

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА «МИФИ»



ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА «МИФИ»

Том 15 № 3 2026 МА ≥ – ≤ ∇ ∫ Ъ

Основан в июле 2012 г.

Выходит 6 раз в год

ISSN: 2304-487X

ПИ № ФС 77-41948

Главный редактор

Михаил Николаевич Стриханов, д. ф.-м. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, г. Москва (Россия)

Заместитель главного редактора

Николай Алексеевич Кудряшов, д.ф.-м.н., профессор, НИЯУ МИФИ, г. Москва (Россия)

Выпускающий редактор

Наталья Вячеславовна Ермолаева, к.т.н., НИЯУ МИФИ, г. Москва (Россия)

Редакционная коллегия:

Аксёнов Александр Васильевич – д.ф.-м.н., профессор, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва (Россия)

Бедриковецкий Павел – д.ф.-м.н., профессор, Университет Аделаиды, Аделаида, (Австралия)

Гаранин Сергей Григорьевич – чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор,

Институт лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров (Россия)

Евтихий Николай Николаевич – д.ф.-м.н., профессор, НИЯУ МИФИ, г. Москва (Россия) **Калашников**

Николай Павлович – д.ф.-м.н., профессор, НИЯУ МИФИ, г. Москва (Россия)

Каргин Николай Иванович – д.т.н., профессор, НИЯУ МИФИ, г. Москва (Россия)

Кашенко Сергей Александрович – д.ф.-м.н., профессор,

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, г. Ярославль (Россия)

Лазаров Райчо – доктор наук, профессор математики, Техасский университет А&М,
г. Колледж-Стейшн, Техас (США)

Нагорнов Олег Викторович – д.ф.-м.н., профессор, НИЯУ МИФИ, г. Москва (Россия)

Полянин Андрей Дмитриевич – д.ф.-м.н., профессор,

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва (Россия)

Цегельник Владимир Владимирович – д.ф.-м.н., профессор,

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.

Четверушкин Борис Николаевич – член РАН, д.ф.-м.н., профессор, Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва (Россия)

Эфендиев Ялчин – д.ф.-м.н., профессор, Техасский университет А&М, г. Колледж-Стейшен, Техас (США)

Компьютерная верстка: Деятели Светлана Константиновна

Учредитель и издатель: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес редакции: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31, Вестник НИЯУ МИФИ

Сайт: <https://vestnikmephi.elpub.ru>

Электронная почта: vestnik@mephi.ru

Москва
НИЯУ МИФИ

СОДЕРЖАНИЕ

Том 15, № 3, 2026

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

- Формирование мультипериодических колебаний в высокотемпературной плазме**
Б. Б. Михалев, С. Б. Дертеев, Н. К. Шивидов, М. Е. Сапралиев 191
- Расчетно-экспериментальные исследования по выбору системы снижения ударной нагрузки на защищаемом грузе**
В. В. Доценко, О. Ю. Жабунина, Ю. Ю. Лушина, М. В. Никульшин 199
-

ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

- Система сбора и обработки геопространственных данных для проведения анализа с помощью машинного обучения**
В. А. Кузнецов, И. А. Лисенков 211
- Применение метода Хироты для нелинейных уравнений Шредингера высших порядков**
Н. А. Кудряшов, А. А. Кутуков, Н. В. Ермолаева 223
-

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

- Определение температурных коэффициентов реактивности ядерного реактора в пассивном эксперименте в точечном приближении**
М. А. Симановский, А. М. Загребаев 236
-

АВТОМАТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

- Принципы и условия обеспечения безопасности реактора РБМК-1000 при полной выгрузке топлива из активной зоны после окончательного останова энергоблока**
М. А. Воронцов, Г. В. Колибас, А. В. Слободчиков, А. О. Толоконский 248
-

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Влияние состава толерантного топлива на стоимость электроэнергии АЭС**
Д. Р. Абашев, С. С. Матвеев, Е. В. Семенов, В. В. Харитонов 258
-

ИННОВАЦИИ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ

- Модель формирования профессиональных навыков у персонала АЭС при использовании натурно-виртуального тренажерного комплекса**
Е. А. Абидова, А. С. Галкин, М. В. Рябышев 271

CONTENTS

Volume 15, Number 3, 2026

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS

- Formation of multiperiodic oscillations in a high-temperature plasma**
B. B. Mikhalyaev, S. B. Derteev, N. K. Shividov, M. E. Sapraliev 191
- Calculation and experimental study on selecting a system to reduce impact loads on a protected cargo**
V. V. Dotsenko, O. Yu. Zhabunina, Yu. Yu. Lushina, M. V. Nikulshin 199
-

APPLIED MATHEMATICS AND COMPUTER SCIENCE

- An ETL-based system for collecting and processing geospatial data for machine learning analysis**
V. A. Kuznetsov, I. A. Lisenkov 211
- Application of the Hirota method for the higher-order nonlinear Schrödinger equations**
N. A. Kudryashov, A. A. Kutukov, N. V. Ermolaeva 223
-

MATHEMATICAL MODELS AND NUMERICAL METHODS

- Determination of the temperature coefficients of reactivity of a nuclear reactor in a passive experiment in a point approximation**
M. A. Simanovskiy, A. M. Zagrebaev 236
-

AUTOMATION AND ELECTRONICS

- Safety conditions for the RBMK-1000 reactor with full unloading of fuel from the active zone after the final stop of the NPP**
M. A. Vorontsov, G. V. Kolibas, A. V. Slobodchikov, A. O. Tolokonskiy 248
-

NUCLEAR ENERGY AND NUCLEAR TECHNOLOGIES

- The Impact of the composition of accident tolerant fuel on the cost of electricity from nuclear power plants**
D. R. Abashev, S. S. Matveev, E. V. Semenov, V. V. Kharitonov 258
-

INNOVATIONS IN ENGINEERING EDUCATION

- Model for developing professional skills of nuclear power plant personnel using a physical-virtual training complex**
E. A. Abidova, A. S. Galkin, M. V. Ryabyshev 271

УДК 533.95; 534.28

Формирование мультипериодических колебаний в высокотемпературной плазме

© 2026 г. Б. Б. Михалев, С. Б. Дертеев, Н. К. Шивидов, М. Е. Сапралиев

Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, г. Элиста, 358000, Россия

Одними из наиболее распространенных нестационарных явлений в плазме солнечной атмосферы являются корональные волны сжатия, наблюдаемые повсеместно в крайнем ультрафиолетовом диапазоне. Важность их изучения обусловлена возможной причастностью к нагреву плазмы и ускорению солнечного ветра. Многочисленные наблюдения и анализ спектров волн сжатия демонстрируют признаки, существенно отличающиеся от свойств обычных волн. Мы считаем, что их можно рассматривать как последовательности отдельных локализованных акустических возмущений. На основе уточненных нами свойств затухания и дисперсии акустических волн в теплопроводящей высокотемпературной плазме с радиационными потерями нам удалось объяснить основные наблюдаемые особенности волн сжатия, в том числе образование двух доминирующих периодов в спектре. Мы полагаем, что их детальное изучение может также пролить свет на нестационарные процессы в нижней атмосфере, которые трудно поддаются описанию.

Ключевые слова: плазма, теплопроводность и излучение плазмы, акустические волны, затухание и дисперсия волн, квазипериодические колебания.

Введение

На протяжении нескольких десятков лет в солнечной короне повсеместно наблюдаются распространяющиеся вариации интенсивности КУФ-излучения, которые интерпретируются как волны сжатия. Наряду с изменением интенсивности иногда наблюдается и доплеровский сдвиг, указывающий на движение плазмы. Возмущения распространяются вдоль магнитных структур, корональных петель и корональных дыр [1–3]. Изучение волн сжатия проводится с помощью временных сигналов, которые снимаются в выбранных точках и имеют вид цепочек из десятка всплесков продолжительностью 20–30 мин каждый. Вейвлет-анализ сигналов показывает широкие непрерывные спектры с доминирующими максимумами, которые объявляются периодами. Обычно наблюдаются два максимума, они называются коротким и длинным периодами; короткий лежит в интервале 3–10 мин, длинный – в интервале 10–30 мин. Возмущения быстро затухают, показывая частотную зависимость длины затухания [4–5].

Мы обратили внимание на ряд наблюдаемых особенностей, которые, на наш взгляд, ставят под сомнение интерпретацию волн сжатия как обычных волн с регулярно распределенными вершинами. Первая – это ширина спектра, более характерная для импульсных возмущений. Вторая – заметное и беспорядочное изменение периодов в течение всего времени наблюдения, обычно составляющего 2–3 часа. Наконец, скорость распространения возмущений заметно меньше звуковой скорости, ожидаемой при температурах, характерных для короны. В качестве оправдания такого результата приводят

✉ Б.Б. Михалев: bbmikh@mail.ru

Поступила в редакцию: 18.11.2025

После доработки: 25.05.2026

Принята к публикации: 26.05.2026

EDN CRGVKL

действие эффекта проекции, однако указанная ситуация со скоростью имеет место в наблюдениях не только на диске, но и на лимбе.

В настоящей работе для объяснения перечисленных особенностей волн сжатия привлекается аппарат акустических волн в высокотемпературной разреженной плазме, разработанный нами для изучения волн сжатия. В нем учитывается теплопроводность плазмы, которая берется в классическом спитцевском значении, и излучение плазмы, рассчитываемое согласно общепринятому ныне коду CHIANTI [6–7]. Полученное таким образом описание неадиабатических акустических волн учитывает основные свойства корональной плазмы, что позволило нам уточнить свойства акустических волн в короне и найти их зависимость от параметров корональной плазмы.

Неадиабатические акустические волны

Поскольку изучаемые волны сжатия распространяются вдоль магнитных структур с большими пространственными масштабами и мало влияют на магнитное поле, расчеты проводятся в приближении одномерной гидродинамики. Дисперсионное уравнение имеет вид [7–8]

$$\tilde{\omega}^3 + iA\tilde{\omega}^2 - \tilde{\omega}\tilde{C}_s^2\tilde{k}^2 + iB = 0, \quad (1)$$

$$A = A_1\tilde{k}^2 + A_2, B = \frac{1}{\gamma}(-A_1\tilde{k}^2 - A_2 + A_3)\tilde{C}_s^2\tilde{k}^2. \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения определяются через коэффициент теплопроводности $\kappa(T_0)$ и функцию излучения $\Lambda(T_0)$

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{(\gamma-1)Mm(k)^2}{R\rho_0m(\omega)}\kappa(T_0), \\ A_2 &= \frac{(\gamma-1)M}{Rm(\omega)}\rho_0\Lambda'(T_0), \\ A_3 &= \frac{(\gamma-1)M}{RT_0m(\omega)}\rho_0\Lambda(T_0). \end{aligned} \quad (3)$$

Тильдой здесь обозначены безразмерные величины, и в условиях солнечной короны выбраны следующие масштабы:

$$\begin{aligned} m(T) &= 10^6 \text{ K}, \quad m(C_s) = 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \quad m(\omega) = 0.1 \text{ с}^{-1}, \quad m(k) = 10^{-6} \text{ м}^{-1}, \\ m(x) &= 10^6 \text{ м}, \quad m(t) = 10 \text{ с}, \quad m(\Lambda) = 10^{26} \text{ эрг} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Плазма описывается уравнением состояния идеального газа, где $\gamma = 5/3$, молярная масса $M = 0.62 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$. Функция излучения определена кубическими сплайнами по ряду значений, найденных численно [6–7]. Для равновесия плазмы в отсутствие возмущений рассматривается постоянная функция удельного нагрева, равная $H = \rho_0\Lambda(T_0)$. Коэффициент теплопроводности определяется классическим выражением для высокотемпературной полностью ионизованной плазмы

$$\kappa(T_0) = 2.28 \times 10^{-11} T_0^{5/2} (\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}). \quad (5)$$

Асимптотическое в пределе больших волновых числах значение частоты равно

$$\tilde{\omega} \approx \tilde{v}_\infty \tilde{k} - i\tilde{\delta}_\infty, \quad \tilde{v}_\infty = \frac{\tilde{C}_s}{\sqrt{\gamma}}, \quad \tilde{\delta}_\infty = \frac{(\gamma-1)\tilde{C}_s^2}{2\gamma A_1}. \quad (6)$$

При больших волновых числах фазовая скорость волны близка к изотермической звуковой скорости, аналогичным свойством обладает групповая скорость (рис. 1).

На рис. 1 показаны основные интересные нас свойства акустических волн, следующие из уравнений (1)–(5). Обратим внимание на групповую скорость, которая имеет два локальных минимума, на рисунке отмечен один из них, равный $k_1 = 0.066 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$ в указанных условиях. Второй минимум $k_2 = 0.0034 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$ очень близок к нулю и на рисунке не отмечен. Первый минимум обусловлен действием теплопроводности, второй – нагрева и радиационного охлаждения. Соответствующие длины волн $\lambda_1 = 9.5 \cdot 10^7 \text{ м}$ и $\lambda_2 = 1.8 \cdot 10^9 \text{ м}$. Второе значение – порядка солнечного диаметра, что подразумевает необходимость учета геометрии и действия гравитации при изучении второго минимума. По этой причине его мы исключаем из рассмотрения в настоящей работе.

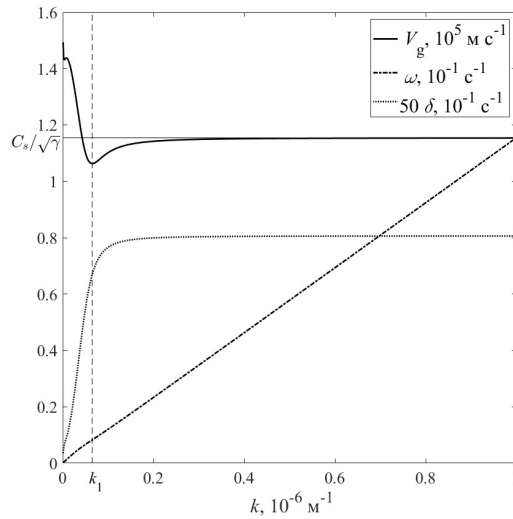


Рис. 1. Кривые зависимости от волнового числа частоты $\text{Re} \omega$, коэффициента затухания $\delta = -\text{Im} \omega$ и групповой скорости $V_g = d\text{Re} \omega / dk$. Параметры равновесной плазмы: $T_0 = 1 \text{ МК}$, $n_0 = 0.4 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Точка $k \approx 0.066 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$ показывает локальный минимум групповой скорости, обусловленный действием теплопроводности

Как следует из формулы (2), эффективность теплопроводности увеличивается с ростом волнового числа, и для ее сравнения с эффективностью нагрева и радиационного охлаждения можно ввести безразмерный параметр $\alpha = A_1 \tilde{k}^2 / A_3$. Функция радиационных потерь имеет интервалы убывания и возрастания, и мы ограничиваемся температурами, близкими к характерному для короны значению $T_0 = 1 \text{ МК}$, где ее можно считать постоянной. С учетом введенных масштабов получаем $\alpha \sim 10^3 \tilde{k}^2 / \tilde{n}_0^2$. При $\tilde{n} = 0.4$ и $\tilde{k} = 0.066$ получаем $\alpha \approx 28$, при $\tilde{n}_0 = 0.4$ и $\tilde{k} = 0.034$ получаем $\alpha \approx 0.072$. Отсюда видно, что при формировании первого минимума доминирующую роль играет теплопроводность, при формировании второго – нагрев и охлаждение.

При изучении временных сигналов вместо зависимости от волнового числа удобнее использовать зависимость от периода. Минимумам k_1 и k_2 соответствуют два минимума на оси периодов P_1 и P_2 (рис. 2), при тех же равновесных параметрах они равны 12.6 и 178 мин. Для нас важен первый, он разделяет периоды на короткие ($P < P_1$) и длинные ($P > P_1$). Короткопериодические волны имеют слабую дисперсию и сильное затухание, длиннопериодические, наоборот, сильную дисперсию и слабое затухание.

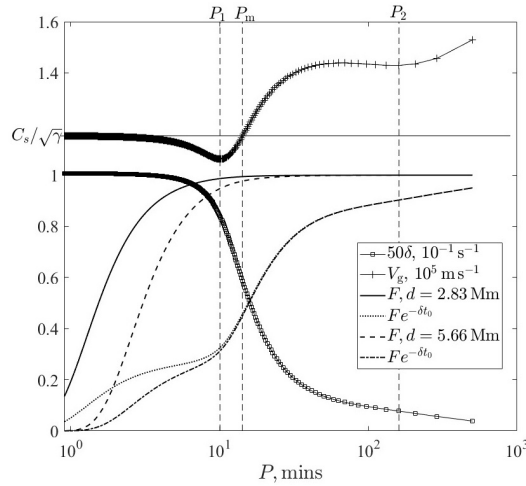


Рис. 2. Свойства затухания и дисперсии акустических волн под действием теплопроводности и нагрева/охлаждения

хание. Подтверждается частотная зависимость затухания, найденная из наблюдений. Таким образом, минимум групповой скорости тесно связан со свойствами дисперсии и затухания. Полученное нами уточнение свойств затухания и дисперсии акустических волн в корональной плазме, как будет показано далее, играет ключевую роль в поведении акустических импульсов под действием теплопроводности и формировании возмущений, характеризующихся двумя максимумами в спектре.

На рис. 2 использованы следующие обозначения. Кривые, помеченные крестиками и квадратами, показывают изменение с периодом групповой скорости V_g и коэффициента затухания δ . Кривые $F e^{-\delta t_0}$ демонстрируют изменение начальной спектральной плотности F в результате неравномерного затухания гармоник. Спектральные плотности показаны для двух значений длины начального импульса d . На вертикальной оси указаны значения групповой скорости в $10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ значения коэффициента затухания указаны в δ_∞ . Спектральные плотности указаны в относительных значениях. Параметры равновесной плазмы: $T_0 = 1 \text{ МК}$, $n_0 = 0.4 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$.

Моделирование волновых пакетов

Рассмотрим начальное импульсное акустическое возмущение, которое возникает в нижней атмосфере и распространяется вверх в корону. Представим его интегралом Фурье [9]

$$\rho = \varepsilon \rho_0 \int_0^{k_{\max}} F(k) e^{-\delta(k)t} \cos(kx - \omega(k)t) dk, \quad (7)$$

где $k_{\max}$ есть максимальное волновое число, определяющее ширину спектра. Функция $\omega(k)$ находится численным решением дисперсионного уравнения (1)–(5). Для спектральной плотности выбираем гауссову форму $F(k) = e^{-d^2 k^2 / 4}$, где параметр d определяет длину начального импульса. Волновой пакет диспергирует и затухает, и выражение под интегралом $F(k) e^{-\delta(k)t}$ можно рассматривать как локальную спектральную функцию в текущий момент времени.

Известно, что наличие минимума групповой скорости приводит к формированию квазипериодических колебаний в случае, когда колебания не затухают [10]. В зависимости от свойств дисперсии при этом могут формироваться вейвлет-спектры, имеющие форму головастика или бумеранга [11–12]. В нашем случае это невозможно из-за быстрого затухания волн. Поведение акустического импульса в нашем случае прослеживается из анализа рис. 2. Сплошной и пунктирной линиями на нем показана спектральная плотность начального импульсного возмущения F для двух различных значений длины d . Ниже показаны те же спектры в некоторый момент t_0 . Мы видим, что в минимуме групповой

скорости P_1 спектральная функция получает со временем провал, обусловленный неравномерностью затухания. По обе стороны от минимума могут формироваться две группы волн, имеющие разные периоды P_s и P_l , но одну и ту же скорость. Длинный период близок к P_m , это граница периодов, когда возможны такие пары.

Таким образом, вместо одного первоначального гауссова пакета могут получиться два отдельных волновых пакета, один из них формируется короткопериодическими гармониками, второй – длиннопериодическими. Для подтверждения мы провели вейвлет-анализ временных сигналов, снятых на заданных расстояниях x от источника (рис. 3).

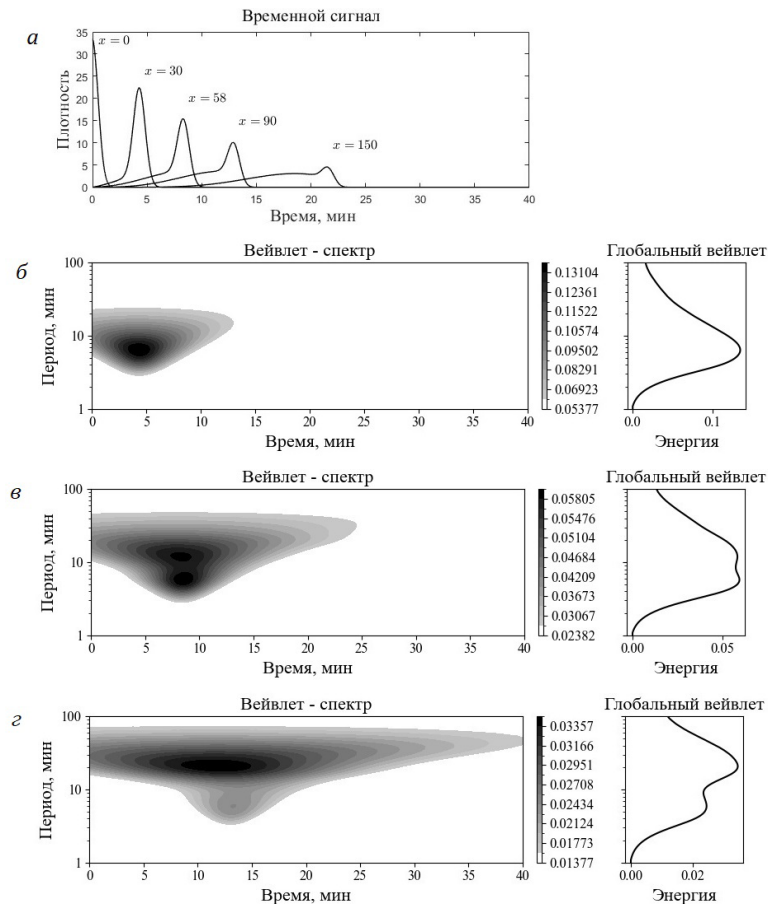


Рис. 3. Временные сигналы, создаваемые волновым пакетом на заданных расстояниях x от источника (а), и их вейвлет-спектры: $x = 30$ Мм (б), $x = 58$ Мм (в), $x = 90$ Мм (г). Параметры плазмы: $T_0 = 1$ МК, $n_0 = 0.4 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Длина начального им пульса $d = 6$ Мм

Вид самих сигналов на верхней панели показывает, что начальный гауссов сигнал разделился на два сигнала, короткий и длинный. Короткий сигнал, составленный из короткопериодических гармоник, со временем быстро затухает. На нижних панелях представлены вейвлет-спектры полученных сигналов, построенные с использованием вейвлета Морле. Кроме одного максимума, характерного для квазигауссова сигнала, мы видим второй максимум, лежащий в области длинных периодов. Со временем он становится основным, а короткопериодический исчезает вследствие быстрого затухания. На расстоянии 58 Мм максимумы имеют значения 5.11 и 13.3 мин при характерных значениях параметров корональной плазмы $T_0 = 1$ МК, $n_0 = 0.45 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Они вполне укладываются в рамки наблюдаемых значений.

Моделирование позволило показать, что появление двух максимумов в спектре временных сигналов, полученных при наблюдении волн сжатия, обусловлено особенностями свойств затухания и дисперсии акустических волн в корональной плазме. Получаемые при этом вейвлет-спектры демонстрируют широкий непрерывный спектр периодов, характерный для импульсных возмущений. Поскольку групповая

скорость акустических волн меньше фазовой [7–8], становится ясной низкая скорость распространения волн сжатия в сравнении со звуковой скоростью.

Заключение

Проведенное тщательное изучение свойств дисперсии и затухания акустических волн в высокотемпературной разреженной плазме позволяет по-новому интерпретировать природу корональных волн сжатия, имеющих большое значение для решения фундаментальных проблем гелиофизики. Каждый всплеск в регистрируемых временных сигналах интенсивности КУФ-излучения можно рассматривать как отражение локализованного возмущения, которое генерируется в нижней атмосфере и затем переносится в корону. Под действием дисперсии и затухания каждое узколокализованное начальное возмущение генерирует отдельный наблюдаемый сигнал, в спектре которого имеются два четко выделенных периода. Тогда так называемые волны сжатия можно представить как цепочки таких возмущений, генерируемых независимо друг от друга и имеющих различные периоды. Такой подход сразу объясняет первые два признака волн сжатия. Возмущения распространяются со скоростью, значения которой близки к групповой скорости, которая всегда меньше фазовой. Это объясняет и третий признак. Отметим также, что периоды, полученные из вейвлет-анализа, зависят не только от параметров корональной плазмы, но и от длины начального импульса. Это дает возможность находить по регистрируемым периодам параметры начальных возмущений, которые генерируются в нестационарных процессах, происходящих в нижней атмосфере.

Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензенту за полезные замечания, которые уточняют реальные границы используемых предположений и позволяют ставить новые задачи исследования акустических возмущений.

Финансирование

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ № 075-03-2024-113.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

Б.Б. Михалеев – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования, анализ и обсуждение результатов, подготовка текста статьи.

С.Б. Дертеев – подбор литературных источников, разработка математической модели, проведение аналитических расчетов, анализ и обсуждение результатов.

Н.К. Шивидов – участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

М.Е. Сапралиев – проведение численных расчетов.

Список литературы

1. *De Moortel I.* Longitudinal waves in coronal loops // *Space Science Reviews*, 2009. V. 149. Iss. 1–4. P. 65–81. DOI: 10.1007/s11214-009-9526-5.
2. *Banerjee D., Krishna Prasad S., Pant V., McLaughlin J.A., Antolin P., Magyar N., Ofman L., Tian H., Van Doorsselaere T., De Moortel I., Wang T.J.* Magnetohydrodynamic waves in open coronal structures // *Space Science Reviews*, 2021. V. 217. Article id. 76. DOI: 10.1007/s11214-021-00849-0.
3. *Wang T., Ofman O., Yuan D., Reale F., Kolotkov D.Y., Srivastava A.K.* Slow-mode magnetoacoustic waves in coronal loops // *Space Science Reviews*, 2021. V. 217. Article number 34. DOI: 10.1007/s11214-021-00811-0.
4. *Gupta G.R., Teriaca L., Marsch E., Solanki S.K., Banerjee D.* Spectroscopic observations of propagating disturbances in a polar coronal hole: evidence of slow magneto-acoustic waves // *Astronomy Astrophysics*, 2012. V. 546. Iss. A@A. Article number A93. DOI: 10.1051/0004-6361/201219795.

5. Krishna Prasad S., Banerjee D., Van Doorsselaere T. Frequency-dependent in propagating slow magneto-acoustic waves // *The Astrophysical Journal*, 2014. V. 789. № 2. P. 118. DOI: 10.1088/0004-637X/789/2/118.
6. Бембитов Д.Б., Дертеев С.Б., Шивидов Н.К., Михальев Б.Б. Акустические волны в разреженной высокотемпературной плазме // *Вестник НИЯУ МИФИ*, 2022. Т. 11. № 4. С. 288–295. DOI: 10.26583/vestnik.2022.3.
7. Derteev S., Shvidov N., Bembitov Dz., Mikhalyaev B. Damping and dispersion of non-adiabatic acoustic waves in a high-temperature plasma: a radiative-loss function // *Physics*, 2023. V.5(1). P. 215–228. DOI: 10.3390/physics5010017.
8. Mikhalyaev B.B., Derteev S.B., Shvidov N.K., Sapraliev M.E., Bembitov D.B. Acoustic waves in a high-temperature plasma II. Damping and instability // *Solar Physics*, 2023. V. 298. Article number 102. DOI: 10.1007/s11207-023-02196-5.
9. Oliver R., Ruderman M.S., Terradas J. Propagation and dispersion of sausage wave trains in magnetic flux tubes // *The Astrophysical Journal*, 2015. V. 806. № 1. P. 56. DOI: 10.1088/0004-637X/806/1/56.
10. Roberts R. MHD Waves in the Solar Atmosphere. University Printing House, Cambridge. 2019. 508 p.
11. Nakariakov V.M., Pascoe D.J., Arber T.D. Short quasi-periodic MHD waves in coronal structures // *Space Science Reviews*, 2005. V. 121. P. 115–125. DOI: 10.1007/s11214-006-4718-8.
12. Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Moss G., Shellard P. Fast magnetoacoustic wave trains: from tadpoles to boomerangs // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021. V. 505. Iss. 3. P. 3505–3513. DOI:10.1093/mnras/stab1587.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2026, vol. 15, no. 3, pp. 191–198

Formation of multiperiodic oscillations in a high-temperature plasma

B. B. Mikhalyaev[✉], S. B. Derteev, N. K. Shvidov, M. E. Sapraliev

Kalmyk State University named after B. B. Gorodovikov, Elista, 358000, Russia

[✉] bbmikh@mail.ru

Received November 18, 2025; revised May 25, 2026; accepted May 26, 2026

One of the most common non-stationary phenomena in the solar atmospheric plasma are coronal compression waves, observed ubiquitously in the extreme ultraviolet range. The importance of studying them is due to their possible involvement in plasma heating and solar wind acceleration. Numerous observations and spectral analysis of compression waves reveal features that differ significantly from those of conventional waves. We believe that they can be viewed as sequences of individual localized acoustic disturbances. Based on our refinement of the damping and dispersion properties of acoustic waves in a heat-conducting, high-temperature plasma with radiative losses, we are able to explain the main observed features of compression waves, including the formation of two dominant periods in the spectrum. We believe that their detailed study may also shed light on non-stationary processes in the lower atmosphere.

Keywords: plasma, thermal conductivity and radiation of the plasma, acoustic waves, dispersion and damping of waves, quasi-periodic oscillations.

References

1. De Moortel I. Longitudinal waves in coronal loops. *Space Science Reviews*, 2009. Vol. 149. Iss. 1–4. Pp. 65–81. DOI: 10.1007/s11214-009-9526-5.
2. Banerjee D., Krishna Prasad S., Pant V., McLaughlin J.A., Antolin P., Magyar N., Ofman L., Tian H., Van Doorsselaere T., De Moortel I., Wang T.J. Magnetohydrodynamic waves in open coronal structures. *Space Science Reviews*, 2021. Vol. 217. Iss. 7. Article id. 76. DOI: 10.1007/s11214-021-00849-0.
3. Wang T., Ofman O., Yuan D., Reale F., Kolotkov D.Y., Srivastava A.K. Slow-mode magnetoacoustic waves in coronal loops. *Space Science Reviews*, 2021. Vol. 217. Article number 34. DOI: 10.1007/s11214-021-00811-0.
4. Gupta G.R., Teriaca L., Marsch E., Solanki S.K., Banerjee D. Spectroscopic observations of propagating disturbances in a polar coronal hole: evidence of slow magneto-acoustic waves. *Astronomy Astrophysics*, 2012. Vol. 546. Iss. A@A. Article number A93. DOI: 10.1051/0004-6361/201219795.

5. *Krishna Prasad S., Banerjee D., Van Doorsselaere T.* Frequency-dependent in propagating slow magneto-acoustic waves. *The Astrophysical Journal*, 2014. Vol. 789, no. 2 . Pp. 118. DOI: 10.1088/0004-637X/789/2/118.
6. *Bembitov D.B., Derteev S.B., Shividov N.K., Mikhalyaev B.B.* Akusticheskie volny v razrezhennoi vysokotemperaturnoi plazme [Acoustic waves in rarefied high-temperature plasma]. *Vestnik NIYAU MIFI*, 2022. Vol. 11. no. 4. Pp. 288–295. DOI: 10.26583/vestnik.2022.3 (in Russian).
7. *Derteev S., Shividov N., Bembitov D.B., Mikhalyaev B.* Damping and dispersion of non-adiabatic acoustic waves in a high-temperature plasma: a radiative-loss function. *Physics*, 2023. Vol. 5(1). Pp. 215–228. DOI: 10.3390/physics5010017.
8. *Mikhalyaev B.B., Derteev S.B., Shividov N.K., Sapraliev M.E., Bembitov D.B.* Acoustic waves in a high-temperature plasma II. Damping and instability. *Solar Physics*, 2023. Vol. 298. Article number 102. DOI: 10.1007/s11207-023-02196-5.
9. *Oliver R., Ruderman M.S., Terradas J.* Propagation and dispersion of sausage wave trains in magnetic flux tubes. *The Astrophysical Journal*, 2015. Vol. 806. No.1. Pp. 56. DOI: 10.1088/0004-637X/806/1/56.
10. *Roberts R.* MHD Waves in the Solar Atmosphere. University Printing House, Cambridge. 2019. 508 p.
11. *Nakariakov V.M., Pascoe D.J., Arber T.D.* Short quasi-periodic MHD waves in coronal structures. *Space Science Reviews*, 2005. Vol. 121. Pp. 115–125. DOI: 10.1007/s11214-006-4718-8.
12. *Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Moss G., Shellard P.* Fast magnetoacoustic wave trains: from tadpoles to boomerangs, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021. Vol. 505. Iss. 3. Pp. 3505–3513. DOI: 10.1093/mnras/stab1587.

УДК 531.661

Расчетно-экспериментальные исследования по выбору системы снижения ударной нагрузки на защищаемом грузе

В. В. Доценко, О. Ю. Жабунина, Ю. Ю. Лушина, М. В. Никульшин

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Челябинская обл., 456770, Россия

Для снижения уровня нагружения грузов при однократном ударном воздействии используются специальные амортизационные системы. В статье рассматриваются варианты амортизаторов в виде конических и цилиндрических оболочек. С целью определения конструктивного облика и параметров амортизатора, способного снизить ускорения на защищаемом грузе при ударном нагружении, проведены расчетно-экспериментальные исследования. По результатам первых испытаний определено, что часть амортизаторов сработали не расчетно. В частности, в конических амортизаторах отсутствовало их деформирование и снижение ускорения на грузе. Одна из причин отличий экспериментальных результатов от расчетных заключается в использовании упрощенных моделей материалов. По итогам проведенной валидации расчетных моделей были уточнены механические характеристики материалов и определены наиболее подходящие модели материалов. При выполнении последующих экспериментов получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных результатов. На основе проведенных исследований даны рекомендации по выбору моделей материалов амортизаторов.

Ключевые слова: амортизатор, коническая оболочка, цилиндрическая оболочка, ударное нагружение, импульс ускорения, деформированное состояние.

Введение

Процесс эксплуатации некоторых грузов включает высокоинтенсивное ударное воздействие [1], при котором должна сохраниться (или продлиться) их живучесть. Для обеспечения сохранности груза от ударного нагружения применяются, в частности, амортизаторы однократного действия, способные снизить ускорения на защищаемом грузе (ЗГ) до допустимых величин.

В данной работе рассматривается система снижения нагрузок, приходящихся на груз массой 30 кг. В качестве ударного нагружения конструкции в расчетах и испытаниях принят импульс ускорения полусинусоидальной формы с амплитудой $a_{\max} = 1000 \text{ м/с}^2$ (перегрузка $n_{\max} = 100 \text{ ед.}$) длительностью $\tau = 15.3 \text{ мс}$. Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований амортизаторов ЗГ, разработанных на основе конических и цилиндрических оболочек.

Расчетные исследования выполнены в программе конечно-элементного анализа ЛОГОС-Прочность версии 5.3.23.87 (далее – ЛОГОС).

