
**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 531.7:539.3:621.039

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ
ЭНЕРГОБЛОКА АЭС И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КАЧЕСТВЕ
ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА
БЕЗОПАСНОСТИ**

© 2017 О.А. Губеладзе*, А.Р. Губеладзе*, С.М. Бурдаков**

* *Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Россия*

** *Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

При решении проблем безопасности АЭС, где существенная роль отводится подъемно-транспортным системам (ПТС) реакторного отделения (РО), их следует рассматривать как элемент комплекса «ядерное топливо – технологическое оборудование реакторного отделения – защитная гермооболочка (ЗГО)». Следует отметить, что, являясь составными частями (элементами) энергоблока, ПТС РО и ЗГО оказывают непосредственное воздействие друг на друга как на этапе строительства, так и в период непосредственной эксплуатации. Реальные значения внутренних параметров построенного энергоблока могут отличаться от результатов проектирования, а точнее, находиться вне допуска.

Целью работы является исследование возможности устранения неопределенности при вероятностном анализе безопасности энергоблока АЭС с ВВЭР путем получения наиболее полных и достоверных данных о параметрах объекта, достигнутых в процессе реализации проектных решений при возведении гермооболочки и монтаже подъемно-транспортных систем реакторного отделения.

Ключевые слова: защитная герметичная оболочка, кран радиального действия, вероятностный анализ безопасности, нерегламентированные деструктивные воздействия.

Поступила в редакцию: 31.08.2017

Критерий безопасности – величина вероятности реализации опасности объекта использования атомной энергии (ОИАЭ). Критерии устанавливаются с учетом всех видов воздействий по результатам моделирования аварийных ситуаций (АС), а их количественное значение определяется: детерминированными проектными параметрами ОИАЭ; стохастическими характеристиками нерегламентируемых деструктивных воздействий (НДВ). Критерий, обобщающий как детерминированные, так и стохастические параметры, должен обладать вероятностной мерой, что не исключает использование частных критериев, выраженных в натуральных единицах.

Характеризуя состояние эксплуатации действующих российских АЭС, следует отметить, что функционирование их осуществляется, в целом, в соответствии с правилами и нормами безопасности. С учетом накопленного опыта работы станций, а также анализа причин и последствий, имевших место аварий, разработаны и реализуются на станциях мероприятия по повышению их надежности и безопасности, при этом учитываются состояние и особенности каждого конкретного энергоблока.

Вместе с тем, на сегодня только энергоблоки с реакторами ВВЭР отличаются достаточной надежностью. Так, в соответствии с результатами вероятностного анализа безопасности (ВАБ) для Балаковской АЭС, среднее значение суммарной (по всем инициирующим событиям) частоты повреждения активной зоны реактора составляет $8,3 \cdot 10^{-5}$ на реактор в год [1]. Отрицательной особенностью является и то, что большинство российских АЭС находятся в густонаселенной Европейской части страны. Положение усугубляется тем, что на большинстве станций сегодня имеет место достаточно высокая степень износа основных производственных фондов. В силу социальных причин наблюдается падение производственной и технологической дисциплины.

Концепция глубокоэшелонированной защиты АЭС включает в себя установку последовательных физических барьеров: топливная матрица и оболочки ТВЭЛов; контур теплоносителя; защитная гермооболочка (ЗГО). С целью реализации концепции создано несколько уровней защиты «в глубину», в том числе:

- поддержание в готовности элементов и систем оборудования АЭС, важных для безопасности объекта (резервирование оборудования, диагностика технического состояния, устранение неисправностей и отказов, качественное проведение планово-предупредительных ремонтов);

- предотвращение перехода значений параметров технологического процесса за пределы безопасной эксплуатации.

