

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ (05.14.03)

УДК 621.039.4

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-29-36

Оценка динамических нагрузок на стены и перекрытие подреакторного помещения РБМК-1000 при паровом взрыве

А.М. Осипов, А.В. Рябов, Д.В. Финошкина

Одно из условий безопасной эксплуатации энергоблока атомной станции (АЭС) — всестороннее расчетное и экспериментальное обоснование его безаварийной работы во всех эксплуатационных режимах и ограничение радиационных последствий аварий, в том числе, при тяжелых запроектных авариях.

Согласно планам развития атомной энергетики России, строительство новых АЭС с реакторами типа РБМК-1000 в перспективе отсутствует, а назначенные сроки службы эксплуатируемых энергоблоков истекают. Однако на долю подобных станций приходится большая часть выработки электроэнергии в общем объеме атомных мощностей России (около 40%), поэтому в настоящий момент отраслевыми организациями принято решение о продлении их эксплуатации.

Проанализирован сценарий развития тяжелой аварии на АЭС с РБМК на стадии тяжелого повреждения активной зоны, в ходе которого топливосодержащие массы обрушиваются в подреакторное пространство, заполненное водой.

После появления топливосодержащих масс в подреакторном помещении происходит их взаимодействие с бетоном основания реактора. Существует потенциальная опасность проплавления бетонной плиты перекрытия и обрушения коридора в воду бассейна-барботера. В качестве основной стратегии удержания расплавленной активной зоны в границах реакторного пространства предусмотрены отвод остаточного энерговыделения от реактора и охлаждение опорных металлоконструкций за счет подачи воды, однако заполнение подреакторного пространства жидкостью может повлечь за собой создание условий для возникновения парового взрыва. В ходе выполнения работы проведена оценка максимального динамического воздействия на стены подреакторного помещения РБМК 1000 при возможном взаимодействии расплава коридора с водой в ходе тяжелой запроектной аварии.

Показано, что при взаимодействии расплава коридора с большим количеством воды в подреакторном помещении кинетической энергии образующихся паров воды достаточно, чтобы вызвать существенные разрушения здания энергоблока. При понижении уровня воды в подреакторном помещении (менее одного метра) снижается уровень угрозы разрушения. Приведена оценка массы водорода, выделившегося в результате взаимодействия.

Ключевые слова: паровой взрыв, расплав, активная зона, коэффициент конверсии, РБМК-1000.

Для цитирования: Осипов А.М., Рябов А.В., Финошкина Д.В. Оценка динамических нагрузок на стены и перекрытие подреакторного помещения РБМК-1000 при паровом взрыве // Вестник МЭИ. 2021. № 2. С. 29—36. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-29-36.

Assessment of the Dynamic Loads Applied to the RBMK-1000 Subreactor Room Walls and Slab during Vapor Explosion

A.M. Osipov, A.V. Ryabov, D.V. Finoshkina

One of the conditions for the safe operation of a nuclear power plant (NPP) unit is a comprehensive design and experimental justification of its failure-free operation in all operating modes and limitation of accident radiation consequences, including those in the case of severe beyond design basis accidents.

According to the nuclear power industry development plans in Russia, new NPPs equipped with RBMK-1000 reactors are not supposed to be constructed in the future. Although the assigned service life of RBMK-1000 based power units that remain in operation is close to expiration, these power units account for most of the electricity generation in the total amount of nuclear power capacities in Russia (about 40%); therefore, the relevant industry organizations have decided to extend their operation.

This article analyzes the severe accident evolution scenario at an RBMK-based NPP during the stage of severe core damage, in the course of which fuel-containing masses collapse into the subreactor space filled with water.

Once fuel-containing masses emerge in the sub-reactor room, they come in interaction with the reactor base concrete. There is a potential danger of the concrete floor slab melting and the corium collapsing into the bubbler pool water. The main strategy foreseen for keeping the molten core within the reactor space boundaries involves decay heat removal from the reactor and cooling of the support metal structures by supplying water. However, the filling of the subreactor space with liquid may give rise to conditions under which vapor explosion can occur.

The maximum dynamic impact applied to the RBMK-1000 subreactor room walls in the event of possible interaction between the molten corium and water during a severe beyond design basis accident is estimated.