Конструкции амортизаторов и предварительные результаты численных расчетов

Для проведения исследований амортизаторов при ударном нагружении разработан экспериментальный макет, схема которого приведена на рис. 1. Амортизатор (поз. 1) и установленный на нем массовый

✉ М.В. Никульшин: M.V.Nikulshin@vniitf.ru

Поступила в редакцию: 24.03.2026

После доработки: 22.05.2026

Принята к публикации: 26.05.2026

EDN NXJJGQ

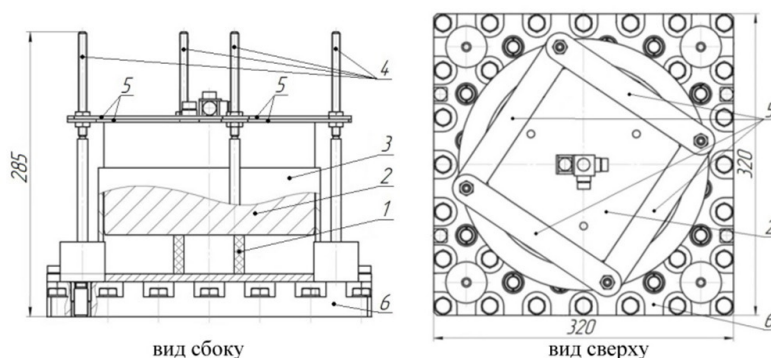


Рис. 1. Схема экспериментального макета

макет ЗГ (поз. 2) размещаются внутри гильзы (поз. 3) и совместно с ней поджимаются при помощи четырех шпилек (поз. 4) и планок (поз. 5) к плите (поз. 6) для исключения взаимного перемещения ЗГ и амортизатора. Требуемое воздействие на груз осуществляется на копровой установке путем падения экспериментального макета на стол установки с заданной высоты.

В процессе предварительных численных расчетов сборки ЗГ с амортизатором в условиях действия на нее принятого импульса ускорения рассмотрен ряд вариантов конических и цилиндрических оболочек, отличающихся по геометрическим параметрам и материалам. По результатам расчетных исследований состояний ЗГ с амортизаторами в условиях действия ударного импульса ускорения определены следующие наиболее подходящие варианты с точки зрения снижения ускорений на грузе:

- амортизатор в виде усеченной конической оболочки переменной толщины (далее – конический амортизатор) из стали 20¹ или сплава АМг6²;
- амортизатор в виде цилиндрической оболочки (далее – цилиндрический амортизатор) из пенопласта ПС-1-100, ПС-1-350³ или фторопласта Ф-4⁴.

Схемы перечисленных амортизаторов представлены на рис. 2 и 3, физико-механические характеристики их материалов, принятые в расчетах в соответствии с нормативными документами и справочниками, в табл. 1.

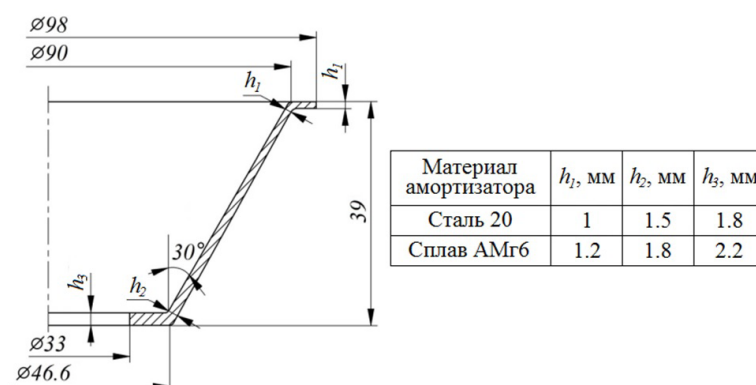


Рис. 2. Схема конического амортизатора

¹ ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. Взамен ГОСТ 1050-88, введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2015. 20 с.

² ГОСТ 21631-2023. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Взамен ГОСТ 21631-76, введ. 2024-02-01. М.: ФГБУ «РСТ», 2024.

³ ТУ2244-461-05761784-01. Пенопласт полистирольный плиточный марок ПС-1 и ПС-4. Технические условия. Взамен ТУ6-05-1178-87, введ. 2002-01-01.

⁴ ТУ6-05-810-88. Заготовки общего назначения из фторопласта-4, фторопласта-4А и фторопласта-4 модифицированного. Технические условия. Взамен ТУ6-05-810-76, введ. 1989-07-01.

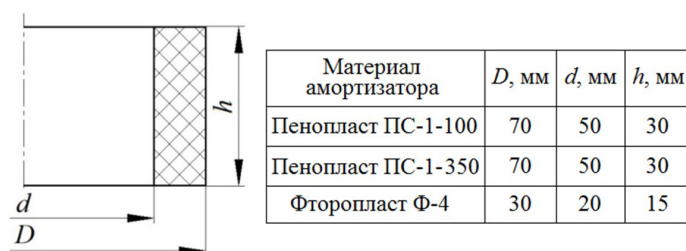


Рис. 3. Схема цилиндрического амортизатора

Таблица 1. Физико-механические характеристики материалов амортизаторов

Амортизатор	Материал	ρ , г/мм ³	E , МПа	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %
Конический	Сталь 20 ¹	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^5$	245	410	25
	Сплав АМг6 ²	$2.75 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^4$	155	315	15
Цилиндрический	Пенопласт ПС-1-100 ³ [2]	$1 \cdot 10^{-4}$	120*	2.6*	5.7*	—
	Пенопласт ПС-1-350 ³ [2]	$3.5 \cdot 10^{-4}$	310*	8.6*	77.7*	—
	Фторопласт Ф-4 ⁴ [2]	$2.2 \cdot 10^{-3}$	410*	13*	25*	—

В таблице приняты следующие обозначения:
 ρ – плотность материала; E – модуль упругости; σ_t – предел текучести; σ_b – предел прочности;
 δ – относительное удлинение после разрыва.
 Примечание: * – значения механических характеристик при сжатии материала.

По результатам расчетов получены две различные картины работы амортизаторов:

- снижение ускорения в центре массы (ЦМ) ЗГ на 15–20 % реализуется в течение всего времени действия нагружения (сплошные кривые, рис. 4). Такая работа характерна для конических амортизаторов из металлических материалов;
- более эффективное снижение ускорения в ЦМ ЗГ на 20–80 %, которое возникает только на этапе срабатывания амортизаторов, но до окончания действия импульса происходит ударное нагружение груза,

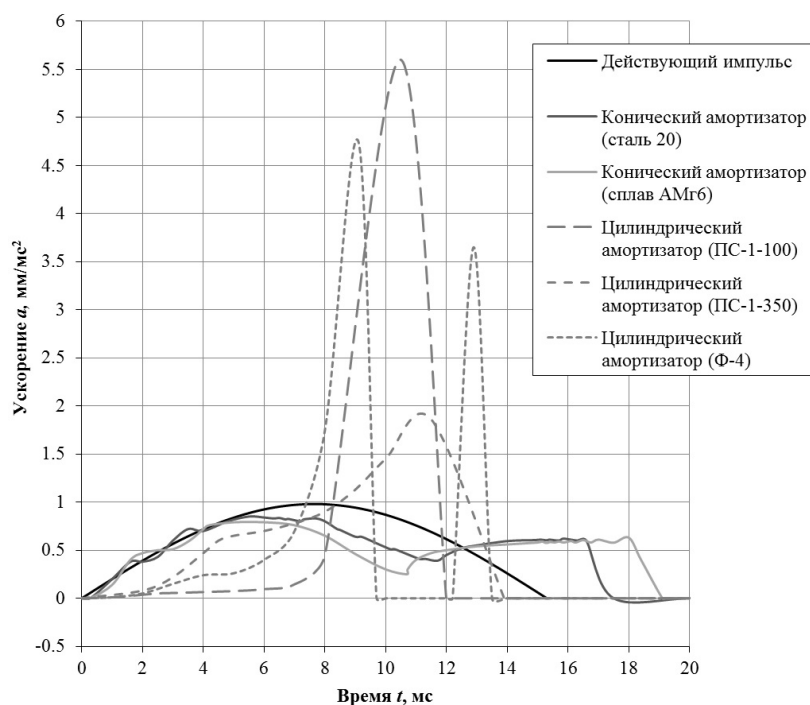


Рис. 4. Графики ускорения в ЦМ ЗГ при использовании амортизаторов по результатам предварительных расчетов

и, соответственно, наблюдается резкий рост ускорения (пунктирные кривые, рис. 4). Такое поведение проявляют цилиндрические амортизаторы из пенопласта и фторопласта.

Анализ результатов расчетов и испытаний по ударному нагружению амортизаторов с грузом

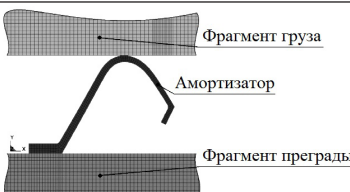
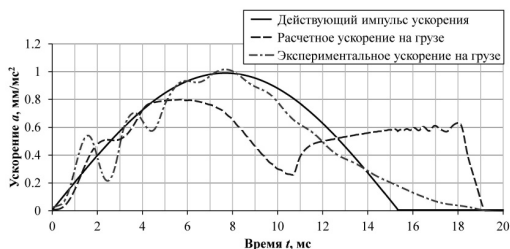
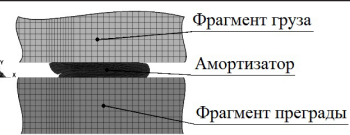
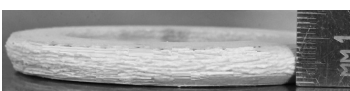
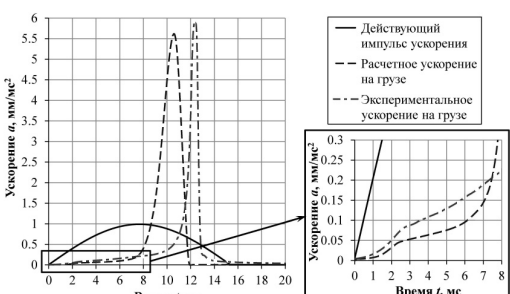
Для уточнения полученных предварительных расчетных результатов по способности амортизаторов к снижению нагружения ЗГ проведены ударные испытания на копровой установке с использованием макета, схема которого приведена на рис. 1, при действии принятого импульса ускорения с амплитудой $a_{\max} = 1000 \text{ м/с}^2$.

Полученные экспериментальные данные имеют отличия от расчетных оценок. Их сравнение по виду деформирования амортизаторов, остаточной высоте $H_{\text{ост}}$ и графикам ускорения в ЦМ ЗГ приведено в табл. 2.

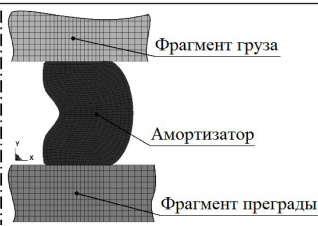
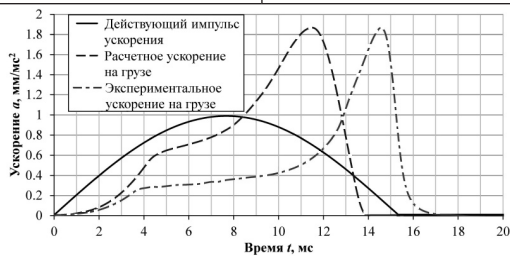
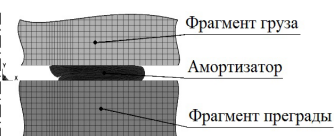
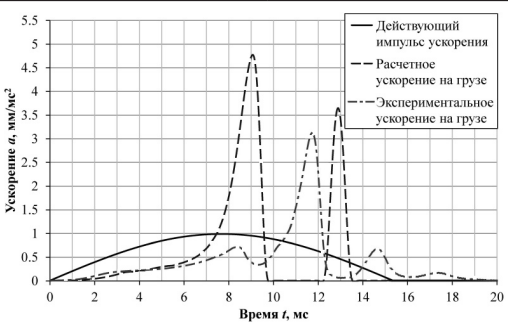
Образцы конических амортизаторов не сработали вследствие отсутствия их пластического деформирования, в то время как по расчетам прогнозировалось уменьшение их высоты. Таким образом, в эксперименте при использовании таких амортизаторов снижение ускорения в ЦМ груза отсутствовало.

В случае применения цилиндрических амортизаторов при ударном нагружении в ходе экспериментов получено их деформирование, по форме близкое к расчетному. При этом наиболее удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных результатов достигнуто для амортизаторов из пено-

Таблица 2. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов по ударному нагружению амортизаторов импульсом ускорения с амплитудой $a_{\max} = 1000 \text{ м/с}^2$

Амортизатор	Результаты	Численный расчет	Эксперимент
Амортизатор из сплава АМг6 (амортизатор из стали 20 ведет себя аналогично)	Вид деформирования амортизатора		
	$H_{\text{ост}}$, мм	22.2	39
	График ускорения в ЦМ ЗГ		
Амортизатор из пенопласта ПС-1-100	Вид деформирования амортизатора		
	$H_{\text{ост}}$, мм	9	8.5
	График ускорения в ЦМ ЗГ		

Продолжение табл. 2

Амортизатор	Результаты	Численный расчет	Эксперимент
Амортизатор из пенопласта ПС-1-350	Вид деформирования амортизатора		
	$H_{ост}$, мм	20.5	10.1
	График ускорения в ЦМ ЗГ		
Амортизатор из фторопласта Ф4	Вид деформирования амортизатора		
	$H_{ост}$, мм	2.8	4.1
	График ускорения в ЦМ ЗГ		

пласта ПС-1-100 и фторопласта Ф-4. Отличие экспериментальных ускорений в ЦМ груза от расчетных значений при использовании данных амортизаторов на этапе их срабатывания до момента времени $t = 6 - 7.5$ мс, когда происходит снижение ускорения в ЦМ ЗГ, составляет не более чем в 1.5 раза. Как и в расчетах, в процессе испытаний с цилиндрическими амортизаторами также не удается избежать ударного нагружения груза в течение действия импульса ускорения. Но полное сжатие амортизаторов и последующее ударное нагружение ЗГ в ходе испытаний происходило позднее, чем при расчетах.

Для амортизатора из пенопласта ПС-1-350 отмечается двукратное отличие расчетных результатов от экспериментальных по его остаточной высоте и ускорению в ЦМ груза на этапе срабатывания до момента времени $t = 8$ мс.

По данным испытаний при действии на конические амортизаторы ударного импульса ускорения с амплитудой $a_{max} = 1000$ м/с² их срабатывание не произошло. При использовании цилиндрических амортизаторов получено снижение ускорения на грузе в 1.3–4 раза в течение времени их срабатывания $t = 10 - 12$ мс. Но после окончания работы амортизаторов в течение действия импульса ускорения реализуется удар ЗГ и рост на нем ускорения до величины, существенно превышающей амплитуду действующего нагружения.

Валидация расчетных моделей амортизаторов на основе результатов испытаний

Проведенный анализ показал, что возможной причиной отличия численных и экспериментальных результатов по ударному нагружению амортизаторов является выбор упрощенных моделей материала для рассматриваемого ударного типа воздействия. Исходя из этого, ниже для амортизаторов проводится валидация моделей материалов на основе имеющихся результатов ударных испытаний.

Конические амортизаторы

Для конических амортизаторов в расчетной модели изначально задавалась модель упруго-пластического материала с билинейной диаграммой деформирования на основе минимальных стандартных механических характеристик, указанных в табл. 1. В ходе валидации расчетной модели конического амортизатора были рассмотрены следующие модели материалов, имеющиеся в наличии программы ЛОГОС⁵:

– упрощенная модель Джонсона – Кука, учитывающая влияние скорости деформации на механические характеристики материала [3]. В данной модели заложена динамическая диаграмма деформирования материала путем введения параметров;

– модель упруго-пластического материала с кусочно-линейной диаграммой деформирования, которая задается в виде зависимости напряжения от деформации $\sigma(\epsilon)$. Для этой модели рассматриваются два варианта диаграммы деформирования – статическая диаграмма [4] и степенная аппроксимация диаграммы деформирования, близкая к истинной диаграмме [5].

Параметры, задаваемые в перечисленных моделях материалов и изначально выбранных моделях для сплава АМг6 и стали 20, представлены в таблице 3. Соответствующие им диаграммы деформирования приведены на рис. 5 и 6.

Таблица 3. Модели материалов конических амортизаторов из сплава АМг6 и стали 20 и их параметры

Материал конического амортизатора	Модель материала	Параметры модели	Диаграмма деформирования
Сплав АМг6	Модель упруго-пластического материала с билинейной диаграммой деформирования (первоначальный выбор)	$\rho = 2.75 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$, $E = 7 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $\mu = 0.37$, $\sigma_t = 155 \text{ МПа}$, $E_t = 1067 \text{ МПа}^2$	Черная сплошная кривая на рис. 5 (билинейная диаграмма деформирования)
	Упрощенная модель Джонсона – Кука	$\rho = 2.75 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$, $E = 7 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $\mu = 0.37$, $A = 151 \text{ МПа}$, $B = 533 \text{ МПа}$, $C = 0$, $n = 0.26$ [3]	Серая сплошная кривая на рис. 5 (динамическая диаграмма деформирования)
	Модель упруго-пластического материала с кусочно-линейной диаграммой деформирования	$\rho = 2.75 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$, $E = 7 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $\mu = 0.37$, $\sigma_t = 155 \text{ МПа}$, зависимость $\sigma(\epsilon)$	Черная пунктирная кривая на рис. 5 (статическая диаграмма)
			Серая пунктирная кривая на рис. 5 (истинная диаграмма)
Сталь 20	Модель упруго-пластического материала с билинейной диаграммой деформирования (первоначальный выбор)	$\rho = 7.8 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$, $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\mu = 0.3$, $\sigma_t = 245 \text{ МПа}$, $E_t = 660 \text{ МПа}^1$	Черная сплошная кривая на рис. 6 (билинейная диаграмма деформирования)
	Упрощенная модель Джонсона – Кука	$\rho = 7.8 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$, $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\mu = 0.3$, $A = 562 \text{ МПа}$, $B = 890 \text{ МПа}$, $C = 0.0149$, $n = 0.987$ [3]	Серая сплошная кривая на рис. 6 (динамическая диаграмма деформирования)
	Модель упруго-пластического материала с кусочно-линейной диаграммой деформирования	$\rho = 7.8 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$, $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\mu = 0.3$, $\sigma_t = 245 \text{ МПа}$, зависимость $\sigma(\epsilon)$	Черная пунктирная кривая на рис. 6 (статическая диаграмма)
			Серая пунктирная кривая на рис. 6 (истинная диаграмма)

⁵ Руководство пользователя ЛОГОС версии 5.3.23.87. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2023.

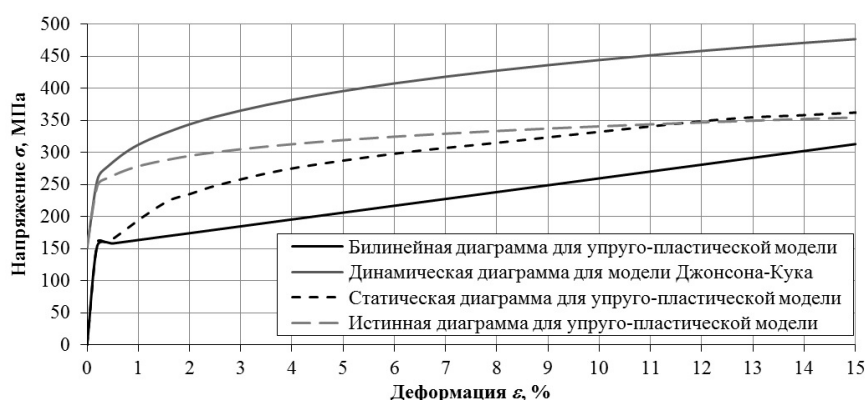


Рис. 5. Диаграммы деформирования сплава АМгб

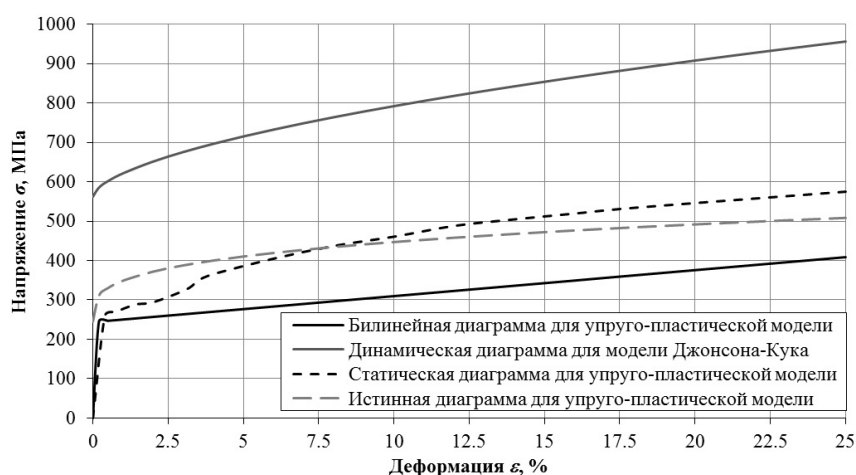


Рис. 6. Диаграммы деформирования стали 20

В результате проведенных расчетов конических амортизаторов с использованием указанных выше моделей материалов определено, что наилучшее согласование результатов с экспериментальными данными происходит в случае применения модели упруго-пластического материала со степенной аппроксимацией диаграммы деформирования (истинной диаграммой).

Ввиду отсутствия деформирования конических амортизаторов при действии импульса ускорения с амплитудой $a_{\max} = 1000 \text{ м/с}^2$, по результатам расчетов для оценки их работы по снижению нагружения ЗГ принято решение увеличить амплитуду ударной нагрузки в 1.5 раза без изменения длительности ее действия ($\tau = 15.3 \text{ мс}$).

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов по ударному нагружению конических амортизаторов импульсом ускорения с амплитудой $a_{\max} = 1500 \text{ м/с}^2$ представлено в таблице 4.

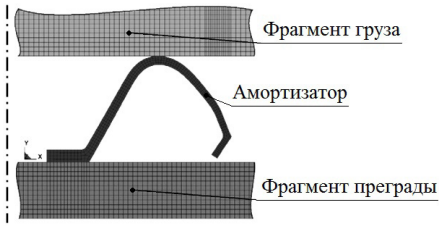
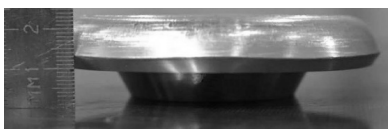
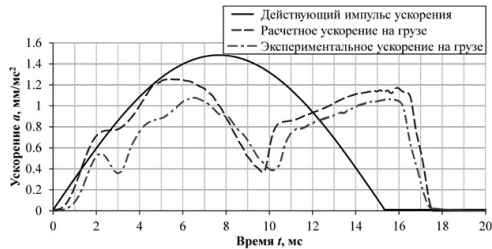
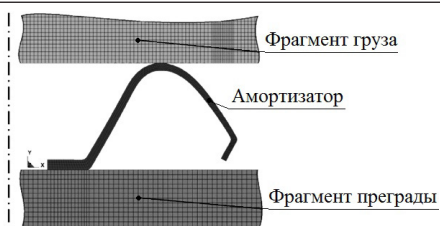
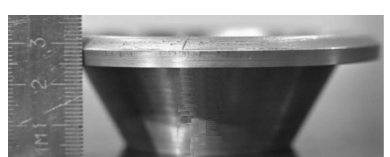
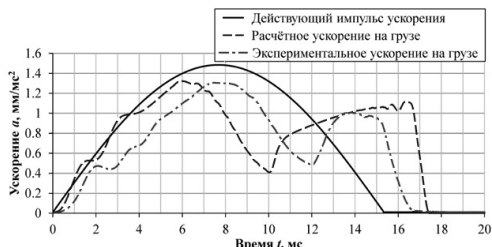
Приведенные расчетные и экспериментальные данные по графикам ускорений в ЦМ ЗГ в условиях действия ударного нагружения хорошо согласуются, максимальные расчетные значения отличаются от экспериментальных не более чем на 15 %.

Анализ полученных экспериментальных данных по коническим амортизаторам позволяет сделать вывод, что в условиях ударного нагружения происходит снижение ускорения на ЗГ в 1.2–1.4 раза относительно амплитуды действующего импульса $a_{\max} = 1500 \text{ м/с}^2$ в течение всего времени действия.

Цилиндрические амортизаторы

При расчетах цилиндрических амортизаторов для их материала первоначально использовалась модель упруго-пластического материала с кусочно-линейной диаграммой деформирования, в которой была задана диаграмма на сжатие материала (для пенопласта ПС-1-100, ПС-1-350 и фторопласта Ф-4,

Таблица 4. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов по ударному нагружению конических амортизаторов импульсом ускорения с амплитудой $a_{\max} = 1500 \text{ м/с}^2$

Амортизатор	Результаты	Численный расчет	Эксперимент
Амортизатор из сплава АМг6	Вид деформирования амортизатора		
	$H_{\text{ост}}, \text{ мм}$	18.7	23.2
	График ускорения в ЦМ ЗГ		
Амортизатор из стали 20	Вид деформирования амортизатора		
	$H_{\text{ост}}, \text{ мм}$	18.8	32.2
	График ускорения в ЦМ ЗГ		

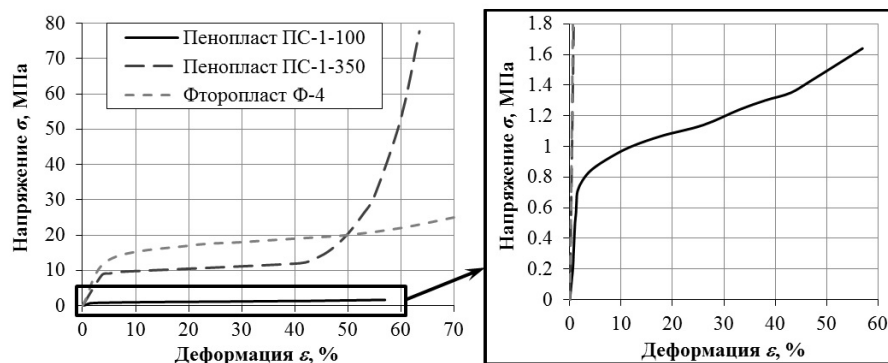


Рис. 7. Диаграммы деформирования при сжатии материалов цилиндрических амортизаторов

рис. 7). Следует отметить, что в ходе углубленного анализа выявлено, что одной из причин отличия расчетных результатов по амортизатору из пенопласта ПС-1-350 от эксперимента является несоот-

ветствие марки материала, из которого были изготовлены образцы. Вместо амортизатора из пенопласта ПС-1-350 при испытаниях использовался образец из пенопласта ПС-1-200, экспериментальная диаграмма деформирования которого в 4 раза ниже диаграммы изначально выбранного материала (рис. 8), чем и объясняется существенное различие первоначальных результатов расчета и эксперимента для данного амортизатора.

В процессе валидации расчетной модели цилиндрического амортизатора из пенопласта ПС-1-200 рассматривались следующие модели материала⁵:

- модель упруго-пластического материала с кусочно-линейной диаграммой деформирования (с параметрами для пенопласта ПС-1-200, в отличие от изначально выбранной модели);
- модель изотропного упруго-пластического материала с различными значениями пределов текучести на сжатие и растяжение;
- модель пористого материала с функцией релаксации на основе разложения в ряд Прони;
- модель пеноматериала;
- модель пористого материала с анизотропными свойствами.

Параметры, задаваемые в указанных моделях материалов для пенопласта ПС-1-200, представлены в табл. 5, где также для сравнения приведены параметры изначально выбранной модели пенопласта ПС-1-350.

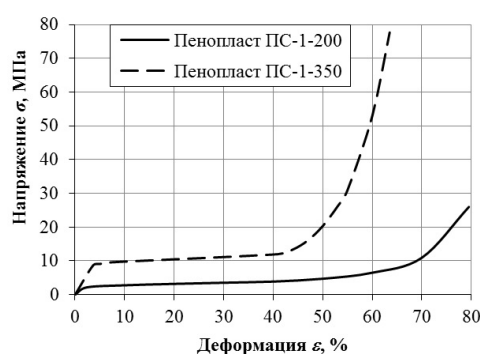


Рис. 8. Сравнение диаграмм деформирования при сжатии пенопласта марок ПС-1-350 и ПС-1-200

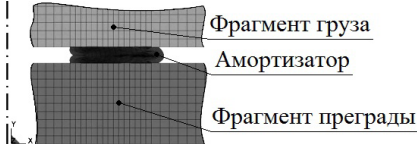
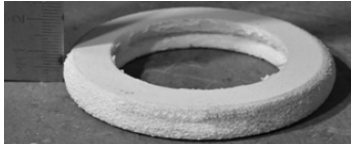
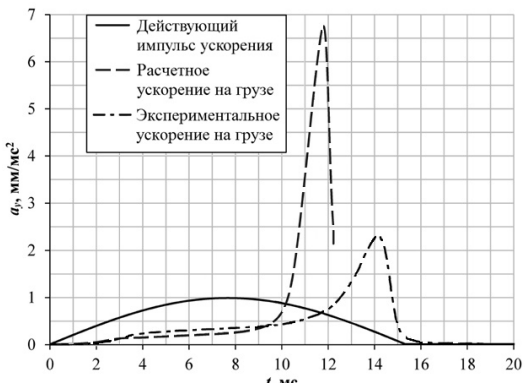
Таблица 5. Модели материалов цилиндрического амортизатора из пенопласта марок ПС 1 350³ и ПС-1-200³ [2] и их параметры

Модель материала	Параметры модели
Модель упруго-пластического материала с кусочно-линейной диаграммой деформирования (первоначальный выбор)	$\rho = 3.5 \cdot 10^{-4}$ г/мм ³ , $E = 310$ МПа, $\mu = 0.1$, $\sigma_t = 8.6$ МПа, диаграмма деформирования пенопласта ПС-1-350 (пунктирная кривая на рис. 8)
Модель упруго-пластического материала с кусочно-линейной диаграммой деформирования	$\rho = 2 \cdot 10^{-4}$ г/мм ³ , $E = 240$ МПа, $\mu = 0.1$, $\sigma_t = 2.5$ МПа, диаграмма деформирования пенопласта ПС-1-200 (сплошная кривая на рис. 8)
Модель изотропного упруго-пластического материала с различными значениями пределов текучести на сжатие и растяжение	$\rho = 2 \cdot 10^{-4}$ г/мм ³ , $E = 240$ МПа, $\mu = 0.1$, диаграммы деформирования при сжатии и растяжении пенопласта ПС-1-200 (при растяжении задан фрагмент сплошной кривой на рис. 8 до деформации $\epsilon = 3$ %)
Модель пористого материала с функцией релаксации на основе разложения в ряд Прони	$\rho = 2 \cdot 10^{-4}$ г/мм ³ , $E = 240$ МПа, $k_{\text{демп}} = 0.2$, диаграмма деформирования при сжатии (сплошная кривая на рис. 8)
Модель пеноматериала	$\rho = 2 \cdot 10^{-4}$ г/мм ³ , $E = 240$ МПа, $\mu = 0.1$, $k_{\text{демп}} = 0.2$, диаграмма деформирования при сжатии (сплошная кривая на рис. 8)
Модель пористого материала с анизотропными свойствами	$\rho = 2 \cdot 10^{-4}$ г/мм ³ , $E = 240$ МПа, $G = 141$ МПа, $\mu = 0.1$, $\sigma_t = 2.5$ МПа, диаграмма деформирования при сжатии (сплошная кривая на рис. 8)

По результатам последующих расчетов цилиндрического амортизатора определено, что наиболее удовлетворительное согласование расчетных данных с экспериментальными по видам деформирования и графикам ускорения в ЦМ ЗГ достигается в случае применения модели пеноматериала. В табл. 6 приведено сравнение результатов расчета амортизатора из пенопласта ПС-1-200 при использовании указанной модели с экспериментальными данными.

В отличие от остальных рассмотренных моделей материалов цилиндрического амортизатора из пенопласта ПС-1-200 при использовании модели пеноматериала получено более длительное время его работы до $t = 10$ мс и близкие расчетные значения ускорений к экспериментальным данным. Расчетные ускорения в ЦМ ЗГ в течение работы амортизатора до времени $t = 10$ мс отличаются от экспериментальных значений в 1.5 раза.

Таблица 6. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов по ударному нагружению амортизатора из пенопласта ПС-1-200 импульсом ускорения с амплитудой $a_{\max} = 1000 \text{ м/с}^2$

Результаты	Численный расчет	Эксперимент
Вид деформирования амортизатора		
$H_{\text{ост}}, \text{ мм}$	1.4	10.1
График ускорения в ЦМ ЗГ		

Ударное нагружение груза в процессе расчета происходит на 2–3 мс раньше, чем в ходе испытания. Причинами такого отличия, вероятно, являются:

- несимметричность деформирования опытного образца при потере устойчивости (в процессе деформирования цилиндрический амортизатор принимает с одной стороны выпуклую бочкообразную форму, а с другой – вогнутую форму), что не учитывается при моделировании состояния амортизатора в плоской осесимметричной постановке;
- незначительное отклонение формы и размеров в рамках допусков опытного образца амортизатора от расчетной (идеальной) схемы, представленной на рис. 3.

Валидация моделей материалов пенопласта ПС-1-100 и фторопласта Ф-4 не проводилась. Но на основе имеющихся расчетных данных по цилиндрическому амортизатору из пенопласта ПС-1-200 можно заключить, что для амортизаторов из пенопласта ПС-1-100 и фторопласта Ф-4 при использовании модели пенomатериала также будут получены более близкие к эксперименту результаты, в отличие от первоначальных. При этом, возможно, момент ударного нагружения ЗГ в случае использования амортизатора из пенопласта ПС-1-100 по расчетным результатам приблизится по времени к экспериментальному ударному нагружению, поскольку для данного амортизатора деформирование опытного образца имеет равномерную выпуклую бочкообразную форму (табл. 2).

Заключение

Темой представленной работы является обеспечение защиты и сохранности грузов при высокоинтенсивном ударном нагружении путем их оснащения амортизаторами на основе использования конических и цилиндрических оболочек. Рассмотрены конические и цилиндрические амортизаторы с различными геометрическими параметрами и материалами для их изготовления. В качестве ударного нагружения ЗГ принят импульс ускорения полусинусоидальной формы длительностью $\tau = 15.3 \text{ мс}$. В случае оснащения груза цилиндрическими амортизаторами амплитуда импульса ускорения составляет $a_{\max} = 1000 \text{ м/с}^2$, а при использовании конических амортизаторов амплитуда равна $a_{\max} = 1500 \text{ м/с}^2$. В работе проведена валидация расчетных результатов по итогам испытаний, и выбраны наиболее подходящие модели материалов амортизаторов из представленных в программе ЛОГОС. Для конических амортизаторов хорошее согласование результатов расчетов с экспериментальными данными проис-

ходит в случае применения модели упруго-пластического материала со степенной аппроксимацией диаграммы деформирования (близкой к истинной диаграмме), а для цилиндрических амортизаторов – при использовании модели пеноматериала.

По результатам проведенных расчетно-экспериментальных исследований амортизаторов получены следующие данные:

- конические амортизаторы из сплава АМг6 и стали 20 позволили снизить ускорения на грузе в течение всего времени действия ударного импульса. При использовании данных амортизаторов ускорения на грузе относительно амплитуды действующего нагружения уменьшаются на 13–28 %;
- цилиндрические амортизаторы из пенопласта ПС-1 и фторопласта Ф-4 снижают ускорения на грузе более эффективно (на 25–70 %). Недостатком данных амортизаторов является реализация ударного нагружения на грузе после выбора хода амортизатора.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

М.В. Никульшин – формулировка идеи и целей исследования, анализ расчетных и экспериментальных данных.

