



УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2022.104.2.002

© 2022. Все права защищены.

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ОБОСНОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Богдан С. Н.\*, канд. техн. наук (bogdan@secnrs.ru),  
Жылмаганбетов Н. М.\*, канд. техн. наук (zhylmaganbetov@secnrs.ru),  
Козлова Н. А.\*, канд. техн. наук (kozlova@secnrs.ru),  
Понизов А. В.\* (ponizov@secnrs.ru),  
Шарафутдинов Р. Б.\*, канд. техн. наук (charafoutdinov@secnrs.ru),  
Шевченко Р. А.\* (rshevchenko@secnrs.ru),  
Шевченко С. А.\*, канд. техн. наук (sshevchenko@secnrs.ru),  
Яшников Д. А.\*, канд. техн. наук (yashnikov@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2022 г.

### Аннотация

В мае 2021 г. исполнилось 30 лет деятельности по экспертизе программ для электронных вычислительных машин (ЭВМ), предназначенных для применения при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). В статье обобщен опыт ФБУ «НТЦ ЯРБ» по организации и проведению экспертизы программ для ЭВМ, накопленный после установления в 2018 г. Федеральным законом «Об использовании атомной энергии» требования об обязательном применении при обосновании безопасности программ для ЭВМ, прошедших экспертизу в организации научно-технической поддержки Ростехнадзора.

Описываются изменения в нормативных документах, регламентирующих процедуру экспертизы и устанавливающих требования и рекомендации к обоснованию применимости программ для ЭВМ. Обсуждаются результаты наиболее значимых экспертиз программ для ЭВМ в привязке к инновационным ОИАЭ.

Рассматриваются также актуальные вопросы развития методической основы экспертизы программ для ЭВМ. Кроме того, обсуждаются применяемые в ФБУ «НТЦ ЯРБ» подходы к использованию расчетного моделирования процессов, влияющих на безопасность ОИАЭ, в целях научно-технической поддержки регулирования безопасности при использовании атомной энергии.

► **Ключевые слова:** экспертиза программ для ЭВМ, обоснование безопасности, верификация, валидация.

\* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

## CURRENT ISSUES OF REVIEW OF COMPUTER CODES USED FOR SAFETY ANALYSIS OF NUCLEAR FACILITIES

Bogdan S. N.\* , Ph. D.,  
Zhylmaganbetov N. M.\* , Ph. D.,  
Kozlova N. A.\* , Ph. D.,  
Ponizov A. V.\* ,  
Sharafutdinov R. B.\* , Ph. D.,  
Shevchenko R. A.\* ,  
Shevchenko S. A.\* , Ph. D.,  
Yashnikov D. A.\* , Ph. D.

Article is received on April 25, 2022

### *Abstract*

May 2021 marks the 30th anniversary of activities on review of computer codes intended for use in safety analysis of nuclear facilities in Russia. Since 2018 the Federal Law "On the Use of Atomic Energy" requires to use for safety analysis only computer codes reviewed in technical support organization of Rostekhnadzor. The article summarizes experience of SEC NRS in this review process. Changes in the regulatory documents governing the review procedure and establishing requirements and recommendations for justification of computer code applicability are described. The results of the most significant computer code reviews are discussed in relation to innovative nuclear facilities. The article also discusses the topical issues of development of the methodological basis of computer code review. In addition, applied by SEC NRS approaches to the use of numerical simulation of processes affecting the safety of nuclear facilities for the purpose of scientific and technical support of safety regulation in the use of atomic energy are discussed.

► **Keywords:** computer code review, safety analysis, verification, validation.

---

\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

## Введение

Обеспечение безопасности при использовании атомной энергии зависит от комплекса взаимосвязанных факторов, одним из которых является всесторонний анализ безопасности с использованием детерминистических и вероятностных методов. При проведении такого анализа используются специализированные программы для электронных вычислительных машин (ЭВМ), обеспечивающие построение расчетных моделей процессов и явлений, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии. Расчетное моделирование переходных процессов и аварий, потенциально возможных при эксплуатации ОИАЭ, является необходимым условием обоснования ядерной и радиационной безопасности при использовании атомной энергии. Результаты расчетных анализов лежат в основе проектных документов, документов, обосновывающих безопасность, а также документов, в соответствии с которыми осуществляется эксплуатация ОИАЭ.

Однако любая созданная с помощью программы для ЭВМ расчетная модель не сможет обеспечить учет всех особенностей моделируемого объекта, а самый совершенный расчетный алгоритм обеспечивает адекватный результат только в определенной области и с определенной погрешностью получаемых результатов расчетов. Именно поэтому разработчики программ для ЭВМ проводят широкий спектр расчетно-экспериментальных научных исследований, выполняют верификацию и валидацию программ для ЭВМ, которые должны обосновать применимость программ для ЭВМ для моделирования конкретного ОИАЭ.

Очевидно, что обоснованность расчетных моделей, создаваемых с применением программ для ЭВМ в целях обоснования безопасности, должна быть оценена и проверена. В странах с развитой ядерной энергетикой специалисты органа регулирования безопасности или его организаций научно-технической поддержки проводят оценку применимости программ для ЭВМ, которая должна подтвердить, что верификация и валидация проведены в соответствии с установленными требованиями [1].

В Российской Федерации такая оценка применимости программ для ЭВМ с 1991 г. проводится ФБУ «НТЦ ЯРБ» [2]. При этом 23.05.2018 были внесены дополнительные части в статью 26 Федерального закона от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии», которые

по существу закрепили на законодательном уровне многолетнюю практику ФБУ «НТЦ ЯРБ» по проведению экспертизы программ для ЭВМ в качестве обязательной процедуры, предшествующей процессу лицензирования в области использования атомной энергии.

В настоящей статье представлен обзор изменений в нормативных документах, регламентирующих процедуру экспертизы и устанавливающих требования и рекомендации к обоснованию применимости программ для ЭВМ, анализируются результаты значимых экспертиз программ для ЭВМ, выполненных с момента законодательного установления необходимости экспертизы программ для ЭВМ. Поднимаются актуальные вопросы развития методической основы оценки применимости программ для ЭВМ при обосновании безопасности. Кроме того, в статье обсуждаются используемые специалистами ФБУ «НТЦ ЯРБ» подходы к применению результатов независимого расчетного моделирования в рамках научно-технической поддержки Ростехнадзора, а также направления развития расчетного моделирования в целях обеспечения деятельности Ростехнадзора результатами квалифицированных расчетно-аналитических исследований в области ядерной и радиационной безопасности инновационных ОИАЭ.

### О развитии нормативной базы экспертизы программ для электронных вычислительных машин

В целях реализации положений Федерального закона от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» Ростехнадзором были утверждены:

- обновленный Порядок проведения экспертизы программ для ЭВМ [3], приказ об определении ФБУ «НТЦ ЯРБ» в качестве организации научно-технической поддержки Ростехнадзора, осуществляющей экспертизу программ для ЭВМ [4];
- новое Положение об экспертном совете по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре [5].

Данные нормативные правовые акты Ростехнадзора в целом сохранили ранее сформировавшуюся процедуру экспертизы программ для ЭВМ [6], целью которой являлось и остается установление подтвержденной верификацией и валидацией области применения программы для ЭВМ, а также оценка обеспечиваемых программой погрешностей результатов расчетов. Сохранился и принцип открытости, которым руководствуется ФБУ «НТЦ ЯРБ» при проведении экспертизы



программ для ЭВМ, предполагающий взаимодействие в рамках экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре со всеми сторонами, участвующими в разработке, верификации / валидации и использовании программ для ЭВМ, применяемых при обосновании безопасности.

Вместе с тем в целях совершенствования процедуры экспертизы программ для ЭВМ во вновь разработанном Порядке проведения экспертизы [3] и Положении об экспертном совете [5]:

- уточнены цели проведения экспертизы программ для ЭВМ (оценивать обоснование применимости программы для ЭВМ и обеспечиваемых программой погрешностей результатов расчетов стало необходимо в отношении конкретного ОИАЭ, что ранее действовавшей инструкцией [6] в явном виде не требовалось);

- установлены порядок действий, этапы при проведении экспертизы программ для ЭВМ и сроки их выполнения;

- введены требования к проведению тестирования программ для ЭВМ, которое должно с одной стороны продемонстрировать работоспособность программы, с другой – подтвердить, что представленные в обосновывающих материалах результаты расчетов получены с использованием поданной на экспертизу версии программы. В соответствии с действовавшей ранее процедурой достаточно было провести депонирование программы для ЭВМ в отраслевом фонде алгоритмов и программ при НИЦ «Курчатовский институт»;

- обновлены структура и принципы формирования экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ, установлены полномочия рабочих групп экспертов, тематических секций и Президиума экспертного совета;

- введены меры по обеспечению конфиденциальности при экспертизе программ для ЭВМ.

Требования к структуре и содержанию отчета о верификации и валидации программы для ЭВМ установлены в РД-03-34-2000 [7]. В 2021 г. по результатам анализа правоприменительной практики указанного документа разработан проект новой редакции требований.

