
БЕЗОПАСНОСТЬ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

УДК 621.039.577-182.3

МОДУЛЬНЫЙ РЕАКТОР МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ “МОДЕСТ”

© 2020 г. Ю. Н. Волков^а, Е. А. Градова^{а, *}

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,
Каширское ш. 31,, Москва, 11540 Россия

*E-mail: eagradovalatom@gmail.com

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

Малая энергетика — новое направление развития атомной отрасли. В данной работе рассматривается проектирование интегрального реактора малой мощности “МОДЕСТ”. Представлены результаты расчетов основных технических характеристик проекта энергетической установки. Для повышения безопасности проекта в модуле осуществлена естественная циркуляция теплоносителя. Естественный отвод тепла от топливных элементов предотвращает аварии, связанные с потерей электроснабжения. В конструкции применен более эффективный, по сравнению с прямотрубными, парогенератор с витыми трубами. Такая реакторная установка может быть использована для выработки электроэнергии, производства водорода и опреснения воды.

Ключевые слова: малая энергетика, модульность, естественная циркуляция, витой парогенератор

DOI: 10.1134/S2079562920060597

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в мире наблюдается бурный рост интереса к созданию и развитию малой атомной энергетики. Рынок малых ядерных энергетических реакторов считается перспективным, и та страна, которая первой создаст экономически эффективный и безопасный проект реактора, получит преимущество на данном рынке. Аналогичные проекты малых АЭС активно обсуждаются на международных конференциях и совещаниях МАГАТЭ, где обсуждаются перспективы и трудности в реализации проектов по реакторам малой мощности. Причем, стоит отметить, что малые реакторы не масштабируются до больших размеров, а эффективно работают и извлекают выгоду из своих меньших размеров для достижения конкретных преимуществ при эксплуатации. Проект модульного реактора “МОДЕСТ” является примером преднамеренно малого реактора и будет описан позже в этой статье. Такая установка может быть пригодна для производства электроэнергии при базовой нагрузке, особенно в регионах с плохо развитой сетевой инфраструктурой, и также для специализированных применений неэлектрической энергии.

Помимо этого, проект реактора “МОДЕСТ” обладает практической значимостью в силу ряда причин:

- принцип модульности обеспечивает гибкость в производстве электроэнергии;
- более короткое время строительства и снижение капитальных затрат за счет заводской сборки модулей;
- потребность развивающихся рынков Азии, Африки и Латинской Америки в атомной генерации электроэнергии и тепла;
- высокий уровень безопасности за счет применения пассивных систем;
- простота конструкции.

Наличие такой разработки в линейке реакторов Росатома может серьезно расширить географию контрактов как на внутреннем, так и на зарубежных рынках в силу экономичности и повышенной безопасности.

ПРОЕКТНЫЕ РАЗРАБОТКИ МОДУЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ

Американский модульный реактор NuScale

Это модульный реактор (рис. 1) с тепловым спектром нейтронов, состоящий из 12 независимых модулей мощностью 45 МВт, что позволяет обеспечивать электроэнергией как городские районы, так и небольшие поселения на отдаленных территориях. Каждый модуль работает на свою отдельную турбину.

