

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ПОДВЕСОК ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Я.В. Глазюк¹

yvglazyuk@rosatom.ru

В.Ю. Попов²

popov@cae-fidesys.com

М.Ю. Федоров³

fedorov@vosafety.ru

Е.А. Капустин⁴

kapustinea@sialuch.ru

¹ АО «НИКИЭТ», Москва, Российская Федерация

² ООО «Фидесис», Москва, Российская Федерация

³ АО «ВО «Безопасность», Москва, Российская Федерация

⁴ АО «НИИ НПО «ЛУЧ», г. Подольск, Московская обл.,

Российская Федерация

Аннотация

Приведены технические решения, результаты расчетного экспериментального обоснования прочности и сейсмостойкости высокотемпературных подвесок ионизационных камер систем управления и защиты реакторов в условиях нормальной эксплуатации, а также при наложении на нагрузки эксплуатационного режима сейсмического воздействия максимального расчетного землетрясения. Расчетное обоснование прочности при одновременном действии статических и сейсмических нагрузок выполнено методом конечных элементов в программном коде Fidesys для среды Windows, аттестованном ФБУ «НТЦ ЯРБ» (аттестационный паспорт 573 от 05.12.2022). Экспериментальные исследования прочности и стойкости конструкции к сейсмическим воздействиям проводились на стендовой базе АО «НИКИЭТ». В результате выполненных расчетных и экспериментальных работ определено, что значения напряжений в корпусных элементах подвески ионизационной камеры не превышают допустимого уровня, а электрические параметры остаются в пределах, установленных для нормальной эксплуатации. Таким образом, обоснованы конструкторско-компоновочные решения проекта высокотемпературных подвесок

Ключевые слова

Аппаратура, ионизационная камера, колебания, реактор, прочность, сейсмостойкость

ионизационных камер. Методики и результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании и постановке на производство аналогичных по назначению и условиям эксплуатации изделий атомной техники

Поступила 24.04.2024

Принята 16.01.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. Широкое внедрение в ядерную энергетику реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями с использованием в топливном цикле изотопа урана 238 и образованием нового ядерного горючего плутония 239 может обеспечить человечество энергией на сотни лет, поскольку запасы природного урана в недрах Земли оцениваются в 14 млн т [1–8].

Особенностью быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем является высокая температура конструкции, которая достигает 600 °С в первом контуре реакторной установки (РУ).

Высокие рабочие температуры характерны и для зон размещения измерительных каналов реактора, в которых находятся подвески ионизационных камер (ПИК) систем управления и защиты (СУЗ). В конструкционных материалах элементов реактора и ПИК (жаростойкие, жаропрочные стали аустенитного класса) при температурах более 450 °С развивается явление высокотемпературной ползучести, что требует расчета на длительную статическую прочность [9–11] от действия эксплуатационных нагрузок в сочетании с сейсмическими нагрузками, характерными для площадок размещения РУ [12–14].

Цель настоящей работы — обоснование работоспособности конструкции высокотемпературной ПИК при действии механических нагрузок эксплуатационного режима с наложением сейсмического воздействия максимального расчетного землетрясения. Для достижения поставленной цели решены задачи методического обеспечения расчетов на прочность и испытаний на сейсмостойкость.

Высокотемпературная ПИК, конструкция и условия эксплуатации. Конструкция экспериментальной высокотемпературной ПИК (рис. 1) представляет собой жесткий герметичный корпус (ЖГК), составленный из отрезков трубы наружным диаметром 70 мм, соединенных между собой сваркой через проставки. В нижней зоне подвески длиной 1170 мм, где размещается ионизационная камера (ИК) для повышения чувствительности, толщина стенки составляет 1,5 мм. Остальная часть ЖГК имеет толщину стенки 2 мм. Ионизационная камера имеет форму цилиндра длиной 750 мм и диаметром 60 мм.

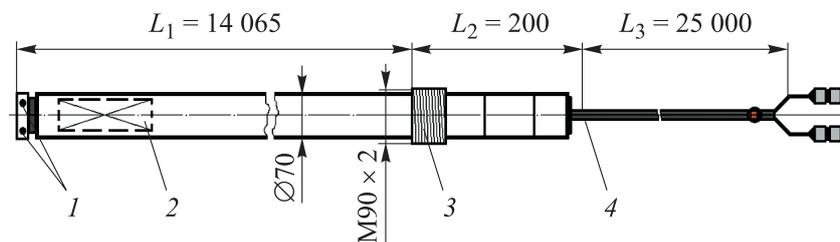


Рис. 1. Схема ПИК:

1 — опора; 2 — ИК; 3 — узел крепления; 4 — кабель

Внутри ЖГК проложен радиационно стойкий кабель линии связи, размещены два узла биологической защиты: один — в верхней части (ниже узла крепления), а другой — в центральной части ПИК. Биологическая защита выполнена из стали и карбида бора.

К механизму перемещения в измерительном канале реактора ПИК крепится на резьбе в верхней части ЖГК.

Основной материал конструкции ЖГК — стойкая к радиационному воздействию сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т, масса подвески не более 120 кг.

Подключение ПИК к аппаратуре регистрации нейтронного потока осуществляется радиационно стойким кабелем.