В новых требованиях терминология, принятая в области верификации / валидации программ для ЭВМ, приведена в соответствие с терминологией, используемой в Федеральном законе от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» и в современных документах МАГАТЭ. Исключен ряд избыточных требований, например, об обязательной оценке степени консерватизма программы для ЭВМ.

Опыт проведения экспертизы программ для ЭВМ показал, что наиболее серьезные недостатки материалов, обосновывающих применимость программ для ЭВМ, являются следствием недостаточно тщательного планирования работ по верификации и валидации. Неотъемлемой частью такого планирования должны являться, во-первых, анализ и идентификация наиболее значимых процессов и явлений, определяющих безопасность объекта при его эксплуатации, во-вторых – критический анализ существующих экспериментальных данных по указанным процессам, на основании которых формируются матрицы верификации / валидации таких программ для ЭВМ, и, при необходимости, планируются дополнительные экспериментальные исследования. Детально это проблема обсуждается, например, в [2]. К сожалению, до сих пор сохраняется практика обоснования применимости программ для ЭВМ не на тех экспериментальных данных, которые бы полностью позволили обосновать применимость программы в предполагаемой области использования, а на тех данных, которые доступны разработчику программы для ЭВМ. Это приводит к тому, что необходимая с точки зрения проектирования и обоснования безопасности область применения программы для ЭВМ остается неподтвержденной, а погрешность получаемых результатов расчетов – не оцененной, что не соответствует требованиям федеральных норм и правил в области использования атомной энергии (ФНП), предъявляемым к расчетным обоснованиям безопасности ОИАЭ.

В целях содействия решению этой проблемы введено новое требование о необходимости обоснования матрицы верификации и валидации программы для ЭВМ. Для ОИАЭ, в отношении которых предполагается использование программы для ЭВМ, включение в матрицу верификации и валидации аналитических задач, экспериментальных данных и результатов кросс-верификационных расчетов по аналогичным программам для ЭВМ должно обосновываться путем анализа их соответствия ключевым процессам и явлениям, влияющим на безопасность указанных ОИАЭ в тех эксплуатационных или аварийных режимах, в отношении которых программа предполагается к применению.

Требование об описании методики оценки значений погрешностей расчетных результатов с использованием программы для ЭВМ дополнено необходимостью анализа неопределенностей, обуславливающих погрешность результатов расчетов, с обязательным указанием всех компонент

погрешности. Применение такой методики в отношении расчетов, выполняемых при обосновании безопасности ОИАЭ, должно быть продемонстрировано в отчете о верификации / валидации программы для ЭВМ. То есть подготовленные в соответствии с новыми требованиями отчеты о верификации и валидации программ для ЭВМ должны содержать не только статистическую оценку результатов верификации / валидации (например, в виде расхода расчетов и измерений в экспериментах, проведенных на исследовательских установках, отличающихся от ОИАЭ), но и описание методики по использованию этих результатов верификации / валидации при оценке погрешностей расчетов ОИАЭ, представляемых в документах, обосновывающих безопасность.

Добавлены требования к верификации / валидации некоторых классов программ для ЭВМ, учитывающие их специфику. Так, например, особенностью программ для ЭВМ, предназначенных для выполнения вероятностного анализа безопасности и расчетов показателей живучести и надежности ОИАЭ, является отсутствие необходимости в их валидации с использованием экспериментальных данных, что отражено в новых требованиях.

Все большее применение в задачах, важных для безопасности, находят программы для ЭВМ, математическая модель которых основана на применении искусственной нейронной сети (ИНС) [8]. В соответствии с вновь введенными требованиями в верификационных отчетах таких программ для ЭВМ должны быть указаны структура и тип ИНС (количество слоев, количество нейронов на каждом из слоев, функции активации), а также должны быть представлены результаты:

- обучения ИНС, в том числе обоснование достаточности базы данных тестов, используемых для обучения ИНС;
- тестирования ИНС с использованием тестов, отличных от тех, с помощью которых проводилось обучение ИНС.

В случае если в программе для ЭВМ реализована модель полномасштабного тренажера (ПМТ) энергоблока атомной станции (АС), в отчете о верификации и валидации должны содержаться:

- описание моделей, реализованных в программе для ЭВМ, включая описание допущений, обеспечивающих специфику моделирования на ПМТ (все системы и элементы энергоблока АС, возможность проведения расчета в режиме реального времени (в ускоренном режиме);

- результаты комплексных испытаний ПМТ, включая результаты кросс-верификации моделей с результатами расчетного обоснования, представленными в отчете по обоснованию безопасности (ООБ) энергоблока АС, и с результатами пусконаладочных испытаний энергоблока АС (при наличии).

Вступление в силу новых требований к верификации и валидации программ для ЭВМ планируется во второй половине 2022 г.

Еще одной важной вехой в развитии нормативной базы, лежащей в основе расчетных обоснований безопасности, стало утверждение в 2020 г. руководства по безопасности при использовании атомной энергии (РБ) «Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций» (РБ-166-20) [9].

Согласно требованиям, установленным в пп. 1.2.9 и 1.2.16 НП-001-15 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» [10], анализы безопасности АС должны сопровождаться оценками погрешностей и неопределенностей полученных результатов. При этом анализы проектных аварий должны выполняться на основе консервативного подхода, а анализы запроектных аварий (ЗПА) – на основе реалистичного (неконсервативного) подхода.

В целях содействия выполнению указанных требований в ФБУ «НТЦ ЯРБ» были разработаны следующие рекомендации, которые были включены в РБ-166-20 [9]:

- по выполнению оценки погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности АС для режимов нормальной эксплуатации, режимов с нарушением нормальной эксплуатации, включая аварии, в части нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов;
- по учету результатов валидации программы для ЭВМ при проведении расчетных анализов безопасности АС, выполняемых с их использованием.

Оценивать неопределенность результатов анализа проектных аварий рекомендуется в целях подтверждения консервативности подхода, принятого при их анализе [10]. В РБ-166-20 [9] приведено описание метода оценки неопределенностей, основанного на использовании соотношения Уилкса, и представлены примеры применения указанного метода к результатам расчетов проектных аварий АС с реакторной установкой (РУ) ВВЭР-1000.

Анализ ЗПА рекомендуется выполнять для окончательного перечня ЗПА, разработанного в соот-

ветствии с требованиями п. 1.2.16 НП-001-15 [10] с учетом результатов вероятностного анализа безопасности. При этом:

- результаты анализов ЗПА в части составления руководства по управлению ЗПА и планов мероприятий по защите персонала и населения в случае аварий рекомендуется сопровождать оценкой чувствительности, в том числе с целью выявления пороговых эффектов;
- результаты анализов ЗПА в части подтверждения выполнения требований ФНП к системам АС рекомендуется сопровождать как оценкой чувствительности, так и оценкой неопределенностей полученных результатов.

В РБ-166-20 [9] приведено описание метода оценки неопределенностей анализов ЗПА, и представлены примеры применения указанного метода к результатам расчетов ЗПА АС с РУ ВВЭР-1000.

### О некоторых результатах экспертизы программ для электронных вычислительных машин

Действующий Порядок проведения экспертизы программ для ЭВМ [3] вступил в силу 12.11.2018 после регистрации приказа Ростехнадзора от 30.07.2018 № 325 Министерством юстиции Российской Федерации. За три года действия нового Порядка экспертизы [3] разработаны и оформлены

аттестационные паспорта для 96 программ для ЭВМ, что составляет 17 % от общего числа прошедших за 30 лет экспертизу программ для ЭВМ, равного 552 [11]. Кроме того, за указанный период четыре экспертизы программ для ЭВМ завершены без оформления аттестационных паспортов. Востребованность в проведении экспертизы программ для ЭВМ со стороны предприятий атомной отрасли за последние годы значительно выросла.

Увеличение количества направляемых на экспертизу программ для ЭВМ связано, с одной стороны, с внедрением новых проектных и конструкторских решений, внедрением новых материалов и технологий на эксплуатируемых ОИАЭ. Например, внедрение толерантного топлива на эксплуатируемых энергоблоках АС с ВВЭР концепции «течь перед разрушением» потребовало проведения экспертизы соответствующих программ для ЭВМ. Кроме того, внедряются новые версии программ для ЭВМ, прошедших ранее экспертизу и обеспечивающих проведение расчетов в расширенной области применения и (или) с меньшей погрешностью получаемых результатов. Значительное количество таких программ для ЭВМ, предназначенных для обоснования безопасности реакторов ВВЭР и РБМК, проходили экспертизу за последние годы (рис. 1).