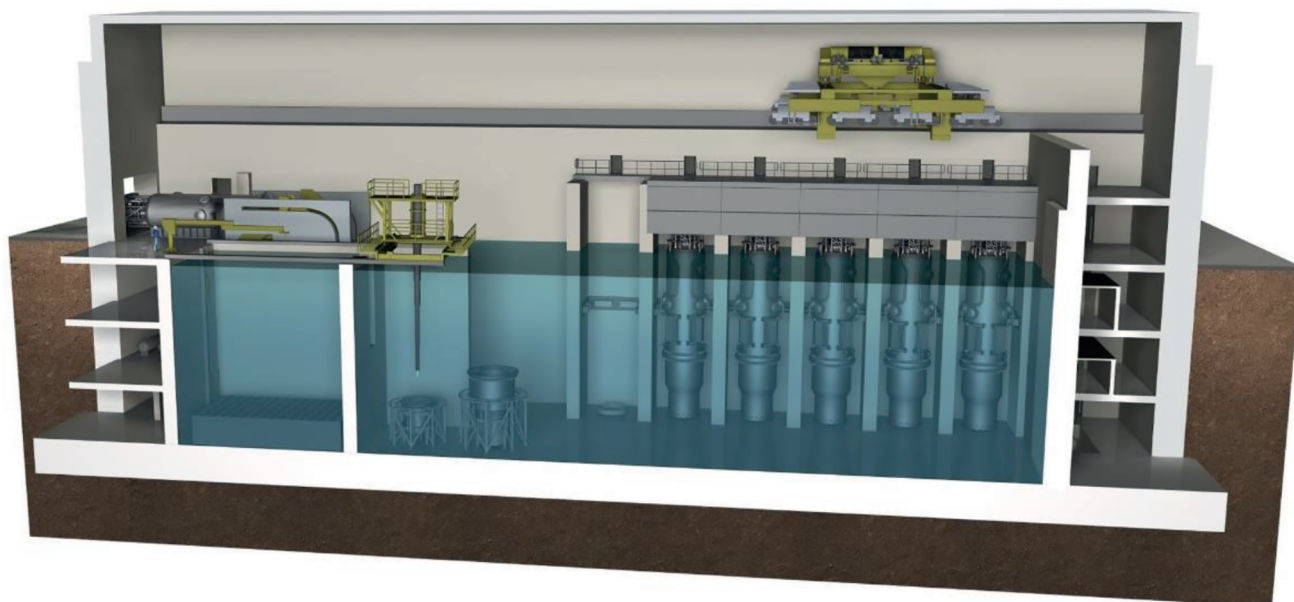


Рис. 1. Общий вид станции NuScale в разрезе [1].