Условия эксплуатации подвески характеризуются следующими параметрами: температура в зоне размещения ПИК $t = 550 + 50$ °С; ресурс 60 000 ч; внутреннее избыточное давление в рабочих условиях $p = 1,0$ МПа; высота крепления (установки) ПИК 50 м.

Подвеска ИК относится к оборудованию 2-го класса безопасности атомной энергетической установки (АЭУ) в соответствии с НП-001-15¹ и к категории I сейсмостойкости по НП-031-01².

Подвеска должна сохранять свою работоспособность в условиях проектного землетрясения (ПЗ) и максимального расчетного землетрясения (МРЗ) интенсивностью 8 баллов по шкале MSK 64 [12]. В международной практике аналог МРЗ обозначается как SL-2³, а в более ранних документах

¹ НП-001-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций». М., Госатомнадзор России, 2015.

² НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. М., Госатомнадзор России, 2001.

³ Серия норм безопасности МАГАТЭ № SSG-67.

как SSE (Safe Shutdown Earthquake) «Землетрясение безопасного останова»⁴, что соответствует приведенному требованию.

Методические основы расчетного и экспериментального обоснования прочности и сейсмостойкой ПИК. Обоснование прочности и сейсмостойкости ПИК состоит из расчетного и экспериментального этапов.

Расчеты на прочность ПИК как оборудования, функционирующего в составе АЭУ, выполняются в соответствии с нормами ПНАЭ Г-7-002–86⁵ и включают в себя расчеты на статическую и длительную статическую прочность в условиях действия нагрузок нормальной эксплуатации (НЭ), на действие нагрузок сейсмического воздействия, а также на сочетание нагрузок НЭ и сейсмических нагрузок.

Сейсмическое воздействие на ПИК при расчете задается спектром ответа в точке фиксации ПИК в механизме перемещения к измерительному каналу реактора. Спектры ответа принимаются в соответствии с ГОСТ 17516.1–90Е⁶ и ГОСТ 29075–91⁷ для МРЗ интенсивностью 8 баллов на отметке 50 м. При этом ось z направлена вдоль продольной оси ПИК, а оси x и y — перпендикулярно продольной оси. В условиях НЭ подвеска располагается в измерительном канале реактора, при длине изделия 14 м зазор между ПИК и стенкой канала составляет 1,5 мм.

Для дальнейшего анализа принимается идеальная схема, при которой зазор между стенкой канала и подвеской при отсутствии внешних воздействий сохраняется по всей длине, тогда реализуется расчетная схема в форме балки с заделкой на одном конце (резьбовое крепление) и с подвижной опорой на другом. Опора организована в виде четырех сфер, расположенных равномерно по окружности (шариковый дистанционатор).

В этом случае поперечное (горизонтальное) сейсмическое воздействие всегда будет приводить к исчерпанию зазора сначала в одной, а затем в нескольких точках по длине измерительного канала и к возникновению

⁴ SSS no. NS-G-3.3. Evaluation of seismic hazards for nuclear power plants. Vienna, IAEA, 2002.

⁵ ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М., Госатомэнергонадзор СССР, Энергоатомиздат, 1989.

⁶ ГОСТ 17516.1–90Е. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам. М., Стандартинформ, 2007.

⁷ ГОСТ 29075–91. Системы ядерного приборостроения для атомных станций. Общие требования. М., ИПК Изд-во стандартов, 2004.

новой расчетной модели с некоторым числом промежуточных точек контакта ПИК со стенкой канала. Следовательно, будут меняться деформированное состояние и напряжения в ЖГК ПИК.

Рассмотрим экспериментальную часть обоснования прочности и сейсмостойкости ПИК.

В целях сокращения сроков испытаний, оптимизации расходов на изготовление приспособлений и транспортировку изделия экспериментальные работы проводились на стендовой базе АО «НИКИЭТ».

При использовании имеющейся стендовой базы, состоящей из типового вибростенда, ударного стенда и регистрирующей аппаратуры, сейсмическое воздействие на объект можно моделировать эквивалентными по энергии вибрационными и ударными нагрузками. Но в то же время планировка производственного помещения испытательной лаборатории не позволяла провести испытания изделия длиной 14 м.

Принято техническое решение, заключающееся в том, что испытаниям на сейсмостойкость подвергаются три автономных блока ПИК.

Такое решение устранило проблему с габаритными размерами изделия и позволило учесть, что спектры ответа меняются по высоте АЭУ, а значит, и по длине подвески. Например, в зоне размещения ИК спектр ответа характеризуется меньшими ускорениями, чем в зоне закрепления ПИК на отметке 50 м.

Результаты расчета на прочность высокотемпературной ПИК.

В условиях НЭ в корпусе ПИК от внутреннего избыточного давления $p = 1,0$ МПа возникают окружные и осевые напряжения. Осевые напряжения возникают и от массы. Рабочая температура ЖГК достигает 600 °С, т. е. корпус работает в условиях ползучести. В этом случае требуется выполнение условия длительной статической прочности (ПНАЭ Г-7-002-86) помимо условия статической прочности.