С другой стороны, создание новых программ для ЭВМ обусловлено реализацией планов развития атомного энергопромышленного комплекса,

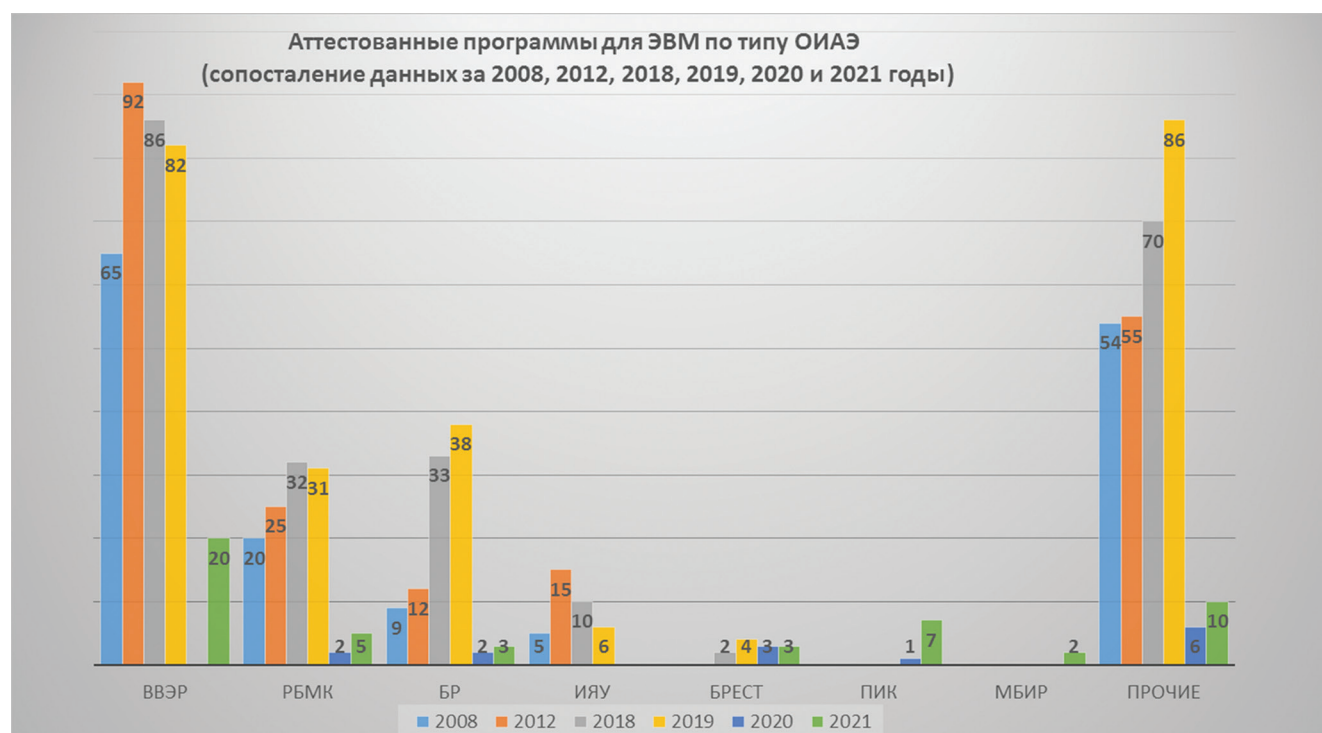


Рис. 1. Статистика экспертизы программ для электронных вычислительных машин [Fig. 1. Statistics of computer code review]

которые включают в себя, в том числе, разработку новых проектов РУ, исследовательских ядерных установок (ИЯУ), пунктов хранения (захоронения) радиоактивных отходов (ПХРО / ПЗРО). Количество программ для ЭВМ, прошедших экспертизу и предназначенных для обоснования безопасности инновационных ядерных установок, ввод в эксплуатацию которых предполагается в ближайшей и среднесрочной перспективе, приведено в табл. № 1.

Необходимо отметить, что общим недостатком обоснования применимости программ для ЭВМ для обоснования безопасности эксплуатации инновационных ядерных установок является отсутствие в их обосновывающих материалах критического анализа экспериментальных данных, на основании которых формируются матрицы верификации / валидации таких программ для ЭВМ. Об этом свидетельствуют многочисленные замечания, отмеченные при проведении экспертизы таких программ для ЭВМ, о недостаточности экспериментальной базы для корректной оценки погрешностей результатов расчетов, получаемых с помощью этих программ. Это приводит к существенным ограничениям области применения программ для ЭВМ.

В частности, по итогам экспертизы программ для ЭВМ, предназначенных для обоснования безопасности АС с РУ, охлаждаемой тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ), отмечались следующие пробелы в экспериментальной базе, необходимой для создания, верификации и валидации теплогидравлических расчетных моделей:

- отсутствие экспериментальных данных, полученных на интегральных стендах с тяжелым ЖМТ, структурно подобных РУ;
- отсутствие экспериментальных данных, необходимых для моделирования естественной конвекции тяжелых ЖМТ в больших объемах;
- недостаток экспериментальных данных по теплоотдаче к тяжелым ЖМТ;

- ограниченность экспериментальных данных, подтверждающих работоспособность систем и элементов РУ с тяжелым ЖМТ.

В отношении инновационной ИЯУ ПИК отмечен недостаток экспериментальных данных, воспроизводящих опускное и противоточное течение теплоносителя, характерные для ИЯУ ПИК. Отмечено также недостаточное количество экспериментальных данных по исследованию кризиса теплообмена в тепловыделяющих сборках с витыми крестообразными твэлами.

Следует также отметить проблемы, выявленные в ходе проведения экспертизы программ для ЭВМ, предназначенных для расчетов эксплуатируемых ядерных установок.

По результатам экспертизы многочисленных «ячейковых» программ для ЭВМ, предназначенных для проведения теплогидравлических расчетов активной зоны ВВЭР, установлено, что обоснование их применимости и погрешностей результатов расчетов запаса до кризиса теплообмена проведено с использованием разных наборов экспериментальных данных. По всей видимости, это обусловлено ограниченным доступом разработчиков программ для ЭВМ к информации об экспериментальных данных, полученных за пределами их организации. В этой связи, с целью унификации матрицы валидации «ячейковых» программ для ЭВМ, представляется целесообразной разработка общедоступного банка экспериментальных данных по кризису теплообмена.

Кроме того, отсутствуют экспериментальные данные, пригодные для валидации программ для ЭВМ, обеспечивающих моделирование процессов в пристанционных бассейнах выдержки, а также экспериментальные данные по влиянию борной кислоты на теплогидравлические процессы в проточной части элементов оборудования АС с ВВЭР.

В настоящее время развиваются методы и средства расчетного моделирования, призванные обеспечить расчет параметров, которые невозможно

Таблица № 1

**Количество аттестованных в 2019–2021 гг. программ для электронных вычислительных машин, предназначенных для обоснования безопасности инновационных ядерных установок**  
**Number of computer codes reviewed during 2019–2021 for safety analysis of innovative nuclear facilities**

Тип ядерной установки	БРЕСТ-ОД-300	БН-1200	ИЯУ ПИК	ИЯУ МБИР
Количество программ для электронных вычислительных машин, прошедших экспертизу	13	14	8	2



было рассчитать с приемлемой точностью с использованием традиционных методов. Например, в последние годы возрастает роль программ для ЭВМ CFD-класса при проведении расчетного анализа безопасности. При этом, если в настоящее время результаты расчетов, выполненных с помощью таких программ, используются в основном в качестве исходных данных при проведении теплогидравлических расчетов активной зоны, то в будущем CFD-коды будут применяться и для решения расчетных задач обоснования безопасности. Сведения о CFD-кодах, прошедших экспертизу, приведены в табл. № 2.

К настоящему моменту аттестационные паспорта оформлены для пяти программ для ЭВМ CFD-класса: в математических моделях четырех из них реализованы модели турбулентности, а в одной – реализовано прямое численное решение уравнений Навье – Стокса для несжимаемой жидкости (DNS-приближение).

Можно констатировать ограниченность экспериментальных данных, пригодных для валидации программ для ЭВМ CFD-класса применительно к свинцовому теплоносителю.

В 2022–2023 гг. предполагается проведение экспертизы программы для ЭВМ “Flowvision” (АО «ОКБМ Африкантов») применительно к моделированию течения теплоносителя в элементах РУ ВТГР, а также программы для ЭВМ “STAR-CCM+” в части моделирования воздействия ветровых нагрузок на работоспособность воздушных теплообменников системы пассивного отвода тепла (СПОТ) РУ ВВЭР (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ») и в части расчета параметров внутри защитной оболочки АС с ВВЭР в рамках обоснования водородной взрывобезопасности (АО «ВНИИАЭС»).

