъективизма. Наиболее популярный подход – принятие решения непосредственно командой разработчиков. Это решение основано на результатах различных испытаний и тестов, являющихся непосредственно частью самого процесса разработки и отладки ПС. Другой подход, часто называемый "независимая проверка и

оценка", предполагает привлечения третьего лица для проведения тестов и проверок на различных этапах процедуры верификации. Третье лицо является независимым как от команды разработчиков ПС, так и от потенциальных пользователей и/или конечных потребителей.

Следует заметить, что третье лицо в большинстве случаев необходимо для аккредитации ПС, когда согласно определенной процедуре устанавливают, удовлетворяет ли оно некоторым заданным критериям. Очень часто аккредитация подразумевает выдачу официального свидетельства о пригодности ПС для решения определенного круга задач в области применения концептуальной модели. В этом случае аккредитацию часто называют аттестацией.

Для процедуры верификации ПС используются два общепринятых способа. Первый способ состоит в том, чтобы проводить проверку непосредственно в процессе разработки ПС. Он обязательно используется, если работы требуют значительных финансовых затрат. При этом команда разработчиков получает возможность принимать во внимание различные замечания и корректировать процесс. В таком случае создание ПС не будет ошибочно продолжаться, если на каком-то этапе оно перестанет удовлетворять требованиям пригодности.

Второй способ – провести проверку после того, как ПС будет полностью закончено командой разработчиков. В этом случае процедура верификации, если она проводится командой разработчиков, по сути, является частью процесса отладки ПС, а привлеченному третьему лицу остается лишь оценить уровень выполнения работ. Такой способ особенно характерен для процедур "доверификации", т.е. при выполнении проверок, по тем или иным причинам не выполненным ранее, или "повторной верификации", необходимость в которой, как уже отмечалось, обязательно возникает при модернизации ПС.

В действительности процедура верификации может представлять достаточно сложную комбинацию указанных способов и подходов. Однако, чаще всего, из-за своей оптимальности основой является вариант, когда сама процедура выполняется разработчиками, а третье лицо привлекается лишь на этапе аттестации ПС.

Важным элементом, обеспечивающим качество процедуры верификации в целом, является достоверность используемых экспериментальных данных. Эти данные необходимы для достижения трех целей – создания концептуальной модели, ее проверки, а также тестирования проверенной и программно реализованной модели или, другими словами, валидации ПС.

Необходимым условием для создания корректной концептуальной модели или, иначе, развития теорий, которые будут использоваться в ее построении, развития внутренних математических и логических связей модели и т.п. является наличие достаточных и достоверных данных об исследуемой системе. Кроме того, эти данные необходимы для проведения квалификационных проверок. Если такие данные недоступны, высокая точность концептуальной модели труднодостижима и уже на этом этапе создания ПС могут закладываться основы ошибочности конечного результата. Следует, однако, отметить, что как получение данных об исследуемой системе, так и обеспечение их достоверности достаточно часто лежит вне возможностей разработчиков ПС.

Аналогично нельзя гарантировать правильность и достоверность конечного результата в случае недостоверности экспериментальных данных, используемых для тестирования проверенной и программно реализованной модели. Поэтому важной задачей процедуры верификации методики дозиметрии КР в целом является обоснование правильности и достоверности экспериментальных данных, которые предназначены для валидации соответствующего ПС. Этот вопрос более подробно будет рассмотрен ниже.

После общих замечаний ко всей процедуре верификации представляется необходимым рассмотреть по отдельности каждую из ее ступеней.

Квалификация является, пожалуй, наиболее простой из них. Связано это, прежде всего, с тем, что она явно или неявно использовалась на протяжении всей истории развития науки и техники.

Справедливость концептуальной модели подразумевает, что (1) теории и предположения, лежащие в ее основе верны и (2) логические, математические и причинные связи и приближения, используемые в модели, "приемлемы" для предназначенной цели. Квалификация означает проверку допустимости сделанных предположений и приближений в области применения модели и поэтому подразумевает, прежде всего, оценку неточностей, возникающих в результате их использования. Если эти неточности достаточно велики, то необходимо создание другой концептуальной модели.