It is shown that when the corium melt interacts with a large amount of water in the subreactor room, the kinetic energy of the resulting water vapor is sufficient to cause significant destruction of the power unit building. When the water level in the subreactor room falls below one meter, the destruction hazard becomes less probable. The mass of hydrogen released as a result of the interaction is also estimated.

Key words: vapor explosion, corium, core, conversion ratio, RBMK-1000.

For citation: Osipov A.M., Ryabov A.V., Finoshkina D.V. Assessment of the Dynamic Loads Applied to the RBMK-1000 Subreactor Room Walls and Slab during Vapor Explosion. Bulletin of MPEI. 2021;2:29—36. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-29-36.

Введение

Одно из возможных событий при развитии тяжелых аварий на АЭС, связанных с разрушением активной зоны, — паровой взрыв, возникающий при взаимодействии высокотемпературного расплава кориума с теплоносителем. Длительное время ведутся активные исследования явления, однако к настоящему времени не создано целостной и исчерпывающей теории.

Ранние работы по термической детонации при паровом взрыве входят в совокупность основополагающих публикаций, актуальность которых сохранилась и до настоящего времени [1 — 11]. Значимый вклад в изучение детонационных процессов внесли отечественные исследователи. Существует ряд работ [12 — 23], в которых продемонстрированы результаты моделирования процессов взаимодействия расплава активной зоны реактора ВВЭР с водой как на внутрикорпусной стадии тяжелой аварии, так и при выходе расплава за пределы корпуса реактора. Прослеживается существенный дефицит информации об аналогичных процессах для реакторов РБМК, на долю которых приходится практически половина производства электроэнергии, вырабатываемой атомными электростанциями нашей страны.

Условия для возникновения парового взрыва на РБМК-1000 реализовываются в ходе проведения мер по управлению тяжелой запроектной аварией, когда для сохранения несущей способности опорных конструкций реактора РБМК-1000 возникает необходимость заполнения подреакторного помещения водой. В случае стекания кориума в подреакторное помещение происходит его взаимодействие с охлаждающей жидкостью.

Цель настоящей работы — оценка максимального динамического воздействия на стены подреакторного помещения РБМК-1000 при взаимодействии расплава топливосодержащих масс с водой в ходе тяжелой запроектной аварии.

Условия возникновения парового взрыва на атомной электростанции с каналным реактором большой мощности (РБМК)

За аварию с наибольшими радиационными последствиями принято считать длительное отсутствие

электроснабжения энергоблока АЭС (BlackOut). При неправильной организации/отсутствии управляющих действий она может перейти в тяжелую стадию с плавлением активной зоны.

На сегодняшний день рассматривается следующий сценарий развития тяжелой аварии на АЭС с РБМК-1000.

Расплавленная активная зона начинает постепенно стекать по технологическим каналам в зону гидрозатворов нижних водяных коммуникаций (НВК). Затем высокотемпературный расплав относительно небольшими порциями (~150...200 кг), распределенными по сетке графитовой кладки, попадает в зону изгиба НВК и практически сразу проплавляет стенки труб (рис. 1). После разрушения труб НВК он попадает в подреакторное пространство (подапаратное помещение), находящееся непосредственно под реактором и представляющее собой выделенный объем для размещения НВК и опорных металлоконструкций реактора (схемы «ОР» и «С»). Высота стен подреакторного помещения — 6 м, диаметр — 14 м (рис. 2).

После появления ТСМ в подреакторном помещении происходит их взаимодействие с бетоном основания реактора. Для энергоблоков второго поколения характерно размещение бассейна-барботера, заполненного водой, под помещением нижних водяных коммуникаций. Таким образом, возникает потенциальная

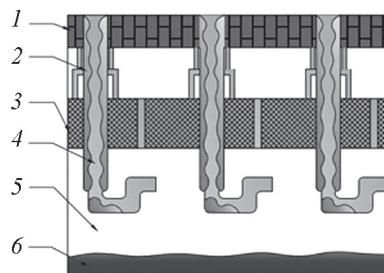


Рис. 1. Схема стекания ТСМ в подреакторное помещение РБМК-1000:

1 — активная зона; 2 — расплавленные ТСМ; 3 — МК схемы «ОР»; 4 — гидрозатворы НВК; 5 — подреакторное пространство; 6 — вода