Еще одним примером положительной практики развития методов расчетного моделирования является внедрение в проектирование и обоснование долговременной безопасности ПЗРО современных отечественных программ для ЭВМ, обеспечивающих моделирование значимых процессов, влияющих на безопасность ПЗРО. Такие программы для ЭВМ используются как для расчетов характеристик источников излучений в ПЗРО, в том числе с учетом изменения свойств инженерных барьеров безопасности, препятствующих выходу радионуклидов, так и для расчетов динамики поступления радионукли-

Таблица № 2

**Аттестованные программы для электронных вычислительных машин CFD-класса  
Reviewed CFD computer codes**

Название программы для электронных вычислительных машин (заказчик экспертизы)	Теплоноситель	Модель турбулентности	Назначение программы для электронных вычислительных машин
“STAR-CCM+” (АО «ВНИИАЭС»)	Вода	$k - \epsilon, k-W-SST, RST$	Моделирование течений теплоносителя в элементах конструкций реакторных установок
“CONV-3D/V2.0” (ИБРАЭ РАН)	Натрий, свинец-висмут	Не используется, реализовано DNS-приближение	Моделирование течений теплоносителя в элементах конструкций реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем
“Flow Vision” (АО «ОКБМ Африкантов»)	Натрий	$k - \epsilon$ совместно с моделью турбулентного теплопереноса <i>LMS</i>	Моделирование течений теплоносителя в элементах реакторных установок на быстрых нейтронах
“STAR-CCM+” (ИБРАЭ РАН, АО «НИКИЭТ»)	Натрий-калий, свинец-висмут, свинец	Realizable $k - \epsilon$	Моделирование течений теплоносителя в элементах реакторных установок, процесса роста и эрозии оксидной пленки на поверхностях элементов конструкции реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем
“STAR-CCM+” (АО «НИКИЭТ»)	Вода	Realizable $k - \epsilon$	Расчет поля температуры в твэлах



дов за пределы инженерных барьеров безопасности и их миграции в геологической среде (с учетом физических, химических, термических процессов). Кроме того, программы для ЭВМ используются и для оценки радиационного воздействия ПЗРО на население и окружающую среду.

Для расчета задач геофильтрации и геомиграции в рамках учета природных и техногенных факторов воздействия источников загрязнения на геологическую среду и обоснования безопасности захоронений радиоактивных отходов (РАО) в настоящее время активно развиваются две российские программы для ЭВМ: «GeRa» (ИБРАЭ РАН) и «НИМФА» (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ» и ФГБУ «Гидроспецгеология»).

Прошли экспертизу две версии программы для ЭВМ «GeRa». Первая – обеспечивает расчет фильтрации в напорных, безнапорных и насыщенно-ненасыщенных условиях, перенос радионуклидов в подземных водах, динамики ореолов радиоактивного и химического загрязнения в подземных водах. Во вторую версию программы «GeRa» добавлены дополнительные возможности расчетов задач геомиграции радионуклидов и химических веществ в средах с двойной пористостью, задач теплопереноса и тепловой конвекции в пористых средах, задач двухфазной фильтрации, а также сопряженных задач фильтрации и поверхностного стока. Также прошли экспертизу две версии программы «НИМФА».

Верификация / валидация упомянутых программ для ЭВМ проводилась как с использованием аналитических тестов, так и с использованием экспериментальных данных, предназначенных для оценки корректности реализации в программах для ЭВМ расчетных моделей. Вместе с тем погрешность расчетов и консерватизм расчетных моделей для конкретных ПЗРО определяются отдельно для каждой такой модели с учетом условий размещения ПЗРО, а также данных мониторинга системы захоронения РАО, включая гидрогеологический, гидрологический и гидрогеохимический мониторинг.

Другой особенностью верификации / валидации программ для ЭВМ, характерной для моделирования геофильтрационных и геомиграционных процессов в системах захоронения РАО, является длительный период времени моделируемых процессов – от нескольких десятков тысяч до миллионов лет [12]. В этой связи, с точки зрения обоснования применимости программ для ЭВМ, предназначенных для оценки долговременной безопасности ПЗРО, возрастает роль, с одной стороны, снижения неопределенностей входных данных для моделирования

(за счет мониторинга состояния ПЗРО с момента сооружения до закрытия, а также системного анализа особенностей, событий и процессов, определяющих состояние РАО, инженерных барьеров безопасности ПЗРО и геологической среды [13]), с другой – методов статистического анализа неопределенностей получаемых результатов расчетов [14].

Программы для ЭВМ, предназначенные для решения задач геофильтрации и геомиграции, успешно использованы в ФБУ «НТЦ ЯРБ» при прогнозировании процессов, происходящих в пунктах глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (ПГЗ ЖРО) после закрытия, в рамках работы «Выполнение комплексов расчетно-экспериментальных исследований в целях реализации рекомендаций миссии МАГАТЭ по совершенствованию обоснования безопасности эксплуатации и закрытия пунктов глубинного захоронения ЖРО» в обеспечение мероприятия «Создание и развитие технологий переработки и кондиционирования радиоактивных отходов» [15].

Таким образом, опыт проведения экспертизы программ для ЭВМ показывает, что актуальным остается проведение новых экспериментальных исследований в обоснование безопасности как инновационных технологий, реализация которых предусмотрена документами стратегического планирования развития атомной отрасли, так и технического перевооружения, модернизации, эксплуатации в период дополнительного срока и вывода из эксплуатации энергоблоков российских АС. В этой связи недостатки, отмечаемые при экспертизе безопасности в части экспериментальных данных, используются предприятиями атомной отрасли при планировании соответствующих экспериментальных исследовательских работ в поддержку обоснования безопасности инновационных проектных решений.

#### **Актуальные направления развития экспертизы программ для электронных вычислительных машин**

Актуальные направления дальнейшего развития системы экспертизы программ для ЭВМ, используемых при обосновании безопасности ОИАЭ, вытекают из представленных выше результатов анализа нормативной базы и проведенных экспертиз программ для ЭВМ.

Наиболее острыми вопросами, возникающими как при оценке программ для ЭВМ (в рамках их экспертизы), так и в рамках экспертизы обоснования безопасности, являются две взаимосвязанные

проблемы. Первая – это недостаточная полнота экспериментальной базы, лежащей в основе валидации программ для ЭВМ, вторая – недостаточная методическая проработка оценки погрешностей расчетов, представляемых в обосновывающих безопасность документах.

Представленная актуализация порядка проведения экспертизы и требований к верификации и валидации программ для ЭВМ была направлена, в том числе, и на решение обозначенных проблем. Дальнейшее совершенствование документов по экспертизе будет касаться актуализации РБ-061-11 [16], РБ-074-12 [17], РБ-040-09 [18], РБ-075-12 [19] и разработки новых РБ, содержащих рекомендации по верификации / валидации различных проблемно ориентированных программ для ЭВМ, например, программ для ЭВМ, используемых для обоснования долговременной безопасности ПЗРО.

Так, например, рекомендации по верификации / валидации и оценке погрешностей нейтронно-физических программ для ЭВМ, содержащиеся в РБ-061-11 [16], предполагается дополнить рекомендациями по учету отличия эксперимента от проекта РУ при оценке погрешностей расчетов, описанием методик учета корреляций экспериментальных данных, методик по обоснованию необходимости новых макроэкспериментов, рекомендациями по оценке константной и технологической составляющих погрешностей расчетов.

Не теряет свою актуальность проблема создания отраслевой базы экспериментальных данных [20].

На рис. 2 приведен анализ экспериментальных данных, использованных для четырех программ для ЭВМ, предназначенных для расчета аварийных режимов ВВЭР. Валидация указанных программ для ЭВМ со схожей областью применения проводилась с использованием, во-первых, различного набора экспериментов (каждый разработчик использовал доступные ему экспериментальные данные, а не все данные, накопленные в отрасли), во-вторых, часть экспериментальных данных не отвечает современным требованиям (отсутствуют данные по неопределенности измерений, детальное описание хода проведения эксперимента и др.).

Способствовать решению проблемы систематизации использования экспериментальных данных в отрасли могла бы разработка РБ с типовыми матрицами верификации / валидации программ для ЭВМ с одинаковой областью применения. Таким образом, можно было бы сформировать типовой набор экспериментальных данных и тестовых задач, рекомендованных к включению в отчеты, обосновывающие применение программ для ЭВМ. Вместе с тем это не решит проблему обмена такими данными с точки зрения их передачи от правообладателя к потребителю. Этот вопрос по-видимому возможно решить только путем создания отраслевой базы данных экспериментов с единым регламентом доступа к такой базе данных для всех заинтересованных предприятий атомной отрасли.

Необходимо отметить, что первая попытка формирования типового набора задач уже сделана.