В результате расчета получены следующие значения окружных σ_φ и меридиональных σ_x напряжений в ЖГК:

$$-\sigma_\varphi = 17,5 \text{ МПа}, \sigma_x = 8,75 \text{ МПа для трубы } 70 \times 2 \text{ мм};$$

$$-\sigma_\varphi = 23,3 \text{ МПа}, \sigma_x = 11,7 \text{ МПа для трубы } 70 \times 1,5 \text{ мм}.$$

Напряжения в ЖГК на режиме НЭ существенно меньше номинальных допускаемых напряжений $[\sigma] = 80,6$ МПа (согласно ПНАЭ Г-7-002-86).

Следовательно, статическая и длительная статическая прочности обеспечены.

При сейсмическом воздействии на реакторную установку ПИК совершает колебания в вертикальном и поперечном направлениях, которые ограничены зазором в измерительном канале реактора.

За счет ограничения горизонтальных колебаний стенкой измерительного канала реактора подвеску можно отнести к классу систем с нелинейными характеристиками жесткости, применительно к таким системам отсутствует понятие резонанса в обычном понимании, как для линейных систем, что осложняет задачу исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) корпуса ПИК и требует задания дополнительных условий.

В настоящей работе анализ компонентов НДС корпуса ПИК выполнен методом конечных элементов [15–17] при использовании вычислительных возможностей отечественного программного кода Fidesys [18–21], предназначенного для решения задач динамики и прочности конструкций.

В табл. 1 приведен спектр ответа (ГОСТ 17516.1–90Е и ГОСТ 29075–91) для землетрясения на отметке 50 м интенсивностью 8 баллов по шкале MSK-64.

Таблица 1

Спектр ответа

Частота f , Гц	Ускорение, м/с ²		
	a_x	a_y	a_z
0	0	0	0
4	58,75	58,75	41,13
8,5	51,25	51,25	35,88
10	46,25	46,25	32,38
11	33,75	33,75	23,63
17,5	32,50	32,50	22,75
30	21,25	21,25	14,88
1000	21,25	21,25	14,88

Конечно-элементная [19] модель корпуса ПИК, состоящая из 37 488 оболочечных элементов 1-го порядка (37 824 узла), приведена на рис. 2. Канал принят как абсолютно жесткий. Модель нагружена внутренним давлением 1 МПа и собственной массой вдоль продольной оси.

С учетом ограничения поперечных перемещений в измерительном канале расчет проводится линейно-спектральным методом (ЛСМ) с применением следующего алгоритма.

К модели прикладывается нагрузка, задаваемая спектром ответа без учета ограничений по перемещению (рис. 3).

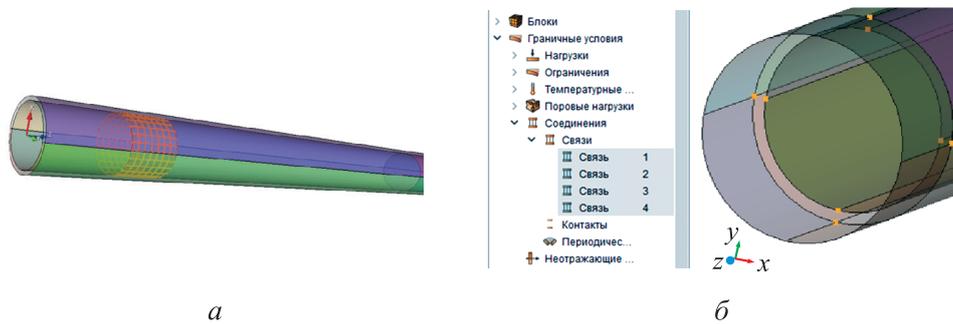


Рис. 2. Конечно-элементная модель корпуса ПИК:

а — жесткое закрепление (сетка); *б* — связи, зона подвижной опоры

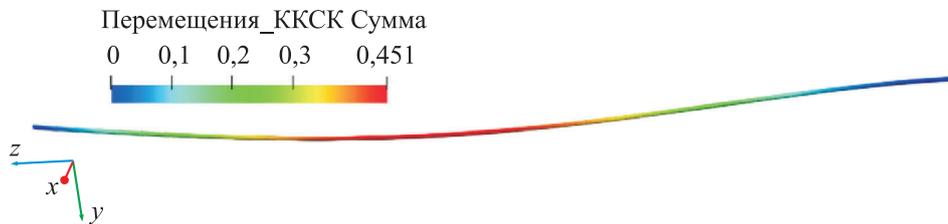


Рис. 3. Деформированное состояние модели (прогиб в метрах)

Точка максимального прогиба перемещается до условного касания противоположной поверхности канала, где задается подвижная шарнирная опора. Новая схема вновь нагружается от спектра ответа при реализации ЛСМ, с новыми точками максимального прогиба выполняется такая же процедура вплоть до состояния, когда прогиб модели в очередной точке максимального прогиба не составит менее двух зазоров, т. е. 3 мм.

Два промежуточных и конечное деформированные состояния модели в процессе расчета приведены на рис. 4, максимальные напряжения в корпусе ИК — на рис. 5.

Комбинацией ЛСМ с последовательным заданием дополнительных условий в процессе расчета получено НДС корпуса ПИК при действии сейсмической нагрузки. Максимальные напряжения в конструкции не превышают предела упругости для материала изделия. Прочность ЖГК изделия на режимах НЭ + ПЗ, НЭ + МРЗ обеспечена.