В.В. Доценко – постановка задачи, разработка концепции расчетных исследований, постановка эксперимента, анализ расчетных и экспериментальных данных, определение причин отличия результатов расчётов от эксперимента, редактирование текста статьи.

О.Ю. Жабунина – разработка концепции расчетных исследований, поиск моделей материалов амортизаторов для моделирования их поведения в программе ЛОГОС, анализ расчетных и экспериментальных данных, редактирование текста статьи.

Ю.Ю. Лушина – проведение численных расчётов, анализ расчётных и экспериментальных данных, валидация расчетных моделей материалов амортизаторов на основе результатов испытаний, подготовка текста статьи.

Список литературы

1. Бирбраер А.Н., Роleder А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 594 с.
2. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
3. Брагов А.М., Игумнов Л.А., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. Высокоскоростная деформация материалов различной физической природы: монография. Н.Новгород, 2020. 299 с.
4. Гохфельд Д.А., Гецов Л.Б., Кононов К.М., Кульчихин Е.Т., Ребяков Ю.Н., Садаков О.С., Тимашев С.А., Чепурский В.Н. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: Справочник. Екатеринбург: УрО РАН; 1996. 408 с.
5. Пономарев С.Д. Расчет на прочность в машиностроении. В 3-х томах. Том 2. М.: Машгиз, 1958.

Calculation and experimental study on selecting a system to reduce impact loads on a protected cargo

V. V. Dotsenko, O. Yu. Zhabunina, Yu. Yu. Lushina, M. V. Nikulshin 

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Zababakhin Research Institute of Technical Physics», Snezhinsk, 456770, Russia

 M.V.Nikulshin@vniitf.ru

Received March 24, 2025; revised May 22, 2026; accepted May 26, 2026

Special damping systems are used to reduce loading of cargos at a single impact. The work considers the damping options in a form of conical and cylindrical shells. Calculation and experimental study was conducted to determine the conceptual design and parameters of the damper capable of decreasing accelerations across the protected cargo at impact loading. The results of the first tests show that some dampers did not operate as designed. In particular, no deformation of conical dampers neither deceleration across the cargo was observed. Among other causes, the use of simplified material models resulted in deviation of the experimental results from the calculation. Upon validation of the calculation models the mechanical characteristics of the materials were refined and the most suitable material models were determined. The results of further experiments showed a satisfactory agreement between the calculation and experimental results. The conducted study was used to issue recommendations on selecting material models for dampers.

Keywords: damper, conical shell, cylindrical shell, impact loading, acceleration pulse, deformed state.

References

1. *Birbrayer A.N., Roleder A.Yu. Ekstremal'nye vozdeystviya na sooruzheniya. [Extreme Impacts on Structures]. Saint-Petersburg: Polytechnic University Publ., 2009. 594 p. (in Russian).*
2. *Physical quantities: Handbook. Ed. by I.S. Grigorieva, E.Z. Meylikhova. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p. (in Russian).*
3. *Bragov A.M., Igumov L.A., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K. Vysokoskorostnaya deformatsiya materialov razlichnoj fizicheskoy prirody: monografiya. [High-rate deformation of materials of various physical nature: Monography]. Nizhniy Novgorod, 2020, 299 p. (in Russian).*
4. *Gokhfeld D.A., Getsov L.B., Kononov K.M., Kulchikhin E.T., Rebyakov Yu.N., Sadakov O.S., Timashev S.A., Chepur-skiy V.N. Mekhanicheskie svoystva stalej i spлавov pri nestacionarnom nagruzhenii: Spravochnik. [Mechanical properties of steels and alloys at unsteady-state loading: Handbook]. Ekaterinburg: Ural branch of the RAS, 1996, 408 p. (in Russian).*
5. *Ponomarev S.D. Raschet na prochnost' v mashinostroenii. V 3-h tomah. [Strength calculation in mechanical engineering. In 3 vol.] Vol. 2, Moscow, Mashgiz Publ., 1958 (in Russian).*

УДК 004.048

Система сбора и обработки геопространственных данных для проведения анализа с помощью машинного обучения

© 2026 г. В. А. Кузнецов¹, И. А. Лисенков²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

² Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Россия

В статье рассматриваются современные инструменты и подходы к проектированию ETL-систем для интеграции и предварительной обработки растровых, векторных и табличных геопространственных данных. Подготовленные данные могут быть использованы для последующего анализа методами машинного обучения. Предлагаемый подход основан на модульной архитектуре конвейера, адаптированной к особенностям GIS-форматов и обеспечивающей интеграцию с ML-пайплайнами без необходимости дорогостоящих лицензий и существенной доработки существующих платформ. Предложен специализированный ETL-конвейер на базе платформы OpenNeurons и СУБД PostgreSQL/PostGIS, включающий конфигурационные модули для описания источников и адаптеров, реализованных на Python с использованием библиотек geopandas, rasterio и pyshp. Система также включает драйвер для прямого взаимодействия с файловым хранилищем и выполнения плановых обновлений данных, а также веб-интерфейс для управления задачами, мониторинга и логирования. Разработанная система была протестирована на реальных геопространственных данных. В частности, был сформирован унифицированный набор данных, содержащий 227 геолого-геофизических параметров для восточного сектора Российской Арктики, подготовленный для последующего анализа методами машинного обучения. Кроме того, в задаче бинарной классификации 240 морфоструктурных узлов Кавказского региона с использованием алгоритмов Gradient Boosting и AutoKeras на тестовой выборке был достигнут F1-score, близкий к 1.0. Сравнение с алгоритмом КОРА-3 показало 67 % совпадение прогнозов, что свидетельствует о потенциальной применимости подхода и требует дополнительной валидации на независимых данных. По сравнению с универсальными ETL-решениями предложенная система характеризуется низкими затратами на внедрение, расширяемостью за счет пользовательских адаптеров и интеграцией с инструментами машинного обучения. Полученные результаты демонстрируют применимость разработанного ETL-конвейера для задач обработки геопространственных данных.

Ключевые слова: ETL, геопространственные данные, машинное обучение, ГИС, PostgreSQL, Python, PostGIS.

Введение

В эпоху стремительного роста объемов данных и их разнообразия процесс их интеграции и анализа становится неотъемлемой частью решения многих задач. Особое значение это приобретает в сфере обработки геопространственных данных, где требуется не только анализировать большие массивы информации, но и учитывать их пространственную природу, структуру и сложные взаимосвязи.

ETL (Extract-Transform-Load, или «Извлечение-Преобразование-Загрузка») является ключевой технологией в построении систем сбора, хранения и анализа данных. ETL-приложения выполняют задачи извлечения данных из различных источников, их преобразования в унифицированный формат и по-

✉ В.А. Лисенков: twi.lek@yandex.ru

Поступила в редакцию: 08.10.2025

После доработки: 22.05.2026

Принята к публикации: 26.05.2026

EDN QYYWVW

следующей загрузки в системы управления данными или хранилища. Эти системы широко используются в различных отраслях, включая здравоохранение, образование, транспорт, и, конечно, геофизику и геоинформатику.

Таким образом может быть сформулирован пространственный ETL (или геопропространственный ETL) – это процесс, применяемый в геоинформатике для интеграции пространственных данных. Он включает извлечение данных из различных источников, приведение их к единому формату и загрузку в хранилище геопропространственных данных для последующего анализа [1].

Этот процесс играет ключевую роль в системах обработки геоданных, поскольку позволяет работать с разнородными источниками информации, обеспечивая их унификацию и доступность для вычислительных экспериментов и моделирования. В данной работе особое внимание уделяется разработке ETL-систем, ориентированных на обработку геофизических и геологических данных, что позволяет эффективно анализировать закономерности в геопропространственной информации и повышать точность прогнозных моделей.

Как отмечается в исследовании [2], современные направления геоинформатики в России включают моделирование техногенных месторождений с их сложной пространственной структурой и неочевидными геохимическими взаимосвязями. Особый акцент делается на применении специализированных математических методов и вычислительных ресурсов для анализа таких объектов. В работе также подчеркивается роль искусственного интеллекта в решении актуальных задач геологии и горного дела.

Современные цифровые геоданные зачастую остаются несовместимыми между собой. Они хранятся в изолированных базах данных, существующие ГИС системы являются по сути закрытыми системами с ограниченным доступом. Это существенно затрудняет обмен данными, а их анализ и интерпретация нередко становятся невозможными [3].

При подготовке данных для их анализа методами машинного обучения необходимо учесть особенности источников геолого-геофизической пространственной информации. К таким особенностям относятся:

- 1) различия в представлении данных (векторный или растровый форматы, временные ряды, выборочные нерегулярные измерения и т. д.);
- 2) различная степень доступности данных для заданной географической окрестности;
- 3) разные форматы хранения данных (ESRI Shape, GEOTIFF, CSV, JSON, XML, Excel и т. д.);
- 4) разные масштабы данных;
- 5) различный вид атрибутивной информации (количественная, качественная) [4].

Таким образом, можно сформулировать следующие требования к искомому ETL-приложению для задач анализа методами машинного обучения.

1. Управление источниками данных:

- поддержка реестра/каталога источников с возможностью описания специфики каждого источника;
- масштабируемость для работы с 200+ источниками данных;
- возможность классификации источников по типам и характеристикам;
- ведение истории изменений и версионности источников.

2. Поддержка форматов данных:

- нативная поддержка специализированных форматов (ESRI Shapefiles, GeoTIFF, GeoJSON);
- возможность быстрой разработки адаптеров для новых форматов (на Python или другом языке);
- механизм расширения системы новыми обработчиками данных.

3. Консолидация и преобразование данных:

- единый механизм нормализации пространственных данных;
- преобразование геоданных в количественные векторы признаков;
- поддержка различных систем координат и проекций;
- возможность пространственной агрегации данных;
- инструменты для геометрических преобразований.

4. Интеграционные возможности:

- API для взаимодействия с внешними системами;
- возможность интеграции с ГИС-платформами (QGIS, ArcGIS);
- подключение к СУБД (PostgreSQL/PostGIS, Oracle Spatial).

Решение должно обеспечивать комплексный подход к работе с геопространственными данными, начиная от загрузки и заканчивая подготовкой для аналитических задач, с акцентом на гибкость и масштабируемость.

Данная работа посвящена анализу и проектированию ETL-приложения для решения задач, связанных с обработкой геопространственной информации. В ней рассмотрены современные подходы к интеграции данных для анализа геофизических и геологических процессов, включая задачи распознавания закономерностей в геоданных, оценки геологических параметров и моделирования пространственных взаимосвязей. Также представлен практический подход к созданию ETL-системы, направленной на сбор, обработку и комбинированный анализ геопространственной информации с использованием современных инструментов и технологий.

Цель исследования заключается в создании универсальной программной инфраструктуры, которая позволит эффективно обрабатывать и анализировать геопространственные данные, интегрируя классические методы геоинформатики с современными подходами машинного обучения и анализа данных.

Обзор существующих решений

Технологии ETL постоянно развиваются, поскольку потребности в обработке данных становятся все более сложными и масштабными. На ранних этапах ETL-методы основывались на проприетарных скриптах и ручных операциях. Однако с ростом объемов данных и необходимостью проведения анализа в реальном времени возникла потребность в сложных автоматизированных ETL-системах.

Современные ETL-решения глобально можно разделить на две основные категории: open-source и коммерческие продукты. Open-source инструменты, такие как Talend, SpatialHadoop и GeoKettle, предоставляют гибкость и возможности для кастомизации, но могут иметь ограничения, связанные с поддержкой специфических форматов данных и сложностью настройки. В то же время коммерческие решения, такие как FME, обеспечивают более надежную и комплексную обработку геоданных, но требуют значительных финансовых затрат.

Одним из популярных open-source инструментов является Talend. Это ETL-платформа, предназначенная для интеграции данных. Talend Open Studio и Talend Data Fabric обеспечивают выполнение различных задач, связанных с обработкой информации. Данный инструмент обладает интуитивно понятным интерфейсом, гибкими вариантами развертывания и экономичностью. Он поддерживает работу с различными облачными и локальными источниками данных, что делает его востребованным среди предприятий разного масштаба [5].

Talend может требовать дополнительных расширений при работе с геопространственными данными, что подтверждается необходимостью разработки дополнительных плагинов (например, Spatial extension for Talend) для выполнения SETL-процессов и интеграции данных между базами. Несмотря на поддержку различных форматов данных, стандартная версия Talend не обеспечивает нативной поддержки работы с геометрией без дополнительных расширений, что подчеркивает узкую специализацию решений и их зависимость от сторонних расширений для полноценной работы с пространственными данными. Это служит доказательством того, что даже популярные инструменты требуют доработок для преодоления ограничений в обработке геоинформации.

Существует ряд продуктов, которые используются в управлении данными в корпоративном секторе, но не учитывают специфику геопространственных данных.

Например, Informatica Power Center требует доработок для обработки шейп-файлов и интеграции с PostGIS¹.

Ataccama ONE предоставляет инструменты для каталогизации данных, управления качеством и интеграции с ИИ, его функции оптимизированы для табличных данных, но не для работы с геометрией, проекциями или растровыми слоями².

¹ Informatica PowerCenter Data Validation Option. URL: <https://docs.informatica.com/>

² Ataccama ONE Data Quality & Catalog unifies Data Quality, Data Catalog, and Data Observability. URL: <https://docs.ataccama.com/one/latest/overview.html>

Другие инструменты, такие как SpatialHadoop и GeoSpark, разработаны для работы с пространственными данными. Однако их основной механизм основан на добавлении функций для обработки геоданных в существующие системы работы с большими данными, а не на создании полноценного специализированного инструмента [6].

Еще одним инструментом с открытым исходным кодом является GeoKettle, который поддерживает обработку векторных геометрических данных, включая линии, полигоны и точки. Этот инструмент позволяет автоматизировать ETL-процессы, упрощая сопоставление атрибутов исходных данных с таблицами в хранилище. Однако его разработка была прекращена в 2015 году, что ограничивает его актуальность в современных условиях [7].

Одним из ведущих коммерческих инструментов является FME (Feature Manipulation Engine) от компании Safe Software. Этот инструмент предназначен для конвертации, управления и визуализации геоданных. FME позволяет решать задачи преобразования данных, такие как геореференцирование и работа с семантикой данных [8].

Изначально FME был разработан для устранения проблем, связанных с традиционными методами конвертации данных. В отличие от стандартных конвертеров, которые могли терять часть информации при передаче данных из одной системы в другую, FME обеспечивает так называемую «толстую» обработку данных, сохраняя их смысловую и структурную целостность³.

FME обладает следующими ключевыми характеристиками:

- централизованность – поддерживает множество форматов данных, позволяя беспрепятственно конвертировать их между различными системами;
- семантическая обработка – сохраняет смысловую целостность данных во время трансформации;
- широкие ETL-возможности – включает инструменты геопространственной обработки, которые позволяют изменять структуру и представление данных при их перемещении между системами ГИС и базами данных.

Следующее решение, OpenNeurons⁴ – современная ETL-платформа, выделяющаяся простотой внедрения и гибкостью. Платформа обеспечивает легкую установку в существующую инфраструктуру благодаря минимальным зависимостям. Ее базовый функционал покрывает ключевые этапы ETL-процессов, а интуитивный веб-интерфейс позволяет отслеживать выполнение задач, анализировать логи и управлять пайплайнами в режиме реального времени. Открытая архитектура предоставляет возможность разработки Python-адаптеров для работы с любыми форматами данных, включая интеграцию специализированных библиотек (geopandas, rasterio). Кроме того, платформа легко совмещается с ML-инструментами (Scikit-Learn, PyTorch, TensorFlow), позволяя напрямую использовать обработанные данные для обучения моделей и прогнозирования.

Как итог, имеется следующий набор решений.

1. Talend, IBM DataStage, Informatica Power Center, Ataccama ONE – ориентированы на финансовый/корпоративный сектор и имеют ограниченную гибкость или вовсе отсутствие возможности в геоаналитике.

2. SpatialHadoop, GeoSpark – не являются полноценными ETL решениям, а скорее могут быть использованы как дополнение в системе обработки больших геоданных.

3. GeoKettle – устаревшая платформа (разработка прекращена в 2015 г.), что делает ее непригодной для современных задач.

4. FME (Feature Manipulation Engine) – единственный инструмент с полноценной поддержкой геопространственных данных (конвертация, семантическая обработка, интеграция с ГИС), однако, имеет высокую стоимость лицензии.

5. OpenNeurons – современная ETL-платформа, сочетающая гибкость и простоту внедрения, позволяющая добавлять python-адаптеры для работы с геоданными.

Выбор конкретного ETL-решения зависит от специфики задачи, объемов данных и доступных ресурсов. В рамках данной работы приоритет отдается кастомизированной ETL-системе OpenNeurons.

³ Safe Software. FME Form Documentation guide. URL: https://docs.safe.com/fme/html/FME-Form-Docmentation/Content/fme_form_documentation.htm

⁴ OpenTRM – IT & BA for financial sector. URL: <https://opentrm.com/en/main-page/>

Таблица 1. Сравнительная таблица ETL-решений для геопространственных данных

Решение	Тип	Поддержка геоданных	Преимущества	Недостатки
Talend	Open-source / коммерческое	Ограниченная (через плагины)	Гибкость, удобный интерфейс, поддержка облачных и локальных источников	Требуются расширения для работы с геоданными, нет нативной поддержки shapefile
IBM DataStage	Коммерческое	Практически отсутствует	Высокая производительность, корпоративная интеграция	Нет поддержки геопространственных форматов
Informatica PowerCenter	Коммерческое	Ограниченная	Развитые ETL-возможности, корпоративный уровень	Требуются доработки для PostGIS и shapefile
Ataccama ONE	Коммерческое	Отсутствует	Управление качеством данных, каталогизация, интеграция с ИИ	Не поддерживает геометрию, проекции, растры
SpatialHadoop	Open-source	Частичная	Обработка больших геоданных	Не является полноценным ETL, требует интеграции
GeoSpark	Open-source	Частичная	Расширение Spark для геоаналитики	Не полноценный ETL-инструмент
GeoKettle	Open-source	Полная	Поддержка векторных геометрий, автоматизация ETL	Прекращена поддержка (с 2015 г.)
FME	Коммерческое	Полная	Широкая поддержка форматов, семантическая обработка, мощные инструменты трансформации	Высокая стоимость
OpenNeurons	Open-source / кастомизируемое	Полная (через Python)	Гибкость, простота внедрения, поддержка ML, расширяемость (geopandas, rasterio)	Требует разработки адаптеров

Аспекты и методология проектирования ETL-приложений

Проектирование ETL-приложений для обработки геопространственных данных требует особого подхода, учитывающего их сложную структуру, разнообразие форматов и необходимость высокой производительности. В отличие от традиционных ETL-процессов, работающих с табличными данными, пространственные ETL (SETL) должны учитывать особенности геоданных, такие как топология, проекции и пространственные взаимосвязи.

В данном разделе рассматриваются ключевые этапы проектирования ETL-приложений, включая экстракцию, преобразование и загрузку данных, архитектурные подходы, методы автоматизации процессов и способы повышения масштабируемости ETL-систем.

Процесс ETL включает три основных этапа: извлечение, преобразование и загрузка данных. Однако в контексте геопространственных данных каждый из этих этапов имеет свои особенности.

На этапе извлечения данных необходимо учитывать разнообразие источников: базы данных, облачные хранилища, файловые форматы (ESRI Shape, GeoTIFF, CSV, JSON), API-сервисы, спутниковые снимки и датчики реального времени. Это требует использования универсальных коннекторов и поддержки множества форматов данных.

Этап преобразования данных включает нормализацию координат, преобразование проекций, геометрические операции (буферизация, упрощение геометрии, топологическая очистка), а также приведение атрибутивных данных к единому формату.

На этапе загрузки данных требуется учет специфики целевой системы. Это может быть пространственная СУБД (PostGIS, Oracle Spatial), облачное хранилище (Google BigQuery, Amazon Redshift), специализированные ГИС-системы или системы бизнес-аналитики.

В проектирование ETL-приложения входят несколько ключевых этапов.

1. Анализ требований – определение типов данных, источников, частоты обновления и требований к производительности.

2. Разработка структуры данных – создание схемы хранилища, проектирование атрибутивных и пространственных индексов.

3. Выбор инструментов и технологий – определение ETL-платформы, СУБД, языков программирования и облачных сервисов.

4. Реализация ETL-процессов – разработка конвейеров обработки данных, настройка коннекторов и преобразований.

Проектирование ETL-приложений для геопространственных данных требует учета множества факторов, включая специфику геоданных, архитектурные особенности и методы автоматизации. Оптимизация ETL-процессов, использование масштабируемых решений и современных инструментов позволяют значительно повысить эффективность работы с пространственными данными и обеспечивать их качественную интеграцию в аналитические системы.

Проектирование и разработка ETL-приложения для работы с геолого-геофизическими данными

Разработка ETL-приложения для обработки геолого-геофизических данных требует учета специфики различных типов информации, таких как растровые изображения, векторные данные (shp) и табличные данные (Excel, CSV). Важным аспектом является выбор надежного хранилища, поддерживающего пространственные данные, а также автоматизация процессов извлечения, трансформации и загрузки данных для повышения эффективности обработки.

Ниже рассматривается реализация ETL-приложения на основе платформы OpenNeurons, адаптированной для работы с геолого-геофизическими данными. Описываются архитектура, используемые технологии и инструменты, а также ключевые особенности реализации.

Для хранения данных выбрана система PostgreSQL с установленным расширением PostGIS, что обеспечивает поддержку пространственных операций и возможность подключения к QGIS. PostgreSQL позволяет хранить и обрабатывать большие объемы пространственных данных, а PostGIS предоставляет широкий набор инструментов для геоаналитики.

Основой ETL-приложения является программная платформа OpenNeurons, которая изначально разрабатывалась для автоматизации обработки данных в финансовых организациях. OpenNeurons включает более 60 предустановленных адаптеров для интеграции с различными источниками данных, поддерживает работу с неструктурированными данными и позволяет разрабатывать пользовательские адаптеры на Python.

На рис. 1 отображена архитектура решения, которое включает модули источников данных, ETL-обработки и хранилище PostgreSQL/PostGIS. Приложение использует веб-интерфейс на базе Flask, который позволяет управлять задачами, просматривать список доступных ETL-процессов, запускать их вручную, а также анализировать логи выполнения.

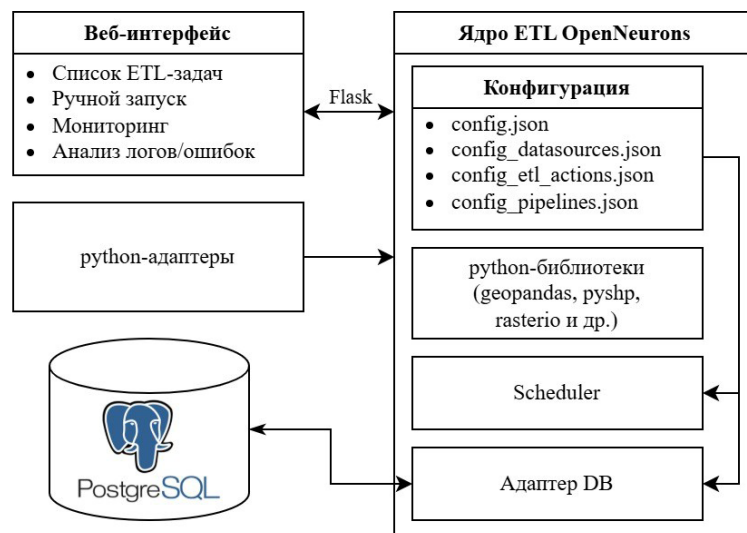


Рис. 1. Архитектура платформы OpenNeurons

Платформа OpenNeurons использует четыре основных конфигурационных файла.

1. Config – содержит настройки подключения к основной базе данных, а также ко всем остальным источникам данных, которые могут использоваться для выгрузки.
2. Config_datasources – включает параметры конфигурации для различных источников данных.
3. Config_etl_actions – содержит список всех возможных адаптеров загрузок и выполняемых задач, определяет названия действий (actions) и соответствующие исполняемые Python-скрипты. Это позволяет дополнять функционал Open Neurons ETL новыми задачами.
4. Config_pipelines – описывает последовательности ETL-задач (pipelines), которые могут выполняться по расписанию с учетом рабочих и выходных дней или запускаться вручную через веб-интерфейс.

На рис. 2 отображен веб-интерфейс платформы OpenNeurons, который позволяет:

- просматривать список доступных ETL-задач;
- запускать задачи вручную;
- контролировать ход выполнения ETL-процессов;
- просматривать логи выполнения и анализировать возможные ошибки.

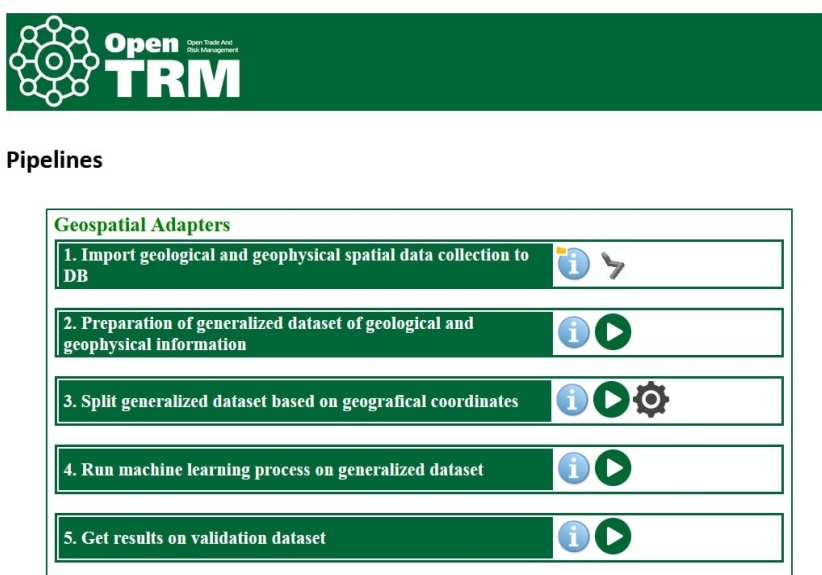


Рис. 2. Веб-интерфейс платформы OpenNeurons

Для обработки геолого-геофизических данных был разработан специализированный адаптер на языке Python с использованием следующих библиотек:

- pyshp – работа с векторными данными в формате shp;
- geopandas – обработка и анализ геопространственных данных;
- rasterio – чтение и обработка растровых данных;
- geopy – геокодирование и работа с координатными системами.

Перечислим этапы обработки данных.

1. Извлечение данных. На вход адаптера поступает Excel-документ, содержащий список всех источников данных с их названиями и путями хранения на локальном или сетевом диске.

2. Преобразование данных. Адаптер обрабатывает файлы в зависимости от их типа:

- растровые данные считываются с помощью rasterio и преобразуются в оптимизированные форматы для загрузки в PostGIS;
- векторные данные (shp) обрабатываются с использованием pyshp и geopandas, при необходимости выполняется конвертация проекций и геометрическая валидация;
- табличные данные из Excel и CSV загружаются в PostgreSQL с приведением к единому формату.

3. Загрузка данных. После обработки данные записываются в PostgreSQL. Для каждого источника создается отдельная таблица, а также формируется таблица-реестр, содержащая метаданные обо всех загруженных источниках и их типах.

Преимущества разработанного ETL-приложения:

- Автоматизация – адаптер позволяет автоматизировать загрузку геолого-геофизических данных, снижая затраты на ручную обработку.
- Гибкость – возможность работы с различными форматами данных (растровыми, векторными, табличными).
- Интеграция – поддержка подключения к QGIS и другим ГИС-системам через PostgreSQL/PostGIS.
- Кроссплатформенность – приложение работает как на Windows, так и на Linux.
- Расширяемость – возможность добавления новых адаптеров и кастомизации ETL-процессов под специфические задачи.

Разработанное ETL-приложение на базе OpenNeurons позволяет эффективно извлекать, преобразовывать и загружать геолого-геофизические данные в PostgreSQL/PostGIS. Использование Python-библиотек для обработки пространственных данных обеспечивает гибкость и масштабируемость решения.

Обсуждение

Разработанное ETL-приложение предназначено для автоматизации процессов извлечения, трансформации и загрузки геопро пространственных данных. Его использование позволяет значительно ускорить обработку информации, повысить точность анализа и минимизировать влияние человеческого фактора. В данной главе рассматриваются реальные примеры применения ETL-приложения в научных и прикладных исследованиях.

Одним из первых примеров использования разработанного ETL-приложения стало исследование распределения геолого-геофизических параметров на восточный сектор Российской Арктики и прилегающие территории. В рамках этого проекта были собраны, обработаны и загружены в базу данных сведения из как аномалии магнитного поля Земли, высота рельефа и батиметрия, типы рельефа и почв, карта активных разломов Евразии, унифицированный каталог землетрясений, аномалии Буге гравитационного поля и FCAZ-зоны возможного возникновения сильных землетрясений.

В ходе работы была проведена систематизация данных и их предварительная обработка, включающая приведение к единому формату, трансформацию координатных систем. Результатом стало создание единой базы данных, содержащей широкий спектр геолого-геофизической информации (227 полей), доступной для последующего анализа методами машинного обучения.

По итогам проекта была зарегистрирована база данных [9] под номером 2023624329 «База геолого-геофизических данных восточного сектора Российской Арктики для анализа методами машинного обучения» (регистрация от 1 декабря 2023 г.).

Разработанное ETL-приложение также использовалось для проведения экспериментов по распознаванию мест возможного возникновения землетрясений в Кавказском регионе. В рамках исследования были собраны и обработаны данные о сейсмической активности, геологическом строении, напряженном состоянии литосферы и других параметрах, оказывающих влияние на вероятность сейсмических событий.

Поставленная задача заключалась в классификации 240 морфоструктурных узлов Кавказского региона на два класса: высокосейсмичные (В) и низкосейсмичные (Н) с пороговой магнитудой $M_0 = 6.0$, распределение узлов отображено на рис. 3. Исходная постановка задачи и методология описаны в работах [10], [11].

В качестве входных данных использовались следующие источники:

- количественные характеристики рельефа (ЕТОРО: max/min/разница/средняя высота);
- параметры линеаментно-блоковой структуры (количество линеаментов, расстояние до ближайшего линеамента 2-го ранга);
- гравитационные аномалии (EGM2008);
- геомагнитные данные (WDMAM и DT1050, пересчитанные на высоту 5 км).

На выходе имеется бинарная классификация узлов (В/Н) на основе исторических данных о землетрясениях.

Для решения поставленной задачи классификации были задействованы классические алгоритмы машинного обучения из библиотеки Scikit-learn и современные нейросетевые подходы. Среди класси-

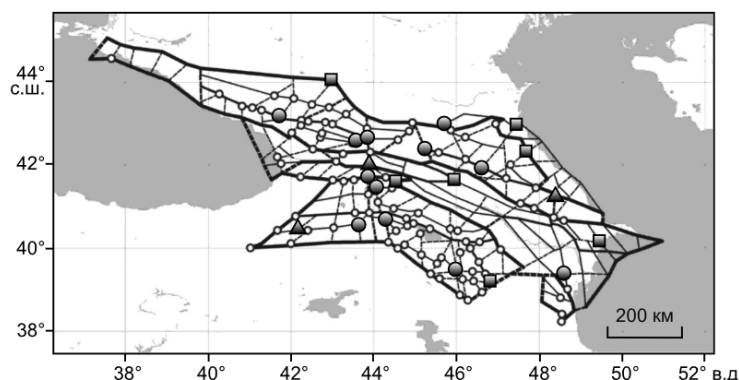


Рис. 3. Визуальное представление распределения примеров обучающей и тестовой выборки: обучающая выборка класса В (круг); валидационная выборка класса В (треугольник); валидационная выборка класса Н (квадрат); обучающая выборка класса Н (неотмеченные пересечения)

ческих методов наиболее эффективными оказались алгоритмы Gradient Boosting и AdaBoost, продемонстрировавшие F1-score до 100% на тестовой выборке. Параллельно с помощью фреймворка AutoKeras/Keras были реализованы многослойные нейронные сети с автоматическим подбором оптимальной архитектуры.

Особое внимание в исследовании уделялось анализу информативности различных геофизических параметров. Результаты показали, что наиболее значимыми для прогнозирования оказались минимальная высота рельефа (ETOPO_MIN), характеристики линейментно-блоковой структуры (LINEAMENT_Nk, LINEAMENT_R2) и данные о геомагнитных аномалиях (DT1050_ANOM_5). Примечательно, что включение в анализ геомагнитных данных WDMAM и DT1050 существенно повысило точность классификации, что полностью согласуется с выводами предыдущих исследований [12].

Для верификации результатов проводилось сравнение с традиционным алгоритмом КОРА-3 [13], показавшее 67%-ное совпадение прогнозов. Хотя окончательная оценка достоверности полученных результатов потребует дополнительной проверки на новых данных, уже сейчас можно говорить о перспективности применения разработанного подхода. Особенно важным преимуществом стало существенное ускорение процесса обработки данных и проведения расчетов благодаря использованию ETL-приложения, что открывает возможности для масштабирования метода на другие сейсмоопасные регионы.

Автоматизированный процесс интеграции данных позволил оперативно проводить анализ и выявлять закономерности, что повысило точность прогнозных моделей. Полученные результаты показали применимость предложенного подхода к сбору и обработке геопространственной информации для решения прикладных задач.

ETL-приложение легко адаптируется к новым источникам данных и может быть расширено для работы с другими форматами и задачами.

Использование ETL-подхода показало свою применимость при решении научных и прикладных задач в области анализа геолого-геофизической информации, демонстрируя высокий уровень автоматизации и масштабируемости.

Разработанное ETL-приложение успешно применяется в научных исследованиях и практических задачах, связанных с анализом геопространственных данных. Его использование позволяет автоматизировать процессы сбора и обработки данных, повышать точность анализа и ускорять выполнение сложных вычислительных задач. Дальнейшее развитие приложения предполагает интеграцию с дополнительными аналитическими инструментами, расширение возможностей машинного обучения и повышение производительности обработки больших массивов данных.

Заключение

Разработка и внедрение ETL-приложения для работы с геопространственными данными позволяет автоматизировать процессы сбора, трансформации и загрузки данных, что значительно сокращает временные и ресурсные затраты на их обработку. В ходе работы был проведен детальный анализ требований к ETL-системам, рассмотрены архитектурные подходы, методы автоматизации и повышения производительности процессов.

Приложение успешно протестировано на реальных задачах, связанных с анализом геолого-геофизической информации восточного сектора Российской Арктики, а также при прогнозировании сейсмической активности в Кавказском регионе. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенного решения, обеспечив сокращение времени обработки данных в несколько раз и повышение их точности за счет автоматизированных алгоритмов очистки и нормализации.

Преимуществами разработанного ETL-приложения являются его гибкость, возможность масштабирования, поддержка множества форматов данных и интеграция с современными системами хранения и анализа информации. Использование Python и специализированных библиотек (pyshp, geopandas, rasterio, geopy) позволило создать адаптер, обеспечивающий высокую производительность обработки пространственных данных.

Дальнейшее развитие приложения может включать расширение функциональности за счет интеграции с методами машинного обучения, добавления новых адаптеров для работы с нестандартными форматами данных и оптимизации алгоритмов обработки больших объемов информации. Развитие ETL-подходов в сфере геопространственных данных открывает новые перспективы для повышения точности прогнозов и эффективности научных и прикладных исследований в области геологии, геофизики и смежных дисциплин.