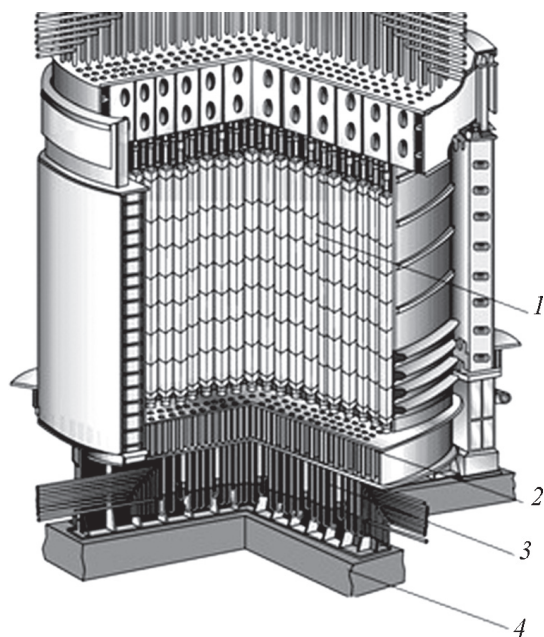


Рис. 2. 3D-модель реактора РБМК-1000:

1 — активная зона; 2 — МК зоны «ОР»; 3 — подреакторное помещение; 4 — бетонное основание шихты реактора

опасность проплавления бетонной плиты перекрытия и обрушения ТСМ в воду бассейна-барботера.

В качестве основной стратегии удержания ТСМ в границах реакторного пространства предусмотрены отвод остаточного энерговыделения от аварийного реактора и охлаждение опорных металлоконструкций за счет подачи воды, в ходе чего подреакторное пространство заполнится водой, и при неблагоприятном исходе мероприятий по локализации ТСМ в пределах реакторного пространства будут созданы условия для возникновения парового взрыва в результате взаимодействия стекающих ТСМ с водой в подреакторном помещении.

Сценарий развития крупномасштабного парового взрыва

Паровой взрыв возникает при взаимодействии высокотемпературного (~3000 К) расплава активной зоны с теплоносителем [12, 15 — 17]. Его сущность заключается в образовании мощной детонационной волны в ходе взаимодействия горячей (нелетучей) и холодной (летучей) жидкостей. Как правило, рассматривается сочетание жидких металлов с водой. Если температура одной жидкости намного превышает температуру кипения другой, то испарение последней происходит взрывным образом за время порядка миллисекунды, давление в такой системе достигает сотни и тысячи атмосфер. Отличительная особенность парового взрыва — увеличение площади теплопередающей поверхности за счет фрагментации расплава [18].

Физика самопроизвольного (внутреннего) запуска (триггеринга синхронизирования тонкой фрагментации горячей жидкости) до конца не выяснена.

Практика показывает, что процессы фрагментации капель и интенсивного парообразования эффективно протекают при внешнем воздействии, осуществляемом путем подачи импульса давления в результате ударного разрыва диафрагмы, резкого перемещения поршня, электрического взрыва проволоочки, подрыва детонатора или просто в результате удара струи горячей жидкости о днище сосуда с холодной жидкостью и т. д.

Эксперименты FARO

В настоящее время существует множество расчетных кодов, посвященных моделированию как различных стадий в отдельности, так и всего процесса возникновения парового взрыва: CULDESAC (Великобритания) [1 — 3], TEXAS (США) [4, 7—8], ESPROSE (США) [5, 6], VAPEX (Россия) [12, 13, 19]. Перечисленные коды созданы, исходя из современного представления о физике процесса парового взрыва и анализа большого объема экспериментальных данных.

Одна из наиболее известных экспериментальных программ по исследованию взаимодействия кориума с водой выполнена на установке FARO в Объединенном исследовательском центре Европейской Комиссии (г. Испра, Италия) [10, 11]. Основная цель опытов состояла в получении данных по перемешиванию струи расплавленного кориума, состоящего из чистых диоксидов UO_2 и ZrO_2 , с водой и последующему охлаждению в условиях, соответствующих протеканию тяжелой аварии на АЭС с водоохлаждаемым реактором под давлением.

В материалах статьи [13] приведен анализ результатов исследований на установке FARO (L-14, L-24 и L-33). По полученным данным можно проследить определенную зависимость отношения массы фрагментированного кориума (массы крупных капель расплава, перемешанных с водой, способных генерировать паровой взрыв) и полной массы кориума от отношения полной массы расплава ко всей массе воды, участвующей в охлаждении расплава.