Экспериментальное обоснование прочности и стойкости ПИК при сейсмическом воздействии. Испытаниям на прочность и стойкость к сейсмическому воздействию подвергались составные части ПИК: узлы соединения герметичных линий связи длиной 2220 мм, внешней линии связи длиной 1460 мм, установки (размещения) и коммутации ИК длиной 1782 мм.

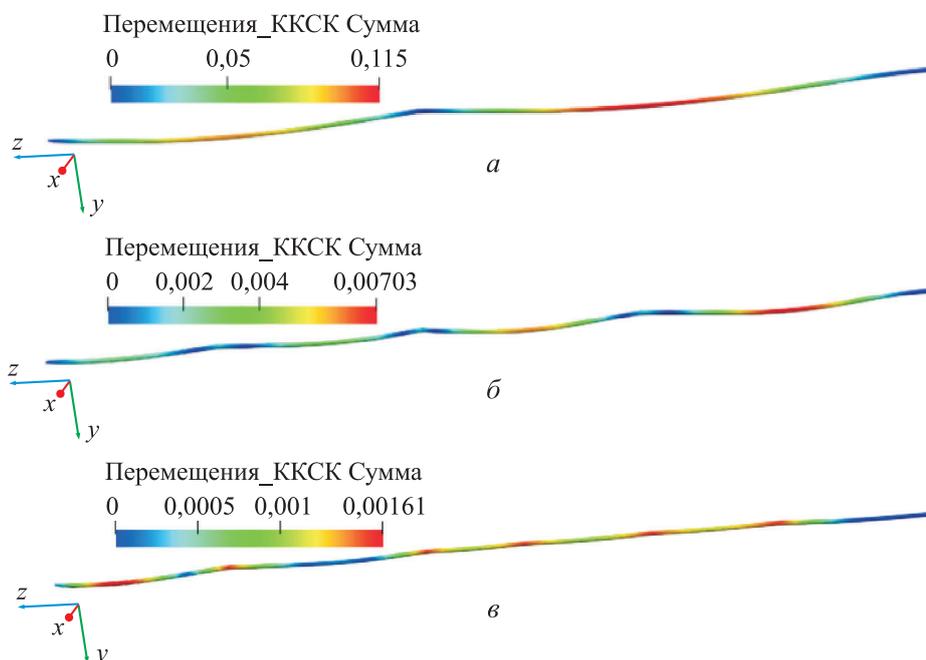


Рис. 4. Промежуточные (а, б) и конечное (в) деформированные состояния модели

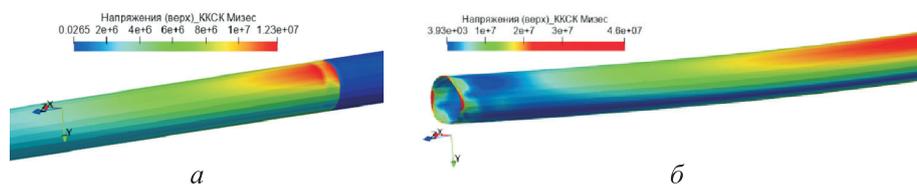


Рис. 5. Максимальные напряжения в корпусе ИК:

а — верхний край (заделка), $\sigma = 12,3$ МПа; б — нижний край (опора), $\sigma = 46$ МПа

Конструктивные схемы испытываемых узлов приведены на рис. 6. Испытания проводились на электродинамическом вибростенде ВЭДС-1500, снабженном системой управления ВС 207.4, и ударном стенде STt-500. Воздействие на испытываемые узлы задавались в виде спектров ответа.

Для узла соединения герметичных линий связи и узла соединения внешней линии связи спектр ответа приведен на рис. 7, а (спектр № 1). Коэффициент демпфирования в этом случае принимался 3 %.

Для узла установки и коммутации ИК спектр ответа приведен на рис. 7, б (спектр № 2). Спектры ответа для объектов испытаний приняты в соответствии с высотным расположением на АЭУ.

Испытания проводились в следующей последовательности: вибронагружение на вибростенде ВЭДС-1500 до момента достижения макси-

мальных виброускорений, а затем ударное нагружение на стенде STt-500 с ускорением (18–20)g.

Для испытаний узлов ПИК в продольном и двух поперечных направлениях использовалось специальное приспособление.