Благодарности

В работе использовалось оборудование и данные, предоставленные ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>).

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования РФ.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

В.А. Кузнецов – обзор литературных источников, написание исходного кода модулей обработки геопространственных данных на языке Python, проведение сравнительного анализа решений; подготовка текста статьи.

И.А. Лисенков – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, постановка эксперимента, анализ и обсуждение результатов.

Список литературы

1. Rakotoarison T., Hajalalaina A.R. Real-time geo-decisional system for risk and disaster management in Madagascar // Reports on Geodesy and Geoinformatics, 2025. V. 119. P. 7–13. DOI: 10.2478/rgg-2025-0002.
2. Tedikova A.A., Klimochenkova M.D., Melnichenko I., Krasnotsvetov M.A., Us S.S., Kutlyev I.I., Shchekina M.V. The history of origin and development of geoinformatics as a science // Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost), 2024. P. 90–99. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-90-99.
3. Rozenberg I., Dulin S. Current Issues Problems of Geoinformatics // Russian Journal of Earth Sciences, 2024. V. 24. № 1. P. 1–11. DOI: 10.2205/2024ES000893.

4. Лисенков И.А., Соловьев А.А., Кузнецов В.А., Николова Ю.И. Обобщенный массив геолого-геофизической информации восточного сектора Российской Арктики для проведения анализа методами машинного обучения // Геология и геофизика, 2025. Т. 66. № 2. С. 232–246. DOI: 10.15372/GiG2024148.
5. Cheruku S., Goel O., Jain S. A Comparative Study of ETL Tools: DataStage vs. Talend // Journal of Quantum Science and Technology, 2024. V. 1. P. 80–90. DOI: 10.36676/jqst.v1.i1.11.
6. Al-Yadum S., Xion T.E., Wei S.G.W., Boursier P. Review on Integrating Geospatial Big Datasets and Open Research Issues // IEEE Access, 2021. P. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051084.
7. Astriani W., Trisminingsih R. Extraction, Transformation, and Loading (ETL) Module for Hotspot Spatial Data Warehouse Using Geokettle // Procedia Environmental Sciences, 2016. V. 33. P. 626–634. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.03.117.
8. Borkowski A., To Duc A. Integration of BIM and GIS Data of a Heritage Building Using FME // Civil and Environmental Engineering Reports, 2024. V. 34. P. 204–215. DOI: 10.59440/ceer/190231.
9. Lisenkov I.A., Soloviev A.A., Kuznetsov V.A., Nikolova Yu.I. Generalized Dataset of Geological and Geophysical Information of the Eastern Sector of the Russian Arctic, ver.1.0 (2023) // ESDB repository, GCRAS, Moscow, 2024. DOI: 10.2205/public-artcic-geospatial-data.
10. Соловьев А.А., Новикова О.В., Горшков А.И., Пиотровская Е.П. Распознавание расположения потенциальных очагов сильных землетрясений в Кавказском регионе с использованием ГИС-технологий // ДАН, 2013. Т. 450. № 5. С. 599–601. DOI: 10.7868/S0869565213170222.
11. Гвишиани А.Д., Дзедобов Б.А., Агаян С.М. Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли, 2016. № 4. С. 3–23. DOI: 10.7868/S0002333716040013.
12. Соловьев А.А., Горшков А.И., Соловьев А.А. Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // Физика Земли, 2016. № 6. С. 21–27. DOI: 10.7868/S0002333716050148.
13. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопоф Л., Пресс Ф., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М., Садовский А.М. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы). Исследование сейсмичности и моделей Земли // Вычислительная сейсмология, 1976. Вып. 9. С. 3–91.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2026, vol. 15, no. 3, pp. 211–222

An ETL-based system for collecting and processing geospatial data for machine learning analysis

V. A. Kuznetsov¹, I. A. Lisenkov^{2,✉}

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409,

² Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296,

✉ twi.lek@yandex.ru

Received October 08, 2025; revised May 22, 2026; accepted May 26, 2026

This paper discusses modern tools and approaches to the design of ETL systems for the integration and preprocessing of raster, vector, and tabular geospatial data. These data can subsequently be used for analysis using machine learning methods. The proposed approach is based on a modular pipeline architecture adapted to the characteristics of GIS data formats. It supports integration with machine learning pipelines without requiring costly licenses or substantial modifications of existing platforms. A specialized ETL pipeline based on the OpenNeurons platform and PostgreSQL/PostGIS database is presented. The system includes configurable modules for describing data sources and adapters implemented in Python using libraries such as geopandas, rasterio, and pyshp. The system also includes a driver for direct interaction with file storage and scheduled data updates. It further provides a web interface for task management, monitoring, and logging. The developed system was tested on real-world geospatial datasets. Firstly, a unified dataset containing 227 geological and geophysical attributes for the eastern sector of the Russian Arctic was created and prepared for machine learning analysis. Secondly,

binary classification of 240 morphostructural nodes in the Caucasus region using Gradient Boosting and AutoKeras, an F1-score close to 1.0 was achieved on the test set. Comparison with the KORA-3 algorithm showed a 67% agreement in predictions, indicating the potential applicability of the proposed approach, although further validation on independent datasets is required. Compared to general-purpose ETL solutions, the proposed system offers low deployment costs, high extensibility through custom adapters, and tight integration with machine learning frameworks. The results demonstrate the applicability of the developed ETL pipeline for geospatial data processing tasks.

Keywords: ETL, geospatial data, machine learning, GIS, PostgreSQL, Python, PostGIS.

References

1. Rakotoarison T., Hajalalaina A.R. Real-time geo-decisional system for risk and disaster management in Madagascar. Reports on Geodesy and Geoinformatics, 2025. Vol. 119. Pp. 7–13. DOI: 10.2478/rgg-2025-0002.
2. Tedikova A.A., Klimochenkova M.D., Melnichenko I., Krasnotsvetov M.A., Us S.S., Kutlyev I.I., Shchekina M.V. The history of origin and development of geoinformatics as a science. Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost), 2024. Pp. 90–99. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-90-99.
3. Rozenberg I., Dulin S. Current Issues Problems of Geoinformatics. Russian Journal of Earth Sciences, 2024. Vol. 24. No. 1. Pp. 1–11. DOI: 10.2205/2024ES000893.
4. Lisenkov I.A., Solov'ev A.A., Kuznetsov V.A., Nikolova YU.I. Obobshchennyj massiv geologo-geofizicheskoy informacii vostochnogo sektora Rossijskoj Arktiki dlya provedeniya analiza metodami mashinnogo obucheniya [A generalized array of geological and geophysical information from the eastern sector of the Russian Arctic for analysis using machine learning methods]. Geologiya i geofizika, 2025. Vol. 66, no. 2. Pp. 232–246. (in Russian) DOI: 10.15372/GiG2024148.
5. Cheruku S., Goel O., Jain S. A Comparative Study of ETL Tools: DataStage vs. Talend. Journal of Quantum Science and Technology, 2024. Vol. 1. Pp. 80–90. DOI: 10.36676/jqst.v1.i1.11.
6. Al-Yadum S., Xion T.E., Wei S.G.W., Boursier P. Review on Integrating Geospatial Big Datasets and Open Research Issues. IEEE Access, 2021. Pp. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051084.
7. Astriani W., Trisminingsih R. Extraction, Transformation, and Loading (ETL) Module for Hotspot Spatial Data Warehouse Using Geokettle. Procedia Environmental Sciences, 2016. Vol. 33. Pp. 626–634. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.03.117.
8. Borkowski A., To Duc A. Integration of BIM and GIS Data of a Heritage Building Using FME // Civil and Environmental Engineering Reports, 2024. Vol. 34. Pp. 204–215. DOI: 10.59440/ceer/190231.
9. Lisenkov I.A., Soloviev A.A., Kuznetsov V.A., Nikolova Yu.I. Generalized Dataset of Geological and Geophysical Information of the Eastern Sector of the Russian Arctic. ESDB repository, GCRAS, Moscow, 2024. DOI: 10.2205/public-artic-geospatial-data.
10. Soloviev A.A., Novikova O.V., Gorshkov A.I., Piotrovskaya E.P. Raspoznavanie raspolozheniya potentsial'nykh ochagov sil'nykh zemletryaseniy v Kavkazskom regione s ispol'zovaniem GIS-tekhnologiy [Recognition of the location of potential sources of strong earthquakes in the Caucasus region using GIS technologies]. Doklady Akademii Nauk, 2013. Vol. 450. No. 5. Pp. 599–601 (in Russian). DOI: 10.7868/S0869565213170222.
11. Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Agayan S.M. Intel'ektual'naya sistema raspoznavaniya FCAZm v opredelenii mest vozmozhnogo vozniknoveniya sil'nykh zemletryaseniy gornogo poyasa And i Kavkaza [Intelligent FCAZm pattern recognition system for identifying possible locations of strong earthquakes in the mountain belts of the Andes and the Caucasus]. Fizika Zemli, 2016. No. 4. Pp. 3–23 (in Russian). DOI: 10.7868/S0002333716040013.
12. Soloviev A.A., Gorshkov A.I., Soloviev A.A. Primenenie dannykh po litosfernym magnitnym anomaliiyam v zadache raspoznavaniya mest vozmozhnogo vozniknoveniya zemletryaseniy [Application of lithospheric magnetic anomaly data in the problem of identifying possible locations of earthquakes]. Fizika Zemli, 2016. No. 6. Pp. 21–27 (in Russian). DOI: 10.7868/S0002333716050148.
13. Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Keylis-Borok V.I., Knopoff L., Press F., Rantsman E.Ya., Rotvain I.M., Sadovsky A.M. Usloviya vozniknoveniya sil'nykh zemletryaseniy (Kaliforniya i nekotorye drugie regiony). Issledovanie seysmichnosti i modeley Zemli [Conditions for the occurrence of strong earthquakes (California and some other regions). Study of seismicity and Earth models]. Vychislitel'naya seysmologiya, 1976. Iss. 9. Pp. 3–91 (in Russian).

УДК 517.9

Применение метода Хироты для нелинейных уравнений Шредингера высших порядков

© 2026 г. Н. А. Кудряшов¹, А. А. Кутуков¹, Н. В. Ермолаева^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, 115409, Россия

² Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ,
г. Волгодонск Ростовская обл., 347360, Россия

Метод Хироты применяется для поиска солитонных решений нелинейных уравнений Шредингера высших порядков. Подробно изучаются уравнения четвертого и шестого порядков из иерархии нелинейного уравнения Шредингера. Частные производные выражаются через оператор Хироты, а уравнения высших порядков преобразуются к билинейной форме, которая приводится к системе из двух уравнений. Найдены одно-, двух- и трехсолитонные решения уравнений из иерархии нелинейного уравнения Шредингера.

Ключевые слова: нелинейное уравнение Шредингера высшего порядка, метод Хироты, многосолитонное решение.

Введение

Теория интегрируемости нелинейных эволюционных уравнений – одна из важнейших тем исследований в прикладной математике и математической физике. Изучение и анализ скрытых закономерностей нелинейных эволюционных уравнений позволяет получить более ясное представление об их природе. Тем самым выявляются физические свойства и ключевые характеристики уравнений, в том числе их ранее скрытые особенности. Поэтому исследование интегрируемости нелинейных эволюционных уравнений необходимо для того, чтобы составить полное представление об их поведении.

Одним из классических подходов к решению задачи Коши для нелинейных эволюционных уравнений является метод обратной задачи рассеяния (МОЗР). Он был успешно применен к нелинейному уравнению Шредингера (НУШ) в 1972 году Захаровым и Шабатом для получения солитонных решений. Несколько десятилетий назад МОЗР был успешно применен для интегрирования уравнения Манаква, моделирующего оптические волокна с дифференциальной групповой задержкой [1]. Преимущество МОЗР перед другими методами интегрирования дифференциальных уравнений состоит в его способности восстанавливать не только солитонные решения, но и данные рассеяния. До сих пор ни один другой подход не позволяет воспроизвести полный спектр решений путем анализа как непрерывной, так и дискретной частей спектральных данных. Еще одним преимуществом МОЗР является возможность построения N-солитонных решений, недоступная для многих других современных методов построения аналитических решений.

Помимо МОЗР существует еще один мощный подход, позволяющий получать многосолитонные решения – билинейный метод Хироты. Хотя этот метод вычислительно трудоемок, его практическая схема заслуживает внимания. Метод Хироты превосходит МОЗР в том, что позволяет строить решения

✉ Н.А. Кудряшов: NAKudryashov@mephi.ru
А.А. Кутуков: AAKutukov@mephi.ru
Н.В. Ермолаева: NVErmolayeva@mephi.ru

Поступила в редакцию: 25.03.2026
После доработки: 12.05.2026
Принята к публикации: 26.05.2026

уравнений без использования пары Лакса и решения спектральной задачи. В данной статье рассматриваются НУШ высшего порядка и ставится задача получить их одно-, двух- и трехсолитонные решения.

1. Рассматриваемая модель

Хорошо известно, что многие волновые процессы в физике и природе описываются нелинейным уравнением Шредингера, которое имеет вид [2–4]

$$iq_t + \alpha q_{xx} + 2|q|^2 q = 0. \quad (1)$$

В частности, решением уравнения (1) является огибающая волнового пакета, хорошо известная как групповой солитон [3–5]. Уравнение (1) появилось в шестидесятых годах прошлого века и нашло многочисленные приложения во многих областях физики, однако наибольшее значение оно имеет для описания распространения импульса в оптической среде с так называемой керровской нелинейностью [6–8]. Уравнение (1) обладает многими замечательными свойствами. Известно, что задача Коши для уравнения (1) может быть решена методом обратной задачи рассеяния [9–10], поэтому уравнение (1) является полностью интегрируемым. Оно обладает многосолитонными решениями, преобразованиями Бэклунда и бесконечным числом законов сохранения.

В последние годы в связи с изучением распространения коротких импульсов в оптических средах возник большой интерес к обобщенным нелинейным уравнениям Шредингера высших порядков [11–20]. Однако, насколько нам известно, ранее такие исследования проводились для обобщений нелинейного уравнения Шредингера, для которых задача Коши не может быть решена методом обратной задачи рассеяния.

В данной работе мы изучаем два нелинейных уравнения Шредингера высшего порядка. Одно из них – уравнение четвертого порядка, которое можно записать в виде

$$iq_t + \alpha q_{xxxx} + 8\alpha |q|^2 q_{xx} + 2\alpha q^2 q_{xx}^* + 4\alpha q |q_x|^2 + 6\alpha q_x^2 q^* + 6\alpha |q|^4 q = 0, \quad (2)$$

где $q(x, t)$ – искомая функция, x и t – пространственная и временная координаты, α – параметр уравнения (2). Без ограничения общности далее в работе будем считать $\alpha = 1$.

Другое нелинейное уравнение Шредингера высшего порядка имеет шестой порядок и записывается следующим образом:

$$iq_t + q_{xxxxxx} + 2q^2 q_{xxx}^* + 12|q|^2 q_{xxx} + 30q^* q_x q_{xx} + 18q q_x^* q_{xx} + 8q q_x q_{xx}^* + 50|q_x|^2 q_{xx} + 20q_x^2 q_{xx}^* + 50|q|^4 q_{xx} + 20q^* q_{xx}^2 + 22q |q_{xx}|^2 + 20|q|^2 q^2 q_{xx}^* + 70|q|^2 q^* q_x^2 + 60|q|^2 |q_x|^2 q + 10q^3 q_x^* + 20|q|^6 q = 0. \quad (3)$$

Цель настоящей работы – найти солитонные решения уравнений (2) и (3). В статье мы получим одно-, двух- и трехсолитонные решения этих уравнений, используя метод Хироты.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 мы обсуждаем метод Хироты применительно к нелинейному уравнению Шредингера. В разделе 3 найдены одно- и двухсолитонные решения уравнения (2). В разделе 4 приводятся одно- и двухсолитонные решения уравнения (3). В разделе 5 мы также даем формулы для одно-, двух- и трехсолитонных решений любого элемента иерархии нелинейного уравнения Шредингера.

2. Метод Хироты для нелинейного уравнения Шредингера

Хорошо известен подход к поиску солитонных решений нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, предложенный Рего Хиротой в 1971 году [28–31]. С помощью этого метода

было найдено множество решений интегрируемых нелинейных дифференциальных уравнений. Например, для уравнения (1) можно использовать преобразование вида

$$q(x, t) = \frac{G(x, t)}{F(x, t)}, \quad q^*(x, t) = \frac{G^*(x, t)}{F(x, t)}, \quad (4)$$

где $G(x, t)$ и $F(x, t)$ – новые функции, $G^*(x, t)$ – комплексно-сопряженная к $G(x, t)$, а $F(x, t)$ – действительная функция.

Подстановка формулы (4) в уравнение (1) приводит к следующему выражению [2, 3]:

$$i \frac{G_t}{F} - i \frac{GF_t}{F^2} + \frac{G_{xx}}{F} - \frac{2G_x F_x}{F^2} + \frac{2GF_x^2}{F^3} - \frac{GF_{xx}}{F^2} + \frac{2G^2 G^*}{F^3} = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) легко записать в виде

$$\frac{1}{F^2} (iD_t(GF) + D_x^2(GF)) + \frac{G}{F^3} (D_x^2(FF) - 2GG^*) = 0, \quad (6)$$

где $D_t^m D_x^n$ – оператор Хироты, определяемый формулой [28–31]

$$D_t^m D_x^n (FF) = \left(\frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t'} \right)^m \left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x'} \right)^n F(x, t) F(x', t') \Big|_{x'=x, t'=t}. \quad (7)$$

Для нахождения солитонных решений уравнения (1) обычно используется следующая система уравнений:

$$D_t(GF) + D_x^2(GF) = 0, \quad (8)$$

$$D_x^2(FF) - 2GG^* = 0. \quad (9)$$

Солитонные решения системы уравнений (8) и (9) приведены во многих книгах (см., например, [2, 3]). Однако прямое применение метода Хироты к нелинейным уравнениям Шредингера высших порядков приводит к ряду трудностей.

3. Солитонные решения уравнения

В этом разделе рассматривается применение метода Хироты для нахождения солитонных решений уравнения (2) при $\alpha = 1$. Подставляя формулу (4) в уравнение (2), получаем

$$\begin{aligned} & \frac{iG_t}{F} - \frac{iGF_t}{F^2} + 6 \frac{G^3 G^{*2}}{F^5} + 2 \frac{G^2 G_{xx}^*}{F^3} - 8 \frac{G^2 G^* F_x}{F^4} - 10 \frac{G^2 G^* F_{xx}}{F^4} + 30 \frac{G^2 G^* F_x^2}{F^5} - \frac{GF_{xxxx}}{F^4} + \\ & + 4 \frac{GG_x^* G_x}{F^3} + 8 \frac{GG^* G_{xx}}{F^3} + 8 \frac{GF_x F_{xxx}}{F^3} + 6 \frac{GF_{xx}^2}{F^3} - 32 \frac{GG^* F_x G_x}{F^4} - 36 \frac{GF_x^2 F_{xx}}{F^4} + 24 \frac{GF_x^4}{F^5} + \\ & + \frac{G_{xxxx}}{F} - 4 \frac{G_{xxx} F_x}{F^2} - 4 \frac{G_x F_{xxx}}{F^2} - 6 \frac{G_{xx} F_{xx}}{F^2} + 6 \frac{G^* G_x^2}{F^3} + 12 \frac{G_{xx} F_x^2}{F^3} + 24 \frac{G_x F_x F_{xx}}{F^3} - 24 \frac{G_x F_x^3}{F^4} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Записать уравнение (10) с помощью оператора Хироты непросто ввиду его громоздкости. Поэтому сначала мы воспользуемся следующими представлениями производных функций $q(x, t)$ и $q(x, t)$ [32]:

$$q_t = \frac{1}{F^2} D_t(GF), \quad q_x = \frac{1}{F^2} D_x(GF), \quad q_x^* = \frac{1}{F^2} D_x(G^*F), \quad (11)$$

$$q_{xx} = \frac{1}{F^2} D_x^2(GF) - \frac{G}{F^3} D_x^2(FF), \quad (12)$$

$$q_{xx}^* = \frac{1}{F^2} D_x^2(G^*F) - \frac{G^*}{F^3} D_x^2(FF), \quad (13)$$

$$q_{xxx} = \frac{1}{F^2} D_x^3(GF) - \frac{3}{F^4} D_x(GF) D_x^2(FF), \quad (14)$$

$$q_{xxx}^* = \frac{1}{F^2} D_x^3(G^*F) - \frac{3}{F^4} D_x(G^*F) D_x^2(FF), \quad (15)$$

$$q_{xxxx} = \frac{1}{F^2} D_x^4(GF) - \frac{G}{F^3} D_x^4(FF) - \frac{6}{F^4} D_x^2(GF) D_x^2(FF) + \frac{6G}{F^5} D_x^2(FF) D_x^2(FF), \quad (16)$$

$$q_{xxxx}^* = \frac{1}{F^2} D_x^4(G^*F) - \frac{G^*}{F^3} D_x^4(FF) - \frac{6}{F^4} D_x^2(G^*F) D_x^2(FF) + \frac{6G^*}{F^5} D_x^2(FF) D_x^2(FF), \quad (17)$$

$$q_{xxxxx} = \frac{1}{F^2} D_x^5(GF) - \frac{5}{F^4} D_x(GF) D_x^4(FF) - \frac{10}{F^4} D_x^2(FF) D_x^3(GF) + \frac{30}{F^6} D_x(GF) D_x^2(FF)^2, \quad (18)$$

$$q_{xxxxx} = \frac{D_x^6(GF)}{F^2} - \frac{GD_x^6(FF)}{F^3} - 90 \frac{GD_x^2(FF)^3}{F^7} - 15 \frac{D_x^4(GF) D_x^2(FF)}{F^4} - \\ - 15 \frac{D_x^4(FF) D_x^2(GF)}{F^4} + 30 \frac{GD_x^4(FF) D_x^2(FF)}{F^5} + 90 \frac{D_x^2(GF) D_x^2(FF)^2}{F^6}. \quad (19)$$

С учетом выражений (11)–(17) уравнение (2) можно записать как

$$\frac{1}{F^2} (D_t(GF) + D_x^4(GF)) + \frac{1}{F^2} D_x^4(GF) + \frac{6G}{F^5} D_x^2(FF) D_x^2(FF) - \frac{15G^2 G^*}{F^5} D_x^2(FF) + \\ + \frac{6G^3 G^{*2}}{F^5} - \frac{6}{F^4} D_x^2(FF) D_x^2(FG) - \frac{G}{F^3} D_x^4(FF) + \frac{16GG^*}{F^4} D_x^2(FG) + \frac{4G^2}{F^4} D_x^2(FG^*) - \\ - \frac{2G}{F^3} D_x^2(GG^*) - \frac{3G^*}{F^3} D_x^2(GG) = 0. \quad (20)$$

Можно заметить, что уравнение (10) приводится к виду

$$\frac{1}{F^2} (D_t(GF) + D_x^4(GF)) - \frac{3G^*}{F^3} D_x^2(GG) + \frac{6G}{F^5} \left(D_x^2(FF) - \frac{1}{2} GG^* \right) \\ (D_x^2(FF) - 2GG^*) - \frac{6}{F^4} D_x^2(FG) (D_x^2(FF) - 2GG^*) - \frac{G}{F^3} D_x^4(FF) + \frac{4GG^*}{F^4} D_x^2(FG) + \\ + \frac{4G^2}{F^4} D_x^2(FG^*) - \frac{2G}{F^3} D_x^2(GG^*) = 0. \quad (21)$$

Подстановка

$$F_{xx} = \frac{1}{F}(GG^* + F_x^2) \quad (22)$$

в последние четыре слагаемых уравнения (21)

$$E = \frac{4GG^*}{F^4} D_x^2(FG) - \frac{G}{F^3} D_x^4(FG) + \frac{4G^2}{F^4} D_x^2(FG^*) - \frac{2G}{F^3} D_x^2(GG^*), \quad (23)$$

дает $E = 0$. Однако выражение $\frac{3G^*}{F^3} D_x^2(GG)$ в (21) после этой подстановки тождественно нулю не равно.

Это означает, что уравнение (21) допускает факторизацию, не содержащую данного слагаемого, и солитонные решения уравнения (2) могут быть найдены из системы уравнений

$$F[D_t(GF) + D_x^4(GF)] - 3G^* D_x^2(GG) = 0, \quad (24)$$

$$D_x^2(FG) - 2GG^* = 0. \quad (25)$$

Далее мы используем следующие разложения

$$\begin{aligned} G(x, t) &= \varepsilon g_1 + \varepsilon^3 g_2 + \varepsilon^5 g_3 + \dots, \\ F(x, t) &= 1 + \varepsilon^2 f_1 + \varepsilon^4 f_2 + \varepsilon^6 f_3 + \dots \end{aligned} \quad (26)$$

Подставляя (26) в (24) и (25) и приравнявая выражения при различных степенях ε нулю, получаем следующую систему

$$\varepsilon^2: \quad i g_{1,t} + g_{1,xxx} = 0, \quad (27)$$

$$\varepsilon^3: \quad f_{1xx} - g_1^* g_1 = 0, \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^4: \quad & i g_{2,t} + g_{2,xxx} + g_1 f_{1,xxx} + 2 f_1 g_{1,xxx} - 4 g_{1,x} f_{1,xx} - 4 f_{1,x} g_{1,xx} + 6 g_1^* g_1 g_{1,xx} + 6 f_{1,xx} g_{1,xx} + \\ & + 6 g_1^* g_{1,x}^2 - i g_1 f_{1,t} + 2 i f_1 g_{1,t} = 0, \end{aligned} \quad (29)$$

$$\varepsilon^5: \quad f_{2,xx} + f_1 f_{1,xx} - f_{1,x}^2 - g_1^* g_2 - g_2^* g_1 = 0. \quad (30)$$

Заметим, что уравнение (27) линейно и имеет решение

$$g_1(x, t) = \exp\{k(x - x_0) + i \alpha k^4 t\}, \quad (31)$$

где x_0 — произвольная постоянная.

Подставляя (31) в (28), находим f_1 в виде

$$f_1 = \frac{1}{4k^2} \exp\{2k(x - x_0)\}. \quad (32)$$

В результате получаем односолитонное решение уравнения (2) при $\alpha = 1$ в форме

$$q(x, t) = \frac{4k^2 \exp\{k(x - x_0) + i\alpha k^4 t\}}{4k^2 + \exp\{2k(x - x_0)\}}. \quad (33)$$

Для построения двухсолитонного решения возьмем решение уравнения (27) в виде

$$g_1(x, t) = \exp\{k_1(x - x_1) + i\alpha k_1^4 t\} + \exp\{k_2(x - x_2) + i\alpha k_2^4 t\}, \quad (34)$$

где x_1 и x_2 – также произвольные постоянные. Используя (34), из (28) находим $f_1(x, t)$ в виде

$$f_1(x, t) = \frac{1}{4} \frac{e^{2k_1 x}}{k_1^2} + \frac{1}{4} \frac{e^{2k_2 x}}{k_2^2} + \frac{2e^{(k_1+k_2)x} \cos\left((k_1^4 - k_2^4)t\right)}{(k_1 + k_2)^2}. \quad (35)$$

Произвольные постоянные x_1 и x_2 в (35) здесь и далее опущены.

С учетом найденных $g_1(x, t)$ и $f_1(x, t)$ из (29) получаем $g_2(x, t)$ в форме

$$g_2(x, t) = \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(k_1+2k_2)+ik_1^4 t}}{4(k_1 + k_2)^2 k_2^2} + \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(2k_1+k_2)+ik_2^4 t}}{4k_1^2 (k_1 + k_2)^2}. \quad (36)$$

Решение $f_2(x, t)$ находится из (30) после подстановки $g_1(x, t)$, $f_1(x, t)$ и $g_2(x, t)$ и имеет вид

$$f_2(x, t) = \frac{(k_1 - k_2)^4 e^{2(k_1+k_2)x}}{16(k_1 + k_2)^4 k_1^2 k_2^2}. \quad (37)$$

Двухсолитонное решение уравнения (2) дается формулой

$$q_2(x, t) = \frac{G_1(x, t)}{F_1(x, t)}, \quad (38)$$

где $G_1(x, t)$ и $F_1(x, t)$ определяются выражениями

$$G_1(x, t) = \varepsilon \left(\exp\{k_1 x + i\alpha k_1^4 t\} + \exp\{k_2 x + i\alpha k_2^4 t\} \right) + \varepsilon^3 \left(\frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(k_1+2k_2)+ik_1^4 t}}{4(k_1 + k_2)^2 k_2^2} + \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(2k_1+k_2)+ik_2^4 t}}{4k_1^2 (k_1 + k_2)^2} \right) \quad (39)$$

и

$$F_1(x, t) = 1 + \varepsilon^2 \left(\frac{e^{2k_1 x}}{4k_1^2} + \frac{e^{2k_2 x}}{4k_2^2} + \frac{2e^{(k_1+k_2)x} \cos\left((k_1^4 - k_2^4)t\right)}{(k_1 + k_2)^2} \right) + \varepsilon^4 \left(\frac{(k_1 - k_2)^4 e^{2(k_1+k_2)x}}{16(k_1 + k_2)^4 k_1^2 k_2^2} \right). \quad (40)$$

Мы проверили двухсолитонное решение (38) и подтвердили, что оно удовлетворяет уравнению (2). Нами также получено и проверено трехсолитонное решение уравнения (2), оно будет приведено в разделе 5.

4. Солитонные решения уравнения

В этом разделе мы ищем солитонные решения уравнения (3), вновь используя метод Хироты с помощью преобразования (4). С этой целью, подставляя (11)–(19) в (3), получаем уравнение, записанное через оператор Хироты:

$$\begin{aligned}
 & i \frac{D_t(GF)}{F^2} + \frac{D_x^6(GF)}{F^2} - \frac{GD_x^6(FF)}{F^3} + 10 \frac{G^3 D_x(G^*F)^2}{F^7} + 70 \frac{GG^{*2} D_x(GF)^2}{F^7} + 60 \frac{G^* G^2 D_x(GF) D_x(G^*F)}{F^7} + \\
 & + 20 \frac{G^4 G^{*3}}{F^7} + 30 \frac{GD_x^4(FF) D_x^2(FF)}{F^5} + 90 \frac{D_x^2(GF) D_x^2(FF)^2}{F^6} + 12 \frac{GG^* D_x^4(GF)}{F^4} - 90 \frac{GD_x^2(FF)^3}{F^7} - \\
 & - 15 \frac{D_x^4(GF) D_x^2(FF)}{F^4} - 15 \frac{D_x^4(FF) D_x^2(GF)}{F^4} + 2 \frac{G^2 D_x^4(G^*F)}{F^4} + 126 \frac{G^2 G^* D_x^2(FF)^2}{F^7} + \\
 & + 8 \frac{GD_x(GF) D_x^3(G^*F)}{F^5} + 18 \frac{GD_x(G^*F) D_x^3(GF)}{F^5} + 22 \frac{GD_x(GF) D_x^2(G^*F)}{F^5} - 70 \frac{G^{*2} G^3 D_x^2(FF)}{F^7} - \\
 & - 34 \frac{G^2 D_x^2(FF) D_x^2(G^*F)}{F^6} + 50 \frac{D_x(G^*F) D_x(GF) D_x^2(GF)}{F^6} - 134 \frac{GG^* D_x^2(GF) D_x^2(FF)}{F^6} - \\
 & - 128 \frac{GD_x(GF) D_x(G^*F) D_x^2(FF)}{F^7} + 20 \frac{G^* G^3 D_x^2(G^*F)}{F^6} - 110 \frac{G^* D_x(GF)^2 D_x^2(FF)}{F^7} - \\
 & - 14 \frac{G^2 G^* D_x^4(FF)}{F^5} + 20 \frac{G^* D_x^2(GF)^2}{F^5} + 20 \frac{D_x(GF)^2 D_x^2(G^*F)}{F^6} + 50 \frac{GG^{*2} D_x^2(GF)}{F^6} + \\
 & + 30 \frac{G^* D_x(GF) D_x^3(GF)}{F^5} = 0. \tag{41}
 \end{aligned}$$

Записать (41) в виде системы двух уравнений непросто, однако можно заметить, что одно из таких уравнений для нелинейного уравнения Шредингера (1) и для уравнения (2) одинаково. Предполагая, что это же уравнение сохраняется и для третьего представителя иерархии нелинейного уравнения Шредингера, и подставляя (25) в (41), получаем второе уравнение для отыскания солитонных решений (3) в виде

$$\begin{aligned}
 & i D_t(GF) + \frac{D_x^6(GF)}{F^2} - 150 \frac{G^{*2} D_x(GF)^2}{F^7} + 20 \frac{G^* D_x^2(GF)^2}{F^5} - 196 \frac{G^* D_x(GF) G^2 D_x(G^*F)}{F^7} + \\
 & + 20 \frac{D_x(GF)^2 D_x^2(G^*F)}{F^6} - \frac{GD_x^6(FF)}{F^3} - 15 \frac{D_x^4(FF) D_x^2(GF)}{F^4} + 2 \frac{G^2 D_x^4(G^*F)}{F^4} + \\
 & + 10 \frac{G^3 D_x(G^*F)^2}{F^7} + 22 \frac{GD_x^2(GF) D_x^2(G^*F)}{F^5} + 8 \frac{GD_x(GF) D_x^3(G^*F)}{F^5} + 46 \frac{G^2 G^* D_x^4(FF)}{F^5} + \\
 & + 30 \frac{G^* D_x(GF) D_x^3(GF)}{F^5} + 142 \frac{G^{*2} G^2 D_x^2(GF)}{F^6} - 18 \frac{GD_x(G^*F) D_x^3(GF)}{F^5} - 18 \frac{GG^* D_x^4(GF)}{F^4} - \\
 & - 48 \frac{G^* G^3 D_x^2(G^*F)}{F^6} + 50 \frac{D_x(G^*F) D_x(GF) D_x^2(GF)}{F^6} - 336 \frac{G^4 G^{*3}}{F^7} = 0. \tag{42}
 \end{aligned}$$

Подставляя разложения (26) в (42) и (25), получаем систему уравнений для $g_1(x, t)$, $f_1(x, t)$, $g_2(x, t)$ и $f_2(x, t)$, аналогичную (27), (28), (29) и (30). При этом решение уравнения для $g_1(x, t)$ принимает вид

$$g_1(x, t) = \exp(kx + ik^6 t). \quad (43)$$

Находим $f_1(x, t)$ в виде

$$f_1(x, t) = \frac{1}{4k^2} \exp(2kx). \quad (44)$$

Решения $g_2(x, t)$ и $f_2(x, t)$ можно выбрать равными нулю. В результате получаем односолитонное решение

$$q_3(x, t) = \frac{4k^2 \exp\{kx + i\alpha k^6 t\}}{4k^2 + \exp\{2kx\}}. \quad (45)$$

В случае

$$g_1(x, t) = \exp(k_1 x + ik_1^6 t) + \exp(k_2 x + ik_2^6 t), \quad (46)$$

получаем $f_1(x, t)$ следующим образом:

$$f_1(x, t) = \frac{1}{4} \frac{e^{2k_1 x}}{k_1^2} + \frac{1}{4} \frac{e^{2k_2 x}}{k_2^2} + \frac{2e^{(k_1+k_2)x} \cos((k_1^6 - k_2^6)t)}{(k_1 + k_2)^2}. \quad (47)$$

С учетом найденных $g_1(x, t)$ и $f_1(x, t)$ находим $g_2(x, t)$ в форме

$$g_2(x, t) = \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(k_1+2k_2)+ik_1^6 t}}{4(k_1 + k_2)^2 k_2^2} + \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(2k_1+k_2)+ik_2^6 t}}{4k_1^2 (k_1 + k_2)^2}. \quad (48)$$

Решение $f_2(x, t)$ имеет вид

$$f_2(x, t) = \frac{(k_1 - k_2)^4 e^{2(k_1+k_2)x}}{16(k_1 + k_2)^4 k_2^2 k_1^2}. \quad (49)$$

Двухсолитонное решение уравнения (3) дается формулой

$$q_4(x, t) = \frac{G_2(x, t)}{F_2(x, t)}, \quad (50)$$

где $G_2(x, t)$ и $F_2(x, t)$ определяются как

$$G_2(x, t) = \varepsilon \left(\exp\{k_1 x + 4i\alpha k_1^6 t\} + \exp\{k_2 x + 4i\alpha k_2^6 t\} \right) + \varepsilon^3 \left(\frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(k_1+2k_2)+ik_1^6 t}}{4(k_1 + k_2)^2 k_2^2} + \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(2k_1+k_2)+ik_2^6 t}}{4k_1^2 (k_1 + k_2)^2} \right) \quad (51)$$

и

$$F_2(x, t) = 1 + \varepsilon^2 \left(\frac{e^{2k_1 x}}{4k_1^2} + \frac{e^{2k_2 x}}{4k_2^2} + \frac{2e^{(k_1+k_2)x} \cos((k_1^6 - k_2^6)t)}{(k_1 + k_2)^2} \right) + \varepsilon^4 \left(\frac{(k_1 - k_2)^4 e^{2(k_1+k_2)x}}{16(k_1 + k_2)^4 k_1^2 k_2^2} \right). \quad (52)$$

Непосредственной подстановкой проверено, что найденные решения удовлетворяют уравнению (3).