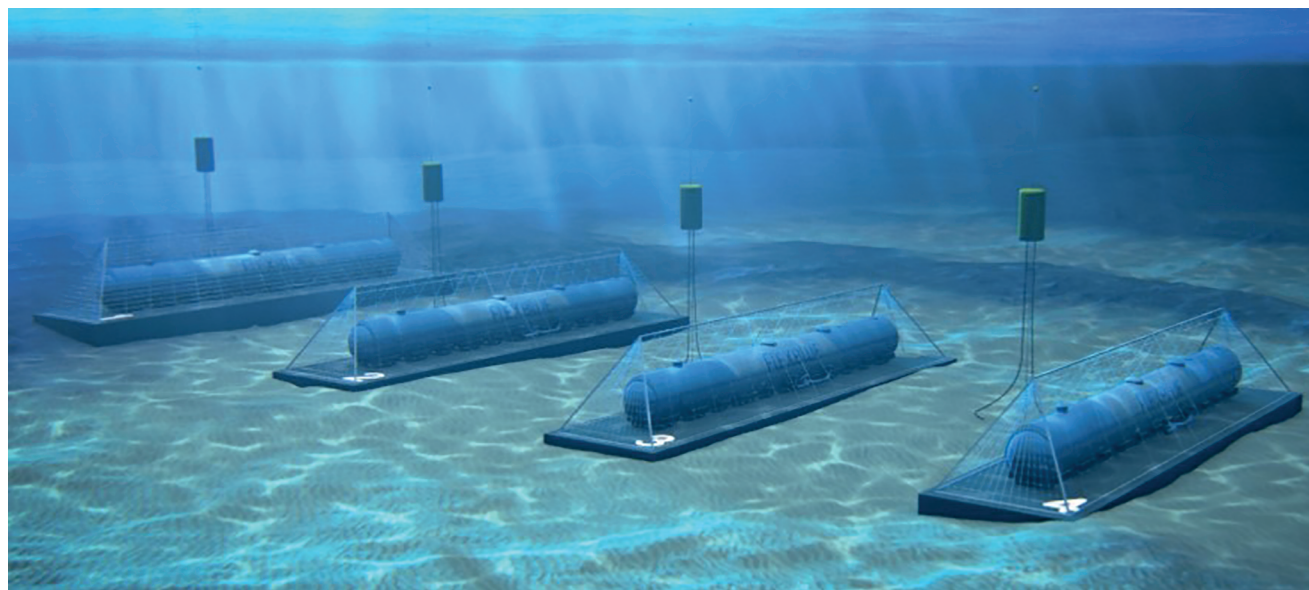


Рис. 2. Установка Flexblue [2].

Каждый реактор размещен в своем собственном защитном сосуде, который погружен под воду в бетонный бассейн. Значительные конструктивные особенности установки включают в себя: заводской компактный модуль, в котором расположены активная зона, парогенератор и компенсатор давления; естественный циркуляционный поток теплоносителя во всех эксплуатационных состояниях. Топливо реактора — оксид урана квадратной конфигурации. Сборки длиной 2 м. Топливная

цикл продолжительностью 24 месяца без перегрузок с обогащением не более 4.95%. Контроль реактивности осуществляется за счет управляющих стержней и борного регулирования.

Международный проект IRIS

Энергетический легководный реактор с принудительной циркуляцией теплоносителя и номинальной электрической мощностью модуля 335 МВт. Установка за счет мощности придает развитым странам больше гибкости при планиро-

вании строительства новых мощностей, и также может быть удобна для развивающихся стран, где большие реакторы не требуются. В прошлом было предложено использовать более высокие обогащения для IRIS, что позволяет увеличить длительность цикла, но в настоящее время проект требует 4.95% обогащенного урана, что соответствует тому, что используется на нынешних заводах. Используемое MOX-топливо рассчитано на срок службы от 3 до 3.5 лет, половина активной зоны будет перегружаться при остановках в работе. Реактивность полностью контролируется стержнями регулирования и выгорающими поглотителями. Это устраняет необходимость в боре в первичной воде.

Французская установка Flexblue

Переносная атомная электростанция мощностью 160 МВт, работающая на глубине до 100 м (рис. 2). Ее длина составляет 140 м.

Модульная единица может быть выбрана развивающимися странами и районами развитых стран, нуждающимися в компенсации дефицита энергии. Целевой рынок реактора также ориентирован на средние страны, такие как Монако, которые могут оказаться непригодными для крупных атомных станций.

Цикл производства электроэнергии длится 3 года. Затем происходит загрузка свежего топлива в активную зону реактора и периодическое техническое обслуживание. Капитальный ремонт планируется проводить каждые 10 лет. В конце своего срока службы энергоблок транспортируется обратно на демонтажный объект, что приводит к быстрому, легкому и полному восстановлению природного объекта. Реактивность контролируется без растворимого бора, что позволяет уменьшить радиоактивные выбросы и отходы в окружающую среду.

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

Основной целью данной работы было конструирование модуля проекта “МОДЕСТ” для определения основных габаритов, обоснование возможности реализации естественной циркуляции теплоносителя, расчет основных нейтронно-физических характеристик.

Для разработки проекта использовались следующие программные средства:

- ANSYS — профессиональный многоцелевой комплекс конечно-элементного анализа, применяемый для решения прочностных, тепловых, акустических, гидро- и газодинамических задач. Программа является средством, с помощью которого создавалась и прорабатывалась CAD-модель конструкции [3].