Наименование	Организация-разработчик	Аттестационный паспорт
КОРСАР/ГП	НИТИ	№ 263 23.09.2009
ТРАП-КС	ОКБ ГП НИТИ	№ 369 18.03.2015
ТИГР-1.1	ОКБМ НИЦ КИ	№ 441 17.04.2018
ATHLET/ VIPR-VVER	НИЦ КИ	№ 455 24.10.2018

- ❑ Неоцененные экспериментальные данные – 60 %
- ❑ Отсутствие подробной информации о методиках измерений – 45 %
- ❑ Доля экспериментов советского периода – 65 %

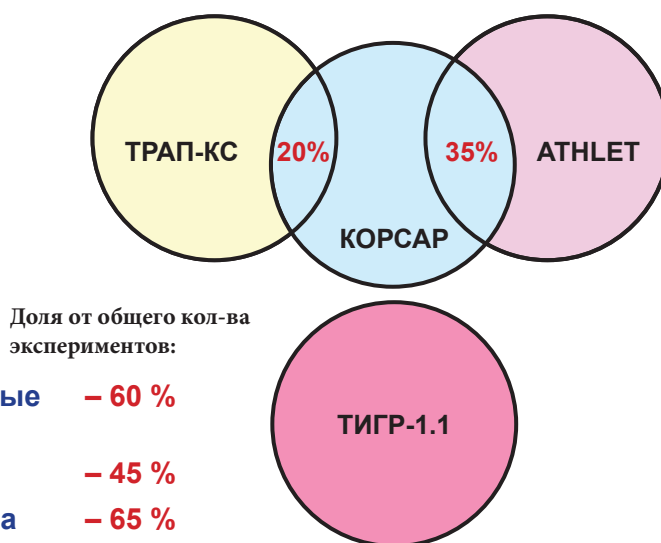


Рис. 2. Анализ экспериментальных данных, использовавшихся для валидации программ для ЭВМ «ТРАП-КС», «КОРСАР-ГП», «ТИГР-1.1» и «ATHLET»  
 [Fig. 2. Analysis of experimental data used for validation of “TRAP-KS”, “KORSAR-GP”, “TIGR-1.1” and “ATHLET” computer codes]

В 2021 г. в ФБУ «НТЦ ЯРБ» разработан проект РБ «Рекомендуемые тестовые задачи для верификации программ для электронных вычислительных машин, используемых при проведении вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии», в котором содержатся как рекомендации по верификации программ для ЭВМ, предназначенных для вероятностного анализа безопасности, включая типовую матрицу верификации, так и описание тестовых задач, рекомендованных для верификации таких программ. Тестовые задачи разделены на две группы:

- группа 1 – «Аналитические задачи», содержащая базовые задачи, позволяющие проверить качество реализации в программе для ЭВМ базовых моделей теории вероятности и теории надежности;
- группа 2 – «Задачи большой размерности», содержащая задачи, решение которых выполняется с использованием сложных моделей (рис. 3).

Аналогичные РБ с рекомендуемыми тестовыми задачами и типовыми матрицами верификации предполагается разработать и для программ для ЭВМ, обеспечивающих проведение расчетов прочности, ресурса элементов, оборудования и систем ОИАЭ, а также расчетов надежности зданий и сооружений ОИАЭ.

Не менее актуальной представляется разработка рекомендаций по выполнению обоснований безопасности ОИАЭ, в том числе в части применения полученных с использованием программ для ЭВМ результатов расчетов. Необходимо отметить, что

в российской системе РБ отсутствует руководство с рекомендациями по проведению детерминистического анализа безопасности АС, хотя такие рекомендации разработаны как международными организациями, например, МАГАТЭ [21], так и органами регулирования безопасности при использовании атомной энергии или их организациями научно-технической поддержки, например, STUK, Финляндия [22], НАЕА, Венгрия [23], NRC, США [24], CNSC, Канада [25] и др.

Отсутствие таких рекомендаций в российской системе РБ приводит к тому, что для анализа режимов одной категории различными организациями используются различные подходы к выполнению анализа и к интерпретации его результатов.

В этой связи представляется целесообразным разработать РБ по проведению детерминистического анализа безопасности АС, который должен содержать рекомендации по:

- выбору исходных данных для анализа безопасности различных режимов эксплуатации АС;
- описанию и категоризации режимов, принимаемых для анализов безопасности в ООБ;
- выбору и обоснованию критериев приемки для анализа различных режимов в рамках обоснования безопасности (с учетом специфики различных типов режимов);
- выполнению расчетов и представлению в ООБ их результатов, включая рекомендации по выбору размерности и характеру дискретизации моделей, описывающих поведение различного

PDS1	Паровой взрыв	Рекомбинаторы	Спринклерная система восстановлена < 24 ч	Взрыв водорода	Спринклерная система восстановлена > 72 ч	Переопрессовка ГО	No.	Freq.	Conseq.	Code
СПИР1	STEAM	RECOMB	SS-EARLY	H2-DEFL/DET	SS-LATE	CONTFAIL				
				1		2	1	1,99E-02	RC2	
				2		2	2	2,79E-06	RC3	CONTFAIL
				3		2	3	2,00E-05	RC2	H2-DEFL/DET
				4		2	4	2,80E-09	RC3	H2-DEFL/DET-CONTFAIL
				5		1	5	2,14E-01	RC2	SS-EARLY
				6		1	6	7,08E-03	RC3	SS-EARLY-CONTFAIL
				7			7	8,26E-03	RC3	SS-EARLY-SS-LATE
				8		1	8	2,14E-04	RC2	SS-EARLY-H2-DEFL/DET
				9		1	9	7,08E-06	RC3	SS-EARLY-H2-DEFL/DET-CONTFAIL
				10			10	8,27E-06	RC3	SS-EARLY-H2-DEFL/DET-SS-LATE
				11		2	11	1,12E-05	RC2	RECOMB
				12		2	12	1,57E-09	RC3	RECOMB-CONTFAIL
				13			13	1,12E-05	RC1	RECOMB-H2-DEFL/DET
				14		1	14	2,16E-04	RC2	RECOMB-SS-EARLY
				15		1	15	7,15E-06	RC3	RECOMB-SS-EARLY-CONTFAIL
				16			16	8,34E-06	RC3	RECOMB-SS-EARLY-SS-LATE
				17			17	2,57E-05	RC1	RECOMB-SS-EARLY-H2-DEFL/DET
				18			18	1,25E-04	RC1	STEAM

Рис. 3. Пример дерева событий для тестовой задачи по расчету вероятностей категорий выбросов при выполнении вероятностного анализа безопасности уровня 2  
 [Fig. 3. Example of event tree for test to calculate emission category probabilities when performing a probabilistic safety analysis of Level 2]



оборудования АС, включая активную зону, реактор, контуры циркуляции и т. д.;

- выполнению анализов безопасности на основе консервативного и реалистического подходов, включая рекомендации по использованию граничных условий (моделированию работы систем нормальной эксплуатации и систем безопасности), параметров исходного состояния реактора и энергоблока, моделирования элементов оборудования, параметры которого используются для проверки выполнения приемочных критериев, и т. д.

Кроме того, представляется целесообразным сформулировать рекомендации по снижению негативного влияния так называемого «эффекта пользователя» программ для ЭВМ. Пользователи могут обладать недостаточной квалификацией для проведения расчетов, не понимать ограничений, которые имеет программа для ЭВМ, неадекватно оценивать полученные результаты расчетов. Такие рекомендации могут быть разработаны с учетом отчетов Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР) [26] и включать, например, независимую проверку файлов исходных данных, используемых для построения расчетных моделей, с участием экспертов ФБУ «НТЦ ЯРБ».

#### **Использование расчетного моделирования в целях научно-технической поддержки регулирования безопасности при использовании атомной энергии**

Программы для ЭВМ, предназначенные для расчетных анализов безопасности ОИАЭ и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии, широко применяются в рамках деятельности Ростехнадзора. Расчетные анализы проводятся при экспертизе безопасности ОИАЭ и экспертизе программ для ЭВМ, при разработке проектов нормативных документов, в поддержку нормирования выбросов и сбросов радиоактивных веществ, аварийного планирования и готовности, а также при расследовании нарушений в работе ОИАЭ.

Результаты, полученные с использованием расчетных моделей, позволяют оценить принимаемые эксплуатирующими организациями технические решения и организационные мероприятия по обеспечению безопасности ОИАЭ, а также их соответствие требованиям ФНП. Кроме того, создание независимых расчетных моделей позволяет развивать технические компетенции экспертов, участвующих в анализах и оценках безопасности ОИАЭ.

В соответствии с п. 3.193 руководства МАГАТЭ GSG-13 “Functions and Processes of the Regulatory Body for Safety” [27] специалисты регулирующего органа или его организаций научно-технической поддержки (ОНТП) могут принять решение о выполнении контрольных (проверочных) расчетов, чтобы убедиться в:

- наличии консерватизма в обосновании безопасности;
- отсутствии недостатков в обосновании безопасности;
- корректности выбора исходных данных для анализа.

При этом такие проверочные расчеты, как правило, выполняются с применением программ для ЭВМ, альтернативных тем, которые использовались эксплуатирующими организациями.

В странах с развитой атомной энергетикой органы регулирования безопасности или их ОНТП, обычно, имеют в своем распоряжении программы для ЭВМ, позволяющие выполнять альтернативные расчеты в следующих областях [28–30]:

- расчетный анализ нормальной эксплуатации, переходных процессов, проектных и запроектных аварий (нейтронно-физические, теплогидравлические, термомеханические расчеты);
- моделирование переноса ионизирующего излучения, распространения радиоактивных веществ, оценка доз облучения;
- оценка прочности оборудования и трубопроводов, надежности строительных конструкций;
- вероятностные анализы риска;
- моделирование пожаров;
- расчеты в обоснование физической защиты.