5. Солитонные решения нелинейного уравнения Шредингера порядка $2n$

Изучая решения уравнений (1), (2) и (3), можно сформулировать следующую гипотезу о первых трех солитонах иерархии нелинейного уравнения Шредингера. Односолитонное решение нелинейного уравнения Шредингера порядка $2n$ имеет вид

$$q_1^{(n)}(x, t) = \frac{4k^2 \exp\{k(x - x_0) + ik^{2n}t\}}{4k^2 + \exp(2kx)}, \quad (53)$$

где k и x_0 – произвольные постоянные.

Двухсолитонные решения нелинейного уравнения Шредингера порядка $2n$ определяются формулами

$$q_2^{(n)}(x, t) = \frac{\varepsilon g_1^{(n)}(x, t) + \varepsilon^3 g_2^{(n)}(x, t)}{1 + \varepsilon^2 f_1^{(n)}(x, t) + \varepsilon^4 f_2^{(n)}(x, t)}, \quad (54)$$

где $g_1^{(n)}(x, t)$, $f_1^{(n)}(x, t)$, $g_2^{(n)}(x, t)$ и $f_2^{(n)}(x, t)$ даются выражениями

$$g_1^{(n)}(x, t) = \exp(k_1 x + ik_1^{2n} t) + \exp(k_2 x + ik_2^{2n} t), \quad (55)$$

$$f_1^{(n)}(x, t) = \frac{e^{2k_1 x}}{4k_1^2} + \frac{e^{2k_2 x}}{4k_2^2} + \frac{2e^{(k_1+k_2)x} \cos\{(k_1^{2n} - k_2^{2n})t\}}{(k_1 + k_2)^2}, \quad (56)$$

$$g_2^{(n)}(x, t) = \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(k_1+2k_2) + ik_1^{2n}t}}{4(k_1 + k_2)^2 k_2^2} + \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(2k_1+k_2) + ik_2^{2n}t}}{4k_1^2 (k_1 + k_2)^2}. \quad (57)$$

$$f_2^{(n)}(x, t) = \frac{(k_1 - k_2)^4 e^{2(k_1+k_2)x}}{16(k_1 + k_2)^4 k_1^2 k_2^2}. \quad (58)$$

Трехсолитонные решения можно записать как

$$q_3^{(n)}(x, t) = \frac{\varepsilon r_1^{(n)}(x, t) + \varepsilon^3 r_2^{(n)}(x, t) + \varepsilon^5 r_3^{(n)}(x, t)}{1 + \varepsilon^2 s_1^{(n)}(x, t) + \varepsilon^4 s_2^{(n)}(x, t) + \varepsilon^6 s_3^{(n)}(x, t)}, \quad (59)$$

где $r_1^{(n)}(x, t)$, $s_1^{(n)}(x, t)$, $r_2^{(n)}(x, t)$, $s_2^{(n)}(x, t)$, $r_3^{(n)}(x, t)$ и $s_3^{(n)}(x, t)$ определяются следующими выражениями

$$r_1^{(n)}(x, t) = \exp(k_1 x + ik_1^{2n} t) + \exp(k_2 x + ik_2^{2n} t) + \exp(k_3 x + ik_3^{2n} t), \quad (60)$$

$$s_1^{(n)}(x, t) = \frac{e^{2k_1 x}}{4k_1^2} + \frac{e^{2k_2 x}}{4k_2^2} + \frac{e^{2k_3 x}}{4k_3^2} + \frac{2e^{x(k_1+k_2)} \cos\{(k_1^{2n} - k_2^{2n})t\}}{(k_1 + k_2)^2} + \frac{2e^{x(k_1+k_3)} \cos\{(k_1^{2n} - k_3^{2n})t\}}{(k_1 + k_3)^2} + \frac{2e^{x(k_2+k_3)} \cos\{(k_2^{2n} - k_3^{2n})t\}}{(k_2 + k_3)^2}. \quad (61)$$

$$r_2^{(n)}(x, t) = \left[\frac{(k_2 - k_3)^2 e^{i(k_2^{2n} + k_3^{2n} - k_1^{2n})t}}{(k_1 + k_2)^2 (k_1 + k_3)^2} + \frac{(k_1 - k_3)^2 e^{i(k_1^{2n} - k_2^{2n} + k_3^{2n})t}}{(k_1 + k_2)^2 (k_2 + k_3)^2} + \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{i(k_1^{2n} + k_2^{2n} - k_3^{2n})t}}{(k_2 + k_3)^2 (k_1 + k_3)^2} \right] e^{x(k_1 + k_2 + k_3)} +$$

$$+ \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(k_1 + 2k_2) + ik_1^{2n}t}}{4k_2^2 (k_1 + k_2)^2} + \frac{(k_1 - k_2)^2 e^{x(2k_1 + k_2) + ik_2^{2n}t}}{4k_1^2 (k_1 + k_2)^2} + \frac{(k_3 - k_1)^2 e^{x(2k_1 + k_3) + ik_3^{2n}t}}{4k_1^2 (k_1 + k_3)^2} +$$

$$+ \frac{(k_3 - k_1)^2 e^{x(k_1 + 2k_3) + ik_1^{2n}t}}{4k_3^2 (k_1 + k_3)^2} + \frac{(k_2 - k_3)^2 e^{x(k_2 + 2k_3) + ik_2^{2n}t}}{4k_3^2 (k_2 + k_3)^2} + \frac{(k_2 - k_3)^2 e^{x(2k_2 + k_3) + ik_3^{2n}t}}{4k_2^2 (k_2 + k_3)^2}. \quad (62)$$

$$s_2^{(n)}(x, t) = \frac{(k_1 - k_3)^2 (k_2 - k_3)^2 e^{x(k_1 + k_2 + 2k_3)}}{2(k_1 + k_3)^2 (k_1 + k_2)^2 k_3^2 (k_2 + k_3)^2} \cos\{(k_1^{2n} - k_2^{2n})t\} +$$

$$+ \frac{(k_2 - k_1)^2 (k_3 - k_1)^2 e^{x(2k_1 + k_2 + k_3)}}{2(k_2 + k_3)^2 (k_1 + k_3)^2 (k_1 + k_2)^2 k_1^2} \cos\{(k_2^{2n} - k_3^{2n})t\} +$$

$$+ \frac{(k_3 - k_2)^2 (k_1 - k_2)^2 e^{x(k_1 + 2k_2 + k_3)}}{2(k_2 + k_3)^2 (k_1 + k_3)^2 (k_1 + k_2)^2 k_2^2} \cos\{(k_1^{2n} - k_3^{2n})t\} +$$

$$+ \frac{(k_1 - k_2)^4 e^{2x(k_1 + k_2)}}{16(k_1 + k_2)^4 k_1^2 k_2^2} + \frac{(k_1 - k_3)^4 e^{2x(k_1 + k_3)}}{16(k_1 + k_3)^4 k_1^2 k_3^2} + \frac{(k_3 - k_2)^4 e^{2x(k_2 + k_3)}}{16(k_2 + k_3)^4 k_3^2 k_2^2}. \quad (63)$$

$$r_3^{(n)}(x, t) = \frac{(k_2 - k_3)^2 (k_1 - k_3)^4 (k_1 - k_2)^2 e^{x(2k_1 + k_2 + 2k_3) + ik_2^{2n}t}}{16(k_1 + k_2)^2 (k_2 + k_3)^2 k_1^2 k_3^2 (k_1 + k_3)^4} +$$

$$+ \frac{(k_2 - k_3)^4 (k_1 - k_3)^2 (k_1 - k_2)^2 e^{x(k_1 + 2k_2 + k_3) + ik_1^{2n}t}}{16(k_1 + k_2)^2 (k_2 + k_3)^4 (k_1 + k_3)^2 k_3^2 k_2^2} +$$

$$+ \frac{(k_1 - k_3)^2 (k_2 - k_3)^2 (k_1 - k_2)^4 e^{x(2k_1 + 2k_2 + k_3) + ik_3^{2n}t}}{16(k_1 + k_2)^4 (k_2 + k_3)^2 (k_1 + k_3)^2 k_2^2 k_1^2}. \quad (64)$$

$$s_3^{(n)}(x, t) = \frac{(k_2 - k_3)^4 (k_1 - k_3)^4 (k_1 - k_2)^4 e^{2x(k_1 + k_2 + k_3)}}{64k_1^2 k_2^2 k_3^2 (k_1 + k_3)^4 (k_2 + k_3)^4 (k_1 + k_2)^4}. \quad (65)$$

Эти решения были проверены нами для $n = 1$ и $n = 2$ на уравнениях (1) и (3). Исходя из этих решений, можно предположить существование многосолитонных решений иерархии нелинейного уравнения Шредингера.

Заключение

В данной работе исследовалась иерархия нелинейного уравнения Шредингера. Метод Хироты применялся для поиска солитонных решений нелинейных уравнений Шредингера высших порядков. В результате с помощью некоторых модификаций метода Хироты получены одно-, двух- и трехсолитонные решения этих уравнений.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект государственного задания № FSWU-2026-0006).

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

Н.А. Кудряшов – постановка задачи, изучение нелинейных уравнения Шредингера высшего порядка, получение одно-, двух- и трехсолитонных решений, используя метод Хироты, обсуждение результатов.

А.А. Кутуков – построение точных решений, подготовка текста статьи, обсуждение результатов.

Н.В. Ермолаева – подготовка текста статьи, обсуждение результатов.

Список литературы

1. Ablowitz M.J., Prinari B., Trubatch A.D. Solitons: an introduction. Cambridge University press, 2004.
2. Drazin P.G., Johnson R. S. Solitons: an introduction. Cambridge University press, 1989. 226 p.
3. Ablowitz M.J., Clarkson P.A. Solitons Nonlinear Evolution Equations and Inverse Scattering. Cambridge university press, 1991. 516 p.
4. Kivshar Y.S., Agrawal G.P. Optical Solitons. From Fibers to Photonic Crystals. Academic Press, 2003. 540 p.
5. Kivshar Y.S., Malomed B.A. Dynamics of solitons in nearly integrable systems // Reviews of Modern Physics, 1989. V. 63. Pp. 763–915. DOI: 10.1103/RevModPhys.61.763
6. Lamb G.L. Elements of Soliton Theory, New York: John Wiley & Sons, 1980. 302 p.
7. Hasegawa A., Tappert F. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Anomalous dispersion // Applied Physics Letters, 1973. V. 23. № 3. P. 142–144. DOI: 10.1063/1.1654836.
8. Hasegawa A., Tappert F. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. II. Normal dispersion // Applied Physics Letters, 1973. V. 23. № 4. P. 171–172. DOI: 10.1063/1.1654847.
9. Zakharov V.E., Shabat A.B. Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media // Sov. Phys. – JETP, 1972. V. 34. P. 62–69.
10. Ablowitz M.J., Kaup D.J., Newell A.C., Segur H. The inverse scattering transform - Fourier analysis for nonlinear problems // Studies in Applied Mathematics, 1974. V. 53. P. 249–315.
11. Kudryashov N.A. Method for finding highly dispersive optical solitons of nonlinear differential equations // Optik, 2020. V. 206, art. No. 163550. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163550.
12. Kudryashov N.A. Implicit Solitary Waves for One of the Generalized Nonlinear Schrodinger Equations // Mathematics, 2021. V. 9(23), art. No. 3024. DOI: 10.3390/math9233024.
13. Kudryashov N.A. Highly dispersive solitary wave solutions of perturbed nonlinear Schrodinger equations // Applied Mathematics and Computation, 2020. V. 371. art. No. 124972. DOI: 10.1016/j.amc.2019.124972.
14. Biswas A., Ekici M., Sonmezoglu A., Belic M.R. Highly dispersive optical solitons with quadratic-cubic law by F-expansion // Optik, 2019. V. 182. P. 930–943.
15. Zayed E.M.E., Al-Nowehy, A.-G., Alngar M.E.M., Biswas A., Asma M., Ekici M., Alzahrani A.K., Belic M.R. Highly dispersive optical solitons in birefringent fibers with four nonlinear forms using Kudryashov's approach // Journal of Optics (India), 2021. V. 50 (1). P. 120–131.
16. Biswas A., Ekici M., Sonmezoglu A., Belic M.R. Highly dispersive optical solitons with Kerr law nonlinearity by F-expansion, Optik, 2019. V. 181. P. 1028–1038.
17. Kudryashov N.A. Method for finding highly dispersive optical solitons of nonlinear differential equations // Optik, 2020. V. 206. 163550. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163550.
18. Kudryashov N.A. Method for finding optical solitons of generalized nonlinear Schrodinger equations // Optik, 2022. V. 261, 169163. DOI:10.1016/j.ijleo.2022.169163
19. Biswas A., Ekici M., Sonmezoglu A., Belic M.R. Highly dispersive optical solitons with cubic-quintic-septic law by F-expansion // Optik, 2019. V. 182. P. 897–906.
20. Biswas A., Ekici M., Sonmezoglu A., Belic M.R. Highly dispersive optical solitons with cubic-quintic-septic law by extended Jacobi's elliptic function expansion // Optik, 2019. V. 183. P. 571–578.
21. Russel J.S. Report on waves. Report on the 14th Meeting of the British Association for the Advancement of Science. London, John Murrey, 1844. P. 311–390.
22. Zabusky N.J., Kruskal M.D. Interaction of solitons in a collisionless plazma and the recurrence of initial states // Physical Review Letters, V. 19. P. 240–243.
23. Gardner C.S., Greene J.M., Kruskal M.D., Miura R.M. Method for solving the Korteweg - de Vries equation // Physical Review Letters, 1967. V.19. P. 1095–1097.
24. Lax P.D. Integrals of nonlinear evolution equations of evolution and solitary waves // Comm. Pure Appl. Math., 1968. V. 21. P. 467–490.
25. Kudryashov N.A. Amalgamations of the Painlevé equations // Journal of Mathematical Physics, 2003. V. 44(12). P. 6160–6178. DOI: 10.1063/1.1623332.
26. Kudryashov N.A. Traveling wave reduction of the modified KdV hierarchy: The lax pair and the first integrals // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2019. V.73. P. 472–480. DOI: 10.1016/j.cnsns.2019.03.007.

27. Kudryashov N.A. Lax pair and first integrals of the traveling wave reduction for the KdV hierarchy // *Applied Mathematics and Computation*, 2019. V. 350. P. 323–330. DOI: 10.1016/j.amc.2019.01.034.
28. Hirota R. Exact solution of the Korteweg-de Vries equation for multiple Collisions of solitons // *Physical Review Letters*, 1971. V. 27. № 18. P. 1192–1194. DOI: 10.1103/PhysRevLett.27.1192.
29. Hirota R. Exact Solution of the Modified Korteweg-de Vries Equation for Multiple Collisions of Solitons // *Journal of the Physical Society of Japan*, 1972. V. 33. P. 1456–1458. DOI: 10.1143/JPSJ.33.1456.
30. Hirota R. Exact Solution of the Sine-Gordon Equation for Multiple Collisions of Solitons // *Journal of the Physical Society of Japan*, 1972. V. 33. № 5. P.1459–1463.
31. Hirota R. Exact envelope-soliton solutions of a nonlinear wave equation // *Journal of Mathematical Physics*, 1973. V. 14. № 7. P. 805–809.
32. Kudryashov N. A. Solitons of the modified Korteweg–de Vries // *Chaos, Solitons and Fractals*, 2024. V. 184., Iss. C. 150010. DOI: 10.1016/j.chaos.2024.115010.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2026, vol. 15, no. 3, pp. 223–235

Application of the Hirota method for the higher-order nonlinear Schrödinger equations

N. A. Kudryashov^{1,✉}, A. A. Kutukov^{1,✉}, N. V. Ermolaeva^{1,2,✉}

¹ National Nuclear Research University MEPhI, Moscow, 115409 Russia

² Volgodonsk Engineering and Technical Institute – branch of National Research Nuclear University MEPhI, Volgodonsk, 347360, Russia

✉ NAKudryashov@mephi.ru

✉ AAKutukov@mephi.ru

✉ NVErmolayeva@mephi.ru

Received March 25, 2026; revised May 12, 2026; accepted May 26, 2026

The Hirota method is applied to look for the soliton solutions of nonlinear higher order Schrödinger equations. The equations of the fourth and sixth orders of the Schrodinger hierarchy are studied in detail. Using the formulas for derivatives of the functions for the higher order equations are represented via the Hirota operator. The equations are presented as a system of two equations. One, two and three soliton solutions of the nonlinear Schrödinger hierarchy are obtained.

Keywords: higher order nonlinear Schrödinger equation, Hirota method, multi-soliton solution.

References

1. Ablowitz M.J., Prinari B., Trubatch A.D. Solitons: an introduction. Cambridge University press, 2004.
2. Drazin P.G., Johnson R.S. Solitons: an introduction. Cambridge University press, 1989. 226 p.
3. Ablowitz M.J., Clarkson P.A. Solitons Nonlinear Evolution Equations and Inverse Scattering. Cambridge university press, 1991. 516 p.
4. Kivshar Y.S., Agrawal G.P. Optical Solitons. From Fibers to Photonic Crystals. Academic Press, 2003. 540 p.
5. Kivshar Y.S., Malomed B. A. Dynamics of solitons in nearly integrable systems. *Reviews of Modern Physics*, 1989. Vol. 63. Pp. 763–915. DOI: 10.1103/RevModPhys.61.763.
6. Lamb G.L. Elements of Soliton Theory. New York, John Wiley & Sons, 1980. 302 p.
7. Hasegawa A., Tappert F. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Anomalous dispersion. *Applied Physics Letters*, 1973. Vol. 23. No. 3. Pp. 142–144. DOI: 10.1063/1.1654836.
8. Hasegawa A., Tappert F. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. II. Normal dispersion. *Applied Physics Letters*, 1973. Vol. 23. No. 4. Pp. 171–172. DOI: 10.1063/1.1654847.

9. Zakharov V.E., Shabat A.B. Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media. Sov. Phys. – JETP, 1972. Vol. 34. Pp. 62–69.
10. Ablowitz M.J., Kaup D.J., Newell A.C., Segur H. The inverse scattering transform – Fourier analysis for nonlinear problems. Studies in Applied Mathematics. 1974 V. 53. P. 249–315.
11. Kudryashov N.A. Method for finding highly dispersive optical solitons of nonlinear differential equations. Optik, 2020. Vol. 206, art. no. 163550. DOI:10.1016/j.ijleo.2019.163550
12. Kudryashov N.A. Implicit Solitary Waves for One of the Generalized Nonlinear Schrodinger Equations. Mathematics, 2021. Vol. 9(23), art. No. 3024. DOI: 10.3390/math9233024.
13. Kudryashov N.A. Highly dispersive solitary wave solutions of perturbed nonlinear Schrodinger equations. Applied Mathematics and Computation, 2020. Vol. 371. art. No. 124972. DOI:10.1016/j.amc.2019.124972.
14. Biswas A., Ekici M., Sonmezoglu A., Belic M.R. Highly dispersive optical solitons with quadratic-cubic law by F-expansion. Optik, 2019. Vol. 182. Pp. 930–943.
15. Zayed E.M.E., Al-Nowehy, A.-G., Alngar M.E.M., Biswas A., Asma M., Ekici M., Alzahrani A.K., Belic M.R. Highly dispersive optical solitons in birefringent fibers with four nonlinear forms using Kudryashov's approach. Journal of Optics (India), 2021. Vol. 50 (1). Pp. 120–131.
16. Biswas A., Ekici M., Sonmezoglu A., Belic M.R. Highly dispersive optical solitons with Kerr law nonlinearity by F-expansion. Optik, 2019. Vol. 181. Pp. 1028–1038.
17. Kudryashov N.A. Method for finding highly dispersive optical solitons of nonlinear differential equations. Optik, 2020, Vol. 206, 163550. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163550.
18. Kudryashov N.A. Method for finding optical solitons of generalized nonlinear Schrodinger equations. Optik, 2022. Vol. 261. 169163. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.169163.
19. Biswas A., Ekici M., Sonmezoglu A., Belic M.R. Highly dispersive optical solitons with cubic-quintic-septic law by F-expansion. Optik, 2019. Vol. 182. Pp. 897–906.
20. Biswas A., Ekici M., Sonmezoglu A., Belic M.R. Highly dispersive optical solitons with cubic-quintic-septic law by extended Jacobi's elliptic function expansion. Optik, 2019, Vol. 183. Pp. 571–578.
21. Russel J. S. Report on waves. Report on the 14th Meeting of the British Association for the Advancement of Science. London, John Murrey, 1844. Pp. 311–390.
22. Zabusky N. J., Kruskal M. D. Interaction of solitons in a collisionless plazma and the recurrence of initial states. Physical Review Letters. Vol. 19. Pp. 240–243.
23. Gardner C.S., Greene J.M., Kruskal M.D., Miura R.M. Method for solving the Korteweg–de Vries equation. Physical Review Letters, 1967. Vol. 19. Pp. 1095–1097.
24. Lax P. D. Integrals of nonlinear evolution equations of evolution and solitary waves. Comm. Pure Appl. Math., 1968. Vol. 21. Pp. 467–490.
25. Kudryashov N.A. Amalgamations of the Painlevé equations. Journal of Mathematical Physics, 2003. Vol. 44(12). Pp. 6160–6178. DOI: 10.1063/1.1623332.
26. Kudryashov N.A. Traveling wave reduction of the modified KdV hierarchy: The lax pair and the first integrals. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2019. Vol. 73. Pp. 472–480. DOI: 10.1016/j.cnsns.2019.03.007.
27. Kudryashov N.A. Lax pair and first integrals of the traveling wave reduction for the KdV hierarchy. Applied Mathematics and Computation, 2019. Vol. 350. Pp. 323–330. DOI: 10.1016/j.amc.2019.01.034.
28. Hirota R. Exact solution of the Korteweg–de Vries equation for multiple Collisions of solitons. Physical Review Letters, 1971. Vol. 27. No. 18. Pp. 1192–1194. DOI: 10.1103/PhysRevLett.27.1192.
29. Hirota R. Exact Solution of the Modified Korteweg–de Vries Equation for Multiple Collisions of Solitons. Journal of the Physical Society of Japan, 1972. Vol. 33. Pp. 1456–1458. DOI: 10.1143/JPSJ.33.1456.
30. Hirota R. Exact Solution of the Sine–Gordon Equation for Multiple Collisions of Solitons. Journal of the Physical Society of Japan, 1972. Vol. 33. No. 5. Pp. 1459–1463.
31. Hirota R. Exact envelope-soliton solutions of a nonlinear wave equation. Journal of Mathematical Physics, 1973. Vol. 14. No. 7. Pp. 805–809.
32. Kudryashov N.A. Solitons of the modified Korteweg – de Vries. Chaos, Solitons and Fractals, 2024. Vol. 184. Iss. C. 150010. DOI: 10.1016/j.chaos.2024.115010.

УДК 621.039.5, 519.6

Определение температурных коэффициентов реактивности ядерного реактора в пассивном эксперименте в точечном приближении

© 2026 г. М. А. Симановский, А. М. Загребаев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

В точечном приближении построена математическая модель реактора типа ВВЭР с учетом нескольких температурных обратных связей. Рассмотрен качественный переход теплофизических уравнений в точечную модель. Получены асимптотические уравнения в малых отклонениях. На основе данной модели формулируется задача линейной регрессии для восстановления температурных коэффициентов реактивности из временных рядов температур топлива и теплоносителя, показаний реактиметра. Получены начальные оценки коэффициентов реактивности на основе статистических характеристик рядов. Высокая корреляция между температурными переменными приводит к вырождению матрицы ковариаций. Определитель матрицы ковариаций, находящийся в знаменателе, влечет неустойчивость решения, что является основным препятствием для получения надежных результатов идентификации. Для анализа стохастической модели и вычисления ковариаций рассмотрено применение уравнения Ляпунова для ковариаций к линеаризованным уравнениям, найдены значения ковариаций производных. Аналитически определены условия, при которых коэффициент корреляции Пирсона между дифференцированными временными рядами температур оказывается меньше оригинальных временных рядов. Предлагается для восстановления коэффициентов использование композиции медианного и дифференцирующего фильтров наряду с регуляризацией. Полученные результаты демонстрируют возможность уменьшения мультиколлинеарности, потенциально повышая стабильность получаемых оценок температурных коэффициентов реактивности в регрессионных методах.

Ключевые слова: динамика ядерного реактора, точечная кинетика, точечная динамика, коэффициенты реактивности, обратные связи, ВВЭР, корреляция, уравнение Ляпунова.

Введение

Классические подходы к определению коэффициентов реактивности основаны на микропараметрах, входящих в формулу четырех сомножителей для коэффициента размножения [1]. Так, для коэффициента реактивности по температуре топлива предлагается оценка (1), где μ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах, ϕ – вероятность избежать резонансного захвата, θ – коэффициент использования тепловых нейтронов, η – выход нейтронов на одно поглощение.

$$\alpha_f = \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial T_f}, \quad k = \mu \phi \theta \eta. \quad (1)$$

В данной работе, как и в [2, 3], коэффициенты реактивности исследуются не с точки зрения их происхождения, а как факт, заложенный в экспериментально наблюдаемые величины: плотность потока

✉ М.А. Симановский: MASimanovskiy@mephi.ru
А.М. Загребаев: AMZagrebaev@mephi.ru

Поступила в редакцию: 01.04.2026
После доработки: 21.05.2026
Принята к публикации: 26.05.2026

нейтронов, определяемая детекторами прямого заряда, реактивность, вычисляемая в ходе решения задачи обратной кинетики, а также параметры температуры топлива и воды-теплоносителя (2)

$$\rho = \sum_i \alpha_{p_i} \frac{\partial p_i}{\partial q} \Big|_{q=q_0}, \quad (2)$$

где p_i – i -ый технологический параметр, α_{p_i} – его коэффициент реактивности, q, q_0 – обобщенная переменная, от которой зависит реактивность, и ее равновесное значение.

Выбирая температуры за параметры, влияние обратных связей по температуре топлива и теплоносителя в рамках рассматриваемой модели может быть учтено следующим образом: вблизи положения равновесия реактивность может быть разложена в ряд Тейлора до линейных членов (3)

$$\rho = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial T_f} (T_f - T_{f_0}) + \frac{\partial \rho}{\partial T_m} (T_m - T_{m_0}), \quad (3)$$

где T_f – температура топлива, T_m – температура воды, T_{f_0}, T_{m_0} – равновесные значения температур, ρ_0 – составляющая реактивности, независимая от температурных характеристик.

В пренебрежении быстропротекающими переходными процессами, влияющими на мощность [3], частные производные остаются постоянными величинами, именуемыми далее коэффициентами реактивности по топливу и теплоносителю (4).

$$\alpha_f \equiv \frac{\partial \rho}{\partial T_f}, \quad \alpha_m \equiv \frac{\partial \rho}{\partial T_m}. \quad (4)$$

Основная гипотеза работы состоит в том, что естественные флуктуации, влияющие на реактивность, в том числе, такие как случайные вибрации элементов системы управления, благодаря обратным связям, коррелированы с остальными наблюдаемыми параметрами.

В модели реактора типа ВВЭР с отрицательными обратными связями случайное дельтаобразное возбуждение производной реактивности даст ступенчатый вклад в изменение потока нейтронов, что повлечет уже гладкое изменение температуры и «вернется» к реактивности дважды гладким.

Теплофизические характеристики точечной модели

Известны точечные модели реактора, например [5], опирающиеся на единую температуру в «точке» моделирования. В таком случае задача поиска единственного коэффициента реактивности тривиальна. В [6] приведен подход с двумя коэффициентами реактивности (по топливу и охладителю) при единой температуре (5).

$$\rho = (\alpha_f + \alpha_m) T + \delta \rho. \quad (5)$$

В данной работе предлагается разделить температуры топлива и воды исходя из следующих энергетических соображений.

Обозначив энерговыделение за единицу времени как W_f , а энергию, покидающую систему за единицу времени, например, посредством теплоносителя, как W_c , можно составить дифференциальное уравнение на тепловой баланс (6),

$$C \frac{dT}{dt} = W_f - W_c, \quad (6)$$

где C – теплоемкость активной зоны.

Уравнение (6) можно разделить на автономную систему уравнений (7), разбив процесс охлаждения на два этапа: теплопередачу горячей воде W_m , находящейся в активной зоне, и охлаждение этой воды под действием теплоносителя W_c .

$$\begin{cases} C_f \frac{dT_f}{dt} = W_f - W_m; \\ C_m \frac{dT_m}{dt} = W_m - W_c. \end{cases} \quad (7)$$

При этом мощности могут быть определены в соответствии с системой (8)

$$\begin{cases} W_f = q_f \Sigma_f n v V; \\ W_m = h (T_f - T_m); \\ W_c = m c_m (T_{out} - T_{in}), \end{cases} \quad (8)$$

где q_f – энергия на одну реакцию деления; h – коэффициент теплопередачи от топлива к воде; $\dot{m}$ – массовый расход теплоносителя за единицу времени; T_{out} и T_{in} – температуры горячей воды на выходе активной зоны и охлажденной на входе.

Работая с двумя обратными связями в одной точке, предлагается ввести упрощение (9) из допущения, что насос управляется оптимальным образом, обеспечивая постоянную температуру охлажденной воды.

$$T_{out} = T_m, \quad T_{in} = T_c = \text{const}. \quad (9)$$

Легко видеть, что в предельном случае $T_m = T_c$ система (7) вырождается в уравнение (6), таким образом, гипотетическое обобщение не противоречит частной теории.

Принимая в системе (7) производные по времени за ноль, можно сделать вывод об условии достижения стационарного режима: $W_f = W_m = W_c$. Система имеет решение при выполнении связи между теплопроводностью и расходом теплоносителя (10).

$$\frac{h}{\dot{m} c_m} = \frac{T_{m_0} - T_c}{T_{f_0} - T_{m_0}} \equiv \tau. \quad (10)$$

Уравнение асимптотической кинетики в малых отклонениях

Уравнение переноса нейтронов при постоянном коэффициенте диффузии задается формулой (11), где ϕ – поток нейтронов, v – средняя скорость тепловых нейтронов, D – коэффициент диффузии, Σ_a – макросечение поглощения, S – источники нейтронов.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \phi(\vec{r}, t) - D \Delta \phi(\vec{r}, t) + \Sigma_a \phi(\vec{r}, t) = S(\vec{r}, t). \quad (11)$$

Основным источником новых нейтронов служит деление: $v_f \Sigma_f$, где Σ_f – сечение деления, а v_f – среднее число нейтронов за один акт деления.

Учитывая влияние запаздывающих нейтронов, источники могут быть определены в соответствии с уравнением (12), где β – доля запаздывающих нейтронов, λ – усредненная по группам постоянная распада, c – концентрация ядер предшественников, а (13) соответствует уравнению для концентрации предшественников.

$$S(\vec{r}, t) = v_f \Sigma_f \phi(\vec{r}, t) - \beta v_f \Sigma_f \phi(\vec{r}, t) + \lambda c; \quad (12)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \beta v_f \Sigma_f \phi - \lambda c. \quad (13)$$

В одгрупповом по скорости приближении вместо плотности потока нейтронов для удобства может также рассматриваться плотность нейтронов n [4]. Дополнительно вводятся обозначения эффективного коэффициента размножения $K_{eff} = \frac{K_\infty}{1 + L^2 B^2}$, реактивности $\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}}$, длины диффузии $L = \sqrt{D / \Sigma_a}$, времени жизни мгновенных нейтронов $l_0 = 1 / v \Sigma_a$, эффективного времени жизни мгновенных нейтронов с учетом утечки $l = \frac{l_0}{1 + L^2 B^2}$. Используя их, уравнения (12) и (13) сводятся к системе (14).

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = K_{eff} (\rho - \beta) \frac{n}{l} + \lambda C; \\ \frac{dC}{dt} = K_{eff} \beta \frac{n}{l} - \lambda C. \end{cases} \quad (14)$$

В приближении критичного реактора ($K_{eff} = 1$) плотность нейтронов представима суммой основного значения n_0 , соответствующего стационарной задаче, и малой нестационарной величиной δn : $n(t) = n_0 + \delta n(t)$.

Отклонения температур от своих равновесных значений по аналогии можно записать как отклонения от стационарных значений: $T_f - T_{f_0} = \delta T_f$, $T_m - T_{m_0} = \delta T_m$.

Обозначив вклад в реактивность, связанный с обратными связями по температуре, за $\delta \rho = \alpha_f \delta T_f + \alpha_m \delta T_m$, можно получить выражение для реактивности в аналогичной форме: $\rho(t) = \rho_0 + \delta \rho(t)$.

Уравнение предшественников линейно по малым приращениям и при переходе к разложению по отклонениям (15) распадается на пару идентичных по форме непересекающихся уравнений (16).

$$\frac{d(C_0 + \delta C)}{dt} - \frac{\beta}{l} (n_0 + \delta n) + \lambda (C_0 + \delta C) = 0, \quad (15)$$

$$\frac{dC_0}{dt} - \frac{\beta}{l} n_0 + \lambda C_0 = - \left(\frac{d\delta C}{dt} - \frac{\beta}{l} \delta n + \lambda \delta C \right). \quad (16)$$

Уравнение на плотность нейтронов же таким свойством не обладает: при аналогичном преобразовании (17) в нем встречается перекрестное произведение малых отклонений температур с плотностью нейтронов (18).