Для моделей и ПС, используемых при решении прикладных задач, в том числе задачи определения условий облучения КР, квалификация означает, прежде всего, использование уже имеющихся научных обоснований допустимости тех или иных приближений в области применения модели. Именно поэтому в таком случае квалификация должна осуществляться на стадии разработки и, по сути, третьим лицом. Задачей

же разработчиков является лишь поиск, анализ и подбор литературных источников в обоснование принимаемой концептуальной модели. При этом указанный подход не исключает проведение и внедрение собственных, более высококачественных или принципиально новых, разработок и, следовательно, необходимости их квалификации.

Верификация ПС (рис. 3) должна гарантировать, что программная реализация концептуальной модели выполнена правильно. Если используется язык программирования высокого уровня, то программа должна быть разработана, написана и откомпилирована с использованием стандартных методов разработки ПС. В этом случае при верификации ПС, прежде всего, проверяется правильность работы компилятора и правильность реализации компьютерной модели (алгоритма). Имеются два базовых подхода для таких проверок: статическое тестирование и динамическое тестирование [14]. В статическом тестировании программа анализируется на корректность, используя метод структурно-критического анализа. В динамическом тестировании программа (или ее часть) выполняется с различными исходными данными и полученные расчетные результаты (включая генерируемые в ходе выполнения) используются для определения, является ли компьютерная программа правильной. Методы, обычно используемые в динамическом тестировании, – это последовательная проверка исходных и полученных данных, а также проверки на совпадение результатов расчетов с заранее полученными аналитическими решениями и перепрограммирование критических компонентов ПС, чтобы определить, получают ли в таком случае те же самые результаты.

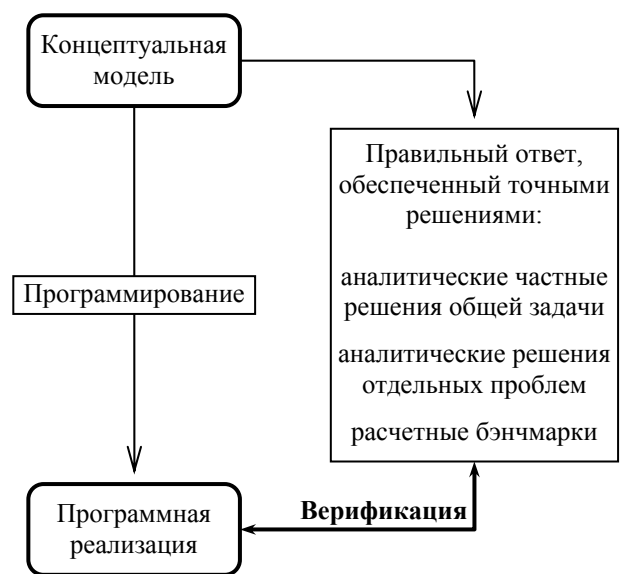


Рис. 3. Верификация ПС.

Кроме описанного выше, частью верификации ПС может являться сравнение полученных с его помощью результатов с результатами расчетов, выполненных другими ПС, как правило, уже прошедшими процедуру верификации.

В отличие от квалификации и верификации валидация ПС (рис. 4) может быть реально осуществлена только после окончания разработки. Точнее, она должна являться конечной стадией разработки и отладки ПС, позволяющей оценить адекватность получаемых результатов. Очевидным пожеланием к валидации является необходимость проверки всей возможной области изменения входных параметров на предмет соответствия выходных расчетных и реальных значений.

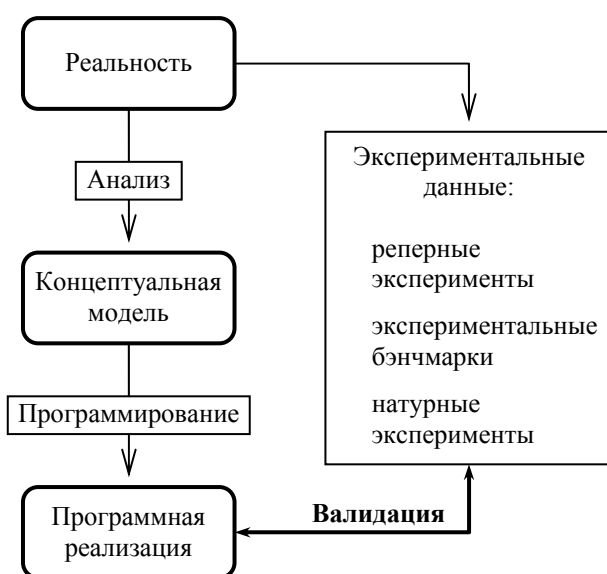


Рис. 4. Валидация ПС.