- GETERA — одномерный код, который используется для решения уравнения переноса ней-

Таблица 1. Основные технические характеристики

Мощность модуля, МВт	110
Количество модулей	4
Коэффициент полезного действия, %	31.3
Температура на входе/выходе из АЗ, °С	200/325
Рабочее давление первого контура, МПа	15.7
Паропроизводительность, т/ч	562
Материал корпуса реактора	15XH2MФА-A
Материал парогенератора	ЧС-33
Наружный диаметр корпуса, м	3.1
Толщина корпуса, м	0.12
Высота реактора, м	13

Таблица 2. Характеристики активной зоны

Среднее обогащение по U-235, %	4.95
Кампания топлива, лет	7.5
Размеры Д × В, мм	1570 × 3730
Количество ТВС	85
Выгорание, МВт сут/кг	33

тронов в элементарной ячейке топливной загрузки реактора методом вероятностей первого столкновения. В области замедления (2.15 эВ–10.5 МэВ) плотность потока нейтронов рассчитывается в 26-групповом приближении с использованием библиотеки БНАБ-93. В области термализации (0.0–2.15 эВ) код использует специальную 100-групповую библиотеку нейтронных сечений из файлов ENDF/B-IV и JENDL-2 [4].

- T-FLEX CAD — российская CAD-система [5].

ОБЗОР ПРОЕКТА

МОДЕСТ — это проект интегрального водородного реактора малой мощности с тепловым спектром нейтронов, название которого содержит в себе две его основные особенности — МОДульность и ЕСТественную циркуляцию теплоносителя. Данный концепт не имеет действующих мировых аналогов. Основные технические характеристики и характеристики активной зоны представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

РУ МОДЕСТ состоит из 4 модулей, расположенных в общем защитном контайнменте. Все необходимое оборудование первого контура: активная зона, парогенератор и компенсатор давления, интегрировано в единый корпус. Компенсатор давления компактно расположен в крышке модуля. Модуль проекта, спроектированный и рассчитанный на прочность в ANSYS [3], изображен на рис. 3.

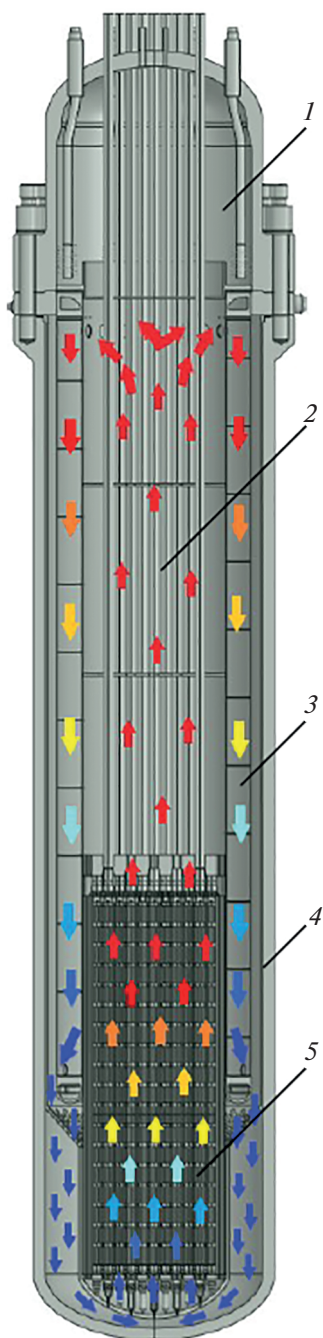


Рис. 3. Модуль проекта: 1 — компенсатор давления, 2 — блок защитных труб, 3 — парогенератор, 4 — шахта реактора, 5 — активная зона.

Расчет на прочность крышки модуля приведен на рис. 4. Диапазон напряжений от 30 до 150 МПа, среднее предельное напряжение около 260 МПа. Расчет показывает, что при данной конструкции напряжение не превышает предельных значений.