Таким образом, зная отношение массы кориума к массе охлаждающей воды, можно примерно оценить долю фрагментированного топлива, энергия которого реализуется в форме парового взрыва.

Одним из неожиданных открытий FARO стало обнаружение значительного количества водорода, образовавшегося при взаимодействии воды с расплавом. Появление неконденсированной компоненты ведет к плохой взрываемости кориума из-за увеличения газосодержания жидкости и препятствию распространения ударных волн.

По этой причине вероятность возникновения детонации перемешанного с водой расплава (триггеринга) существенно снижается при приближении температуры воды к температуре насыщения. Консервативно можно считать, что паровой взрыв возможен при значениях объемного паросодержания $\varphi \leq 0,6$.

Развитие процесса парового взрыва требует проведения аккуратного моделирования с учетом множества факторов. Поскольку эксперименты FARO являются эталонными в области исследования динамических воздействий от ударной волны, а также ввиду отсутствия работ по РБМК в этой области, в рамках консервативных оценок использование соотношений, полученных в результате анализа экспериментов FARO, обосновано и позволяет провести оценку последствий взаимодействия расплава топлива с водой в подреакторном помещении РБМК-1000.

Коэффициент конверсии

Традиционно в работах по паровому взрыву для оценки кинетической энергии, способной выделиться в ходе взрывного взаимодействия расплава с водой, используется понятие коэффициента конверсии:

$$\eta = K/E,$$

где K — кинетическая энергия движущегося потока, образующегося в результате парового взрыва; E — тепловая энергия, запасенная во всей массе расплава.

Это связано, в первую очередь, с тем, что значение η можно измерить экспериментально.

Теоретические оценки дают максимальную величину коэффициента — 30% [9]. Полученные опытным путем коэффициенты конверсии как минимум на порядок меньше идеального (0,3...3,0%). О коэффициенте конверсии еще говорят как об отношении кинетической энергии паровой смеси к тепловой энергии расплава, непосредственно участвующего во взрыве. В эксперименте его величина ограничена 10%.

Оценка выделяющейся механической энергии в ходе взаимодействия расплава с водой в подреакторном помещении РБМК

Масса одной ТВС для реактора РБМК-1000 около 185 кг [20], из которой около 156 кг приходится на тепловыделяющие элементы. Тогда при загрузке реактора 1661 ТВС (в предположении, что произошло расплавление всех ТВС) массу чистого расплава UO_2 — ZrO_2 можно консервативно оценить величиной ~260 т.

При плавлении ТВЭЛов масса расплава разбавляется дополнительным цирконием от материала несущих стержней и дистанционирующих решеток, а также материалом труб ТК, каналов схемы ОР, стальных элементов конструкции реактора и серпентинитом, приводя к снижению температуры расплава, что способствует снижению коэффициента конверсии. При этом доля провзаимодействовавшего корнума отличается от результатов, полученных на установке FARO (80% UO_2 и 20% ZrO_2), в меньшую сторону. Идентификация параметров взаимодействия полученного расплава с водой — вопрос дополнительных исследований.

Объем подреакторного пространства — 900 м³. Если предположить, что все оно полностью заполнено

водой, то при массе расплава 260 т отношение массы расплава к массе воды будет ~0,29. Согласно данным [14] снижение объема воды приводит к снижению доли фрагментированного топлива, а значит, и значения максимальной кинетической энергии паровой смеси при заданной массе расплава.

При подводном взрыве максимальное давление на фронте ударной волны определяется выражением [21]:

$$p = A \left(\frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right)^{1,13}, \quad (1)$$

где $A = \sim 533$ — постоянный эмпирический коэффициент; G — энергия взрывного воздействия в тротиловом эквиваленте; R — расстояние от эпицентра до места наблюдения.

В статье [15] проведен анализ воздействия на шахту реактора ВВЭР в зависимости от уровня воды под корпусом реактора в результате парового взрыва из-за взаимодействия корнума с водой. Показано, что при снижении уровня воды на 2 м в результате взрыва на порядок снижается динамическое воздействие на шахту реактора.