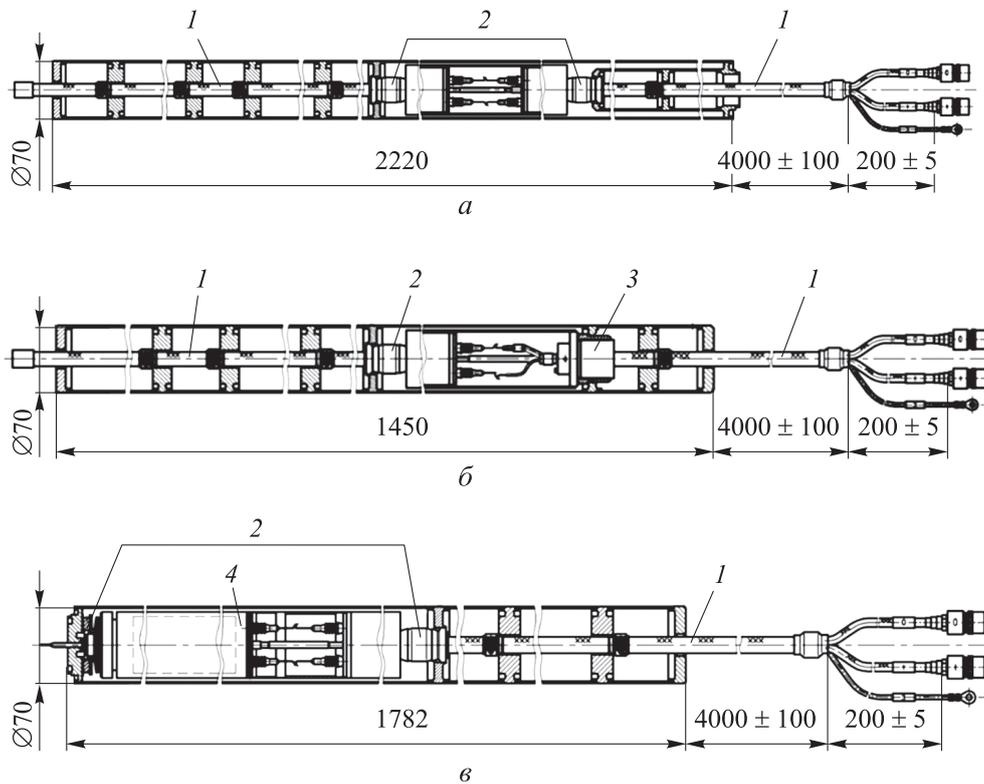


Рис. 6. Конструктивные схемы испытуемых узлов соединения герметичной (а) и внешней (б) линий связи, узел установки и коммутации ИК (в):
 1 — кабель линии связи; 2 — изолирующий металлокерамический узел;
 3 — изолирующий узел; 4 — ИК

Конструкция приспособления состоит из двух швеллеров № 16 длиной 2400 мм, соединенных в положении стенка к стенке. На полках швеллеров с одной стороны приварена труба, имитирующая измерительный канал РУ, а на полках с обратной стороны и на торцах швеллеров приварены фланцы для крепления приспособления к стенду. Масса приспособления 110 кг.

Испытуемые узлы ПИК поочередно устанавливали на приспособление и закрепляли хомутами. Для нагружения объектов испытаний в продольном направлении приспособление вывешивалось с помощью четырехветвевоего стропа на подвижной ручной тали силового портала, а вибростол

стенда ВЭД-1500 поворачивался на 90° в горизонтальное положение. Для виброиспытаний в поперечном направлении вибратор ВЭД-1500 переводился в вертикальное положение. Контроль положения приспособления обеспечивался с помощью рамного уровня Л-324.

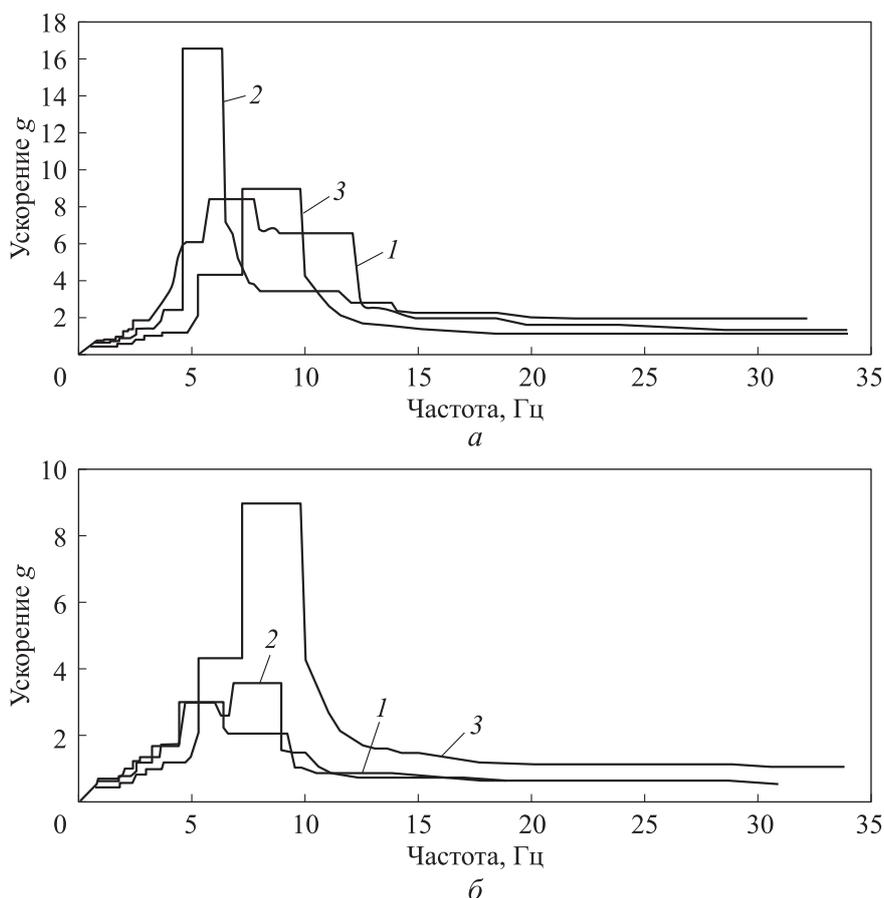


Рис. 7. Спектры ответов № 1 (а) и № 2 (б) при испытаниях трех составных частей ПИК:

1–3 — воздействие по осям x , y , z соответственно

Для разгрузки стола вибростенда приспособление устанавливалось на специальные планки. На крюке ручной тали приспособление с объектом испытаний вывешивалось четырехветвевым стропом, а в случае испытаний в поперечном направлении — с помощью амортизатора грузоподъемностью не менее 3 кН.