Предотвращение АС предусматривает проведение с высоким качеством мероприятий соответствующих таким этапам жизненного цикла АЭС с ВВЭР как создание (проектирование, строительство, монтаж оборудования) и эксплуатация. Для предотвращения неблагоприятного развития инициирующих событий в рамках концепции выполняются различные функции, одной из которых является безусловное обеспечение охлаждения активной зоны реактора (предотвращение перегрева ТВЭЛов и их разрушения). Машина перегрузки (МП) ядерного топлива (ЯТ) предназначена для загрузки, перегрузки и выгрузки тепловыделяющих сборок на остановленном и расхоложенном реакторе. Точность наведения на заданную координату составляет ± 3 мм. Мостовой кран радиального действия (полярный кран) устанавливаются под куполом ЗГО реакторного отделения АЭС и применяются для перемещения различных грузов в реакторном отделении. Его конструкция позволяет совершать транспортные операции в любой точке здания. Точность наведения груза таким краном должна составлять ± 7 мм. Особую актуальность это требование принимает в случае неисправности МП при реализации АС, требующей выгрузки тепловыделяющих сборок (ТВС) из реактора.

Важнейшей функцией при неблагоприятном развитии событий необходимо считать локализацию и удержание радиоактивных веществ в пределах зоны локализации аварии. Защитная гермооболочка (ЗГО) энергоблока АЭС с ВВЭР – 1000 должна обеспечивать стабильную работу на всем протяжении жизненного цикла объекта.

Эффективность реализации защитных функций гермооболочкой в значительной степени зависит от того – насколько успешным будет противодействие ЗГО нерегламентируемым деструктивным воздействиям, а точнее деструктивным факторам (ДФ) этих воздействий. К ДФ соответствующих воздействий на ЗГО можно отнести: рост избыточного давления и температуры внутри гермозоны; давление во фронте ударной волны; динамическое воздействие кинетического ударника; параметры ударно-теплового воздействия, вызванного падением летательного аппарата; пожарная нагрузка и др. В реальной АС следует ожидать одновременное или комбинированное воздействие нескольких ДФ. Комбинированное воздействие возможно при условии, что первое по времени НДВ явилось источником последующих (вторичных) воздействий.

После монтажа крана радиального действия на подкрановый путь, на консоли, расположенные в районе ходовых колес, воздействует сила, обусловленная его весом. Стена защитной оболочки в зоне крепления консоли воспринимает момент силы, который вызывает упругие деформации стены оболочки. При этом зона крепления консоли является фрагментом стены, где расположенные выше и ниже зоны обладают соответствующей на конкретный момент строительства жесткостью.

Исходя из выше сказанного, при решении проблем безопасности АЭС, где существенная роль отводится подъемно-транспортным системам (ПТС), их следует рассматривать как элемент комплекса «ЯТ – технологическое оборудование (ТО) реакторного отделения – ЗГО».

Безусловно, АЭС является сложной технической системой, обладающей рядом специфических свойств. Проведя ее детализацию, выделим элемент для дальнейшего исследования – энергоблок АЭС. Исследуемый объект S представим в виде модели, которая имеет следующие характеристики:

X – входные воздействия ($x_a \in X, a = \overline{1, N_x}$);

H – внутренние параметры системы ($h_l \in H, l = \overline{1, N_h}$);

Y – выходные параметры ($y_b \in Y, b = \overline{1, N_y}$);

V – набор внешних возмущений ($v_d \in V, d = \overline{1, N_v}$).

При наличии в наборе внешних возмущений НДВ ($V^{НДВ} \cap V, v_d' \in V^{НДВ}, d = \overline{1, N_d}$) возможно возникновение АС, при развитии которой ожидаются исходы G , где $g_j \in G$. Исходы характеризуются критериями $K(g_j)$, в данном случае предпочтения в G можно описать при помощи единственного критерия K , т.е. исход g_0 предпочтительнее других