Пренебрегая перекрестными произведениями из соображений порядка малости, в правой части получается линеаризованное уравнение в отклонениях от стационарного режима работы реактора, а в левой – уравнение этого режима. Из равенства левой части нулю следует система (19).

$$\frac{d(n_0 + \delta n)}{dt} = \frac{n_0 + \delta n}{l} (\rho_0 + \delta \rho - \beta) + \lambda C; \quad (17)$$

$$\frac{dn_0}{dt} - \frac{\rho_0 - \beta}{l} n_0 - \lambda C = - \left(\frac{d\delta n}{dt} - \frac{\rho_0 - \beta}{l} \delta n - \frac{n_0}{l} \delta \rho - \frac{\delta n \delta \rho}{l} \right); \quad (18)$$

$$\begin{cases} \frac{dn_0}{dt} - \frac{\rho_0 - \beta}{l} n_0 - \lambda C = 0; \\ \frac{d\delta n}{dt} - \frac{\rho_0 - \beta}{l} \delta n - \frac{n_0}{l} \delta \rho = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Первое уравнение системы (7) на температуру топлива аналогично уравнению концентрации предшественников (16) не терпит никаких изменений при выделении моды и малых отклонений. Обозначив аналогично равновесные мощности и малые отклонения энерговыделения и теплопередачи воде за $W_f^0, \delta W_f, W_m^0, \delta W_m$ соответственно, легко перейти к системе (20).

$$C_f \frac{dT_{f_0}}{dt} - W_f^0 - W_m^0 = 0 = -C_f \frac{d\delta T_f}{dt} + \delta W_f - \delta W_m. \quad (20)$$

Принятое допущение (9) незначительно модифицирует уравнение на температуру воды системы (7). Поскольку постоянная на входе температура T_c не содержит отклонений, аналогичная процедура преобразует его в пару идентичных по форме непересекающихся уравнений (21) и (22), где κ определяется безмассовым параметром, связанным со скоростью истечения жидкости в соответствии с (23).

$$C_m \frac{dT_{m_0}}{dt} = h(T_{f_0} - T_{m_0}) - \kappa C_m (T_{m_0} - T_c); \quad (21)$$

$$C_m \frac{d\delta T_m}{dt} = h(\delta T_f - \delta T_m) - \kappa C_m \delta T_m; \quad (22)$$

$$\dot{m}c_m = \kappa C_m. \quad (23)$$

Второе уравнение системы (19) из абсолютного отклонения может быть удобно сведено к уравнению в относительном отклонении (24) заменой $\eta = \delta n/n_0$.

$$l \frac{d\eta}{dt} = (\rho_0 - \beta)\eta + \delta \rho. \quad (24)$$

При этом переход от плотности нейтронов к энерговыделению осуществляется преобразованием $\delta W_f = \zeta \eta$, где $\zeta = q_f \Sigma_f n_0$.

Поиск коэффициентов реактивности

Дифференцируя (3), может быть получено уравнение (25).

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial T_f} dT_f + \frac{\partial \rho}{\partial T_m} dT_m. \quad (25)$$

Отсюда коэффициенты реактивности могут быть вычислены как частные производные:

$$\alpha_f = \frac{\partial \rho}{\partial T_f}, \quad \alpha_m = \frac{\partial \rho}{\partial T_m}. \quad (26)$$

Или же мгновенное значение коэффициента реактивности по каждому параметру может быть получено из разностной схемы (27) [7].

$$\alpha_{f,m}^i = \frac{\rho^{i+1} - \rho^{i-1}}{T_{f,m}^{i+1} - T_{f,m}^{i-1}}. \quad (27)$$

Однако, этот подход слабо применим к изучаемому пассивному эксперименту, где основное воздействие на систему является случайным шумом.

С другой стороны, дифференцируя (25) по времени, может быть получено выражение (28), где $\varepsilon(t)$ соответствует винеровскому процессу.

$$\frac{\partial \delta \rho}{\partial t} = \alpha_f \frac{\partial \delta T_f}{\partial t} + \alpha_m \frac{\partial \delta T_m}{\partial t} + \varepsilon(t). \quad (28)$$

В задачах фильтрации зашумленных измерений при наличии математической модели часто используется фильтр Калмана для линейных дифференциальных уравнений или расширенный фильтр для нелинейных задач. Однако искомые параметры, коэффициенты реактивности, содержатся в самой модели, а, следовательно, и матрице перехода. Таким образом, моделирование и коррекция по алгоритму Калмана становятся невозможными без самих параметров. Для борьбы со случайным дельтаобразным возмущением реактивности, принятым за модель шума в данной работе, применяются медианные фильтры, как хорошо применимые в задачах фильтрации импульсных помех [8]. Результат медианного фильтра может быть объединен с дифференцирующим фильтром.

Вводя обозначение « $\hat{\cdot}$ » для величины, прошедшей фильтрацию, из (28) получим (29):

$$\frac{\widehat{\partial \delta \rho}}{\partial t} = \alpha_f \frac{\widehat{\partial \delta T_f}}{\partial t} + \alpha_m \frac{\widehat{\partial \delta T_m}}{\partial t} + \hat{\varepsilon}(t). \quad (29)$$

Выражение (29) может быть рассмотрено как результат матричного произведения. Действительно, пронумеровав каждый отсчет среза временного ряда наблюдений индексами $j = 1, \dots, N$, можно составить матрицу производных температур размерности $2 \times N$ (30), а из коэффициентов реактивности собрать вектор (31).

$$\hat{T}_k^j = \left(\left(\frac{\widehat{\partial \delta T_f}}{\partial t} \right)^j \quad \left(\frac{\widehat{\partial \delta T_m}}{\partial t} \right)^j \right), \quad k = 1, \dots, 2, \quad j = 1, \dots, N; \quad (30)$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_f \\ \alpha_m \end{pmatrix} = (\alpha)^k, \quad k = 1, \dots, 2. \quad (31)$$

Таким образом (29) сводится к (32), где $\hat{\rho}^j$ – значение отфильтрованной производной реактивности в дискретный момент времени j .

$$\hat{\rho}^j = \hat{T}_j^k (\alpha)^k + \hat{\varepsilon}^j. \quad (32)$$

Тогда задача поиска коэффициентов может быть сведена к минимизации квадрата нормы разности целевой производной реактивности и линейной комбинации производных температур (33). Необходимым условием достижения экстремального значения является равенство градиента (34) нулю (35).

Подстановка в (35) значения S^j из (33) дает систему уравнений (36).

$$S^2(\alpha^k) = S^j S_j \rightarrow \min, \quad S^j = \hat{\rho}^j - \hat{T}_k^j(\alpha)^k. \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \partial_{\alpha^k} S^i S_i &= -2 \partial_{\alpha^k} \hat{T}_k^j(\alpha)^m S_j, \\ \partial_{\alpha^k} S^i S_i &= -2 \hat{T}_m^j \delta_k^m S_j. \end{aligned} \quad (34)$$

$$\hat{T}_k^j S_j = 0. \quad (35)$$

$$\hat{T}_k^j \hat{\rho}_j = (\alpha)_m \hat{T}_k^i \hat{T}_i^m. \quad (36)$$

Тогда коэффициенты реактивности после транспонирования в предположении невырожденности матрицы $\hat{T}_k^i \hat{T}_i^m$ могут быть найдены по формуле (37).

$$(\alpha)^m = \left(\hat{T}_i^m \hat{T}_k^i \right)^{-1} \hat{T}_k^j \hat{\rho}_j. \quad (37)$$

Учитывая центральность малых отклонений, справедлива система (38), где введено обозначение ковариации двух величин $\text{Cov}[i, j] = \Sigma_{i,j}$.

$$\begin{cases} \Sigma_{\hat{\rho}, \hat{T}_k} = \hat{T}_k^j \hat{\rho}_j, & k \in \{f, m\}; \\ \Sigma_{\hat{T}_i, \hat{T}_k} = \hat{T}_i^j \hat{T}_k^j, & i, k \in \{f, m\}. \end{cases} \quad (38)$$

Тогда определение коэффициентов реактивности доступно через статистические характеристики временных рядов (39). В частности, вычисляя обратную матрицу ковариации, имеем (40).

$$\alpha_i = \left(\Sigma_{\hat{T}_i, \hat{T}_k} \right)^{-1} \Sigma_{\hat{\rho}, \hat{T}_k}, \quad i, k \in \{f, m\}. \quad (39)$$

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{\Sigma_{\hat{\rho}, \hat{T}_f} \Sigma_{\hat{T}_m, \hat{T}_m} - \Sigma_{\hat{\rho}, \hat{T}_m} \Sigma_{\hat{T}_f, \hat{T}_m}}{\Sigma_{\hat{T}_f, \hat{T}_f} \Sigma_{\hat{T}_m, \hat{T}_m} - \Sigma_{\hat{T}_f, \hat{T}_m} \Sigma_{\hat{T}_m, \hat{T}_f}}; \\ \alpha_m = \frac{\Sigma_{\hat{\rho}, \hat{T}_m} \Sigma_{\hat{T}_f, \hat{T}_f} - \Sigma_{\hat{\rho}, \hat{T}_f} \Sigma_{\hat{T}_m, \hat{T}_m}}{\Sigma_{\hat{T}_f, \hat{T}_f} \Sigma_{\hat{T}_m, \hat{T}_m} - \Sigma_{\hat{T}_f, \hat{T}_m} \Sigma_{\hat{T}_m, \hat{T}_f}}. \end{cases} \quad (40)$$

Поскольку между реактивностью и температурами существует обратная связь, между факторами возможно наблюдение мультиколлинеарности, при котором знаменатель стремится к нулю. В предельном случае линейной зависимости матрица ковариаций становится вырожденной, и ее определитель (41) становится равным нулю.

$$\left| \Sigma_{\hat{T}_i, \hat{T}_k} \right| = \Sigma_{\hat{T}_f, \hat{T}_f} \Sigma_{\hat{T}_m, \hat{T}_m} - \left(\Sigma_{\hat{T}_f, \hat{T}_m} \right)^2. \quad (41)$$

Впрочем, для нахождения коэффициентов реактивности можно поставить задачу линейной регрессии на (33). Для борьбы с мультиколлинеарностью могут применяться различные методы регуляризации, например, регуляризация Тихонова [9], основанная на модификации минимизируемого функционала добавлением стабилизатора, а в качестве начальной оценки использоваться значения (40).

Уменьшение мультиколлинеарности

Можно заметить, что задача линейной регрессии могла быть поставлена аналогичным образом и на результат фильтрации наблюдаемой реактивности напрямую, а не на его временную производную (28). Ниже будет показано, что дифференцирование по времени снижает корреляцию между температурами топлива и воды, что обеспечивает лучшую сходимость алгоритма регрессии.

Рассмотренные ранее уравнения можно сгруппировать в нормальную форму дифференциальных уравнений (43), где $X_i = (\eta \delta T_f \delta T_m)^T = (N F M)^T$ – вектор состояний, $\xi = (\varepsilon(t) \ 0 \ 0)^T$ – вектор шумов, а матрица Якоби определяется (42).

$$J = \begin{pmatrix} \frac{(\rho_0 - \beta)}{l} & \frac{\alpha_f}{l} & \frac{\alpha_m}{l} \\ \frac{\zeta}{C_f} & -\frac{h}{C_f} & \frac{h}{C_f} \\ 0 & \frac{h}{C_m} & -\frac{C_m \kappa + h}{C_m} \end{pmatrix}. \quad (42)$$

$$\frac{d}{dt} X^i = J_j^i X^j + \xi. \quad (43)$$

По аналогии с изучаемым в работе [10] уравнением диффузии, возмущаемым броуновским движением как гауссовским процессом, можно сделать вывод, что матрица ковариаций $\Sigma_i^j = \langle X_i X^j \rangle - \langle X_i \rangle \langle X^j \rangle$ будет удовлетворять уравнению Ляпунова (44), где $E_i^k = \langle \xi_i \xi^k \rangle$ – матрица шумов. Поскольку уравнение записано в отклонениях от нуля, математическое ожидание установившегося режима $\langle X \rangle = 0$.

$$J_i^j \Sigma_j^k + \Sigma_j^k J_i^j + E_i^k = 0. \quad (44)$$

Симметричность матрицы в левой части уравнения (44) сокращает число независимых уравнений с девяти до шести (45), где ввиду громоздкости введены обозначения (46).

$$\begin{cases} 2D\Sigma_{NN} + 2\Sigma_{NF}k_1 + 2\Sigma_{NN}k_2 + E = 0; \\ A\Sigma_{NN} - B_1\Sigma_{NF} + B_1\Sigma_{NM} + D\Sigma_{NF} + \Sigma_{FF}k_1 + \Sigma_{FM}k_2 = 0; \\ B_2\Sigma_{NF} - C\Sigma_{NM} + D\Sigma_{NM} + \Sigma_{FM}k_1 + \Sigma_{MM}k_2 = 0; \\ 2A\Sigma_{NF} - 2B_1\Sigma_{FF} + 2B_1\Sigma_{FM} = 0; \\ A\Sigma_{NM} - B_1\Sigma_{FM} + B_1\Sigma_{MM} + B_2\Sigma_{FF} - C\Sigma_{FM} = 0; \\ 2B_2\Sigma_{FM} - 2C\Sigma_{MM} = 0. \end{cases} \quad (45)$$

$$\begin{cases} A = \zeta / C_f; \\ B_1 = \frac{h}{C_f}, \quad B_2 = \frac{h}{C_m}; \\ C = \frac{C_m \kappa + h}{C_m}, \quad D = \frac{(\rho_0 - \beta)}{l}; \\ k_1 = \frac{\alpha_f}{l}, \quad k_2 = \frac{\alpha_m}{l}. \end{cases} \quad (46)$$

Из уравнения (43) с использованием свойств линейности математического ожидания могут быть получены оценки ковариации производных по времени (47).

$$\begin{cases} \Sigma_{\dot{F}\dot{M}} = (B_1 C + B_1 B_2) \Sigma_{FM} - B_1 C \Sigma_{MM} - B_1 B_2 \Sigma_{FF} + A B_2 \Sigma_{NF} - A C \Sigma_{NM}; \\ \Sigma_{\dot{F}\dot{F}} = A^2 \Sigma_{NN} + B_1 (\Sigma_{FF} + \Sigma_{MM}) - 2 B_1^2 \Sigma_{FM} - 2 A B_1 (\Sigma_{NF} - \Sigma_{NM}); \\ \Sigma_{\dot{M}\dot{M}} = B_2^2 \Sigma_{FF} + C^2 \Sigma_{MM} - 2 B_2 C \Sigma_{FM}. \end{cases} \quad (47)$$

Тогда отношение ковариации производных температур к ковариации температур в пренебрежении малым множителем $\rho_0 - \beta$ определяется (48), где за γ обозначено $\zeta / (C_f \kappa^2 \lambda)$.

$$\frac{\Sigma_{\dot{F}\dot{M}}}{\Sigma_{FM}} = \gamma \kappa^2 \frac{(1 + \tau) |\alpha_f| + \tau |\alpha_m|}{(1 + \tau) + \frac{C_m}{C_f} \tau}. \quad (48)$$

Для исключения влияния амплитуд разных порядков отношение ковариаций может быть переписано как отношение коэффициентов корреляций Пирсона делением на соответствующие величины дисперсий (49).

$$\frac{R_{\dot{F}\dot{M}}}{R_{FM}} = \frac{\Sigma_{\dot{F}\dot{M}}}{\Sigma_{FM}} \sqrt{\frac{\Sigma_{FF} \Sigma_{MM}}{\Sigma_{\dot{F}\dot{F}} \Sigma_{\dot{M}\dot{M}}}}. \quad (49)$$

Подкоренное выражение аналогичными преобразованиями может быть найдено из решения систем (45) и (47).

$$\frac{\Sigma_{FF} \Sigma_{MM}}{\Sigma_{\dot{F}\dot{F}} \Sigma_{\dot{M}\dot{M}}} = \frac{1}{\kappa^4} \frac{\left((1 + \tau) + \frac{C_m}{C_f} \tau \right) \left(\gamma \left((1 + \tau) |\alpha_f| + \tau |\alpha_m| \right) + \tau (1 + \tau)^2 \frac{C_m}{C_f} + (1 + \tau)^3 \right)}{\left(\gamma \left((1 + \tau) |\alpha_f| + \tau |\alpha_m| \right) \right)^2 \left((1 + \tau)^2 + \frac{C_m}{C_f} \tau + \gamma |\alpha_f| \right)} \quad (50)$$

Подстановка (50) и (48) в (49) дает выражение (51), знаменатель которого превосходит числитель при выполнении условия (52).

$$\frac{R_{\dot{F}\dot{M}}}{R_{FM}} = \sqrt{\frac{\gamma \left((1 + \tau) |\alpha_f| + \tau |\alpha_m| \right) + \tau (1 + \tau)^2 \frac{C_m}{C_f} + (1 + \tau)^3}{\gamma \left((1 + \tau) |\alpha_f| + \tau |\alpha_m| \frac{C_m}{C_f} \right) + \tau (1 + \tau)^2 \frac{C_m}{C_f} + (1 + \tau)^3 + \frac{C_m}{C_f} (2\tau^2 + \tau)}}. \quad (51)$$

$$\frac{C_m}{C_f} < \frac{|\alpha_m|}{|\alpha_f|} \frac{1}{1 + \frac{2\tau}{\gamma|\alpha_f|} + \frac{1}{\gamma|\alpha_f|}}. \quad (52)$$

Пренебрегая малыми слагаемыми в знаменателе, возможно получить более компактное условие (53). Теплоемкость воды превосходит теплоемкость урана на порядок примерно так же, как и коэффициент реактивности по температуре теплоносителя превосходит аналогичный параметр по температуре топлива. В правой части неравенства, соответственно, ожидается значение порядка единицы.

$$\frac{m_m}{m_f} < \frac{|\alpha_m|}{|\alpha_f|} \frac{c_f}{c_m}. \quad (53)$$

Используя значения параметров ВВЭР-1200 [11] и сведения о плотности воды в соответствующих условиях давления и температуры [12], можно оценить отношение масс на один ТВЭЛ в рамках треугольной решетки формулой (54), где $d_h = d_{clad} (2\sqrt{3}/\pi (p_{rod}/d_{clad})^2 - 1)$ – гидравлический диаметр, d_{clad} – внешний диаметр оболочки ТВЭЛ, p_{rod} – шаг решетки.

$$\frac{m_m}{m_f} = \frac{m d_h^2}{\rho_f d_f^2} < 0.15. \quad (54)$$

Заключение

Построена стохастическая точечная модель ядерного реактора, учитывающая одновременно пару температурных динамик: обратные связи по температуре топлива и по температуре теплоносителя. Предложен метод определения температурных коэффициентов реактивности на основе статистических характеристик малых отклонений параметров реактора, соответствующих пассивному эксперименту.

При решении уравнения Ляпунова для линеаризованной модели аналитически найдены условия повышения стабильности оценок метода при уменьшении мультиколлинеарности температурных параметров вследствие их дифференцирования. Показана выполнимость этого условия на типичных параметрах реактора типа ВВЭР-1200.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

М.А. Симановский – разработка математической модели, проведение численных расчетов.

А.М. Загребаев – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи.

Список литературы

1. De Kruijf W.J.M., Janssen A.J. On the definition of the fuel temperature coefficient of reactivity for pin-cell calculations on an infinite lattice // *Annals of Nuclear Energy*, 1993. V. 20. № 9. P. 639–648. DOI: 10.1016/0306-4549(93)90031-J.
2. Kazansky Yu.A., Slemenichs Ya.V. Power coefficient of reactivity used for assessing the results of transients in power reactors // *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2018. № 1. P. 63–74. DOI: 10.26583/npe.2018.1.07.
3. Pravosud S.S., Yakubov Ya.O., Susakin V.A. Multipoint kinetics model with power reactivity defect for the axial offset control in the VVER-1200 nuclear reactor during the load following mode of operation // *Global nuclear safety*, 2024. V. 14. № 2. P. 73–90. DOI: 10.26583/gns-2024-02-07.

4. Казанский Ю.А. Кинетика ядерных реакторов. Обнинск: ИАТЭ, 2003. 96 с.
5. Bogado Leite S.Q., de Vilhena M.T., Bodmann B.E.J. Solution of the point reactor kinetics equations with temperature feedback by the ITS2 method // Progress in Nuclear Energy, 2016. V. 91. P. 240–249. DOI: 10.1016/j.pnucene.2016.03.020.
6. Shimazu Y. A new method of estimation for moderator temperature coefficient using Fourier transform // Journal of Nuclear Science and Technology, 1995. V. 32. № 7. P. 622–628. DOI: 10.3327/jnst.32.622.
7. Lashkari A. Loss of flow accident analyses in Tehran Research Reactor. // Proc. 24th Int. Conf. Nuclear Energy for New Europe, September 14–17, Portorož, Slovenia, 2015. https://arhiv.djs.si/proc/nene2015/pdf/NENE2015_303.pdf.
8. Justusson B.I. Two-Dimensional Digital Signal Processing II: Transforms and Median Filters. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. P. 161–196.
9. Tikhonov A.N. On incorrect problems of linear algebra and a stable method for their solution // Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1965. V. 163. № 3. P. 591–594.
10. Jacobsen M. A brief account of the theory of homogeneous Gaussian diffusions in finite dimension // Frontiers in Pure and Applied Probability: Proceedings of the Third Finnish-Soviet Symposium on Probability Theory and Mathematical Statistics, Turku, Finland, August 13–16. 1991. V. 1. P. 86–94.
11. Korotkikh A.G., Odii C.J. Analysis of VVER-1200 thermal characteristics using analytical calculation validated by PCTran simulator // Discover Mechanical Engineering, 2025, V. 4. № 1. Article number 79. DOI: 10.1007/s44245-025-00175-7.
12. Harvey A.H. Thermodynamic Properties of Water: Tabulation From the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1998. DOI: 10.6028/NIST.IR.5078.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2026, vol. 15, no. 3, pp. 236–247

Determination of the temperature coefficients of reactivity of a nuclear reactor in a passive experiment in a point approximation

M. A. Simanovskiy ✉, A. M. Zagrebaev ✉

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409, Russia

✉ MASimanovskiy@mephi.ru

✉ AMZagrebaev@mephi.ru

Received April 1, 2026; revised May 21, 2026; accepted May 26, 2026

A mathematical model of a VVER-type reactor has been constructed in a point approximation, taking into account several temperature feedbacks. The qualitative transition of thermophysical equations to a point model is considered. Asymptotic equations in small deviations are obtained. Based on this model, the study formulates a linear regression problem in order to recover the temperature coefficients of reactivity from time series of fuel and coolant temperatures, and reactimeter. Initial estimates of the reactivity coefficients are obtained based on the statistical characteristics of the series. A high correlation between temperature variables leads to a degeneration of the covariance matrix. The determinant of the covariance matrix, located in the denominator, entails instability of the solution, which is the main obstacle to obtaining reliable identification results. To analyze the stochastic model and calculate covariances, the application of the Lyapunov equation for covariances to linearized equations is considered, and the values of derivative covariances are found. The conditions under which the Pearson correlation coefficient between differentiated temperature time series turns out to be less than the original time series are analytically determined. Combination of median filter and differentiating filter is proposed, along with regularization to restore the coefficients. The results obtained demonstrate the possibility of reducing multicollinearity, potentially increasing the stability of the obtained estimates of temperature reactivity coefficients in regression methods.

Keywords: nuclear reactor dynamics, point kinetics, reactivity coefficients, feedbacks, PWR, VVER, correlation, Lyapunov equation.

References

1. De Kruijf W.J.M., Janssen A.J. On the definition of the fuel temperature coefficient of reactivity for pin-cell calculations on an infinite lattice. *Annals of Nuclear Energy*, 1993. Vol. 20. No. 9. Pp. 639–648. DOI: 10.1016/0306-4549(93)90031-J.
2. Kazansky Yu.A., Slemenichs Ya.V. Power coefficient of reactivity used for assessing the results of transients in power reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2018. No. 1. Pp. 63–74. DOI: 10.26583/npe.2018.1.07.
3. Pravosud S.S., Yakubov Ya.O., Susakin V.A. Multipoint kinetics model with power reactivity defect for the axial offset control in the VVER-1200 nuclear reactor during the load following mode of operation. *Global nuclear safety*, 2024. Vol. 14, No. 2. Pp. 73–90. DOI: 10.26583/gns-2024-02-07.
4. Kazanskii Yu. A. *Kinetika yadernykh reaktorov* [Nuclear reactor kinetics]. Obninsk, IATE, 2003. 96 p.
5. Bogado Leite S.Q., de Vilhena M.T., Bodmann B.E.J. Solution of the point reactor kinetics equations with temperature feedback by the ITS2 method. *Progress in Nuclear Energy*, 2016. Vol. 91. Pp. 240–249. DOI: 10.1016/j.pnucene.2016.03.020.
6. Shimazu Y. A new method of estimation for moderator temperature coefficient using Fourier transform. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1995. Vol. 32. No. 7. Pp. 622–628. DOI: 10.3327/jnst.32.622.
7. Lashkari A. Loss of flow accident analyses in Tehran Research Reactor. *Proc. 24th Int. Conf. Nuclear Energy for New Europe*, Portorož, Slovenia, 2015.
8. Justusson B.I. *Two-Dimensional Digital Signal Processing II: Transforms and Median Filters*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. Pp. 161–196.
9. Tikhonov A.N. On incorrect problems of linear algebra and a stable method for their solution. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1965. Vol. 163. No. 3. Pp. 591–594.
10. Jacobsen M. A brief account of the theory of homogeneous Gaussian diffusions in finite dimension. *Frontiers in Pure and Applied Probability: Proceedings of the Third Finnish-Soviet Symposium on Probability Theory and Mathematical Statistics*, Turku, Finland, August 13–16, 1991. Vol. 1. Pp. 86–94.
11. Korotkikh A.G., Odii C.J. Analysis of VVER-1200 thermal characteristics using analytical calculation validated by PCTran simulator. *Discover Mechanical Engineering*, 2025. Vol. 4. No. 1. Article number 79. DOI: 10.1007/s44245-025-00175-7.
12. Harvey A.H. *Thermodynamic Properties of Water: Tabulation From the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use*. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1998. DOI: 10.6028/NIST.IR.5078.

УДК 621.039-78

Принципы и условия обеспечения безопасности реактора РБМК-1000 при полной выгрузке топлива из активной зоны после окончательного останова энергоблока

© 2026 г. М. А. Воронцов¹, Г. В. Колибас¹, А. В. Слободчиков¹, А. О. Толоконский²

¹ АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники, им. Н.А. Доллежалея», Москва, 107140, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

В статье рассмотрены подходы к обеспечению безопасности реактора РБМК-1000 при подготовке его к выводу из эксплуатации в части полной выгрузки топлива из активной зоны реактора. В материале сформулированы принципы обеспечения безопасности, основывающиеся на требованиях нормативных документов, а также необходимости обеспечения критических функций безопасности для окончательно остановленного реактора. Авторами выполнен анализ пределов и условий безопасной эксплуатации с учетом особенностей эксплуатационного состояния реактора при его подготовке к выводу из эксплуатации. Отмечена целесообразность автоматизации функций анализа показаний датчиков нейтронного потока, диагностики имеющихся запасов до порогов их чувствительности и выработки рекомендаций по перестановке датчиков в рамках отдельной системы информационной поддержки персонала на этапе выгрузки ядерного топлива из активной зоны реактора. Представленные в статье принципы и условия обеспечения безопасности реактора РБМК-1000 при полной выгрузке ядерного топлива из активной зоны в дальнейшем могут быть использованы в качестве основы для разработки метода построения системы информационной поддержки персонала для реакторных установок РБМК-1000 в период их подготовки к выводу из эксплуатации.

Ключевые слова: АЭС, безопасность, пределы, РБМК, условия, функции, энергоблок.

Введение

Энергоблоки атомных электростанций (АЭС), относящиеся к первому поколению энергоблоков с реакторами РБМК-1000 (энергоблоки № 1 и № 2 Ленинградской АЭС, № 1 и № 2 Курской АЭС), были введены в эксплуатацию в период с 1973 по 1979 годы. После завершения проектного 30-летнего срока эксплуатации энергоблоков проведение работ по совершенствованию систем и элементов, среди которых особо нужно отметить масштабную модернизацию управляющих систем и улучшение нейтронно-физических характеристик активной зоны, а также поэтапное проведение работ по управлению ресурсом графитовой кладки, позволило дополнительно продлить срок эксплуатации до 45 лет. По завершению указанного дополнительного срока эксплуатации было принято решение об окончательном останове энергоблоков первого поколения и подготовке их к выводу из эксплуатации.

В соответствии с п. 5.8 НП-001-15¹ энергоблок, остановленный для вывода из эксплуатации, считается находящимся в эксплуатации до удаления с него всех ядерных материалов, включая свежее и отработавшее ядерное топливо [1].

¹ НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.

✉ Г.В. Колибас: gkolibas@yandex.ru
А.О. Толоконский: AOTolokonskij@mephi.ru

Поступила в редакцию: 12.01.2026
После доработки: 29.05.2026
Принята к публикации: 02.06.2026

Подготовка энергоблока к выводу из эксплуатации после его окончательного останова включает в себя три этапа:

- 1) подготовка к выгрузке ядерного топлива из реактора;
- 2) выгрузка ядерного топлива из реактора в приреакторные бассейны выдержки;
- 3) выгрузка ядерного топлива из приреакторных бассейнов выдержки и удаление его с энергоблока.

Принципиальную основу всей деятельности по обеспечению безопасности энергоблока в период его подготовки к выводу из эксплуатации составляют реализация концепции глубоководной защиты и поддержание культуры безопасности, постоянное сравнение текущего состояния энергоблока с требованиями действующих нормативных документов и учет опыта эксплуатации.

Таким образом, важным для обеспечения безопасности энергоблока в целом и реакторной установки в частности является соблюдение пределов и условий безопасной эксплуатации при проведении работ по извлечению ядерного топлива из активной зоны реактора РБМК-1000 вплоть до полной его выгрузки на первых двух этапах подготовки к выводу из эксплуатации. При этом следует учитывать особенности процесса полной выгрузки ядерного топлива из активной зоны канального реактора РБМК-1000 и необходимость обеспечения персонала, задействованного в данном процессе, соответствующими средствами контроля, управления и информационной поддержки. Рассматриваемые в данной статье принципы и условия обеспечения безопасности реактора на энергоблоке, остановленном для подготовки к выводу из эксплуатации, которые учитывают особенности выгрузки ядерного топлива из активной зоны реактора РБМК-1000, могут служить основой для разработки метода построения системы информационной поддержки персонала для реакторных установок РБМК-1000 в период их подготовки к выводу из эксплуатации [2].

При написании данной статьи использованы руководства² и требования³ МАГАТЭ, материалы доклада конференции [3], а также нормативные документы⁴ в части, применимой к энергоблоку, остановленному для подготовки к выводу из эксплуатации.

Принципы обеспечения безопасности

В соответствии с НП-001-15 основой обеспечения безопасности атомной станции является последовательная реализация глубоководной защиты. Данная концепция применяется на всех этапах проектирования, строительства и эксплуатации АЭС и включает как физические барьеры, так и технические, организационные меры. В рамках концепции глубоководной защиты для обеспечения безопасности применяется стратегия, предполагающая, прежде всего, предотвращение аварий, а потом, при необходимости, ослабление их последствий.

Предотвращение аварий сводится к предотвращению нарушений проектных пределов и условий, которые представляют собой значения параметров и характеристик состояния систем и элементов АЭС в целом, установленные в проекте для нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации.

Для обеспечения безопасности реактора энергоблока, остановленного для подготовки к выводу из эксплуатации, должны выполняться три основные функции:

- поддержание реактора в подкритическом состоянии;
- отвод тепла от реактора;
- удержание радиоактивных веществ в установленных проектом границах.

Эти функции реализуются с помощью систем нормальной эксплуатации и систем безопасности. При этом, основным принципом, в соответствии с которым системы безопасности проектируются и выполняют заданные функции, является принцип единичного отказа. Под данным принципом понимается требование к системам нормальной эксплуатации выполнение возложенных на них функций, при любом проектном исходном событии с наложением одного независимого от исходного события

² МАГАТЭ. NS G 2.2 «Пределы и условия для эксплуатации и эксплуатационные процедуры для атомных электростанций». Руководство, 2004. С. 6–12, С. 25.

³ МАГАТЭ. GSR Part 4 (Rev. 1) «Оценка безопасности установок и деятельности. Общие требования безопасности». 2016. С. 15–16.

⁴ НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций.

отказа любого из активных элементов или пассивных элементов. Подразумевается, что эти элементы имеют значимую вероятность невыполнения функции безопасности или одной независимой от исходного события ошибки персонала.

Для запроектных аварий должны быть предусмотрены меры и средства управления, предназначенные для смягчения последствий таких аварий [2]. При этом в качестве средств управления могут применяться специальные технические средства, а также любые системы или их элементы, включая системы нормальной эксплуатации и системы безопасности, способные выполнять требуемые функции в сложившихся условиях.

Ядерная безопасность реактора РБМК-1000 в процессе полной выгрузки топлива из активной зоны базируется на выполнении следующих условий:

- обеспечение достаточной для выполнения работ подкритичности реактора;
- наличие средств контроля реактора по нейтронным параметрам (контроль нейтронного потока, уровня мощности реактора и периода его разгона);
- наличие автоматических аварийных защит (АЗ), обеспечивающих ввод в активную зону дополнительной отрицательной реактивности в случае нарушения установленных пределов по нейтронным параметрам;
- строгое соблюдение персоналом, задействованным при проведении работ по выгрузке топлива из активной зоны, требований нормативных и эксплуатационных документов, выполнение работ в полном соответствии с обоснованием и программой выгрузки ядерного топлива, поддержание культуры безопасности.

В свою очередь правила ядерной безопасности НП-082-07 устанавливают следующие требования по обеспечению безопасности при проведении перегрузок остановленного канального реактора, которые распространяются и на процесс полной выгрузки топлива из активной зоны:

- минимальная подкритичность реактора – не менее 2 %;
- выгрузка топлива должна осуществляться при взведенных рабочих органах системы АЗ.

Пределы безопасной эксплуатации

Пределы безопасной эксплуатации (ПБЭ) – это установленные проектом значения параметров технологического процесса, отклонения от которых могут привести к аварии [1]. Авария определяется как нарушение нормальной эксплуатации и всегда сопровождается радиационными последствиями, которые возможны только при нарушении целостности физических барьеров безопасности.

При работе реактора РБМК-1000 на мощности в перечень ПБЭ входят пределы по нейтронно-физическим характеристикам реактора – оперативный запас реактивности. Кроме нейтронно-физических параметров необходимо учитывать пределы по технологическим параметрам – мощность реактора и отдельных каналов, линейная мощность тепловыделяющих элементов, коэффициент запаса до кризиса теплообмена в каналах, давление в КМПЦ, параметры контура охлаждения каналов СУЗ и другие параметры. Также в состав ПБЭ энергоблока включены пределы по допустимым выбросам и сбросам радионуклидов с площадки АЭС.

Для состояния остановленного реактора на этапе полной выгрузки ядерного топлива из активной зоны указанные выше пределы по технологическим параметрам теряют свою актуальность. В данном случае реактор заглушен и расхоложен, возможность вывода его в критическое состояние исключена техническими и организационными мерами, давление в КМПЦ не превышает атмосферного, тепловая мощность реактора определяется остаточными энерговыделениями в топливе и элементах активной зоны. Вместе с тем, для безопасности реактора на данном этапе особое значение имеет гарантированное, с достаточным запасом обеспечение его подкритичности, в связи с чем этот параметр внесен в перечень пределов безопасной эксплуатации.