Схемы размещения приспособления при испытаниях на вибростенде приведены на рис. 8, режимы испытаний узлов — в табл. 2.

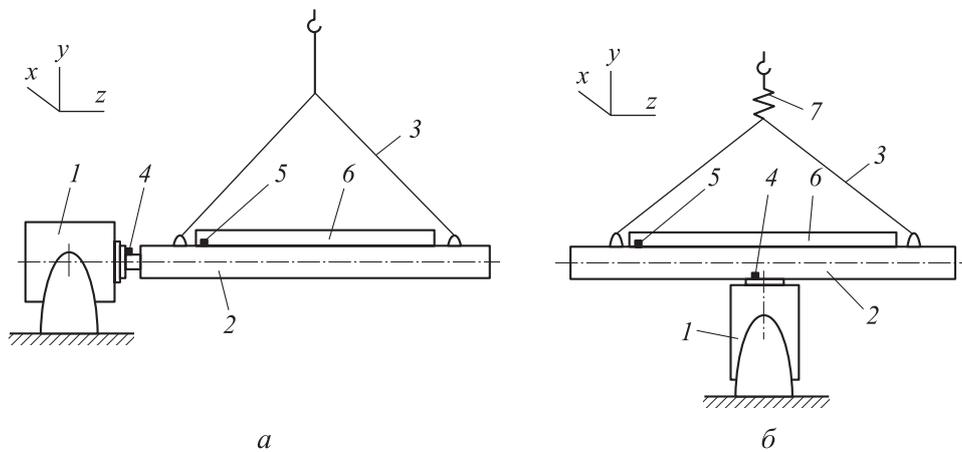


Рис. 8. Схемы установок виброиспытаний составных частей ПИК в продольном (а) и поперечном (б) направлениях:

1 — вибростенд (вибратор); 2 — приспособление для испытаний; 3 — четырехветвевой стrop; 4 — управляющий вибродатчик; 5 — мониторинговый вибродатчик; 6 — объект испытаний; 7 — амортизатор

Таблица 2

Режимы испытаний узлов ПИК

Параметр	Направление	
	продольное, ось z	поперечное, равнодействующая по осям x, y
Частота, Гц	10–35	10–35
Виброускорение g	1–9	1–10
Скорость развертки, октава/мин	1	
Число проходов	3	
Продолжительность испытаний, мин	5	

Параметры испытаний задавались автоматически и поддерживались системой управления вибрацией ВС-207.4.

Ударные испытания проводились для узла соединения герметичных линий связи и узла соединения внешней линии связи. Приспособление выставлялось и закреплялось на столе ударного стенда STt-500 в горизонтальном положении. Режим нагружения: ударное ускорение 18g, длительность ударного импульса 8,5 мкс.

В процессе вибрационных и ударных испытаний контролировали электрические параметры узлов ПИК, а именно, электрическую емкость, электрическое сопротивление изоляции, выходной ток ИК. По окончании

каждого этапа испытаний проводилось контрольное измерение электрических параметров с помощью комплекса «Автотест-М» [22].

Результаты измерений электрических параметров при испытаниях на сейсмостойкость узлов ПИК не изменились и соответствовали требованиям технического задания. По результатам внешнего осмотра механических повреждений испытываемых узлов и приспособления не обнаружено.

Заключение. Приведена общая методика расчетного и экспериментального обоснования прочности, устойчивости к сейсмическим воздействиям конструкции высокотемпературных ПИК систем управления и защиты реакторов на быстрых нейтронах в условиях НЭ, а также при наложении на нагрузки эксплуатационного режима сейсмических нагрузок МРЗ.

Выполнены расчеты напряжений в протяженной конструкции ЖГК ПИК при стесненном деформировании в измерительном канале реактора под действием сейсмических нагрузок поперечного направления.

В части организации экспериментального обоснования прочности и стойкости ПИК к внешним механическим воздействиям можно применять универсальное испытательное оборудование для изделия большой длины с моделированием сейсмического воздействия, эквивалентного по энергии вибрационным и ударным нагрузкам.

Результаты, приведенные в настоящей работе, применяются при разработке ПИК для действующих реакторов на быстрых нейтронах и могут быть использованы при конструировании аналогичных высокотемпературных изделий для перспективных реакторных установок.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александров А.П. Атомная энергетика и научно-технический прогресс. М., Наука, 1978.
- [2] Меррей Р. Атомная энергетика. М., Энергия, 1979.
- [3] Морохов И.Д., ред. Атомной энергетике XX лет. М., Атомиздат, 1974.
- [4] Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М., Энергоатомиздат, 1990.
- [5] Афров А.М., Андрушечко С.А., Украинцев В.Ф. и др. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность. М., Университетская книга, Логос, 2006.
- [6] Андрушечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. М., Логос, 2010.