$$K(g_0) > K(g_j), j = 1, 2, 3. \quad (1)$$

С целью предотвращения возникновения или дальнейшего развития АС выполняются мероприятия защиты объекта S . Реализация этих мероприятий зависит от эффективности, как отдельных элементов, так и всей системы защиты (СЗ) [2]. Здесь под эффективностью будем понимать свойство, определяющее степень пригодности системы для использования по назначению и характеризующее соответствие достигнутого в процессе применения системы результата ожидаемому (требуемому). Способы реализации мероприятий защиты будем называть стратегиями U ($u_m \in U, m = \overline{1, N_u}$). Если задача характеризуется наличием случайных факторов с известными законами распределения (отказ оборудования, случайный «спрос» и т.д.), то каждой стратегии из множества U можно поставить в соответствие распределение на множество исходов. В данном случае, G является конечным множеством, поэтому для стратегии u_m при воздействии v_d' можно определить вероятность $P_j(u_m, v_d')$ появления каждого исхода g_j . Критерий, характеризующий исходы, является случайной функцией $\tilde{K}(u_m)$. Для любой выбранной стратегии распределение $\tilde{K}(u_m)$ известно. Задав число Z , можно определить вероятность того, что $\tilde{K}(u_m)$ примет значение не меньше Z :

$$P(\tilde{K}(u_m) \geq Z) = \gamma(z, u_m). \quad (2)$$

Согласно принципу вероятностного гарантированного результата, задается требуемый уровень и вводится числовая функция $K^z(u) = \gamma(z, u)$, т.е. оптимальная стратегия определяется как нахождение $\max K^z(u)$, где $u \in U$. Однако задача усложняется наличием неопределенности. Это связано с отдаленностью этапа непосредственного применения СЗ, неопределенностью самого момента ее использования, характеристик системы (на момент возникновения НДВ, способного вызвать АС), а также будущих условий применения (сочетание НДВ и их параметров). Технологическое оборудование, а именно ПТС, и защитная гермооболочка, являясь элементами СЗ, в свою очередь также подвергаются НДВ. Это касается не только воздействий непосредственно в момент возникновения АС, а и НДВ в предшествующий период существования энергоблока (возведение, монтаж, испытания, эксплуатация).

Следует отметить, что, являясь составными частями (элементами) энергоблока, ПТС РО и ЗГО оказывают непосредственное воздействие друг на друга как на этапе строительства, так и в период непосредственной эксплуатации (рис.1). Из рисунка видно, что, в отсутствии краткосрочных динамических НДВ при эксплуатации энергоблока, основные изменения параметров происходят во время возведения, монтажа и испытаний ПТС и ЗГО [3].

Для устранения неопределенности при анализе безопасности энергоблока необходимо получить как можно более полные и достоверные сведения о параметрах элементов СЗ, достигнутых в процессе реализации проектных решений при возведении гермооболочки [4] и монтаже ПТС РО [5].

Для устранения неопределенности при анализе безопасности энергоблока необходимо получить как можно более полные и достоверные сведения о параметрах элементов СЗ, достигнутых в процессе реализации проектных решений при возведении гермооболочки [4] и монтаже ПТС РО [5].

На рисунке 2 представлена схема НДВ на оболочку и ПТС РО (без влияния ошибок проектирования) с учетом взаимовлияния.

Здесь представлены следующие воздействия: $v'_{1.1}$ – ошибки монтажа крана кругового действия; $v'_{1.2}$ – отклонения от проекта в период возведения ЗГО; $v'_{2.1}$ – массово-инерционные нагрузки; $v'_{2.2}$ – отклонения от программы испытаний; $v'_{2.3}$ – нарушения при проведении транспортно-технологических операций; $v'_{2.4}$ – нагрузки, приводящие к избыточным деформациям кранового пути; $v'_{3.1}$ – деформация оболочки на горизонте консолей кранового пути в период монтажа, испытаний ККД; $v'_{3.2}$ – деформация оболочки на горизонте консолей кранового пути в процессе преднапряжения; $v'_{3.3}$ – деформация оболочки на горизонте консолей кранового пути в процессе испытания ЗГО; $v'_{4.1}$ – нарушения технологии преднапряжения ЗГО; $v'_{5.1}$ – нарушения программы испытаний.