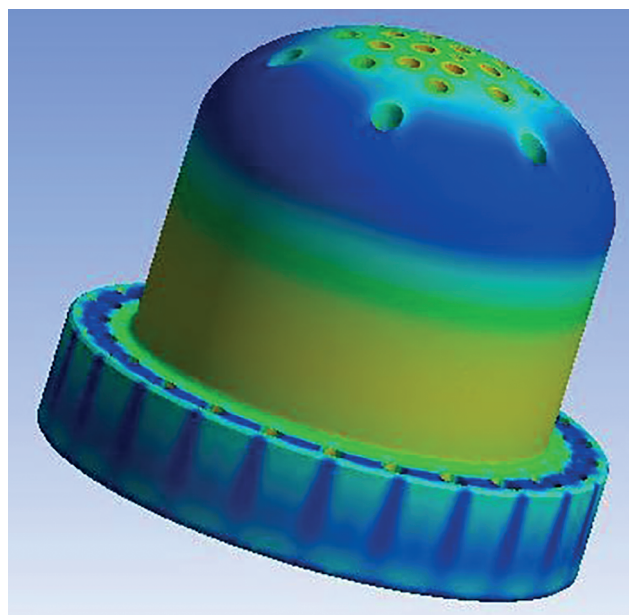


Рис. 4. Крышка модуля в расчете на прочность.

Парогенератор

Высокие удельные параметры пара и компактность модуля достигаются за счет применения уникального парогенератора. Парогенератор с витыми трубами не имеет собственного корпуса и располагается внутри реактора. Витой парогенератор обладает более эффективными параметрами по теплосъему и меньшими вертикальными габаритными размерами относительно использующихся в настоящее время прямотрубных. Габарит является важным критерием при транспортировке модулей. Из-за интегральной компоновки в корпусе реактора отсутствуют патрубки, что увеличивает технологичность его изготовления, нанесения антикоррозионной наплавки и контроля. Подвод питательной воды и вывод перегретого пара осуществляется в верхней части парогенератора между шпильками главного разъема реактора. Отсутствие общих сварных соединений между парогенератором и реактором позволяет легко извлекать парогенератор для его обслуживания и ремонта. В качестве материала парогенератора был выбран высоконикелевый сплав ЧС-33, потому что привычная реакторная сталь 15ХН2МФА-А не способна выдержать большого перепада температур. Основные характеристики парогенератора приведены в табл. 3.

Активная зона

В ходе разработки был проведен нейтронно-физический расчет активной зоны с помощью кода GETERA [4].

Рассчитываемая полиячейка состоит из трех видов ТВС: свежие сборки и те, что проработали 1 или 2 микрокампании. Каждая из 85 ТВС актив-

Таблица 3. Параметры парогенератора

Число теплообменных труб, шт	1400
Средняя длина теплообменной трубы, м	25.3
Поверхность теплообмена, м ²	1780
Давление генерируемого пара, МПа	5
Температура генерируемого пара, °С	300
Температура питательной воды, °С	170
Паропроизводительность, т/ч	562

Таблица 4. Количество элементарных ячеек каждого типа в ТВС при 12 твэгах

Центральный твэл — ц	72
Твэг с гадолинием — г	12
Водяная полость — в	6
Периферийный твэл — п	36

ной зоны представлена в виде набора из 127 элементарных ячеек, учитывая 1 центральную трубу. Элементарные ячейки активной зоны изображены на рис. 5. Среди этих ячеек центральные тепловыделяющие элементы (твэлы), твэлы с гадолинием в качестве выгорающего поглотителя (твэги), водные полости и периферийные твэлы.

Было проведено исследование при 6 и 12 твэгах, причем гадолиний был добавлен и в цен-