- [7] Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. М., Энергоатомиздат, 1988.
- [8] Селезнев Е.Ф. Кинетика реакторов на быстрых нейтронах. М., Наука, 2013.
- [9] Голденблат И.И., Бажанов В.Л., Копнов В.А. Длительная прочность в машиностроении. М., Машиностроение, 1977.
- [10] Локощенко А.М. Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов. М., МГИУ, 2007.
- [11] Шестириков С.А., Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. *Итоги науки и техники. Сер. Механика деформируемого твердого тела*, 1980, т. 13, с. 3–104.
- [12] Ананьев А.Н., Казновский П.С., Казновский С.П. и др. Сейсмическая безопасность атомных станций. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
- [13] Бугаев Е.Г., Бедняков В.Г., Гусельцев А.С. и др. Учет внешних природных и техногенных воздействий на площадках размещения объектов использования атомной энергии. *Ядерная и радиационная безопасность*, 2012, спец. вып., с. 28–45.
- [14] Бугаев Е.Г., Кишкина С.Б. Оценка долговременной и текущей сейсмической опасности площадок объектов использования атомной энергии на основании материалов инженерных изысканий. *Ядерная и радиационная безопасность*, 2018, № 3, с. 1–13.
- [15] Сегерлинд Л. Дж. Применение метода конечных элементов. М., Мир, 1979.
- [16] Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М., Мир, 1975.
- [17] Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М., Мир, 1981.
- [18] Левин В.А. Модели и методы. Образование и развитие дефектов. М., ФИЗМАТЛИТ, 2015.
- [19] Левин В.А., Вершинин А.В. Численные методы. Параллельные вычисления на ЭВМ. М., ФИЗМАТЛИТ, 2015.
- [20] Левин В.А., Зингерман К.М. Точные и приближенные аналитические решения при конечных деформациях и их наложении. М., ФИЗМАТЛИТ, 2016.
- [21] Василевский Ю.В., Данилов А.А., Литников К.Н. и др. Автоматизированные технологии построения неструктурированных расчетных сеток. М., ФИЗМАТЛИТ, 2016.
- [22] Алексаков Г.Н., Захарова В.В., Николаев Е.В. Аппаратно-программный комплекс для поддержки метрологических служб АЭС. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов*, 2005, № 49-2, с. 42–48.

Глазюк Яков Вадимович — заместитель генерального директора, главный конструктор аппаратуры контроля нейтронно-физических параметров АО «НИКИЭТ» (Российская Федерация, 107140, Москва, пл. Академика Доллежала, д. 1, корп. 3).

Попов Вячеслав Юрьевич — руководитель направления внедрения и технического сопровождения разработок ООО «Фидесис» (Российская Федерация, 119234, Москва, территория Ленинские горы, д. 1, стр. 75).

Федоров Михаил Юрьевич — канд. техн. наук, главный эксперт департамента экспертизы и оценки безопасности объектов использования атомной энергии АО «ВО «Безопасность» (Российская Федерация, 109147, Москва, Таганская ул., д. 34А).

Капустин Евгений Александрович — начальник группы АО «НИИ НПО «ЛУЧ» (Российская Федерация, 142103, Московская обл., г. Подольск, Железнодорожная ул., д. 24).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Глазюк Я.В., Попов В.Ю., Федоров М.Ю. и др. Расчетное и экспериментальное обоснование прочности и сейсмостойкости подвесок ионизационных камер в системах управления и защиты реакторов на быстрых нейтронах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 3 (154), с. 112–128.

EDN: QDDMYW

**COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION
OF STRENGTH AND SEISMIC RESISTANCE
OF THE IONIZATION CHAMBER SUSPENSIONS
IN THE CONTROL AND PROTECTION SYSTEMS
OF FAST NEUTRON REACTORS**

Ya.V. Glazyuk¹

V.Yu. Popov²

M.Yu. Fedorov³

E.A. Kapustin⁴

yvglazyuk@rosatom.ru

popov@cae-fidesys.com

fedorov@vosafety.ru

kapustinea@sialuch.ru

¹ JSC “NIKIET”, Moscow, Russian Federation

² LLC “Fidesys”, Moscow, Russian Federation

³ JSC “VO “Safety”, Moscow, Russian Federation

⁴ JSC “NII NPO “LUCH”, Podolsk, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

The paper presents technical solutions, results of computational and experimental substantiation of strength and seismic resistance of the ionization chamber high-temperature suspensions in the reactor control and protection systems under the normal operating conditions, as well as under a seismic impact of the maximum computed earthquake on the operating mode

Keywords

Equipment, ionization chamber, vibrations, reactor, strength, seismic resistance

load. Strength under simultaneous action of the static and seismic loads is substantiated computationally by the finite element method in the Fidesys software code for the Windows environment certified by the FSBI “STC NRS” (Approval Certificate no. 573 dated 05.12.2022). Experimental studies of the design strength and resistance to seismic effects were carried out on the JSC “NIKIET” test bench. As a result of computation and experiments, it was found that stress values in the housing elements of the ionization chamber suspension were not exceeding the permissible level; and the electrical parameters remained within the limits established for the normal operation. Thus, the design and layout solutions for the project of the ionization chamber high-temperature suspensions were substantiated. Methods and results of the conducted research could be applied in design and manufacture of the similar products in terms of their purpose and operating conditions in the nuclear engineering