К началу непосредственной эксплуатации энергоблока внутренние параметры элементов системы представляют собой множество H^0 . Сюда входят конструктивные параметры ($r_{внеш}$, $r_{внут}$ – внешний и внутренний радиусы ЗГО; δ_i – толщина цилиндрической стенки ЗГО в контрольных точках; физико-механические характеристики материалов конструкции ЗГО) и режимные параметры ($\Delta p_{исп}$ – величина избыточного давления испытательной среды при испытаниях ЗГО на прочность; $\Delta p_{ас}$ – прогнозируемая величина избыточного давления среды при проектной АС, которое ЗГО способна выдержать; параметры напряженно-деформированного состояния ГО в контрольных точках; усилия в арматурных канатах системы преднапряжения защитной оболочки; нагрузки от ККД). Диапазон значений параметров должен соответствовать проектным допускам, которые определяются с

учетом внешних расчетных воздействий (РВ), принятых во внимание при проектировании. Ограничения на параметры заданы выражением:

$$\eta_i(h_i^0) \leq 0, \quad i = \overline{1, w}; \quad h_i^0 \in H^0 \quad (2)$$

где w – количество ограничений на параметры объекта.

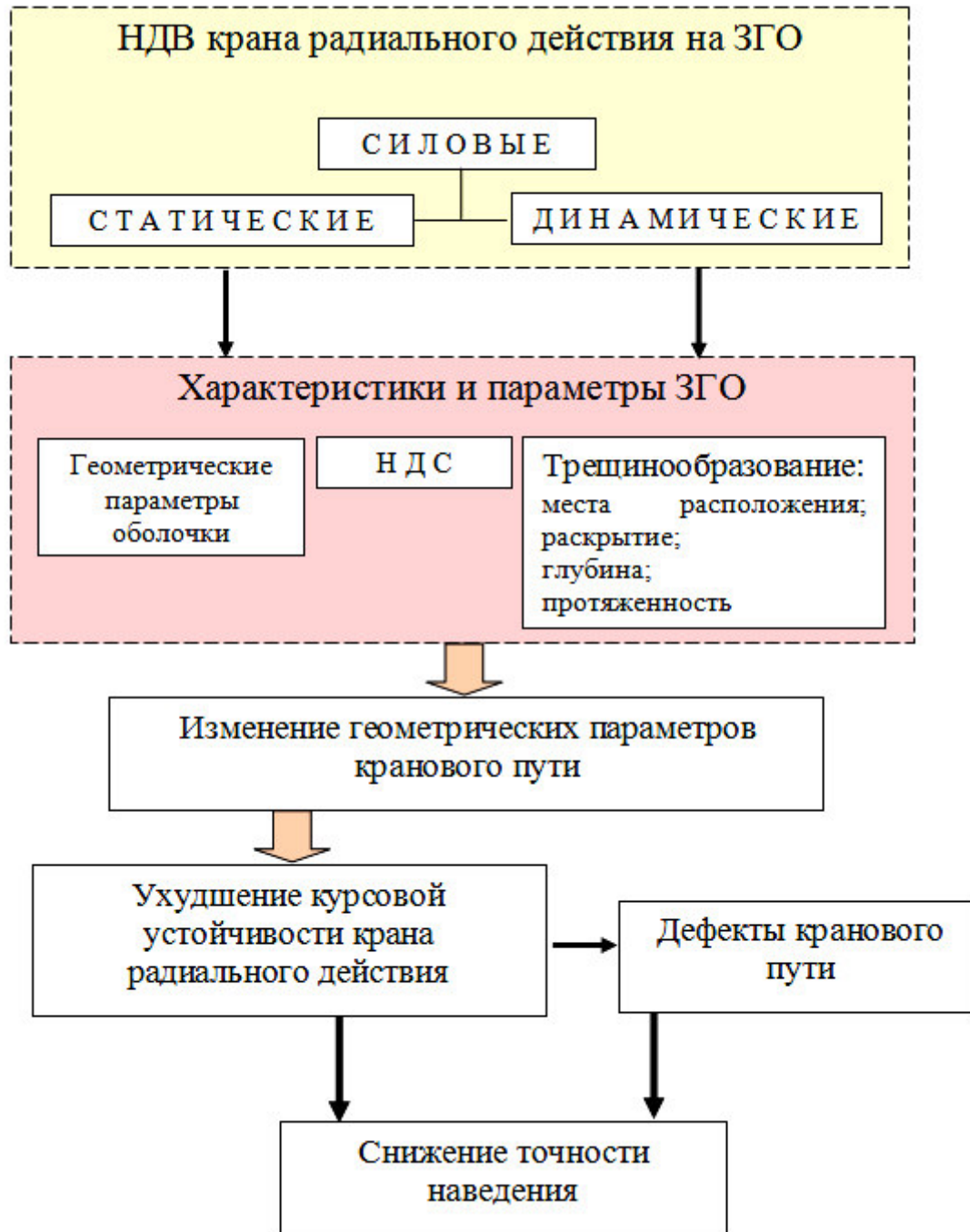


Рис. 1. – Порядок деструктивных воздействий и их последствия для комплекса ЯТ – технологическое оборудование (ТО) реакторного отделения – ЗГО

Реальные значения внутренних параметров (множество H) могут отличаться от результатов проектирования, а точнее, находиться вне допуска. Как уже отмечалось,

необходимо получить как можно более полные и достоверные сведения о параметрах элементов исследуемого объекта, достигнутых в процессе реализации проектных решений при возведении гермооболочки и монтаже ПТС РО. Чтобы избежать разночтения, а также добиться обязательного выполнения работ по инструментальному контролю в требуемом объеме необходимо разработать и утвердить в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору единые стандартные программы:

1) Программу инструментального контроля строительных конструкций защитной оболочки энергоблока АЭС с ВВЭР в период возведения, преднапряжения, приёмодаточных испытаний и эксплуатации.

2) Программу входного контроля геометрических параметров ходовой части крана радиального действия и оценка их соответствия проектным решениям.

3) Программу комплексного обследования рельсового пути крана радиального действия в период монтажа и эксплуатации.