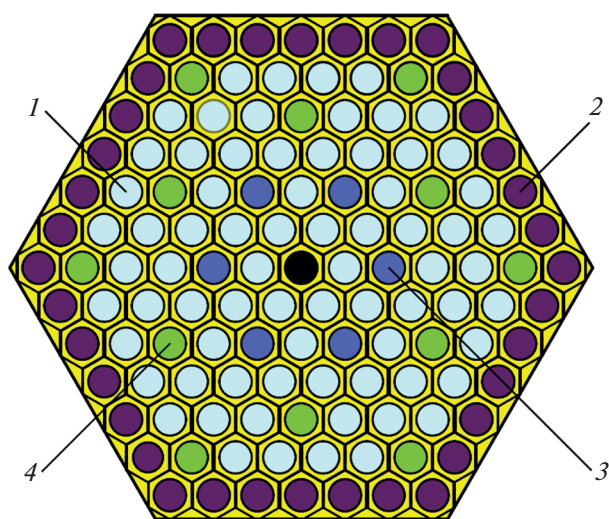


Рис. 5. Элементарные ячейки активной зоны: 1 — центральные твэлы, 2 — периферийные твэлы, 3 — водные полости, 4 — твэлы с гадолинием.

тральные твэлы, но заложенная концентрация была в 2 раза меньше, чем в твэгах. При 12 твэгах коэффициент размножения, а, следовательно, и запас реактивности на выгорание топлива меньше: $K_{\infty}(6) = 1.11$, $K_{\infty}(12) = 1.09$ (рис. 6). Следовательно, установка безопаснее и проще в управлении, и понадобится меньше стержней регулирования для компенсации избыточной реактивности. Поэтому был выбран этот вариант. Количество элементарных ячеек каждого типа в ТВС при 12 твэгах приведено в табл. 4.

Для учета разной концентрации топлива и гадолиния в ячейках была рассчитана матрица перетечек (табл. 5), учитывающая вероятность “перетекания” нейтронов из ячейки одного типа в ячейку другого типа.

Входные данные для расчетного кода:

- радиус гомогенизированного топливного стержня — 3.9 см;
- толщина циркониевой оболочки — 0.65 см;
- радиус ячейки с отражателем — 6.35 см;
- средняя температура топлива — 730°С;
- средняя температура отражателя — 270°С;
- средняя энергонапряженность — 50 МВт/м³.

Кампания реактора с 12 твэгами представлена на рис. 4. Оставшийся запас реактивности на выгорание и на расхолаживание компенсируется органами СУЗ.

БЕЗОПАСНОСТЬ

В основу нашего проекта был заложен принцип повышенной безопасности, по сравнению с работающими реакторными установками. Это обеспечивается за счет естественной циркуляции теплоносителя как пассивной системы, позволяющей отводить тепло от активной зоны без использования внешних источников энергии. Благодаря этому, в схеме реакторной установки отсутствуют циркуляционные насосы. Таким образом, заранее предотвращается сценарий аварии Фукусимы–Дайити, связанной с потерей теплоносителя из-за отказа циркуляционных насосов, что привело к отсутствию теплоотвода от активной зоны, ее быстрому нагреву до температур, больших, чем температуры нормальной эксплуатации, и взрыву. Параметры осуществления естественной циркуляции указаны в табл. 6.

Стоит отметить, что каждый модуль находится в своей собственной бетонной шахте, наполненной водой, то есть происходит дополнительный пассивный теплообмен между корпусом и водным бассейном. Кроме того, отсутствуют трубопроводы первого контура, которые соединяют основные элементы классической реакторной установки. В силу чего, повышается безопасность, потому что исключается возможность про-

Таблица 5. Матрица перетечек при 12 твэгах

	ц	г	в	п	ц	г	в	п	ц	г	в	п
ц	0.68	0.13	0.08	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0
г	0.75	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0
в	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
п	0.23	0.08	0	0.33	0	0	0	0.18	0	0	0	0.18
ц	0	0	0	0	0.68	0.13	0.08	0.11	0	0	0	0
г	0	0	0	0	0.75	0	0	0.25	0	0	0	0
в	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
п	0	0	0	0.18	0.23	0.08	0	0.33	0	0	0	0.18
ц	0	0	0	0	0	0	0	0	0.68	0.13	0.8	0.11
г	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75	0	0	0.25
в	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
п	0	0	0	0.18	0	0	0	0.18	0.23	0.08	0	0.33