Итоговый перечень пределов безопасной эксплуатации на этапе подготовки к выгрузке и этапе выгрузки ядерного топлива из реактора включает в себя:

- 1) подкритичность реактора – не менее 2 % в соответствии с [5];
- 2) скорость разогрева и расхоложивания реактора и КМПЦ – параметры, обеспечивающие целостность металлоконструкций реакторной установки;

3) предельно допустимые выбросы радионуклидов в атмосферу и допустимые сбросы радионуклидов в открытые водоемы, определяющие в целом радиационную безопасность энергоблока для населения и окружающей среды.

Условия безопасной эксплуатации

Условия безопасной эксплуатации в соответствии с НП-001-15 определяются как установленные проектом минимальные требования по количеству, характеристикам, состоянию работоспособности, объему, периодичности и иным условиям технического обслуживания, контроля и испытаний систем и элементов, важных для безопасности, при которых обеспечивается соблюдение пределов безопасной эксплуатации и критериев безопасности.

Условия безопасной эксплуатации обеспечиваются наличием работоспособных систем безопасности, количество и характеристики которых определены проектом, и систем нормальной эксплуатации, важных для безопасности. Системы безопасности предназначены для выполнения функций безопасности при проектных авариях; системы, важные для безопасности, выполняют функции нормальной эксплуатации, но отказ этих систем или их элементов нарушает нормальную эксплуатацию и в дальнейшем может привести к аварии [4]. Таким образом, условия безопасной эксплуатации определяют:

- минимальный перечень работоспособных систем (элементов), важных для безопасности;
- ограничения на характеристики этих систем (элементов);
- состояние их работоспособности;
- условия их технического обслуживания.

Первым условием безопасной эксплуатации энергоблока, остановленного для подготовки к выводу из эксплуатации, является наличие определенного состава исправно действующего оборудования и систем, важных для безопасности, в число которых входят: реактор; система контроля, управления и защиты реактора по нейтронным параметрам; контур многократной принудительной циркуляции, газовый контур реактора, системы контроля технологических параметров: давление, температура, уровень, расход, напряжение и т.д. и их предоставления оперативному персоналу в режиме реального времени. В первое условие безопасной эксплуатации энергоблока также входит наличие технологических систем безопасности, в частности, система аварийного охлаждения реактора и аварийной подпитки КМПЦ, системы аварийного электроснабжения и технического водоснабжения и их управляющие системы, прочие системы и элементы, важные для безопасности энергоблока.

Вторым условием безопасной эксплуатации является контроль определенного набора параметров, в число которых входят, как минимум, параметры, на значения которых установлены пределы безопасной эксплуатации и отдельные эксплуатационные пределы [4]. К основным таким параметрам относятся: нейтронный поток в реакторе, подкритичность реактора, положение стержней АЗ, температура графитовой кладки и металлоконструкций реакторной установки, температура, уровень и активность воды в КМПЦ, параметры продувки реакторного пространства, выбросы и сбросы радиоактивных веществ с территории АЭС.

Третьим условием безопасной эксплуатации является наличие автоматических средств защиты от недопустимого изменения параметров и при отказах оборудования. На этапе подготовки к выводу из эксплуатации все стержни СУЗ, за исключением АЗ, полностью введены в активную зону, переведены на ручное управление, питание сервоприводов отключено. Действует аварийная защита АЗ, осуществляющая введение в активную зону стержней АЗ с максимальной скоростью при повышении уровня мощности реактора, уменьшении периода его разгона или отсутствии достоверного контроля плотности нейтронного потока в реакторе [5].

Четвертым условием безопасной эксплуатации является обеспечение безопасности при выполнении транспортно-технологических работ с ядерным топливом в соответствии с проектной документацией и обосновывающими документами.

Особенности процесса полной выгрузки ядерного топлива

При выгрузке ядерного топлива из активной зоны РБМК-1000 в соответствии с нормативными требованиями, в качестве предела безопасной эксплуатации, принято минимальное значение подкритичности 2 %, в качестве консервативного эксплуатационного предела – 2.5 %. Эти нормативы гарантируют, что активная зона останется подкритичной т.е. она не сможет самопроизвольно войти в критический режим на любом этапе извлечения тепловыделяющих сборок (ТВС). Указанные пределы установлены для состояния активной зоны с максимальным запасом реактивности – этому состоянию соответствует разогрев элементов активной зоны до 140 °С при взведенных стержнях АЗ и введенных в активную зону всех остальных стержнях системы управления и защиты (СУЗ).

Выгрузка ядерного топлива из активной зоны выполняется поэтапно (рис. 1):

- на первом этапе производится выгрузка из реактора ограниченной партии (200 шт.) ТВС с наименьшим выгоранием, что позволяет, во-первых, существенно увеличить подкритичность реактора, а во-вторых, повторно использовать выгруженные ТВС на соседних, работающих на мощности, энергоблоках АЭС. На данном этапе выгрузка ТВС производится из топливных каналов, равномерно расположенных на картограмме реактора;

- в дальнейшем топливо постепенно выгружается из периферийных топливных каналов активной зоны, в результате чего эффективный радиус активной зоны, охватывающий ту часть зоны, в которой находится ядерное топливо, уменьшается.

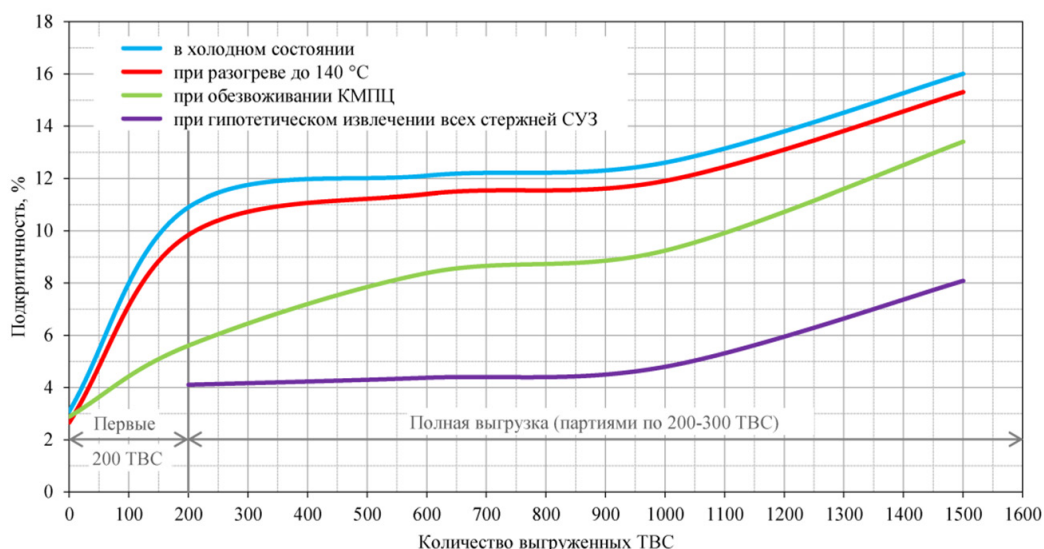


Рис. 1. Изменение подкритичности реактора в процессе выгрузки ТВС

Выгрузка топлива из первых двухсот ячеек обеспечивает глубокую подкритичность реактора, даже в состоянии с максимальным запасом реактивности при разогреве активной зоны до 140 °С. После этого реактор не имеет избыточного запаса реактивности – при гипотетическом извлечении всех стержней СУЗ из активной зоны обеспечивается подкритическое состояние реактора. В условиях аварийного обезвоживания контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) реактор также остается глубоко подкритическим [6].

Дальнейшая выгрузка ТВС из активной зоны партиями по 200-300 штук сопровождается увеличением подкритичности как для условий нормальной эксплуатации, так и при аварийном обезвоживании активной зоны. Процесс поэтапной выгрузки топлива продемонстрирован на рис. 2–5. На данных рисунках представлена картограмма реактора, на которой:

- белым цветом выделены ячейки с установленными в них ТВС;
- красным цветом – ячейки стержней АЗ;
- серым цветом – ячейки с датчиками контроля нейтронного потока, дополнительными поглотителями и погруженными стержнями СУЗ;

Принципы и условия обеспечения безопасности реактора РБМК-1000 при полной выгрузке топлива из активной зоны после окончательного останова энергоблока

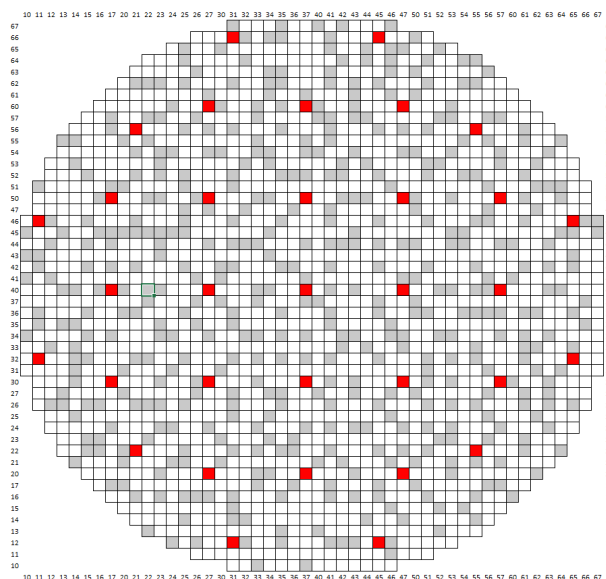


Рис. 2. Картограмма загрузки активной зоны реактора на момент окончательного останова

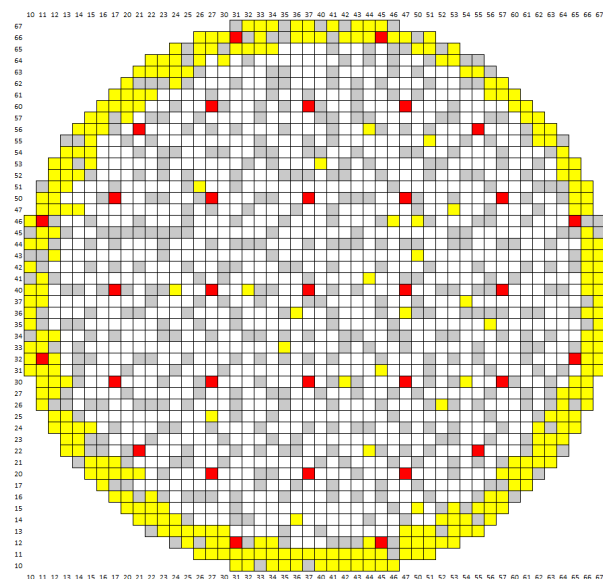


Рис. 3. Картограмма на начальном этапе выгрузки топлива

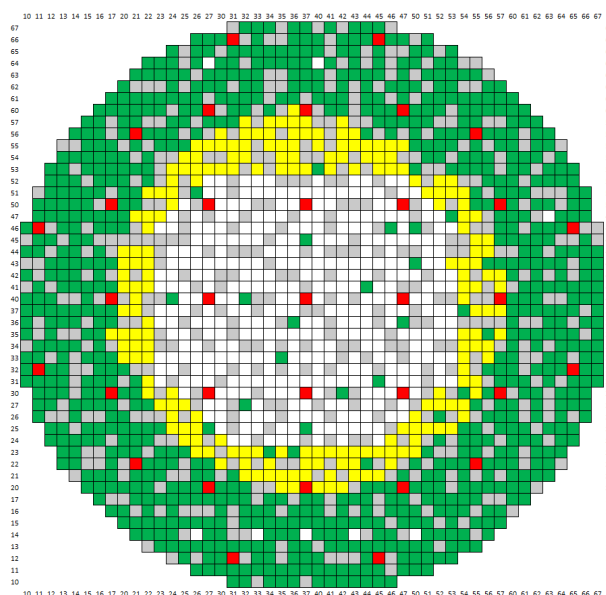


Рис. 4. Картограмма на промежуточном этапе выгрузки топлива

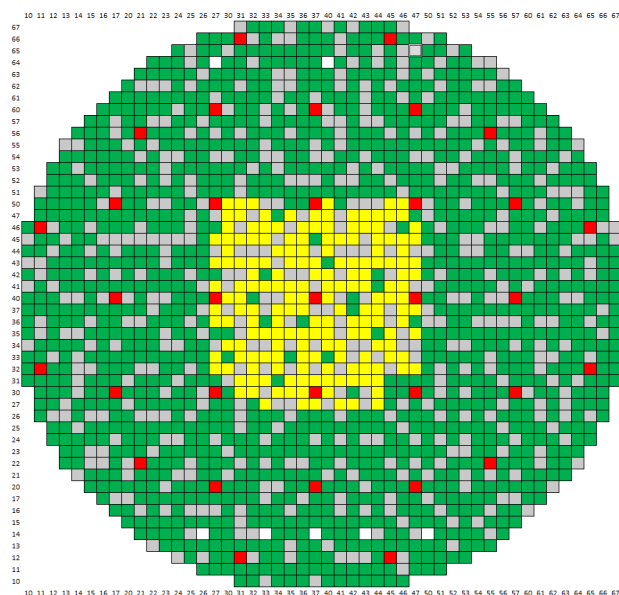


Рис. 5. Картограмма на последнем этапе выгрузки топлива

– желтым цветом – ячейки, из которых производится извлечение топлива в рамках данного этапа выгрузки;

– зеленым цветом – ячейки, из которых ТВС были выгружены на предыдущих этапах.

Представленный подход по поэтапной выгрузке ядерного топлива гарантирует, что на протяжении всего процесса выгрузки активная зона сохраняется как единая (связанная) подкритическая размножающая система.

Стоит отметить, что выгруженные мало выгоревшие ТВС используются для последующего дожигания на энергоблоках, остающихся в эксплуатации, что позволяет оптимизировать использование энергоресурса топлива. Практичность такого подхода подтверждена результатами математического моделирования при решении задачи оптимизации дожигания топлива при выводе из эксплуатации реакторов РБМК-1000 [7].

Конкретная последовательность выгрузки ядерного топлива для каждого энергоблока определяется по результатам нейтронно-физических расчетов из условия поддержания необходимой равномерности радиального и радиально-азимутального распределения плотности потока тепловых нейтронов в активной зоне. После выгрузки каждой партии топлива выполняются расчеты нейтронно-физических характеристик реактора и анализ ядерной безопасности.

Для расчета распределения плотности потока нейтронов в подкритическом реакторе применяется программный комплекс MCU-RBMK [8], который является прецизионным так называемым реперным кодом для расчета нейтронно-физических характеристик канальных энергетических реакторов RBMK-1000. Программный комплекс MCU-RBMK верифицирован и аттестован в установленном порядке.

Расчетное моделирование условно-критической задачи с использованием программного комплекса MCU-RBMK выполняется для определения подкритичности реактора, эффективности систем остановки и эффектов реактивности, важных для безопасности реакторов RBMK-1000, а также при выгрузке топлива из остановленного реактора энергоблока АЭС.

При этом на всех этапах выгрузки топлива обеспечивается действие неотключаемых аварийных защит АЗ последующим причинам:

- превышение уровня мощности реактора;
- уменьшение периода разгона реактора;
- при неисправности каналов аппаратуры контроля плотности нейтронного потока.

Для контроля плотности нейтронного потока применяются датчики, обеспечивающие контроль и регистрацию информации о нейтронной мощности реактора и периоде, ее увеличения в диапазоне мощности реактора от 10^{-11} до 10^{-5} % номинальной мощности реакторной установки. На заключительных этапах выгрузки ядерного топлива большая часть датчиков находится в окружении ячеек, из которых топливо уже выгружено, вследствие чего показания этих датчиков приближаются к нижнему порогу чувствительности. В связи с этим возникает необходимость перестановки датчиков с периферии в центр активной зоны, что позволяет обеспечить функции контроля плотности нейтронного потока и защиты по нейтронным параметрам на протяжении всего процесса выгрузки топлива.

Целесообразным является автоматизация функций анализа показаний датчиков нейтронного потока, диагностики имеющихся запасов до порогов их чувствительности и выработки рекомендаций по перестановке датчиков в рамках отдельной системы информационной поддержки персонала на этапе выгрузки ядерного топлива из активной зоны реактора.

Таким образом, ядерная безопасность реактора в процессе выгрузки ядерного топлива из активной зоны обеспечивается следующим:

- подкритичность реактора имеет значение не менее 2.5 % и увеличивается в процессе выгрузки топлива из активной зоны;
- при нарушениях нормальной эксплуатации, связанных с обездвиживанием КМПЦ и последующим разогревом реактора, обеспечивается подкритичность не менее 2.5 %;
- обеспечивается контроль и аварийная защита реактора в соответствии с требованиями нормативных документов.

Заключение

В статье выполнен анализ подходов по обеспечению безопасности реактора RBMK-1000 при подготовке его к выводу из эксплуатации в части полной выгрузки топлива из активной зоны реактора.

Сформулированы принципы обеспечения безопасности, основывающиеся на требованиях нормативных документов, а также необходимости обеспечения критических функций безопасности для окончательно остановленного реактора – поддержание его в подкритическом состоянии, отвод тепла от реактора и удержание радиоактивных веществ в установленных проектом границах.

Выполнен анализ пределов и условий безопасной эксплуатации с учетом особенностей эксплуатационного состояния реактора при его подготовке к выводу из эксплуатации.

В части обеспечения ядерной безопасности реактора в процессе поэтапной выгрузки топлива из активной зоны выделены особенности данного процесса, определяющие требования к системе контроля, управления и защиты реактора, а также к реализации организационных и технических мер

по обеспечению безопасности. Отмечена целесообразность автоматизации функций анализа показаний датчиков нейтронного потока, диагностики имеющихся запасов до порогов их чувствительности и выработки рекомендаций по перестановке датчиков в рамках отдельной системы информационной поддержки персонала на этапе выгрузки ядерного топлива из активной зоны реактора.

Представленные в статье принципы и условия обеспечения безопасности реактора РБМК-1000 при полной выгрузке ядерного топлива из активной зоны основываются на опыте выполнения данных работ на энергоблоках с РБМК-1000 первого поколения и в дальнейшем могут быть использованы в качестве основы для разработки мер по обеспечению безопасности при подготовке к выводу из эксплуатации остальных энергоблоков с реакторами РБМК-1000.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

М.А. Воронцов – разработка концепции исследования, разработка методик измерения; анализ нормативной базы, постановка эксперимента, выполнение экспериментальных работ, обработка результатов, участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

Г.В. Колибас – разработка концепции исследования, разработка методик измерения; анализ нормативной базы, постановка эксперимента, выполнение экспериментальных работ, обработка результатов; анализ экспериментальных данных, выявление закономерностей, проведение численных расчетов; разработка математической модели; первичная обработка результатов исследования, проведение расчетов, обсуждении результатов, подбор литературных источников, подготовка текста статьи; редактирование текста статьи; подготовка заключения.

А.В. Слободчиков – проведение численных расчетов; разработка математической модели; первичная обработка результатов исследования, проведение расчетов, участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

А.О. Толоконский – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования; разработка концепции исследования, разработка методик измерения; первичная обработка результатов исследования, выявление закономерностей, проведение расчетов и подготовка заключения; участие в проведении исследования и обсуждении результатов.

Список литературы

1. Доллежалъ Н.А., Емельянов И.Я. Канальный энергетический ядерный реактор. М.: Атомиздат, 1980. 208 с.
2. Колибас Г.В., Толоконский А.О. Система информационной поддержки для реакторных установок, выводимых из эксплуатации // Вестник НИЯУ МИФИ, 2025. Т. 14. № 2. С. 163–172. DOI: 10.26583/vestnik.2025.2.8.
3. Основные принципы безопасности атомных электростанций 775-INSAG-3 Rev.1, INSAG Series No. 12. Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности. Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2015. С. 13–14. ISBN 978–92–0–401315–3.
4. Кузнецов В.М., Юрчевский Е.Б., Амерханов Р.А., Спиридонов В.П. Вопросы обеспечения безопасности и технические аспекты вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергетики // Энергосбережение и водоподготовка, 2022. № 2 (136). С. 57–69.
5. Хомяков Д.Н., Меньшиков В.Ф. Снятие с эксплуатации энергоблоков АЭС // Сборник докладов Всероссийской конференции «Энергетика России в 21 веке: проблемы и научные основы устойчивого и безопасного развития», 2000.
6. Абрамов М.И., Авдеев В.И., Адамов Е.О. и др. Канальный ядерный реактор / Ред. Ю.М. Черкашов. М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. С. 86–165.
7. Загребяев А.М., Литвинова Г.А., Ястребов А.С. Математическое моделирование и оптимизация дожигания топлива при выводе из эксплуатации реактора РБМК // Вестник НИЯУ МИФИ, 2025. Т. 14 № 5. С. 393–401. DOI: 10.26583/vestnik.2025.5.2

8. Алимов Ю.В., Калугина К.М., Рождественский И.М., Сахарова Т.Ю., Юферева В.А. Дополнительная верификация МСУ-РВМК для анализа ядерной и радиационной безопасности объектов атомной отрасли // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2022. № 2. С. 42–52. EDN: JWDPIJS

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2026, vol. 15, no. 3, pp. 248–257

Safety conditions for the RBMK-1000 reactor with full unloading of fuel from the active zone after the final stop of the NPP

M. A. Vorontsov¹, G. V. Kolibas^{1,✉}, A. V. Slobodchikov¹, A. O. Tolokonskiy^{2,✉}

N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering,
Joint Stock Company, Moscow, 107140, Russia¹

National research nuclear university «MEPhI», Moscow, 115409, Russia²

✉ gkolibas@yandex.ru

✉ AOTolokonskiy@mephi.ru

Received January 12, 2026; revised May 29, 2026; accepted June 2, 2026

The article discusses approaches to ensuring the safety of the RBMK-1000 reactor during its decommissioning, including the complete removal of fuel from the reactor core. The article outlines the principles of safety based on regulatory requirements and the need to ensure critical safety functions for a permanently shut down reactor. The authors analyze the limits and conditions of safe operation, taking into account the specific characteristics of the reactor's operational state during its decommissioning. The expediency of automating the functions of analyzing the readings of neutron flux sensors, diagnosing the available reserves up to their sensitivity thresholds, and generating recommendations for repositioning the sensors within a separate system of information support for personnel at the stage of unloading nuclear fuel from the reactor core has been noted. The safety conditions for the RBMK-1000 reactor presented in the article, which involve the complete unloading of nuclear fuel from the core, can be used as a basis for developing a method for building an information support system for RBMK-1000 reactor units during their preparation for decommissioning.

Keywords: NPP, safety, limits, RBMK, conditions, functions, power unit.

References

1. Dollezhal N.A., Emel'yanov I.Ya. Kanal'nyj energeticheskij yadernyj reaktor [Channel-type power nuclear reactor]. Moscow, Atomizdat Publ., 1980. 208 p. (in Russian).
2. Kolibas G.V., Tolokonskiy A.O. Sistema informacionnoj podderzhki dlya reaktornyh ustanovok, vyvodimyh iz ekspluatatsii [Information Support System for Decommissioned Reactor Plants]. Vestnik NIYAU MIFI, 2025. Vol. 14. No. 2. Pp. 163–172 (in Russian). DOI: 10.26583/vestnik.2025.2.8.
3. Osnovnye principy bezopasnosti atomnyh elektrostancij 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG Series No. 12. Doklad Mezhdunarodnoj konsul'tativnoj grupy po yadernoj bezopasnosti [Basic Principles of Safety of Nuclear Power Plants 75 INSAG 3 Rev.1. Report of the International Advisory Group on Nuclear Safety]. Viena, IAEA Publ., 2015. Pp. 13–14. ISBN 978-92-0-401315-3.
4. Kuznetsov V.M., Yurcheskiy E.B., Amerkhanov R.A., Spiridonov V.P. Voprosy obespecheniya bezopasnosti i tekhnicheskie aspekty vyvoda iz ekspluatatsii ob'ektov ispol'zovaniya atomnoj energetiki [Safety assurance and technical aspects of decommissioning of nuclear power facilities]. Energobezopasnost i Vodopodgotovka, 2022. No. 2 (136). Pp. 57–69 (in Russian).
5. Khomyakov D.N., Menshikov V.F. Snyatie s ekspluatatsii energoblokov AES [Decommissioning of NPP units]. Sbornik dokladov Vserossijskoj konferentsii «Energetika Rossii v XXI veke: problemy i nauchnye osnovy ustojchivogo i bezopasnogo razvitiya» [Proc. All-Russian Conference «Power Industry of Russia in the 21st Century: Problems and Scientific Foundations of Sustainable and Safe Development»], 2000 (in Russian).

6. Abramov M.I., Avdeev V.I., Adamov E.O., etc. Ducted nuclear reactor. /edit. Yu.M. Cherkashov. Moscow, GUP NIKIET Publ., 2006. Pp. 86–165. (in Russian).

7. Zagrebaev A.M., Litvinova G.A., Yastrebov A.S. Matematicheskoe modelirovanie i optimizaciya dozhiganiya topliva pri vyvode iz ekspluatatsii reaktora RBMK [Mathematical Modeling and Optimization of Fuel Afterburning during the Decommissioning of the RBMK Reactor]. Vestnik NIYAU MIFI, 2025. Vol. 14. No. 5. Pp. 393–401. DOI: 10.26583/vestnik.2025.5.2.

8. Alimov Yu.V., Kalugina K.M., Rozhdestvenskij I.M., Saharova T.YU., Yufereva V.A. Dopolnitel'naya verifikatsiya MCU-RBMK dlya analiza yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti ob'ektov atomnoj otrasli [Additional Verification of MCU-RBMK for Analysis of Nuclear and Radiation Safety of Nuclear Industry Facilities]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: YAderno-reaktornye konstanty, 2022. No. 2. Pp. 42–52. EDN: JWDPIJS.

УДК 621.039.54, 621.039.516.22, 338.27, 338.45

Влияние состава толерантного топлива на стоимость электроэнергии АЭС

© 2026 г. Д. Р. Абашев, С. С. Матвеев, Е. В. Семенов, В. В. Харитонов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

После аварий на АЭС «Фукусима-1» (Япония), последствия которой были усугублены паро-циркониевой реакцией с образованием водорода, все промышленные компании мира, разрабатывающие и производящие ядерное топливо, включились в активные исследования новых сочетаний материалов ядерного топлива и оболочек твэлов, т.е. в разработку новых типов ядерного топлива, устойчивого к авариям (так называемого толерантного топлива). В данной работе приведена комплексная аналитическая методика оценки взаимосвязей технологических параметров ядерного топливного цикла (ЯТЦ) реакторов типа ВВЭР/PWR/BWR, использующих толерантное топливо, и влияния этих параметров на топливную составляющую стоимости электроэнергии АЭС. Показаны универсальные аналитические взаимосвязи выгорания, обогащения и тепловой напряженности топлива с топливной кампанией реактора (периодичностью перегрузок), числом перегружаемых тепловыделяющих сборок (ТВС), расходом топлива и природного урана, а также стоимостными показателями ключевых технологических переделов. На основе этих взаимосвязей построены сеточные диаграммы для определения топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС в широком диапазоне технологических параметров толерантного топлива.

Ключевые слова: толерантное ядерное топливо, выгорание, обогащение, периодичность перегрузок, кампания реактора, ядерный топливный цикл, стоимость электроэнергии АЭС.

Введение

В истории эксплуатации ядерных реакторов были зарегистрированы две крупные аварии седьмого (максимального) уровня по шкале INES – на Чернобыльской АЭС (СССР, 1986 г.) и АЭС «Фукусима-1» (Япония, 2011 г.)¹. Экономический ущерб от данных аварий составил сотни миллиардов долларов, при этом их масштаб был в значительной степени усугублен так называемой паро-циркониевой реакцией, в результате которой выделяется взрывоопасный водород. Цирконий используется практически во всех водо-охлаждаемых реакторах мира в качестве оболочки тепловыделяющих элементов (твэлов), поскольку почти не поглощает нейтроны. Однако при аварийном (неконтролируемом) росте температуры в активной зоне реакторов цирконий вступает в химическое взаимодействие (экзотермическое) с парами воды при температуре выше 700–800 °С, что приводит к выделению водорода и, в конечном итоге, образованию взрывоопасной смеси². После 2011 года все промышленные компании мира, разрабатывающие и производящие ядерное топливо (фабрикаторы), включились в активные исследова-

¹ Журавлёв И.Б., Птицын П.Б. Анализ технических и организационных причин наиболее значимых аварий в истории атомной энергетики / М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021. – 118 с. – Деп. 21.05.21, № 29-В2021.

² В реакторе ВВЭР-1200 содержится более 22 т циркония (в составе оболочек твэлов). Если бы весь цирконий окислился, то по реакции $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$ образовалась бы почти 1 т водорода. Взаимодействие такой массы водорода с кислородом эквивалентно взрыву около 30 т тротила.

✉ В.В. Харитонов: vvkharitonov@mephi.ru

Поступила в редакцию: 02.03.2026

После доработки: 30.05.2026

Принята к публикации: 02.06.2026

EDN UA EWQA

ния новых сочетаний материалов ядерного топлива и оболочек твэлов, т.е. в разработку новых типов ядерного топлива, устойчивого к авариям (так называемого толерантного топлива – Accident Tolerant Fuel). Согласно определениям МАГАТЭ³, NEA⁴ и др. толерантным называют топливо, в котором тепловыделяющие элементы (твэлы) могут выдерживать запроектную аварию с плавлением топлива и выделением водорода в активной зоне реактора в течение значительно более длительного периода времени, чем традиционное топливо (топливная матрица из диоксида урана UO_2 и оболочки топлива из циркония Zr) при сохранении или улучшении характеристик традиционного топлива при нормальной эксплуатации [1 – 3]. Поскольку четкие критерии такого топлива отсутствуют [1 – 3], специалисты тестируют различные концептуальные подходы к разработке топлива, которые можно сгруппировать в три концепции:

- 1) нанесение защитного покрытия на существующие циркониевые оболочки;
- 2) замена циркониевой оболочки на оболочку из другого материала;
- 3) замена топливной композиции из диоксида урана на топливо с повышенной теплопроводностью вместе с заменой циркониевой оболочки на оболочку из другого материала.

В настоящей работе основное внимание уделено анализу третьей наиболее затратной концепции. Главным направлением выбора новых топливных составов является повышение теплопроводности и плотности по урану, что должно способствовать продлению топливной кампании и температурной устойчивости топлива. Сравнение некоторых параметров основных претендентов на толерантное топливо приведено в табл. 1 [4 – 9]. Как видно, наибольшей плотностью по урану и теплопроводностью обладает сплав урана с молибденом.

Таблица 1. Свойства кандидатов на замену UO_2 в толерантном топливе

Топливо	Плотность, г/см ³		Температура плавления, °C	Теплопроводность, Вт/(м·K)	Тепловая напряженность по урану*, кВт/кгU
	топлива	урана			
UMo	17.4	16.7	1150	25	24
UN	14.3	13.5	2850	21	30
UC	13.6	12.9	2507	20	31
U_3Si_2	12.2	11.3	1665	16	36
UO_2	10.9	9.6	2840	4.6	42

* Тепловая напряженность по урану $q = Q/M_{A3}$ – отношение установленной тепловой мощности Q реактора типа PWR-1200 к массе урана M_{A3} в активной зоне при ее неизменной геометрии и неизменной плотности теплового потока с поверхности твэлов, являющейся одним из критических параметров активной зоны реактора, ответственным за его безопасность.

Замена традиционного топлива из UO_2 и оболочки твэлов из циркониевого сплава на другие вещества приводит к изменению ряда технологических и экономических параметров топлива и ЯТЦ. Поэтому цель настоящей работы заключается в создании универсальной аналитической методики расчета взаимосвязей между основными характеристиками топлива (выгоранием, обогащением, тепловой напряженностью) и параметрами ЯТЦ (периодичностью перегрузок топлива, числом перегружаемых тепловыделяющих сборок, расходом топлива и природного урана, стоимостными показателями ключевых технологических переделов) и, в итоге, топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС в широком диапазоне технологических параметров.

Взаимосвязь стоимости электроэнергии АЭС с параметрами топлива и ЯТЦ

К числу важнейших факторов экономической конкурентоспособности электроэнергетических установок принято относить так называемую приведенную (дисконтированную) стоимость электроэнергии LCOE (Levelized Costs of Electricity) [10 – 12]. Величина LCOE – это такая среднегодовая минимально допустимая стоимость отпускаемой электроэнергии, при которой проект окупается только в конце

³ Международное Агентство по Атомной Энергии.

⁴ Nuclear Energy Agency.

жизненного цикла энергоблока. Чем меньше LCOE по сравнению с реальной ценой на рынке электроэнергии, тем экономически выгоднее проект. В работе [13] получено аналитическое выражение для расчета LCOE, вытекающее из математического определения чистого дисконтированного дохода и удобное для вариативных оценок различных инвестиционных проектов, в виде:

$$LCOE = \frac{AK + Y + aD}{E}, \quad (1)$$

где K – полные капитальные затраты на проектирование и сооружение АЭС, руб.; Y – среднегодовые эксплуатационные затраты, руб./год.; D – полные затраты на вывод АЭС из эксплуатации (декомиссию), руб.; E – среднегодовое количество продаваемой электроэнергии, кВт · ч/год (или МВт·ч/год); A – дисконтированная норма амортизации капитальных затрат, 1/год (при отсутствии дисконтирования денежных потоков $A = 1/T_3$, где T_3 – проектный срок эксплуатации энергоблока, лет); a – дисконтированная норма отчислений в резерв под вывод АЭС из эксплуатации, 1/год (при отсутствии дисконтирования денежных потоков $a = 1/T_3$). Выражение (1) относится, как правило, к установившемуся режиму работы реактора с постоянным уровнем продажи электроэнергии E и эксплуатационных издержек Y . Отношение Y/E представляет собой эксплуатационную составляющую стоимости электроэнергии (часто называемую себестоимостью электроэнергии). Важной составляющей эксплуатационных затрат является топливная составляющая $Y_T = P(C_{ТВС} + C_{ОЯТ})$, равная произведению среднегодовой потребности реактора в топливе P (кгU/год) на стоимость услуг предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) в расчете на 1 кг урана в топливе (руб./кгU). Здесь величина $C_{ТВС} = C_X + C_\Phi$ представляет затраты на производство свежей тепловыделяющей сборки (ТВС) в расчете на 1 кг урана в ней (руб./кгU), включающие затраты на производство обогащенного урана C_X и на фабрикацию (изготовление) ТВС C_Φ ; $C_{ОЯТ}$ – затраты на обращение с отработанными ТВС (обращение с ОЯТ) в расчете на 1 кг урана в исходной ТВС (руб./кгU). Поскольку расход топлива по определению $P = Q/B$ зависит от тепловой мощности реактора Q и выгорания топлива (называемой также удельной энерговыработкой) B , то искомое выражение для топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС (руб./МВт·ч) принимает вид

$$LCOE_T = \frac{C_X + C_\Phi + C_{ОЯТ}}{24\eta B}, \quad (2)$$

где $\eta = W/Q$ – КПД-брутто энергоблока (в относительных единицах), коэффициент 24 (час/сут.) учитывает принятую в отрасли размерность выгорания МВт·сут/кгU. Так, для ВВЭР-1200 при $W = 1200$ МВт, $Q = 3200$ МВт, $\eta = 37.5 \%$, $B = 55.5$ МВт сут/кгU получаем расход топлива $P = 20$ тU/год.