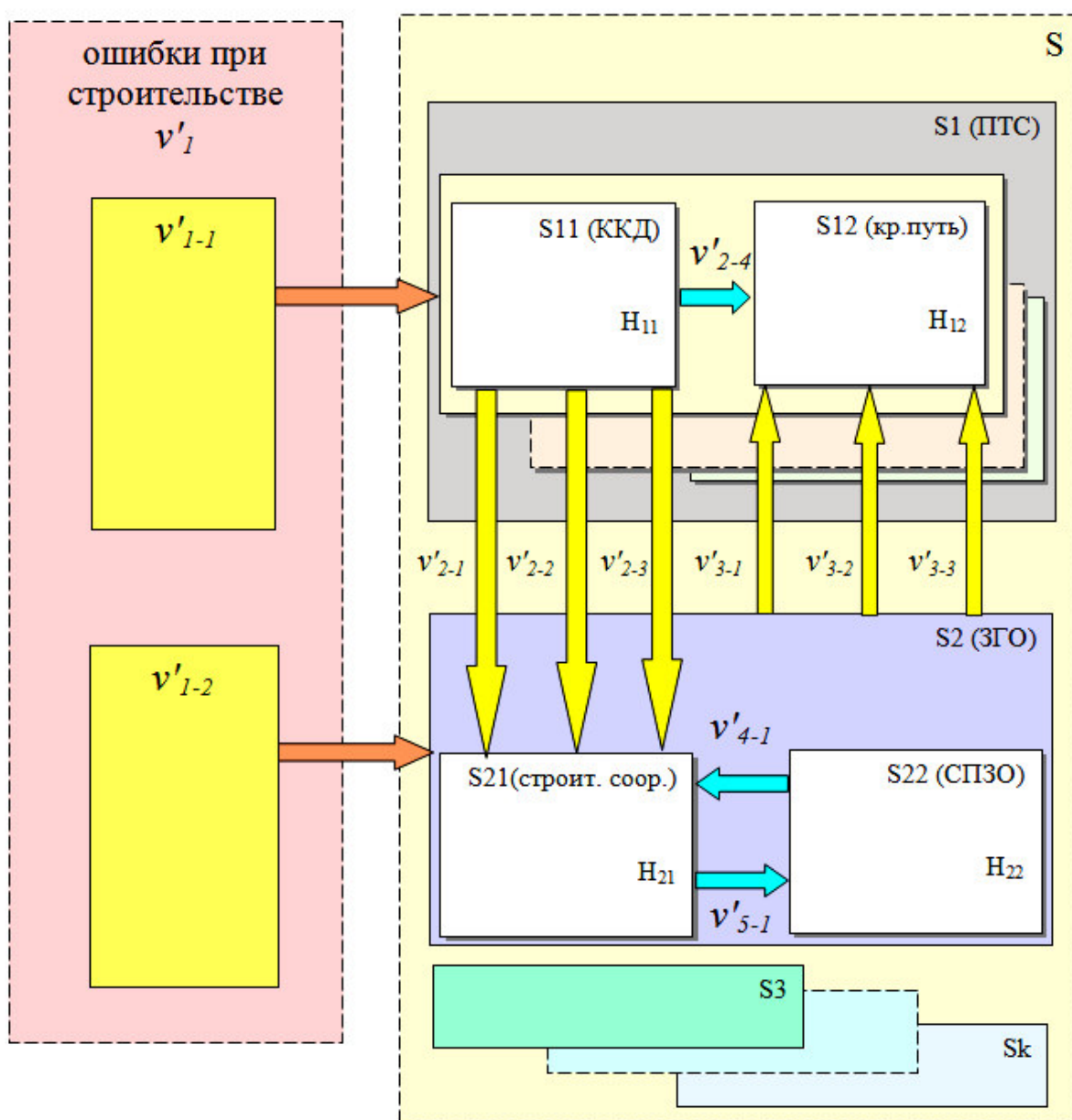


Рис. 2. – Схема НДВ в период строительства и испытаний

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Острейковский, В.А. и др.* Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. [Текст] / В.А. Острейковский, Ю.В. Швыряев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 352 с.
2. *Губеладзе, О.А.* Исследование эффективности системы физической защиты ядерноопасных объектов [Текст] / О.А. Губеладзе // Изв. вузов. Сев. – Кавк. регион. Техн. науки. – 2008. – Спецвыпуск. – С. 127–129.
3. *Пимшин, Ю.И. и др.* Влияние крана кругового действия на техническое состояние строящейся защитной оболочки АЭС [Текст] / Ю.И. Пимшин, Е.Б. Ключин, О.А. Губеладзе, В.Н. Медведев, С.М. Бурдаков, Ю.В. Заяров // Глобальная ядерная безопасность. – 2016.– №2. – С. 33–42.
4. НП–010–16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций». Приказ Ростехнадзора от 24.02.2016 №70 (ред. от 17.01.2017) [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». – Режим доступа: URL: http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_196163/ – 27.08.2017.
5. НП–043–11. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии". Приказ Ростехнадзора от 30.11.2011 №672 (ред. от 19.11.2013) [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». – Режим доступа: URL: http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125802/4c55d1a30b908c9a13add7e2e5976ffbd97f4b4e/ – 27.08.2017.