Исходя из представления о развитии процесса парового взрыва выполнена оценка максимального динамического воздействия на стены и перекрытие подреакторного пространства РБМК-1000 в зависимости от массы расплава и уровня воды под ним, при этом учитывали, что рассматривалось воздействие, инициируемое ударной волной (совместное силовое влияние вследствие парового взрыва и взрыва сгенерированного водорода не анализировалось).

Тепловую энергию расплава определяли как количество теплоты, переданное от корнума к воде в процессе теплоотдачи (в Дж):

$$E = C_p m \Delta T,$$

где m — масса корнума; C_p — удельная теплоемкость (в расчете принята теплоемкость жидкого расплава — 565 Дж/кг·К); ΔT — изменение температуры корнума.

В свою очередь, кинетическую энергию парового взрыва вычисляли с учетом коэффициента конверсии:

$$K = E\eta.$$

Давление на стены подапаратного помещения оценивали выражением (1).

Расстояние до ближайших стен определялось оценкой эффективного радиуса помещения. Площадь помещения под реактором РБМК-1000 — 320 м², следовательно $R = (320/\pi)^{0,5} \approx 10$ м. Более точное моделирование распространения волны детонации приведено в [22, 23].

Высотный уровень воды в подреакторном помещении учитывали из соображений, приведенных

в [15], т. е. при снижении высотного уровня воды на каждые 2 м на порядок уменьшается динамическое воздействие на стены подреакторного помещения РБМК-1000 (табл. 1).

Следует отметить, что работа носит оценочный характер, в рамках консервативных оценок импульс давления на стенку и временные характеристики ударной волны не рассматривались.

Данные расчетов предельной несущей способности элементов подапаратного помещения энергоблоков № 1–2 Курской и № 1–2 Ленинградской АЭС [20] приведены в табл. 2.

По данным табл. 2 можно сделать вывод, что при взаимодействии расплава кориума с большим количеством воды в подреакторном помещении кинетической энергии образующихся паров воды достаточно, чтобы вызвать существенные разрушения конструкции аварийных помещений. При снижении уровня воды в подреакторном помещении ниже одного метра возможность разрушения снижается.

В таблице 3 дана оценка массы водорода, выделившегося в результате взаимодействия расплава с водой в подреакторном помещении РБМК-1000. При оценке консервативно предполагалось, что при взаимодействии с водой фрагментируется 80% от всего расплава, а масса выделившегося водорода пропорциональна количеству фрагментированного топлива.

Данные табл. 1, 3 стоит расценивать как грубую консервативную оценку, однако даже по ней можно сделать вывод, что:

- при наличии большого объема воды в подреакторном пространстве в случае расплавления активной зоны существует обоснованная опасность возникновения парового взрыва, приводящего к разрушительным последствиям;
- при уменьшении количества воды, взаимодействующей с расплавом, динамическое воздействие на стены и перекрытие подреакторного помещения снижается;
- при плавном проникновении расплава в воду возможно отсутствие триггеринга парового взрыва, что ведет к процессу охлаждения кориума;
- при взаимодействии расплава с водой образуется водород, который, даже в отсутствии триггеринга парового взрыва, создает взрывоопасную концентрацию в подреакторном помещении.

Более точные оценки вероятности возникновения парового взрыва и его последствий можно получить в процессе моделирования процесса взаимодействия с помощью специализированных программ. Однако неопределенность в исходных данных по параметрам взаимодействия кориума активной зоны РБМК с водой сохранится.

Таблица 1

Динамическое воздействие на стены и перекрытие подреакторного пространства РБМК-1000 в результате парового взрыва

Количество расплавленных кассет, шт.	1661	833	417	167	83	17
Полная масса расплава, т	260	130	65	26	13	2,6
Тепловая энергия расплава, МДж·10 ⁻⁵ , при T = 3073 К	4,51	2,26	1,13	0,45	0,23	0,05
Кинетическая энергия парового взрыва, МДж, при:						
η = 30%	135000	67700	33900	13500	6770	1350
η = 3%	13500	6770	3390	1350	677	135
η = 0,3%	1350	677	339	135	67,7	13,5
Давление на стены подреакторного помещения, кгс/см²						
Уровень воды 5 м						
η = 30%	1975	1521	1172	830	639	349
η = 3%	830	639	492	349	268	146
η = 0,3%	349	268	207	146	113	61
Уровень воды 3 м						
η = 30%	197	152	117	83	64	35
η = 3%	83	64	49	35	27	15
η = 0,3%	35	27	21	15	11	6
Уровень воды 1 м						
η = 30%	19,7	15,2	11,7	8,3	6,4	3,5
η = 3%	8,3	6,4	4,9	3,5	2,7	1,5
η = 0,3%	3,5	2,7	2,1	1,5	1,1	0,6