На практике при решении этой задачи пытаются совместить два пути. Первый – сравнить реальные и расчетные значения при экстремальных значениях входных параметров. Этим в некоторой степени гарантируется, что ПС дает адекватные результаты на границе области применения концептуальной модели. Второй – использовать все имеющиеся в наличии экспериментальные данные, что позволяет удостовериться в работоспособности модели во всей области применения. Следует также обратить внимание, что в некоторых случаях проверка ПС может осуществляться даже за пределами области применения концептуальной модели. Это происходит в некоторых реперных экспериментах, предназначенных, по сути, для проверки не всего ПС, а лишь какой-то его части.

ПС может содержать ошибки из-за неадекватной концептуальной модели, ошибочного программирования или ошибочных данных. Поэтому наибольшее количество проверок должно

быть направлено на выяснение уровня точности получаемых с помощью ПС результатов в области применения концептуальной модели. Методы, используемые в различных случаях при валидации ПС, отличаются очень широким разнообразием. Достаточно подробный их список и анализ можно найти в [12].

В то же время необходимо обратить внимание, что при проведении процедуры верификации не выдвигается жесткого требования на получение таких характеристик неточности, как, например, погрешность результата. Главными причинами такого подхода является то, о чем уже было сказано выше: невозможность полной проверки ПС и невозможность однозначно доказать полное отсутствие ошибок. Более того, во многих случаях, в том числе при расчетах переноса нейтронов, тяжело предсказать даже закон распределения погрешностей для входных параметров. Поэтому разработчики ПС часто идут по пути обоснования некоей условно-предельной величины ошибки, уверенность в которой растет в процессе "доверификации" ПС. Следует обратить внимание на невозможность использования строгих математических подходов и, следовательно, на наличие определенной доли субъективизма при таком обосновании. Именно поэтому предельная величина ошибки результата является условной.

Выводы

Анализ общих подходов к процедуре верификации, изложенных в предыдущем разделе, позволил выработать основные положения процедуры верификации для ПС, являющегося составной частью методики определения условий облучения корпуса ВВЭР. В данном случае главной задачей ПС является моделирование распространения нейтронов в сложной гетерогенной среде ядерного реактора и, в конечном счете, получение расчетных значений ФНП в его околорпусном пространстве.

Прежде всего, очевидно, что процедура верификации должна выполняться либо командой разработчиков, либо конечными потребителями ПС и в обязательном порядке должна включать все три стадии: квалификацию, верификацию и валидацию.

На стадии квалификации должно быть выполнено обоснование всех приближений и допущений, используемых в ПС. К ним относятся, например, групповая структура библиотеки микроконстант, приближение индикатриссы рассеяния, адекватность материальных и геометрических параметров расчетной модели, гомогенизация и т.д.

Верификация должна включать, прежде всего, набор тестов для проверки адекватности работы как ПС в целом, так и отдельных его модулей и блоков. Кроме того, желательным является сравнение результатов расчетов по верифицируемым ПС с результатами расчетов ФНП в различных гомогенных и гетерогенных структурах, полученными с помощью других ПС.

Валидация ПС, используемого при определении условий облучения корпуса ВВЭР, должна быть осуществлена путем сравнения расчетных данных с экспериментальными. Экспериментальные данные могут быть получены в макетном и натуральных экспериментах. К примеру, макетные эксперименты для реакторов ВВЭР были выполнены на реакторе LR-0 Института ядерных

исследований (г. Ржеж, Чехия) [15]. В качестве данных натуральных экспериментов представляется целесообразным использовать удельные активности продуктов реакций активации нейтронно-активационных детекторов, которые облучаются у внешней поверхности КР в течение топливной кампании.