Received 24.04.2024

Accepted 16.01.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.P. Atomnaya energetika i nauchno-tekhnicheskiy progress [Nuclear power and scientific and technological progress]. Moscow, Nauka Publ., 1978.
- [2] Murray R.L. Nuclear energy. New York, Pergamon Press, 1975.
- [3] Morokhov I.D., ed. Atomnoy energetike XX let [Nuclear power industry is XX years old]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974.
- [4] Galanin A.D. Vvedenie v teoriyu yadernykh reaktorov na teplovykh neytronakh [Introduction to the theory of thermal neutron nuclear reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990.
- [5] Afrov A.M., Andrushechko S.A., Ukraintsev V.F., et al. VVER-1000: fizicheskie osnovy ekspluatatsii, yadernoe toplivo, bezopasnost [VVER-1000: physical basics of operation, nuclear fuel, safety]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., Logos Publ., 2006.
- [6] Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasilyev B.Yu., et al. AES s reaktorom tipa VVER-1000. Ot fizicheskikh osnov ekspluatatsii do evolyutsii proekta [Nuclear power plants with a VVER-1000 reactor. From the physical foundations of operation to the evolution of the project]. Moscow, Logos Publ., 2010.
- [7] Ovchinnikov F.Ya., Semenov V.V. Ekspluatatsionnye rezhimy vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov [Operational modes of water-water power reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988.
- [8] Seleznev E.F. Kinetika reaktorov na bystrykh neytronakh [Kinetics of fast neutron reactors]. Moscow, Nauka Publ., 2013.

- [9] Goldenblat I.I., Bazhanov V.L., Kopnov V.A. Dlitelnaya prochnost v mashinostroenii [Long-term strength in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977.
- [10] Lokoshchenko A.M. Modelirovanie protsessa polzuchesti i dlitelnoy prochnosti metallov [Modeling of the creep process and the long-term strength of metals]. Moscow, MGIU Publ., 2007.
- [11] Shestirikov S.A., Lokoshchenko A.M. Creep and long-term strength of metals. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela*, 1980, vol. 13, pp. 3–104 (in Russ.).
- [12] Ananyev A.N., Kaznovskiy P.S., Kaznovskiy S.P., et al. Seysmicheskaya bezopasnost atomnykh stantsiy [Seismic safety of nuclear power plants]. Moscow, BMSTU Publ., 2011.
- [13] Bugaev E.G., Bednyakov V.G., Guseltsev A.S., et al. Accounting for external natural and man-made impacts at sites where nuclear energy facilities are located. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost*, 2012, spec. iss., pp. 28–45 (in Russ.).
- [14] Bugaev E.G., Kishkina S.B. Assessment long-term and current seismic hazard of OIAE site on basis of materials of engineering researches. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost*, 2018, no. 3, pp. 1–13 (in Russ.).
- [15] Segerlind L.J. Applied finite element analysis. New York, Wiley, 1976.
- [16] Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. New York, McGraw-Hill, 1971.
- [17] Norrie D.H., De Vries G. An introduction to finite element analysis. New York, Academic Press, 1978.
- [18] Levin V.A. Modeli i metody. Obrazovanie i razvitie defektov [Models and methods. Formation and development of defects]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2015.
- [19] Levin V.A., Vershinin A.V. Chislennyye metody. Parallelnyye vychisleniya na EVM [Numerical methods. Parallel computing on a computer]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2015.
- [20] Levin V.A., Zingerman K.M. Tochnyye i priblizhennyye analiticheskiye resheniya pri konechnykh deformatsiyakh i ikh nalozhenii [Accurate and approximate analytical solutions for finite deformations and their superposition]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2016.
- [21] Vasilevskiy Yu.V., Danilov A.A., Litnikov K.N., et al. Avtomatizirovannyye tekhnologii postroyeniya nestrukturirovannykh raschetnykh setok [Automated technologies for building unstructured computational grids]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2016.
- [22] Aleksakov G.N., Zakharova V.V., Nikolaev E.V. Hardware and software package to support metrological services of nuclear power plants. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Fizika i tekhnika yadernykh reaktorov*, 2005, no. 49-2, pp. 42–48 (in Russ.).

Glazyuk Ya.V. — Deputy General Director, Chief Designer of Neutron-Physical Parameters Monitoring Equipment, JSC “NIKIET” (Akademika Dollezhalaya ploshchad 1, str. 3, Moscow, 107140 Russian Federation).

Попов В.Ю. — Head of the Implementation and Technical Support of the Developments, LLC “Fidesys” (Leninskie Gory territory 1, str. 75, Moscow, 119234 Russian Federation).

Федоров М.Ю. — Cand. Sc. (Eng.), Chief Expert, Department of Expertise and Safety Assessment of Nuclear Energy Facilities, JSC “VO “Safety” (Taganskaya ul. 34A, Moscow, 109147 Russian Federation).

Капустин Е.А. — Chief Specialist of Department Group, JSC “НИИ НПО “ЛУЧ” (Zheleznodorozhnaya ul. 24, Podolsk, Moscow Region, 142103 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Glazyuk Ya.V., Popov V.Yu., Fedorov M.Yu., et al. Computational and experimental substantiation of strength and seismic resistance of the ionization chamber suspensions in the control and protection systems of fast neutron reactors. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 3 (154), pp. 112–128 (in Russ.). EDN: QDDMYW