Таблица 2

Предельно допустимое избыточное давление на железобетонные конструкции подреакторного помещения

Помещение	Элемент конструкции	Предельное давление, кПа
Подаппаратное помещение	Стена в сторону бассейнов выдержки ОТВС	180
	Стена в сторону турбинного отделения	710
	Фрагмент перекрытия помещения	180

Таблица 3

Количество водорода, выделившееся при взаимодействии расплава с водой

Количество расплавленных кассет, шт.	1661	833	417	167	83	17	11
Полная масса расплава, т	260	130	65	26	13	2,6	1,7
Масса фрагментированного топлива, т	208	104	52	20,8	10,4	2,08	1,36
Масса водорода, кг	832	416	208	83	41	8	5

Заключение

На основе опубликованных работ по паровому взрыву проведена оценка динамического воздействия на стены подреакторного помещения РБМК-1000 в случае его предварительного заполнения водой из-за действий в рамках мероприятий по управлению гипотетической тяжелой запроектной аварией с расплавлением активной зоны.

Полученные величины давления на стены и перекрытие подаппаратного помещения прогнозируют разрушающие последствия для элементов конструкции здания энергоблока в ходе взаимодействия топливосодержащих масс с большим объемом воды. Приемлемые величины давления достигаются в результате существенного снижения уровня воды в подаппарат-

ном помещении. Основным выводом из проведенного анализа служит рекомендация о недопущении предварительного заполнения водой подреакторного пространства.

Оценено количество водорода, образованного в результате взаимодействия корнума с водой. Достижение взрывоопасной концентрации водорода с воздухом ведет к взрыву в подаппаратном помещении даже в отсутствие триггеринга взаимодействия корнума с водой.

Представленные в статье результаты носят оценочный характер. Более точное значение величин можно получить только в результате полномасштабного моделирования по специализированным программным средствам CULDESAC (Великобритания) [1 — 3], TEXAS (США) [4, 7, 8], ESPROSE (США) [5, 6], VAPEX (Россия) [12 — 13, 19].

Литература

1. **Fletcher D.F.** An Improved Mathematical Model of Melt/Water Detonations. I. Model Formulation and Example Results // Int. J. Heat Mass Transfer. 1991. V. 34. Pp. 2435—2448.
2. **Fletcher D.F.** An Improved Mathematical Model of Melt/Water Detonations. II. A Study of Escalation // Int. J. Heat Mass Transfer. 1991. V. 34. Pp. 2449—2459.
3. **Fletcher D.F.** Propagation Investigations Using the CULDESAC Model. Proc. CSNI Specialist Meeting on Fuel-coolant Interactions // Nuclear Eng. and Design. 1995. V. 155. Iss. 1—2. Pp. 271—287.
4. **Tang J., Corradini M.L.** Modelling of the One-Dimensional Vapor Explosions // Proc. VI Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics. Grenoble, 1993. V. 1. P. 107.
5. **Yuen W.W., Theofanous T.G.** The Prediction of 2D Thermal Detonation and Resulting Damage Potential // Nuclear Eng. and Design. 1995. V. 155. Iss. 1—2. Pp. 289—309.
6. **Chen X., Yuen W.W., Theofanous T.G.** On the Constitutive Description of the Microinteractions Concept

References

1. **Fletcher D.F.** An Improved Mathematical Model of Melt/Water Detonations. I. Model Formulation and Example Results. Int. J. Heat Mass Transfer. 1991;34:2435—2448.
2. **Fletcher D.F.** An Improved Mathematical Model of Melt/Water Detonations. II. A Study of Escalation. Int. J. Heat Mass Transfer. 1991;34:2449—2459.
3. **Fletcher D.F.** Propagation Investigations Using the CULDESAC Model. Proc. CSNI Specialist Meeting on Fuel-coolant Interactions. Nuclear Eng. and Design. 1995;155;1—2:271—287.
4. **Tang J., Corradini M.L.** Modelling of the One-Dimensional Vapor Explosions. Proc. VI Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics. Grenoble, 1993;1:107.
5. **Yuen W.W., Theofanous T.G.** The Prediction of 2D Thermal Detonation and Resulting Damage Potential. Nuclear Eng. and Design. 1995;155;1—2:289—309.
6. **Chen X., Yuen W.W., Theofanous T.G.** On the Constitutive Description of the Microinteractions Concept

in Steam Explosions // Proc. 7th Intern. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics. 1995. V. 3. Pp. 1586—1606.