В заключение следует сказать, что изложенная в данной работе процедура верификации была применена к пакету программ MCPV, разработанному специалистами Института ядерных исследований НАН Украины для выполнения численных расчетов переноса нейтронов из активной зоны на корпус ВВЭР [16]. Результаты будут представлены в последующих публикациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Minutes of WGRD-VVER Workshop on RPV Neutron Dosimetry*. Sandanski, Bulgaria, 29 Sept. - 3 Oct. 1997. - 4 p.
2. *Пояснительная записка к предложению по разработке и внедрению штатных систем мониторингования радиационной нагрузки корпусов и внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР (СМРН ВВЭР)*. Приложение 2 к письму ИАЭ им. И. В. Курчатова (Москва, Россия) № 36-04/1 от 21.01.91 к зам. Министра Минатомэнергопрома СССР. - 5 с.
3. *Zsolnay É. M. Reactor Dosimetry Aspects of the RPV Service Life Management at the Paks NPP // Proc. of the 9th Int. Symp. on Reactor Dosimetry*. Prague, Czech Republic, 2 - 6 Sept. 1996. - Singapore: World Scientific - 1998. - P. 50 - 57.
4. *Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов РБ-007-99 / Госатомнадзор России*, 1999. - 9 с.
5. *Regulatory Guide 1.190 "Calculational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence" / US Nuclear Research Commission*, 2001. - 53 p.
6. *Положение об аттестации программных средств, используемых при обосновании или обеспечении безопасности ядерно- и/или радиационноопасных объектов и производств РД-03-17-94 / Госатомнадзор России*, 1994.
7. *AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (G-077-1998e)*. - Reston, VA, USA, AIAA, 1998. - 19 p.
8. *Сулов И. П. Прецизионные программы для решения уравнения переноса // Сб. докл. сем. "Нейтроника-92: Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов"*, Обнинск, Россия, 27 - 29 окт. 1992 г. - Обнинск, Россия, 1994. - С. 26 - 28.
9. *Дубкин А. А., Жарков В. П., Николаев А. Н. Основные положения концепции верификации-валидации в задачах расчета защиты от излучения // Сб. докл. сем. "Нейтроника-92: Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов"*, Обнинск, Россия, 1994. - С. 15 - 21.
10. *Verification and Validation of Software Related to Nuclear Power Plant Instrumentation and Control*. - Vienna, IAEA, 1999 - 125 p.
11. *Sargent R. G. Verification and Validation of Simulation Models // Simulation in the 21st Century (Proc. of the 1998 Winter Simulation Conf., Washington, DC, USA, 13 - 16 Dec. 1998)*. - P. 121 - 130.
12. *Sargent R. G. Verification, Validation, and Accreditation of Simulation Models // Proc. of the 2000 Winter Simulation Conf., 10 - 13 Dec, 2000, Orlando, Florida, USA. - IEEE, Piscataway, NJ, USA, 2000. - P. 50 - 59.*
13. *John S. Carson, II. Model Verification and Validation // Proc. of the 2002 Winter Simulation Conf., 8 - 11 Dec, 2002, San Diego, California, USA. - Naval Postgraduate School, Monterey, CA, USA, 2002. - P. 52 - 58.*
14. *Fairley R. E. Dynamic Testing of Simulation Software // Proc. of the 1976 Summer Computer Simulation Conf., Washington, D.C., USA, 1976. - P. 40 - 46.*
15. *Reactor Dosimetry: Accurate Determination and Benchmarking of Radiation Field Parameters, relevant for Pressure Vessel Monitoring (REDOS): Final Report / Ageing Materials European Strategy - No. EUR 21771 EN - AMES, Petten, the Netherlands, 2005 - 63 p.*
16. *Пакет программ MCPV для расчета функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус ВВЭР-1000 / В. Н. Буканов, А. В. Гриценко, В. Л. Демехин, С. М. Пугач. - К., 2005. - 28 с. - (Препр. / НАН Украины. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-05-6).*

**ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОЦЕДУРИ ВЕРИФІКАЦІЇ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ,
ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ДОЗИМЕТРІЇ КОРПУСУ РЕАКТОРА**

В. М. Буканов, В. Л. Демьохін, І. І. Липський

Розглянуто й проаналізовано сучасні підходи до процедури верифікації програмних засобів. Показано, що процедура верифікації має включати три стадії: кваліфікацію, верифікацію та валідацію. Розроблено основні положення процедури верифікації програмного засобу, що є складовою частиною методики визначення умов опромінення корпусу ВВЕР.

**MAIN POSITIONS OF V&V PROCEDURE FOR THE SOFTWARES USED
AT REACTOR PRESSURE VESSEL DOSIMETRY**

V. N. Bukanov, V. L. Dyemokhin, I. I. Lipsky

Modern approaches to V&V procedure of software are considered and analyzed. It is shown that V&V procedure should include three stages: qualification, verification and validation. Main positions of V&V procedure for the software to be a component of VVER pressure vessel irradiation conditions determination technique are worked out.

Поступила в редакцію 17.03.08,
после доработки – 15.04.08.