Имеющиеся в распоряжении ФБУ «НТЦ ЯРБ» программы для ЭВМ (рис. 4) в целом закрывают наиболее значимые тематические области расчетов для эксплуатируемых ОИАЭ.

Проведение альтернативных расчетов требует заблаговременного создания расчетных моделей, описывающих поведение ОИАЭ, его системы или элемента в процессе эксплуатации или в условиях развития аварии. Создание расчетных моделей – ресурсозатратный процесс, так как требует не только задания параметров моделируемого объекта (нодализацияная схема, свойства веществ и материалов, сценарий моделируемого процесса), но и проведения верификации / валидации созданной модели, а также – высокой квалификации пользователя программы. В этой связи создание расчетных моделей (и своевременная их актуализация) осуществляется заблаговременно,

	Физика ядерных реакторов и систем с ядерными материалами, ядерная безопасность	Теплогидродинамика и моделирование мультифизических процессов, анализ переходных процессов и аварий	Перенос ионизирующего излучения, радиационная защита, распространение (миграция) радиоактивных веществ	Прочность и ресурс элементов, оборудования, систем, поведение топлива	Прочность и надежность строительных конструкций зданий и сооружений	Вероятностный анализ безопасности и надежности систем и объектов	Физическая химия, геохимия и гидрогеология
Наименование программы для ЭВМ	DRAGON/DONJON	AC <sup>2</sup> (Athlet, Athlet-CD, Cocosys, Atlas)	COG11.1	Зенит-95 РФ	SCAD РФ	Risk Spectrum	COMSOL
	DYN3D		CAP-88	Ansys		SAPHIRE	GeRa РФ
	Eranos 2.3	APROS	DOORS	Mechanical			GMS
	Quabox/Cubbox-	AZTEC v.2.1	FASTGRASS	Win leak 5.0			MODFLOW
	RBMK	CMS	FLUKA	ISAAC			Ecolego
	SCALE	COBRA-SFS	MicroShield	Casket			ADaExp РФ
	Serpent	RAINBOW-TPP	MicroSkyshine				Fork 4.4 РФ
	WIMSD-5B.12	Thermal power plant	PEPIN				TDPro РФ
	NJOY	САПР MBTY-4	PC CAREM				
	САФИР_95.1	СОКРАТ-БН	Касандра	РФ			
	MCNP		Нострадамус	РФ			
	TDMCC						
TRAMO							

■ – аттестованные программы  
РФ – Российские программы для ЭВМ  
 – программы для ЭВМ, полученные из банка данных АЯЭ ОЭСР

Рис. 4. Программы для электронных вычислительных машин, применяемые в ФБУ «НТЦ ЯРБ»  
 [Fig. 4. Computer codes used in SEC NRS]

в том числе в рамках исполнения государственного задания и федеральных целевых программ. Так, в ФБУ «НТЦ ЯРБ» были разработаны следующие расчетные модели:

- расчетные модели РУ с ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 для моделирования нормальной эксплуатации и аварий, в том числе тяжелых аварий;
- расчетные модели для теплогидравлических процессов в бассейне выдержки, для оценки флюенса быстрых нейтронов на корпус, внутрикорпусные устройства и опорные конструкции;
- расчетные модели РБМК для нейтронно-физического расчета активной зоны и моделирования переходных процессов, в том числе с учетом мероприятий по восстановлению ресурсных характеристик графитовой кладки;
- расчетные модели РУ с БН-600 и БН-800 для нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов;
- расчетные модели, предназначенные для анализа безопасности всей цепочки обращения с ядерным топливом (начиная с систем хранения свежего ядерного топлива на АС и заканчивая централизованным хранилищем отработавшего ядерного топлива (ОЯТ));
- расчетные модели для анализа ядерной и радиационной безопасности и температурных режимов транспортирования ОЯТ (для всех транспортных упаковочных комплектов, используемых для транспортирования ОЯТ энергетических реакторов);

- расчетные модели для оценки радиационного воздействия выбросов и сбросов радиоактивных веществ и характеризующие процессы переноса радионуклидов в атмосфере;
- расчетная модель для оценки прочности трубопроводов с учетом наличия дефектов в сварных соединениях;
- расчетные модели для оценки долговременной безопасности обращения с РАО для различных ПЗРО и ПХРО;
- расчетные модели для оценки пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств;
- расчетные модели для информационно-аналитического центра Ростехнадзора, включая модели для оценки и прогнозирования радиационных последствий при авариях.

В качестве хорошей практики стоит выделить деятельность по разработке и поддержке собственных проблемно ориентированных программ для ЭВМ [31].

Для целей развития расчетного моделирования и обеспечения готовности Ростехнадзора к будущим вызовам, связанным с оценкой безопасности инновационных ядерных технологий, новых проектов РУ, передовых материалов, в ФБУ «НТЦ ЯРБ» решаются следующие задачи:

- всесторонняя верификация / валидация и апробация создаваемых расчетных моделей;
- своевременное приобретение прав на новые программы для ЭВМ, необходимые для выполнения

задач научно-технической поддержки Ростехнадзора, а также разработка собственных проблемно ориентированных программ для ЭВМ;

- обеспечение квалифицированными кадрами с навыками расчетного моделирования, необходимыми для решения поставленных задач;
- обеспечение наличия достаточного количества вычислительных мощностей с характеристиками, соответствующими сложности расчетных моделей;
- реализация эффективного информационно-технического и правового обеспечения расчетного моделирования.

Формирование перспективных направлений расчетного моделирования проводится с учетом актуальных документов стратегического планирования развития российской атомной отрасли [32–36].

### Заключение

Планы развития атомного энергопромышленного комплекса (разработка инновационных проектов РУ, исследовательских реакторов, развитие водородной энергетики, сооружение ПХРО / ПЗРО, внедрение новых материалов и технологий, а также новых проектных и конструкторских решений на эксплуатируемых ОИАЭ) будут сопровождаться разработкой новых программ для ЭВМ. В этой связи ФБУ «НТЦ ЯРБ» проводит и будет развивать целенаправленную деятельность по всесторонней экспертизе вновь создаваемых программ для ЭВМ с целью оценки их применимости для построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность использования инновационных ядерных технологий.

При этом обеспечение ядерной и радиационной безопасности при использовании инновационных ядерных технологий требует решения наиболее значимой в отношении расчетных анализов безопасности проблемы, связанной с потребностью в экспериментальных данных, получаемых с применением современных средств измерений и обработки их результатов и необходимых для построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность применения инновационных ядерных технологий.

В качестве первоочередных выделяются следующие задачи развития системы экспертизы программ для ЭВМ, выполнение которых будет способствовать повышению эффективности применения результатов расчетного моделирования как при обосновании безопасности, так и в рамках научно-технической поддержки регулирования безопасности:

- разработка рекомендаций по выполнению детерминистического анализа безопасности;
- формирование перечней рекомендуемых тестовых задач и типовых матриц верификации / валидации для использования при обосновании применимости программ для ЭВМ по различным тематическим расчетам;
- дальнейшая актуализация РБ и методических документов, сопровождающих экспертизу программ для ЭВМ.

Кроме того, ФБУ «НТЦ ЯРБ» продолжит эффективное использование и непрерывное совершенствование современных методов и средств расчетного моделирования, применяемых при осуществлении научно-технической поддержки государственного регулирования безопасности.

### Литература

1. Богдан С. Н., Шевченко С. А. О подходах регулирующих органов стран с развитой ядерной энергетикой к верификации и признанию обоснованности применения программных средств при обосновании безопасности ОИАЭ // Ядерная и радиационная безопасность. 2013. № 4 (70). С. 3–9.
2. Совет по аттестации программных средств при Ростехнадзоре. 25 лет на службе безопасности: сборник публикаций / Труды НТЦ ЯРБ. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. – 115 с.
3. Порядок проведения экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии: утв. приказом Ростехнадзора от 30.07.2018 № 325 (зарегистрирован в Минюсте России 12.11.2018 № 52650).
4. Об определении организации научно-технической поддержки Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, осуществляющей проведение экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых для построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии: приказ Ростехнадзора от 20.09.2018 № 450.