REFERENCES

- [1] Ostreykovskiy V.A., Shvyryaev Yu.V. Bezopasnost atomnykh stantsiy. Veroyatnostnyy analiz [Safety of Nuclear Power Plants. Probability Analysis.]. M. Pub. "FIZMATLIT" [physical and mathematical literature publishing house], 2008, 352 p. (in Russian)
- [2] Gubeladze O.A. Issledovanie effektivnosti sistemy fizicheskoy zashchity yadernoopasnykh ob'ektov [Research of System Effectiveness of Nuclear-Dangerous Object Physical Protection]. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazsky region. Tehnicheskiye nauki. [Scientific and Educational Applied Journal. University News of North-Caucasian Region. Technical Science Series], 2008, Special issue, ISSN 0321-3005, pp.127–129. (in Russian)
- [3] Pimshin Yu.I., Klyushin E.B., Gubeladze O.A., Medvedev V.N., Burdakov S.M., Zayarov Yu.V. Vliyanie krana krugovogo deystviya na tekhnicheskoe sostoyanie stroyashcheysya zashchitnoy obolochki AES [Influence of Circular Action Crane on Technical Condition of the NPP Constructing Tight Cover]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №2(19), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 33–42. (in Russian)
- [4] NP–010–16. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii «Pravila ustroystva i ekspluatatsii lokalizuyushchikh sistem bezopasnosti atomnykh stantsiy». Prikaz Rostekhnadzora ot 24.02.2016 №70 (red. ot 17.01.2017). [Federal Standards and Rules of Atomic Energy Use "The Rule of the Device and Operation of the Localizing Security Systems of Nuclear Power Plants". Order of Rostekhnadzor , 24.02.2016 №70 (edition of 17.01.2017)]. Ofitsial'nyy sayt kompanii «Konsul'tant Plyus» [Official site of the Consultant Plus Company], 2017. Available at: https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_196163/ – 27.08.2017. (in Russian)
- [5] NP–043–11. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii gruzopod'emnykh kranov dlya ob'ektov ispol'zovaniya atomnoy energii". Prikaz Rostekhnadzora ot 30.11.2011 №672 (red. ot 19.11.2013). [Federal Standards and Rules of Atomic Energy Use "Rules for the Construction and Safe Operation of Load-Lifting Cranes for subjects of Atomic Energy Use ". Order of Rostekhnadzor, 30.11.2011 №672 (edition of 19.11.2013)]. Ofitsial'nyy sayt kompanii «Konsul'tant Plyus» [Official site of the Consultant Plus Company], 2017. Available at: http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125802/4c55d1a30b908c9a13add7e2e5976ffbd97f4b4e/ – 27.08.2017. (in Russian)

Definition of Geometrical, Physical and Mechanical Characteristics of the NPP Power Unit Elements and Their Use as Input Data for the Safety Probability Analysis

O.A. Gubeladze^{*1}, A.R. Gubeladze^{*2}, S.M. Burdakov^{**3}

* *Don State Technical University*

Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000

¹*e-mail: buba26021966@yandex.ru*

ORCID iD: 0000-0001-6018-4989

WoS ResearcherID: F-6921-2017;

²*e-mail: buba26021966@yandex.ru*

ORCID iD: 0000-0002-6966-6391

WoS ResearcherID: F-7215-2017 ;

** *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",*

Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

³*e-mail: SMBurdakov@mephi.ru*

ORCID iD: 0000-0002-8599-6008

WoS ResearcherID: F-6903-2017

Abstract – Lifting and transport systems (LTS) of the reactor compartment (RC) are considered as an element of the "nuclear fuel - technological equipment of the reactor compartment - protective pressure-tight shell (PPHTS)" complex when solving the safety problems of nuclear power plants. It should be noted that being elements of the power unit, LTS RC and PHC make immediate impact at each other both at a construction stage, and during immediate operation. Actual values of internal parameters of the constructed power unit can differ from results of projection.

The objective of work is to research possibility of indeterminacy elimination in the probability analysis of the NPP power unit with WWER safety by receiving the fullest and reliable object parameters data reached during design decision implementation at construction of a containment and installation of lifting and transport systems of the reactor compartment.

Keywords: protective pressure-tight shell, radial action crane, safety probability analysis, independent destructive influences.