7. **Corradini ML., Tang J., Shamonn B., Niluwankosit S.** TEXAS-V: A Fuel-coolant Interaction Model. Heat and Mass Transfer in Severe Nuclear Reactor Accidents. Begell House Inc. N.-Y., 1996.

8. **Annunziato A., Yerkess A., Addabbo C.** FARO and KROTOS Code Simulation and Analysis at JRC Ispra // Nuclear Eng. and Design. 1999. V. 189. Iss. 1—3. Pp. 359—378.

9. **Speis P.T., Basu S.** Fuel-Coolant Interaction (FCI) Phenomena in Reactor Safety: Current Understanding and Future Research Needs // Proc. OECD/CSNI Specialists Meeting on Fuel-coolant Interactions. Tokai-Mura, 1997. Pp. 19—24.

10. **Magallon D., Huhtiniemi I., Hohmann H.** Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching Experiments // Nuclear Eng. and Design. 1999. V. 189. Iss. 1—3. Pp. 233—238.

11. **Magallon D., Huhtiniemi I.** Corium Melt Quenching Tests at Low Pressure and Subcooled Conditions in FARO // Nuclear Eng. and Design. 2001. V. 204. Pp. 369—376.

12. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Соколин А.В.** Взрывное взаимодействие расплава с водой. Моделирование кодом VAPEX-D // Теплофизика высоких температур. 2002. Т. 40. № 3. С. 466—474.

13. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В., Соколин А.В.** Анализ эксперимента по взаимодействию расплава с охладителем на установке FARO с помощью кода VAPEX // Атомная энергия. 2002. Т. 92. № 2. С. 91—95.

14. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е.** Анализ крупномасштабных экспериментов по взаимодействию кориума с водой с помощью кода VAPEX // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 4. С. 565—574.

15. **Блинков В.Н. и др.** Определение динамических нагрузок на контейнмент при внекорпусном паровом взрыве на АЭС с ВВЭР // Технические науки. Фундаментальные исследования. 2012. № 9. С. 889—893.

16. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Ртищев Н.А., Тарасов А.Е.** Разработка и валидация модели термического взаимодействия высокотемпературного расплава с натрием // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 6. С. 250—257.

17. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В., Ртищев Н.А., Боровкова Е.М.** Оценка ударного воздействия на корпус реактора вследствие внутрикорпусного парового взрыва // Вестник МЭИ. 2012. № 2. С. 50—57.

18. **Степанов Е.В.** Физические аспекты явления парового взрыва. М.: ИАЭ, 1991.

19. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В.** Численное моделирование процесса предварительного перемешивания струи расплава активной зоны с помощью кода VAPEX-P // Теплоэнергетика. 2003. № 11. С. 35—39.

in Steam Explosions. Proc. 7th Intern. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics. 1995;3:1586—1606.

7. **Corradini ML., Tang J., Shamonn B., Niluwankosit S.** TEXAS-V: A Fuel-coolant Interaction Model. Heat and Mass Transfer in Severe Nuclear Reactor Accidents. Begell House Inc. N.-Y., 1996.

8. **Annunziato A., Yerkess A., Addabbo C.** FARO and KROTOS Code Simulation and Analysis at JRC Ispra. Nuclear Eng. and Design. 1999;189;1—3:359—378.

9. **Speis P.T., Basu S.** Fuel-Coolant Interaction (FCI) Phenomena in Reactor Safety: Current Understanding and Future Research Needs. Proc. OECD/CSNI Specialists Meeting on Fuel-coolant Interactions. Tokai-Mura, 1997: 19—24.

10. **Magallon D., Huhtiniemi I., Hohmann H.** Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching Experiments. Nuclear Eng. and Design. 1999;189; 1—3:233—238.

11. **Magallon D., Huhtiniemi I.** Corium Melt Quenching Tests at Low Pressure and Subcooled Conditions in FARO. Nuclear Eng. and Design. 2001;204:369—376.

12. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Sokolin A.V.** Vzryvnoe Vzaimodeystvie Rasplava s Vodoy. Modelirovanie Kodom VAPEX-D. Teplofizika Vysokikh Temperatur. 2002;40;3:466—474. (in Russian).

13. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Parfenov Yu.V., Sokolin A.V.** Analiz Eksperimenta po Vzaimodeystviyu Rasplava s Okhladitelem na Ustanovke FARO s Pomoshch'yu Koda VAPEX. Atomnaya Energiya. 2002;92; 2:91—95. (in Russian).

14. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E.** Analiz Krupnomasshtabnykh Eksperimentov po Vzaimodeystviyu Koriuma s Vodoy s Pomoshch'yu Koda VAPEX. Teplofizika Vysokikh Temperatur. 2007;45;4:565—574. (in Russian).

15. **Blinkov V.N. i dr.** Opredelenie Dinamicheskikh Nagruzok na Konteynment pri Vnekorpusnom Parovom Vzryve na AES s VVER. Tekhnicheskie Nauki. Fundamental'nye Issledovaniya. 2012;9:889—893. (in Russian).

16. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Rtishchev N.A., Tarasov A.E.** Razrabotka i Validatsiya Modeli Termicheskogo Vzaimodeystviya Vysokotemperaturnogo Rasplava s Natriem. Teplovye Protsessy v Tekhnike. 2015;7;6: 250—257. (in Russian).

17. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Parfenov Yu.V., Rtishchev N.A., Borovkova E.M.** Otsenka Udannogo Vozdeystviya na Korpus Reaktora Vsledstvie Vnutrikorpusnogo Parovogo Vzryva. Vestnik MEI. 2012;2; 50—57. (in Russian).

18. **Stepanov E.V.** Fizicheskie Aspekty Yavleniya Parovogo Vzryva. M.: IAE, 1991. (in Russian).

19. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Parfenov Yu.V.** Chislennoe Modelirovanie Protsessa Predvaritel'nogo Peremeshivaniya Strui Rasplava Aktivnoy Zony s Pomoshch'yu Koda VAPEX-P. Teploenergetika. 2003;11: 35—39. (in Russian).

20. **Абрамов М.И. и др.** Канальный ядерный энергетический реактор. М.: НИКИЭТ, 2006.

21. **Буланов Н.В.** Взрывное вскипание диспергированных жидкостей. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011.

22. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Тарасов А.Е.** Формирование, распространение и отражение от стенки сосуда волны термической детонации // Вестник МЭИ. 2016. № 5. С. 49—56.

23. **Гудеменко Д.В., Мелихов В.И., Мелихов О.И.** Исследование термической детонации на основе модели микровзаимодействий // Вестник МЭИ. 2017. № 2. С. 32—39.

20. **Abramov M.I. i dr.** Kanal'nyy Yadernyy Energeticheskiy Reaktor. M.: NIKIET, 2006. (in Russian).

21. **Bulanov N.V.** Vzryvnoe Vskipanie Dispergировannyykh Zhidkostey. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2011. (in Russian).

22. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Tarasov A.E.** Formirovanie, Rasprostranenie i Otrazhenie ot Stenki Sosuda Volny Termicheskoy Detonatsii. Vestnik MEI. 2016;5:49—56. (in Russian).

23. **Gudemenko D.V., Melikhov V.I., Melikhov O.I.** Issledovanie Termicheskoy Detonatsii na Osnove Modeli Mikrovzaimodeystviy. Vestnik MEI. 2017;2:32—39. (in Russian).

Сведения об авторах:

Осипов Алексей Михайлович — начальник отдела НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Osipov_AM@nrcki.ru

Рябов Александр Валерьевич — старший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Ryabov_AV@nrcki.ru

Финошкина Дарья Владимировна — лаборант-исследователь НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Finoshkina_DV@nrcki.ru

Information about authors:

Osipov Aleksey M. — Head of Department of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Osipov_AM@nrcki.ru

Ryabov Aleksandr V. — Senior Researcher of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Ryabov_AV@nrcki.ru

Finoshkina Darya V. — Laboratory Research Assistant of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Finoshkina_DV@nrcki.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 25.09.2019

The article received to the editor: 25.09.2019