5. Об организации деятельности экспертного совета по аттестации программ для электронных вычислительных машин при Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору: приказ Ростехнадзора от 27.12.2018 № 655.
6. Инструкция об организации проведения экспертизы программных средств, применяемых при обосновании и (или) обеспечении безопасности объектов использования атомной энергии. РД-03-33-2008: утв. приказом Ростехнадзора от 19.08.2008 № 634.
7. Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. РД-03-34-2000: утв. приказом Госатомнадзора РФ от 28.12.2000 № 122.
8. Забиров А. Р., Смирнова А. А., Феофилактова Ю. М., Шевченко Р. А., Шевченко С. А., Яшников Д. А., Соловьев С. Л. Использование нейронных сетей в теплофизических задачах атомной энергетики // Теплоэнергетика. 2020. № 8. С. 5–19.
9. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций. РБ-166-20: утв. приказом Ростехнадзора от 30.07.2020 № 288.
10. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Комментарии к федеральным нормам и правилам «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15). РБ-152-18: утв. приказом Ростехнадзора от 03.10.2018 № 486.
11. Перечень действующих аттестационных паспортов программ для ЭВМ. URL: <https://www.secnr.ru/expertise/software-review/> (дата обращения: 20.04.2022).
12. Абалкина И. Л., Большов Л. А., Капырин И. В., Линге И. И., Савельева Е. А., Свительман В. С., Уткин С. С. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние. Препринт ИБРАЭ № 2019-03. – М: ИБРАЭ РАН, 2019. – 40 с.
13. Шарафутдинов Р. Б., Понизов А. В., Мурлис Д. В., Савельева Е. А., Свительман В. С. Методические аспекты учета особенностей, событий и процессов природного и техногенного происхождения при обосновании долговременной безопасности системы захоронения РАО // Ядерная и радиационная безопасность. 2018. № 4 (90). С. 20–33.
14. Богдан С. Н., Ковалевич О. М., Козлова Н. А., Шевченко С. А., Яшников Д. А. Об оценке погрешностей расчетов, выполняемых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 2 (84). С. 38–53.
15. Дорофеев А. Н., Савельева Е. А., Уткин С. С., Понизов А. В. и др. Эволюция обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 54–63.
16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Положение о проведении верификации и экспертизы программных средств по направлению «Нейтронно-физические расчеты». РБ-061-11: утв. приказом Ростехнадзора от 06.05.2011 № 228.
17. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Положение о рекомендациях по сопоставлению рассчитанной и измеренной реактивности при обосновании ядерной безопасности реакторных установок с ВВЭР. РБ-074-12: утв. приказом Ростехнадзора от 24.04.2012 № 264.
18. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования водоохлаждаемых ядерных энергетических установок. РБ-040-09: утв. приказом Ростехнадзора от 20.07.2009 № 641.
19. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования ядерных энергетических установок с жидкометаллическим теплоносителем. РБ-075-12: утв. приказом Ростехнадзора от 31.08.2012 № 484.
20. Zabirov A. R., Smirnova A. A., Feofilaktova Yu. M., Shevchenko S. A., Yashnikov D. A. Russian experimental database for validation of computer codes used for safety analysis of nuclear facilities. Progress in Nuclear Energy, volume 118, January 2020, 103061.
21. SSG-2 (rev. 1). Deterministic safety analysis for nuclear power plants: safety guide, IAEA, 2019.
22. YVL B.3. Deterministic safety analyses for a nuclear power plant, STUK, 2019.
23. N3a.32. Deterministic safety assessment for new NPPs, HAEA, 2015.

24. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition, US NRC, 2021.
25. GD-310. Guidance on Safety Analysis for Nuclear Power Plants, CNSC, 2012.
26. Good Practices for User Effect Reduction. – Status report NEA/CSNI/R (1998) 22. – Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations. – Paris. – 1998.
27. GSG-13. Functions and Processes of the Regulatory Body for Safety, IAEA, 2018.
28. Scientific Codes Developed and Used at GRS. Volume 1. Reactor Safety. GRS, 2011.
29. Scientific Computer Codes Used at the IRSN. Report IRSN/DSDRE/ № 2010.150, 2010.
30. U. S. Nuclear Regulatory Commission, “NRC Non-Light Water Reactor (Non-LWR). Vision and Strategy, Volume 1 – Computer Code Suite for Non-LWR Plant Systems. Analysis”. Revision 1, January 31, 2020, ADAMS Accession No. ML20030A176.
31. Курындин А. В., Киркин А. М., Ляшко И. А. О необходимости развития проблемно-ориентированных программных средств для поддержки принятия регулирующих решений в области использования атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2022. № 1 (103). С. 19–31. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.103.1.002.
32. Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации: утв. указом Президента РФ от 16.04.2020 № 270.
33. Государственная программа Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса»: утв. постановлением Правительства РФ от 02.06.2014 № 506-12 (ред. от 29.09.2021).
34. План мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года»: утв. распоряжением Правительства РФ от 12.10.2020 № 2634-р.
35. Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы: утв. постановлением Правительства РФ от 16.03.2020 № 287.
36. Единый план по достижению национальных целей развития Российской Федерации на период до 2024 года и на плановый период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 01.10.2021 № 2765-р (с изм. от 24.12.2021).

## References

1. Bogdan S. N., Shevchenko S. A. O podkhodakh reguliruyushchikh organov stran s razvitoi yadernoi ehnergetikoi k verifikatsii i priznaniyu obosnovannosti primeneniya programmnykh sredstv pri obosnovanii bezopasnosti OIAEH [Approaches of regulatory authorities of countries with developed nuclear power for review and acceptance of verification and validation of software used for safety analysis of nuclear facilities]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety, 2013, no. 4 (70), pp. 3–9 [in Russian].
2. (2016). Sovet po attestatsii programmnykh sredstv pri Rostekhnadzore. 25 let na sluzhbe bezopasnosti: sbornik publikatsii [Expert council on software certification under Rostekhnadzor. 25 years in the security service: collection of publications]. Trudy NTTs YARB – Proceedings of SEC NRS. Moscow: SEC NRS [in Russian].
3. Poryadok provedeniya ehkspertizy programm dlya ehlektronnykh vychislitel'nykh mashin, ispol'zuemykh v tselyakh postroeniya raschetnykh modelei protsessov, vliyayushchikh na bezopasnost' ob"ektov ispol'zovaniya atomnoi ehnergii i (ili) vidov deyatel'nosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii [On approval of the procedure for computer code review used for building computational models of processes affecting the safety of nuclear facilities and (or) types of activities in the field of the use of atomic energy]. 2018.
4. Ob opredelenii organizatsii nauchno-tekhnicheskoi podderzhki Federal'noi sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru, osushchestvlyayushchei provedenie ehkspertizy programm dlya ehlektronnykh vychislitel'nykh mashin, ispol'zuemykh dlya postroeniya raschetnykh modelei protsessov, vliyayushchikh na bezopasnost' ob"ektov ispol'zovaniya atomnoi ehnergii i (ili) vidov deyatel'nosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii [On determining of the technical support organization of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service that conducts computer code review used to build calculation models of processes affecting the safety of nuclear facilities and (or) activities in the field of atomic energy use]. 2018.
5. Ob organizatsii deyatel'nosti ehkspertnogo soveta po attestatsii programm dlya ehlektronnykh vychislitel'nykh mashin pri Federal'noi sluzhbe po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru

[About organization of activities of the Expert Council for computer code certification under the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision]. 2018.

6. Instruktsiya ob organizatsii provedeniya ehkspertizy programmnykh sredstv, primenyaemykh pri obosnovanii i (ili) obespechenii bezopasnosti ob"ektov ispol'zovaniya atomnoi ehnergii. RD-03-33-2008 [Instruction on the organization of the computer code review used to analyze and (or) ensure the safety of nuclear facilities. RD-03-33-2008]. 2008.

7. Trebovaniya k sostavu i soderzhaniyu otcheta o verifikatsii i obosnovanii programmnykh sredstv, primenyaemykh dlya obosnovaniya bezopasnosti ob"ektov ispol'zovaniya atomnoi ehnergii. RD-03-34-2000 [Requirements for the composition and content of the report on the verification and validation of computer codes used to safety analysis of nuclear facilities. RD-03-34-2000]. 2000.

8. Zairov A. R., Smirnova A. A., Feofilaktova Y. M., Shevchenko R. A., Shevchenko S. A., Yashnikov D. A., Soloviev S. L. Ispol'zovanie neironnykh setei v teplofizicheskikh zadachakh atomnoi ehnergetiki [The Use of Neural Networks in Thermophysical Problems of Nuclear Power Engineering]. *Teploehnergetika – Thermal Power Engineering*, 2020, no. 8, pp. 5–19 [in Russian].

9. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii. Rekomendatsii po otsenke pogreshnostei i neopredelennosti rezul'tatov raschetnykh analizov bezopasnosti atomnykh stantsii. RB-166-20 [Recommendations on Estimation of Errors and Uncertainties of the Results of Calculated Safety Analyses of Nuclear Power Plants. RB-166-20]. 2020.

10. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii. Kommentarii k federal'nym normam i pravilam "Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsii" (NP-001-15). RB-152-18 [Comments to the federal norms and rules "General provisions for the safety of nuclear power plants" (NP-001-15). RB-152-18]. 2018.

11. Perechen' deistvuyushchikh attestatsionnykh pasportov programm dlya EHVM [List of valid certification passports for computer codes]. URL: <https://www.secnrs.ru/expertise/software-review/> (reference date: 20.04.2022).