Таблица 6. Параметры естественной циркуляции

Расход, кг/с	913.5
Скорость циркуляции, м/с	0.5
Напор циркуляции, Па	11400

ектной аварии по разрыву трубопровода первого контура. Помимо этого, защитный контайнмент, толщина которого определяется именно из этого аварийного сценария, можно сделать тоньше, что приводит к большей экономической выгоде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено проектирование проекта модульного реактора малой мощности “МОДЕСТ”. Главной целью является разработка проекта новой интегральной энергетической установки с повышенными параметрами безопасности и компактными размерами для транспортировки. Расчеты показали, что проект “МОДЕСТ” может работать при реализации пассивных систем, требуя минимального обслуживания. Парогенератор с витыми трубами, вместо использующихся прямотрубных, более эффективен при теплосъеме и имеет ряд технологических преимуществ.

Безусловно, проект нуждается в доработке в части активной зоны и органов СУЗ. Но уже на данном этапе можно отметить, что малые реакторы могут работать наравне со станциями большой мощности, снабжая своих потребителей электроэнергией и расширяя возможности применения атомной энергетики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Хотим выразить особую признательность и огромную благодарность специалисту ОКБ “Гидропресс”

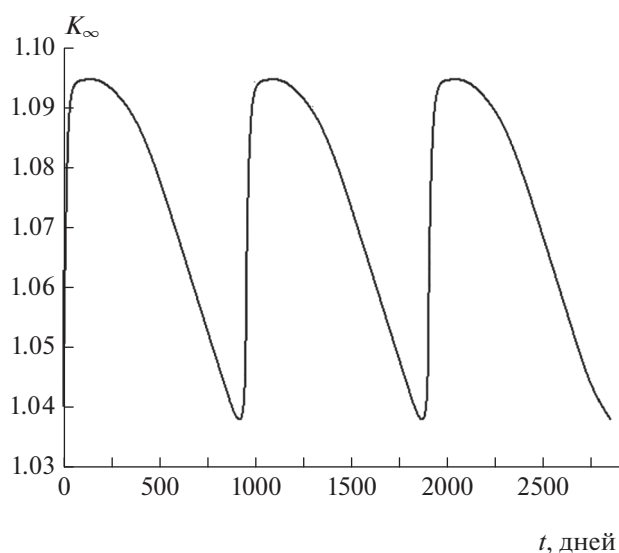


Рис. 6. График зависимости коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде к кампании реактора.

С.Л. Лякишеву за техническую поддержку в вопросах конструирования и прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. NuScale Plant Design Overview. 2012. NuScale Power, LLC.
2. Status of Small and Medium Sized Reactor Designs 2012. Vienna: IAEA.
3. *Конюхов А.В.* Основы анализа конструкций в ANSYS: Учебное пособие. 2011. Казань: Изд-во КГУ. 102.
4. *Пряничников А.В.* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2009. № 3. Р. 63–77.
5. *Елисеев В.Г., Коробов В.М., Милованов Н.Н.* // Автоматизация проектирования в программном комплексе T-FLEX. 2010. Москва: НИЯУ МИФИ.

Small Nuclear Power Engineering Modular Low Power Reactor with Natural Circulation “MODEST”

Y. N. Volkov¹ and E. A. Gradova^{1, *}

¹*National Research Nuclear University MEPhI, (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye sh. 3, Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: egradova.atom@gmail.com*

Received March 4, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

Small power engineering is a new direction of development of the nuclear industry. In this paper, the design of the integrated low-power reactor project “MODEST” is considered. The results of calculations of the main technical characteristics of the power installation are presented. Natural circulation of the coolant is carried out in the module to increase the safety of the project. Natural heat removal from active core prevents accidents associated with loss of power supply. In the design, there is a more efficient helical coil steam generator, compared to straight-tube ones. Such a reactor can be used for power generation, hydrogen production and water desalination.

Keywords: small power engineering, modularity, natural circulation, helical coil steam generator