12. Abalkina I. L., Bolshov L. A., Kapyrin I. V., Linge I. I., Savelyeva E. A., Svitelman V. S., Utkin S. S. (2019). Obosnovanie dolgovremennoi bezopasnosti zakhroneniya OYAT i RAO na 10 000 i bolee let: Metodologiya i sovremennoe sostoyanie [Justification of Long-Term Safety of SNF and RAW Disposal for 10 000 and More Years: Methodology and Current State]. IBRAE Preprint no. 2019-03. Moscow: IBRAE [in Russian].

13. Sharafutdinov R. B., Ponizov A. V., Murlis D. V., Savelyeva E. A., Svitelman V. S. Metodicheskie aspekty ucheta osobennostei, sobytii i protsessov prirodnoho i tekhnogennogo proiskhozhdeniya pri obosnovanii dolgovremennoi bezopasnosti sistemy zakhroneniya RAO [Methodological aspects of accounting of features, events and processes of natural and man-induced origin in justification of long-term safety of radioactive waste disposal system]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety*, 2018, no. 4, pp. 20–33 [in Russian].

14. Bogdan S. N., Kovalevich O. M., Kozlova N. A., Shevchenko S. A., Yashnikov D. A. Ob otsenke pogreshnostei raschetov, vpolnyaemykh pri obosnovanii bezopasnosti ob"ektov ispol'zovaniya atomnoi ehnergii [About the calculation error evaluation in the framework of the nuclear facilities safety analysis]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety*, 2017, no. 2 (84), pp. 38–53 [in Russian].

15. Dorofeev A. N., Savelyeva E. A., Utkin S. S., Ponizov A. V. et al. Ehvolutsiya obosnovaniya dolgovremennoi bezopasnosti PGZ ZHRO [Evolution of Justification of Long-Term Safety of LRW SRW]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 54–63 [in Russian].

16. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii. Polozhenie o provedenii verifikatsii i ehkspertizy programmnykh sredstv po napravleniyu "Neitronno-fizicheskie raschety". RB-061-11 [Regulations on Verification and Examination of Computer Codes for Neutron Physics Calculations. RB-061-11]. 2011.

17. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii. Polozhenie o rekomendatsiyakh po sopostavleniyu rasschitannoi i izmerennoi reaktivnosti pri obosnovanii yadernoi bezopasnosti reaktornykh ustanovok s VVEHR. RB-074-12 [Regulation on Recommendations on Comparison of the Calculated and Measured Reactivity when Justifying the Nuclear Safety of Reactor Facilities with VVER. RB-074-12]. 2012.

18. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii. Raschetnye sootnosheniya i metodiki rascheta gidrodinamicheskikh i teplovykh kharakteristik ehlementov i oborudovaniya vodookhlazhdaemykh yadernykh ehnergeticheskikh ustanovok. RB-040-09 [Calculation ratios and methods of calculation of hydrodynamic and thermal characteristics of elements and equipment of water-cooled nuclear power installations. RB-040-09]. 2009.



19. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii. Raschetnye sootnosheniya i metodiki rascheta gidrodinamicheskikh i teplovykh kharakteristik ehlementov i oborudovaniya yadernykh ehnergeticheskikh ustanovok s zhidkometallicheskim teplonositelem. RB-075-12 [Calculation ratios and methods of calculation of hydrodynamic and thermal characteristics of elements and equipment of nuclear power plants with liquid metal coolant. RB-075-12]. 2012.
20. Zairov A. R., Smirnova A. A., Feofilaktova Yu. M., Shevchenko S. A., Yashnikov D. A. Russian experimental database for validation of computer codes used for safety analysis of nuclear facilities. Progress in Nuclear Energy. Volume 118, January 2020, 103061.
21. SSG-2 (rev. 1). Deterministic safety analysis for nuclear power plants: safety guide, IAEA, 2019.
22. YVL B.3. Deterministic safety analyses for a nuclear power plant, STUK, 2019.
23. N3a.32. Deterministic safety assessment for new NPPs, HAEA, 2015.
24. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition, US NRC, 2021.
25. GD-310. Guidance on Safety Analysis for Nuclear Power Plants, CNSC, 2012.
26. Good Practices for User Effect Reduction. Status report NEA/CSNI/R (1998) 22. Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations, Paris, 1998.
27. GSG-13. Functions and Processes of the Regulatory Body for Safety, IAEA, 2018.
28. Scientific Codes Developed and Used at GRS. Volume 1. Reactor Safety. GRS, 2011.
29. Scientific Computer Codes Used at the IRSN. Report IRSN/DSDRE/ № 2010.150, 2010.
30. U. S. Nuclear Regulatory Commission, "NRC Non-Light Water Reactor (Non-LWR). Vision and Strategy, Volume 1 – Computer Code Suite for Non-LWR Plant Systems. Analysis," Revision 1, January 31, 2020, ADAMS Accession No. ML20030A176.
31. Kuryndin A. V., Kirkin A. M., Liashko I. A. O neobkhodimosti razvitiya problemno-orientirovannykh programmnykh sredstv dlya podderzhki prinyatiya reguliruyushchikh reshenii v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii [On the need for development of problem-oriented software to support regulatory decision-making in the field of atomic energy use]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety, 2022, no. 1 (103), pp. 19–31. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.103.1.002 [in Russian].
32. Razvitie tekhniki, tekhnologii i nauchnykh issledovaniy v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii v Rossiiskoi Federatsii [On development of techniques, technologies and scientific research in the use of atomic energy in the Russian Federation]. 2020.
33. Gosudarstvennaya programma Rossiiskoi Federatsii "Razvitie atomnogo ehnerGOPromyshlennogo kompleksa" [On approval of the state program of the Russian Federation "Development of the nuclear power industry complex"]. 2021.
34. Plan meropriyatii "Razvitie vodorodnoi ehnergetiki v Rossiiskoi Federatsii do 2024 goda" [On approval of the action plan "Development of hydrogen energy in the Russian Federation until 2024"]. 2020.
35. Federal'naya nauchno-tekhnicheskaya programma razvitiya sinkhrotronnykh i neitronnykh issledovaniy i issledovatel'skoi infrastruktury na 2019–2027 gody [On approval of the federal scientific and technical program for the development of synchrotron and neutron research and research infrastructure for 2019–2027]. 2020.
36. Edinyi plan po dostizheniyu natsional'nykh tselei razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2024 goda i na planovyi period do 2030 goda [Unified plan to achieve national development goals of the Russian Federation for the period up to 2024 and for the planning period up to 2030]. 2021.

### Сведения об авторах

*Богдан Сергей Николаевич*, заместитель директора, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Жылмаганбетов Нурбол Мухтарович*, старший научный сотрудник отдела расчетных обоснований безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Козлова Надежда Александровна*, начальник лаборатории аварийных режимов атомных станций отдела безопасности атомных станций, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Понизов Антон Владимирович*, начальник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Шарафутдинов Рашет Борисович*, заместитель директора, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Шевченко Роман Александрович*, заместитель начальника отдела расчетных обоснований безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Шевченко Сергей Александрович*, начальник отдела расчетных обоснований безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Яшников Дмитрий Аркадьевич*, начальник лаборатории оценки погрешностей и неопределенностей отдела расчетных обоснований безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

### Authors credentials

*Bogdan Sergei Nikolaevich*, Deputy Director, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: bogdan@secnrs.ru.

*Zhylmaganbetov Nurbol Mukhtarovich*, Senior Scientific Researcher, Division for Safety Assessment Calculations, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: zhylmaganbetov@secnrs.ru.

*Kozlova Nadezhda Aleksandrovna*, Laboratory Head of NPP Accidents, NPP Safety Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: kozlova@secnrs.ru.

*Ponizov Anton Vladimirovich*, Head of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

*Sharafutdinov Rashet Borisovich*, Deputy Director, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: charafoutdinov@secnrs.ru.

*Shevchenko Roman Aleksandrovich*, Deputy Head of Division for Safety Assessment Calculations, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: rshevchenko@secnrs.ru.

*Shevchenko Sergei Aleksandrovich*, Head of Division for Safety Assessment Calculations, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: sshevchenko@secnrs.ru.

*Yashnikov Dmitrii Arkad'evich*, Head of Laboratory for Error and Uncertainty Estimations, Division for Safety Assessment Calculations, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: yashnikov@secnrs.ru.

### Для цитирования

*Богдан С. Н., Жылмаганбетов Н. М., Козлова Н. А., Понизов А. В., Шарафутдинов Р. Б., Шевченко Р. А., Шевченко С. А., Яшников Д. А.* Актуальные вопросы экспертизы программ для электронных вычислительных машин, применяемых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2022. № 2 (104). С. 31–49. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.104.2.002.

### For citation

*Bogdan S. N., Zhylmaganbetov N. M., Kozlova N. A., Ponizov A. V., Sharafutdinov R. B., Shevchenko R. A., Shevchenko S. A., Yashnikov D. A.* Current issues of review of computer codes used for safety analysis of nuclear facilities. Nuclear and Radiation Safety, 2022, no. 2 (104), pp. 31–49. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.104.2.002 [in Russian].