Входящая в выражение (2) стоимость приобретения топлива ($C_{ТВС} = C_X + C_\Phi$) отражает экономические отношения промышленных предприятий начальной стадии ЯТЦ, требования разработчиков реактора к рабочим параметрам топлива и учитывают рыночные или договорные цены технологических переделов. Так, стоимость обогащенного урана (руб./кгU) рассчитывается согласно известному выражению [13]

$$C_X = C_F \frac{x-y}{c-y} + C_R \left(\Phi(x) + \Phi(y) \frac{x-c}{c-y} - \Phi(c) \frac{x-y}{c-y} \right) + C_D \frac{x-c}{c-y}, \quad (3)$$

где $C_F = C_U + C_K$ – цена гексафторида природного урана (UF_6), включающая стоимость природного урана C_U в форме U_3O_8 и его конверсию C_K в гексафторид (руб./кгU); C_R – цена единицы работы разделения в процессе обогащения урана (руб./ЕРР); C_D – стоимость обращения с обедненным гексафторидом урана (руб./кгU); x и y – массовые концентрации делящегося изотопа уран-235 в обогащенном и обедненном потоках урана раздельного производства (%), величину x обычно называют обогащением топлива; $c = 0.711\%$ – концентрация урана-235 в природном уране; $\Phi = (1 - 2z) \ln(1/z - 1)$ – раздельный потенциал природного, обогащенного и обедненного урана соответственно ($z = c, x, y$). В формуле (3) дроби $(x-y)/(c-y) = F/P$ характеризуют отношение потребности в природном уране F (тU/год) для

производства обогащенного продукта к потребности реактора в обогащенном уране P (тУ/год), а дроби $(x-c)/(c-y) = 1 - F/P$ характеризуют отношение массы отвалного (обедненного) урана, образующегося при обогащении урана, к потребности реактора в обогащенном уране P .

Как следует из рис. 1, стоимость обогащенного урана по формуле (3) весьма существенно коррелирует с волатильными рыночными ценами на природный уран, его конверсию в гексафторид и на работу разделения, превышая в настоящее время 4000 долл./кгУ.

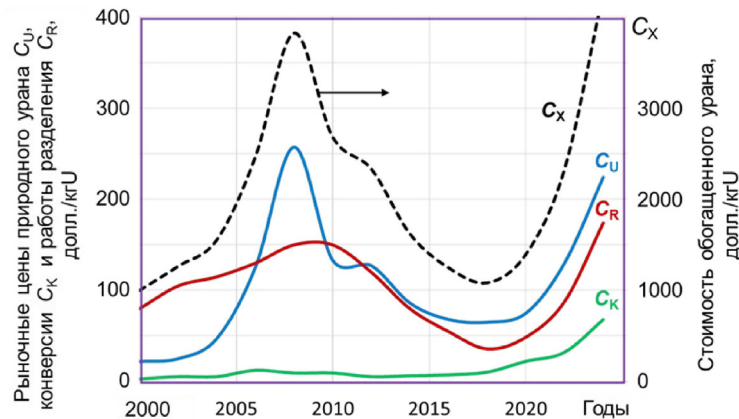


Рис. 1. Историческая динамика рыночных цен на природный уран C_U (долл./кгУ), услуги по конверсии урана C_K (долл./кгУ), обогащению урана C_R (долл./ЕРР) (левая шкала) и расчетной себестоимости обогащенного урана C_X (долл./кгУ) по формуле (3) (правая шкала) при обогащении топлива $x = 4.9 \%$ и концентрации урана-235 в отвалном уране $y = 0.2 \%$

Важно отметить, что снижению топливной составляющей стоимости электроэнергии, согласно формуле (2), должно способствовать повышение выгорания топлива B . Однако для увеличения выгорания требуется увеличение обогащения топлива x , что ведет, согласно (3), к росту стоимости обогащенного урана. Кроме того, увеличение выгорания ведет к росту стоимости фабрикации ТВС и обращения с ОЯТ (C_Φ и $C_{\text{ОЯТ}}$) вследствие возросшей радиоактивности топлива и ОЯТ. Так, по данным [18] при увеличении выгорания топлива реакторов PWR с $B = 35$ до $95 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кгУ}$ стоимости фабрикации ТВС и обращения с ОЯТ (в открытом цикле) практически линейно увеличиваются, что можно аппроксимировать выражениями (долл./кгУ)

$$C_\Phi = \varphi \cdot (165 + 3B); \quad C_{\text{ОЯТ}} = \beta \cdot 18.6B. \quad (4)$$

Здесь численные коэффициенты $\varphi = \beta = 1$ для традиционного топлива UO_2 . Для толерантного топлива таких данных нет, поэтому в наших оценках будут использованы значения коэффициентов в диапазоне $\varphi = \beta = 1 - 2$. Так, при типичных выгораниях $B = 45 - 60 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кгУ}$ топлива реакторов PWR из уравнений (4) получаем $C_\Phi = 300 - 345 \text{ долл./кгУ}$, $C_{\text{ОЯТ}} = 840 - 1120 \text{ долл./кгУ}$. Далее рассмотрим взаимосвязь выгорания с обогащением топлива и параметрами ЯТЦ.

Взаимосвязь энергетических параметров толерантного топлива и ЯТЦ

К числу наиболее важных энергетических параметров толерантного топлива относятся выгорание B , обогащение x и тепловая напряженность q (удельное тепловыделение, см табл. 1). К числу важнейших технологических параметров ЯТЦ АЭС относятся кампания реактора T (период времени между перегрузками топлива, измеряемый обычно в сут.) и количество N перегружаемых ТВС.

Тепловая напряженность топлива q (Вт/кгУ) определяется, с одной стороны, через отношение тепловой мощности реактора к массе урана в активной зоне (см. табл. 1), а с другой стороны, через плотность теплового потока q_F (Вт/м²) с поверхности твэлов в теплоноситель выражением

$$q = q_F \frac{4d}{\rho_U (d_T^2 - d_0^2)} = q_L \frac{4}{\rho_U \pi (d_T^2 - d_0^2)}, \quad (5)$$

где ρ_U – массовая плотность топлива по урану (кгU/м^3) (см. табл. 1), d – внешний диаметр оболочки твэла, d_T – внешний диаметр топливной матрицы (топливных таблеток), d_0 – диаметр центрального отверстия в топливной таблетке (если оно есть), $q_L = q_F \pi d$ – линейный тепловой поток (линейная тепловая мощность твэла, Вт/м). Величина плотности теплового потока q_F относится к числу критических параметров активной зоны реактора, ответственных за его безопасность, и лимитируется запасом до кризиса кипения воды в наиболее теплонапряженных ТВС. Поэтому замена топлива без изменения геометрии твэлов и ТВС не должна приводить к изменению плотности теплового потока с поверхности твэлов. Так, для реактора ВВЭР-1200 характерна величина $q_F = 0.56 - 0.66 \text{ МВт/м}^2$ (при средней линейной мощности твэлов $q_L = 16 - 19 \text{ кВт/м}$ и максимальной в центральных ТВС до $42 - 45 \text{ кВт/м}$), что дает среднюю тепловую напряженность топлива $q = 38 - 46 \text{ кВт/кгU}$ при $d = 9.1 \text{ мм}$, $d_T = 7.6 - 7.8 \text{ мм}$, $d_0 = 0 - 1.2 \text{ мм}$ и $\rho_U = 9.3 \text{ г/см}^3$. При замене UO_2 на более плотный по урану сплав U-Мо величина q уменьшится до $21 - 26 \text{ кВт/кгU}$.

Из определения выгорания топлива B как количества тепловой энергии, выделившейся при сгорании единицы массы ядерного топлива за период T использования в реакторе до выгрузки, вытекает известная взаимосвязь выгорания с тепловой напряженностью топлива q и кампанией реактора T [9, 20]

$$B = nqT, \quad (6A)$$

в котором отношение $n = N_{A3}/N$ количества ТВС в активной зоне к количеству перегружаемых ТВС называют кратностью перегрузок. В современных реакторах тепловая напряженность топлива из диоксида урана около $q = 42 \text{ кВт/кгU}$ (см. табл. 1), а топливная кампания составляет около $T = 500$ сут (18-месячный топливный цикл). В этом случае, согласно равенству (6), при выгорании $B = 55 \text{ МВт·сут/кгU}$ и числе ТВС в активной зоне $N_{A3} = 163$ при перегрузке извлекается около $N = 62$ ТВС (кратность перегрузок $n = 2.62$). Т.е. приблизительно через четыре года (после трех перегрузок топлива) полностью заменится топливо в активной зоне.

В настоящее время в мировой ядерной энергетике наблюдается переход к более продолжительным топливным циклам (большей длительности непрерывной работы реактора) – от годового цикла перегрузок топлива ($T = 320 - 340$ сут) до 18-месячного цикла ($T = 480 - 510$ сут) и до 24-месячного цикла ($T = 640 - 680$ сут). Из уравнения (6) следует, что увеличение кампании реактора T возможно за счет увеличения выгорания и уменьшения тепловой напряженности топлива q и кратности перегрузок n . Существенная особенность ряда реакторов для атомных станций малой мощности (АСММ), широко обсуждаемых в печати [14 – 17], – длительная работа без перегрузки топлива (до 7 – 10 лет, а в судовых реакторах до 50 лет) с полной заменой топлива в активной зоне в конце кампании реактора, что означает кратность перегрузок в этих реакторах $n = 1$. Т.е. в этом случае увеличение кампании реактора возможно только за счет увеличения выгорания и концентрации урана в активной зоне (снижения q), что потребует и увеличения обогащения топлива изотопом уран-235.

При конечной кратности перегрузок $n = N_{A3}/N$ выгорание B меньше, чем выгорание B_∞ при «идеальном режиме» перегрузок, когда подпитка реактора осуществляется микродозами свежего топлива с перемешиванием по всему объему активной зоны, то есть, когда $n = \infty$ [9]:

$$B = B_\infty \frac{n}{n+1}. \quad (6B)$$

Взаимосвязи выгорания топлива с его обогащением и другими вышеперечисленными параметрами определяют на основе сложных численных расчетов для конкретного реактора и вида топлива [19 – 23]. Однако, в результате анализа и обобщения таких расчетов, а также ряда экспериментальных данных, авторам [9, 23] удалось обнаружить ранее неизвестную закономерность, заключающуюся в том, что

в диапазоне обогащений топлива $x = 3 - 10\%$ величина B_∞ (МВт·сут/кгU) зависит только от обогащения по найденной эмпирической зависимости (аппроксимации)

$$B_\infty \approx 14.8 \cdot x. \quad (6B)$$

Эта простая аппроксимация удивительно точно (разброс менее 6 %) описывает доступные в литературе результаты сложных нейтронно-физических расчетов реакторов. Из выражений (6A) – (6B) вытекают полезные для расчетов соотношения между параметрами ЯТЦ в виде

$$\frac{N}{N_{A3}} = 14.8 \frac{x}{B} - 1; \quad T = \frac{14.8x - B}{q}; \quad x = \frac{B}{14.8} \left(\frac{N}{N_{A3}} + 1 \right), \quad (7)$$

где 14.8 МВт·сут/(%·кгU) – константа, определенная при аппроксимации расчетных и экспериментальных данных о взаимосвязи рассматриваемых параметров. В приведенных выражениях выгорание B измеряется в МВт·сут/кгU, тепловая напряженность топлива q – в МВт/кгU, кампания реактора T – в сутках, обогащение x – в %. В диапазоне обогащений топлива $x = 3 - 10\%$ и тепловой напряженности топлива $q = 35 - 45$ кВт/кгU аналитические выражения (7) дают погрешность не более $\pm 6\%$. В литературе часто приводится выгорание B_0 как отношение (в %) массы разделившихся ядер к исходной массе урана в топливе. В этом случае $B_0(\%) = 0.1 B$ (МВт·сут/кгU). Т.е., при типичной величине $B = 55$ МВт·сут/кгU в выгруженном топливе (в ОЯТ) будет содержаться 5,5 % продуктов деления (по отношению к исходной массе урана в топливе). Приведенные здесь выражения (6) и (7) позволяют легко строить сеточные диаграммы для выбора рабочих параметров топлива и ЯТЦ в координатах «выгорание – кампания реактора» (рис. 2) или «расход урана – кампания реактора» (рис. 3). На рис. 2 восходящие прямые $B(T)$ при $N = \text{const}$ дают выражение (6), а нисходящие прямые при $x = \text{const}$ дают выражение

$$B = 14.8x - qT, \quad (8)$$

вытекающее из (7). Как следует из рис. 2, повышение концентрации урана в активной зоне, приводящее к снижению q (переход от нитрида урана UN к сплаву UMo), смещает сеточную диаграмму вправо в область более длительных топливных кампаний реактора, где больше возможностей для изменения параметров ЯТЦ.

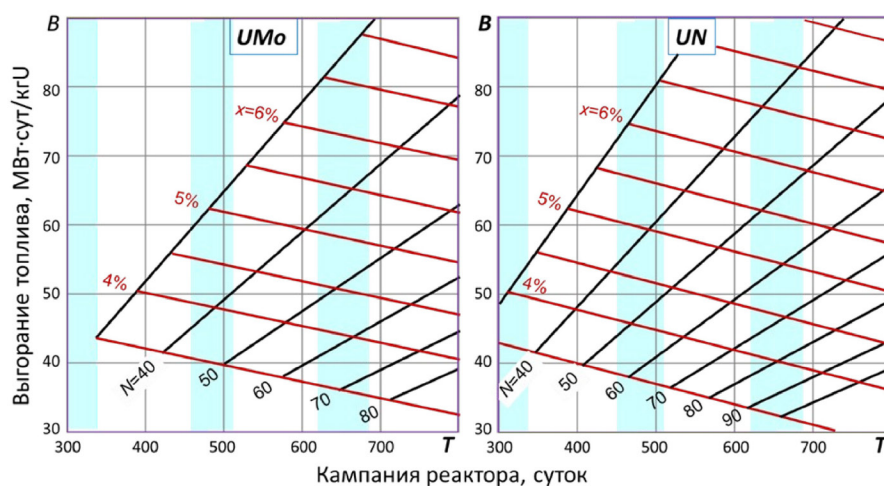


Рис. 2. Сеточные диаграммы зависимости выгорания толерантного топлива UMo и UN от кампании реактора (периода времени между перегрузками топлива) T (сут), обогащения топлива (x , %) и числа перегружаемых ТВС (N , шт.) при тепловой напряженности $q = 24$ кВт/кгU (UMo) и 30 кВт/кгU (UN), количестве ТВС в активной зоне $N_{A3} = 163$ шт. Расчет по формулам (6) – (8). Вертикальные окрашенные полосы соответствуют диапазонам кампании реактора для 12-, 18- и 24-месячных топливных циклов

Если в первом выражении (7) исключить выгорание с помощью (8), то получим зависимость числа перегружаемых ТВС от кампании реактора, обогащения топлива и его тепловой напряженности в виде

$$N = N_{A3} / (-1 + 14.8x / qT). \quad (9)$$

Представленные на рис. 3 результаты расчета числа перегружаемых ТВС реактора ВВЭР-1000 с разными конструкциями ТВС (см. табл. 2) полностью совпадают с расчетами из работы [19].

Расчеты годового потребления обогащенного урана P (тU/год) реактором с тепловой мощностью 3200 МВт и необходимого для этого расхода природного урана F (тU/год), представленные на рис. 4, показывают, что увеличение кампании реактора T (сут) способствует расширению допустимых диапазонов параметров ЯТЦ. Повышение обогащения топлива сильнее сказывается на снижении потребности в обогащенном уране, нежели в сокращении потребности в природном уране.

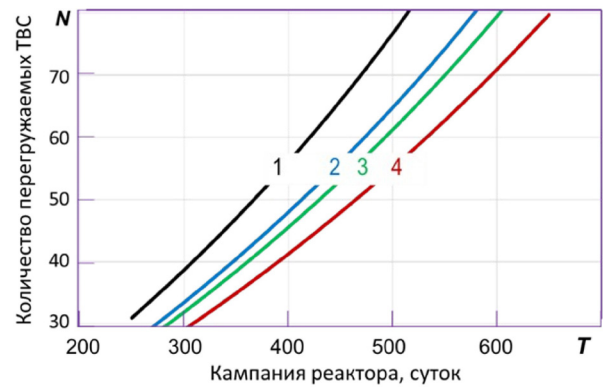


Рис. 3. Зависимость количества загружаемых ТВС N (шт.) реактора ВВЭР-1000 от длительности работы между перегрузками T (сут) для различных конструкций ТВС из табл. 2. Расчет авторов по формуле (9)

Таблица 2. Параметры вариантов конструкции ТВС реактора ВВЭР-1000*

Параметры конструкции ТВС	Варианты конструкции ТВС			
	1	2	3	4
Обогащение топлива x , %	4.40	4.95	4.95	4.95
Длина топливного столба в ТВС L , см	353	353	368	368
Внешний диаметр топливной таблетки d_t , мм	7.6	7.6	7.6	7.8
Диаметр центрального отверстия в топливной таблетке d_0 , мм	1.2	1.2	1.2	0
Тепловая напряженность топлива** q , кВт/кгU	42	42	40	37

**Расчет авторов с учетом геометрии топливного столба

* Примечание: составлено авторами по данным [19]

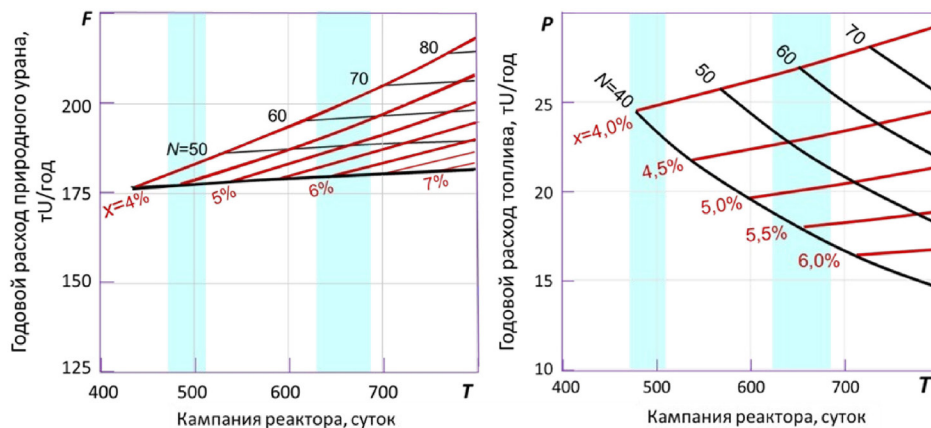


Рис. 4. Сеточная диаграмма зависимости среднегодового расхода природного урана F (тU/год) и ядерного топлива P (тU/год) от кампании реактора T (сут), обогащения топлива x (%) и числа перегружаемых ТВС N (шт.) при тепловой напряженности $q = 24$ кВт/кгU (УМо), количестве ТВС в активной зоне $N_{A3} = 163$ шт и тепловой мощности реактора $Q = 3200$ МВт. Расчет по формулам $F = P(x-y)/(c-y)$ и $P = Q/B$ с учетом (6)–(8). Вертикальные окрашенные полосы соответствуют диапазонам кампании реактора для 18- и 24-месячных топливных циклов

Таким образом, приведенные здесь выражения (3)–(8) полностью описывают искомую взаимосвязь параметров топлива и ЯТЦ реактора, необходимую для выбора рабочих параметров энергоблока и оценки топливной составляющей стоимости электроэнергии.

Сеточные диаграммы для топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС

Подстановка выражений (3), (4) и (6)–(8) в (2) позволяет определять топливную составляющую стоимости электроэнергии АЭС в зависимости от ключевых производственных и стоимостных параметров продукции предприятий ЯТЦ для разных видов толерантного топлива, отличающихся содержанием урана в активной зоне, т.е. величиной тепловой напряженности топлива q (кВт/кгU). Полученные таким образом результаты расчетов удобно и наглядно представлять в виде сеточных диаграмм в координатах, например, « $LCOE_T$ -выгорание B » (рис. 5).

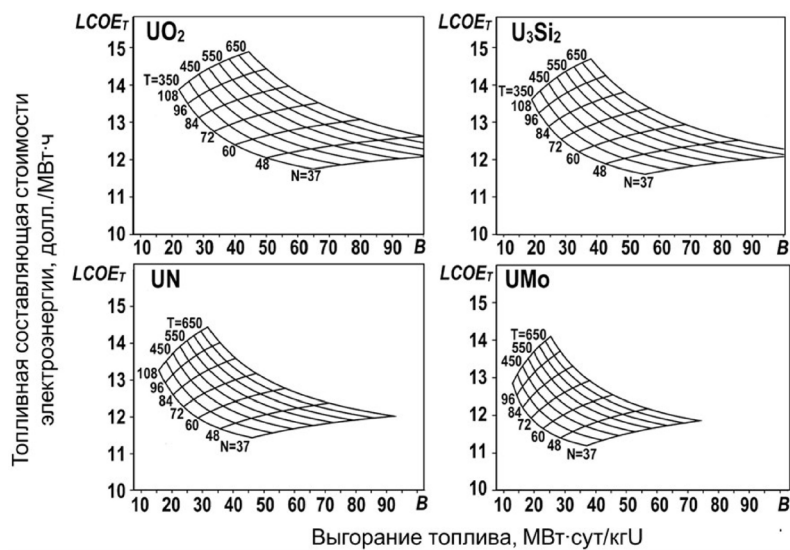


Рис. 5. Сеточная диаграмма для определения топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС ($LCOE_T$, долл./МВт·ч) с реактором ВВЭР-1200 и толерантным топливом разного состава в зависимости от выгорания топлива (B , МВт·сут/кгU), кампании реактора (периода времени между перегрузками топлива, T сут), числа перегружаемых ТВС (N , шт.) при среднегодовых рыночных ценах на природный уран, его конверсию и обогащение за 2024 год, и при коэффициентах $\varphi = \beta = 1$ в формуле (4). Расчет по формуле (2) с учетом (3), (4) и (6)–(8) при тепловой напряженности топлива из табл. 1

Диаграммы на рис. 5 расположены в порядке увеличения концентрации урана в топливе, т.е. в порядке уменьшения тепловой напряженности топлива ($UO_2 \rightarrow U_3Si_2 \rightarrow UN \rightarrow UMo$). Видно, что по мере снижения тепловой напряженности топлива (увеличения массы урана в активной зоне) сеточные диаграммы смещаются влево и вниз, т.е. в зону более низких уровней выгорания и топливной составляющей себестоимости. Диапазон же значений топливной составляющей себестоимости электроэнергии для всех типов толерантного топлива достигает 11–15 долл./МВт·ч при рыночных ценах на природный уран, конверсию и обогащение, характерных для 2024 г.

На рис. 6 показаны разные сценарии перехода от традиционного на толерантное топливо в перспективном 24-месячном топливном цикле: при сохранении выгорания или обогащения, или числа перегружаемых ТВС, как у традиционного топлива.

В случае неизменных затрат на фабрикацию ТВС и обращение с ОЯТ (при $\varphi = \beta = 1$ в формуле (4)) наблюдается наибольшее снижение топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС с толерантным топливом на 13–16 % в сценариях с сохранением обогащения (x) или выгорания (B). Однако затраты на фабрикацию толерантного топлива и на обращение с отработанным толерантным топливом первоначально (до освоения серийного производства) могут превышать таковые для традиционного

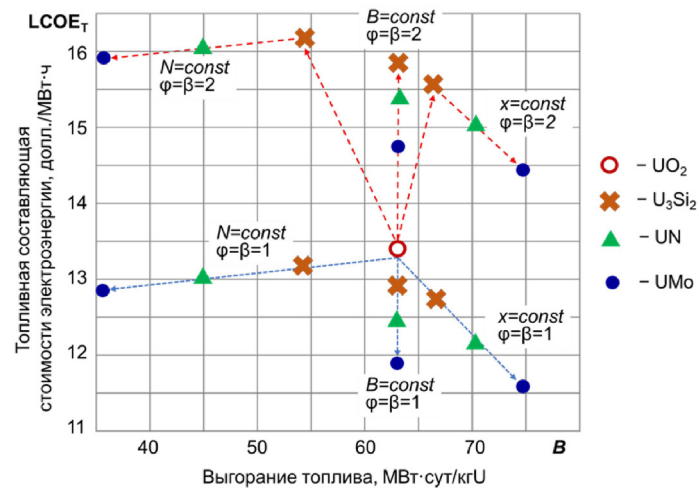


Рис. 6. Зависимость топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС $LCOE_T$ (долл./МВт·ч) с толерантным топливом различного состава (U_3Si_2 , UN и UMo) от выгорания топлива B (МВт·сут/кгU) при 24-месячном топливном цикле и при разных сценариях перехода от традиционного топлива UO_2 к толерантному: при постоянном обогащении $x = 6.15\%$, постоянном выгорании $B \approx 63$ МВт·сут/кгU или постоянном числе перегружаемых ТВС $N = 73$ шт. Синие стрелки соответствуют сценариям при $\phi = \beta = 1$ в формулах (4), а красные стрелки — $\phi = \beta = 2$. Расчет по формуле (2) с учетом (3)–(8)

топлива UO_2 в 1.5–2.0 раза, т.е. коэффициенты ϕ и β в формуле (4) могут достигать 1.5–2.0 как ввиду удорожания производства оболочек ТВЭЛов, так и из-за использования более сложных в производстве и переработке составов топливной матрицы. В этом случае, как показано на рис. 6, увеличение вдвое стоимости фабрикации ТВС и обращения с ОЯТ для всех типов толерантного топлива (при $\phi = \beta = 2$) приводит к увеличению топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС с толерантным топливом на 8–21 % по сравнению с традиционным топливом. В то же время, как следует из выражения (3) и рис. 1, рыночные цены на природный уран, конверсию и обогащение урана могут оказывать большее влияние на топливную составляющую стоимости электроэнергии АЭС по сравнению с ожидаемым ростом затрат на толерантное топливо.

Заклучение

В настоящей работе представлена разработанная авторами комплексная аналитическая методика оценки взаимосвязей технологических параметров ядерного топливного цикла реакторов типа ВВЭР/PWR/BWR, использующих толерантное топливо, и влияния этих параметров на топливную составляющую стоимости электроэнергии АЭС, работающих в 12-, 18- или 24-месячных топливных циклах. Показаны универсальные аналитические взаимосвязи выгорания, обогащения и тепловой напряженности топлива с топливной кампанией реактора (периодичностью перегрузок), количеством перегружаемых тепловыделяющих сборок, расходом топлива и природного урана, а также стоимостными показателями ключевых технологических переделов. Показано, что полученные аналитические результаты удовлетворительно согласуются с нейтронно-физическими расчетами других авторов. На основе полученных взаимосвязей энергетических характеристик топлива и топливного цикла представлены сеточные диаграммы для определения топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС в широком диапазоне технологических параметров толерантного топлива. Сеточные диаграммы предназначены для визуализации зависимостей параметров топливного цикла и его экономических показателей от характеристик традиционного и толерантного топлива.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

Д.Р. Абашев – обработка результатов; проведение численных расчетов, участие в проведении исследования и обсуждении результатов, подготовка текста статьи.

С.С. Матвеев – подбор литературных источников, редактирование текста статьи, первичная обработка результатов исследования.

Е.В. Семенов – разработка концепции исследования, анализ экспериментальных данных, выявление закономерностей, подбор литературных источников, редактирование текста статьи.

В.В. Харитонов – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования; разработка математической модели, подготовка текста статьи.

Список литературы

1. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. NEA-OECD, 2018. 372 p. [Электронный ресурс]. URL: https://oecd-nea.org/jcms/pl_15020/state-of-the-art-report-on-light-water-reactor-accident-tolerant-fuels?details=true (дата обращения: 15.01.2026).
2. Критерии таксономии ЕС для проектов атомной энергетики. Технологии ВВЭР и инновационные разработки атомной отрасли. Анализ // Росатом, октябрь 2022. 87 с. <https://www.rosenergoatom.ru/upload/medialibrary/71b/71be-2d5718472284ec085d987503a47c.pdf>.
3. Проектирование активных зон реакторов атомных электростанций. Специальное руководство по безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSG-52 // Вена, МАГАТЭ, 2025. 114 с. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1859R_web.pdf.
4. *Daniel S. Gomes, Antonio T. Silva, Alfredo Y. Abe at al.* Simulation of accident-tolerant U_3Si fuel using FRAPCON code 2017 // International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2017. Belo Horizonte, MG, Brazil, October 22–27, 2017. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/018/49018166.pdf.
5. *Скупов М.В.* Топливо для АЭС: перспективные разработки АО «ВНИИНМ» // Научно-техническая конференция под эгидой Ядерного общества 27.06.2019, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». [Электронный ресурс]. URL: <https://nsrus.ru/files/65NP/ppt/du-2706/Skupov.pdf?ysclid=mmqlrt4e3594350111> (дата обращения: 01.02.2026).
6. *Карпюк Л.А., Новиков В.В., Кулаков Г.В. и др.* Сплав 42ХНМ и карбид кремния как материал оболочек твэлов, устойчивых к авариям // Атомная энергия, 2021. Т. 130. № 4. С. 211–215.
7. *Карпюк Л.А., Лысыков А.В., Маслов А.А. и др.* Перспективное металлическое уран-молибденовое топливо, устойчивое к авариям // Атомная энергия, 2021. Т.130. № 3. С. 148–152.
8. *Карпюк Л.А., Новиков В.В., Михеев Е.Н. и др.* Исследование свойств таблеточного уран-молибденового топлива для ВВЭР // Атомная энергия, 2022. Т. 132. Вып. 1. С. 10–14.
9. *Семенов Е.В., Харитонов В.В.* Аналитическое построение сеточных диаграмм для выгорания ядерного топлива различного состава в водоохлаждаемых реакторах // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2024. Вып. 1. С. 51–57.
10. Electricity Generation Costs 2025//OGL, UK Government, January 2026. 43 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/696697d19d9b9da37c04c2e4/electricity-generation-costs-report-2025.pdf> (дата обращения: 15.01.2026).
11. Lazard LCOE. Levelized Costs of Energy, June 2025. 48 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.lazard.com/media/5tlbhyla/lazards-lcoeplus-june-2025-_vf.pdf (дата обращения: 15.01.2026).
12. Nuclear Power Economics and Structuring. 2024 Edition // World Nuclear Association. Published: April 2024, Report No. 2024/001. 56 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://world-nuclear.org/images/articles/economics-report-2024-April.pdf> (дата обращения: 15.01.2026).
13. *Семенов Е.В., Семенова Д.Ю., Харитонов В.В.* Усовершенствованная модель расчета микроэкономических критериев эффективности инвестиций в энергетические проекты // Микроэкономика, 2024. № 3. С. 41–68. DOI: 10.33917/mic-3.116.2024.41–68.
14. *Петрунин В.В., Шешина Н.В., Фатеев С.А., Кураченко А.В., Щекин Д.В., Брыкалов С.М., Безруков А.А.* Научно-технические аспекты создания инновационной реакторной установки РИТМ-200Н для АСММ // Атомная энергия, 2023. Т. 134. Вып. 1–2. С. 3–10. <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5265>.

15. Смирнова Л.С., Королев С.А. Анализ факторов, важных для комплексного подхода к экономике проектов атомных станций малой мощности // Атомная энергия, 2024. Т. 137. Вып. 1–2. С. 3–14. <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5410>.
16. Мичурина Д.А., Семенов Е.В., Харитонов В.В. Об экономической конкурентоспособности малых модульных АЭС с толерантным топливом. Часть 1 // Микроэкономика, 2025. № 4. С. 67–69. DOI: 10.33917/mic-4.123.2025.62-69.
17. Мичурина Д.А., Семенов Е.В., Харитонов В.В. Об экономической конкурентоспособности малых модульных АЭС с толерантным топливом. Часть 2 // Микроэкономика, 2025. №5. С. 13–20. DOI: 10.33917/mic-5.124.2025.13-20.
18. Very High Burn-ups in Light Water Reactors. Nuclear Science Publication. ISBN 92-64-02303-8. NEA No. 6224., OECD, 2006. 138 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/nea6224-burn-up.pdf>.
19. Семченков Ю., Павловичев А., Чибиняев А. Близость к сценарию. Перспективы эволюционного развития топлива ВВЭР // Атомная энергетика России, 2011. № 10. С. 25–29.
20. Jatuff F.E. High Burnup Fuel Technical and Economical Lessons Learned at SWISS Nuclear Power Plants. Proc. of a Technical Meeting. IAEA, 2016. P. 125–138.
21. Burns J.R., Hernandez R., Terrani R.A. et al. Reactor and fuel cycle performance of light water reactor fuel with 235U enrichments above 5% // Annals of Nuclear Energy, 2020. № 142. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.anucene. 2020.107423.
22. Горохов А.К., Драгунов Ю.Г., Лукин Г.Л. Обоснование нейтронно-физической и радиационной частей проектов ВВЭР: монография. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 496 с.
23. Семенов Е.В., Харитонов В.В. Аналитическая зависимость глубины выгорания от обогащения перспективного топлива и параметров топливной кампании реакторов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2023. № 3. С. 94–105. DOI: 10.26583/npe.2023.3.08.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2026, vol. 15, no. 3, pp. 258–270

The impact of the composition of accident tolerant fuel on the cost of electricity from nuclear power plants

D. R. Abashev, S. S. Matveev, E. V. Semenov, V. V. Kharitonov[✉]

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409, Russia
[✉] VVKharitonov@mephi.ru

Received March 26, 2026; revised May 30, 2026; accepted June 02, 2026

After the accident at the Fukushima-1 nuclear power plant (Japan), the consequences were exacerbated by a steam-zirconium reaction with the formation of hydrogen, all the world's industrial companies that develop and produce nuclear fuel, got involved in active research on new combinations of nuclear fuel materials and fuel element shells, that is, in the development of new types of nuclear fuel that are resistant to accidents (the so-called tolerant fuel). This paper presents a comprehensive analytical methodology for assessing interconnections between the technological parameters of nuclear fuel cycle (NFC) for VVER/PWR/BWR reactors using tolerant fuel, and the impact of these parameters on the fuel component of the cost of nuclear power generation. Universal analytical relationships between burnout, enrichment, thermal tension of the fuel, the frequency of overloads and the number of heat-generating assemblies unloaded, consumption of fuel and natural uranium, as well as the cost indicators of key technological processes are shown. Grid diagrams have been constructed to determine the fuel component of the cost of nuclear power plant electricity in a wide range of technological parameters for tolerant fuel.

Keywords: accident tolerant fuel, burnup, enrichment, frequency of overload of fuel assemblies, reactor campaign, nuclear fuel cycle, fuel share of the cost of electricity.

References

1. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. NEA-OECD, 2018. 372 p. Available at: https://oecd-nea.org/jcms/pl_15020/state-of-the-art-report-on-light-water-reactor-accident-tolerant-fuels?details=true (accessed 15.01.2026).
2. EU Taxonomy Criteria for Nuclear Power Projects. VVER Technologies and Innovative Developments in the Nuclear Industry. Analysis. Rosatom Publ., October 2022. 87 p. <https://www.rosenergoatom.ru/upload/medialibrary/71b/71be2d-5718472284ec085d987503a47c.pdf> (in Russian).
3. Design of the active zones of nuclear power plant reactors. Special Safety Guide. A series of IAEA safety standards, № SSG-52. Vienna, IAEA, 2025. 114 p. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1859R_web.pdf.
4. Daniel S. Gomes, Antonio T. Silva, Alfredo Y. Abe et al. Simulation of accident-tolerant U_3Si_2 fuel using FRAPCON code 2017. International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2017. Belo Horizonte, MG, Brazil, October 22–27, 2017. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/018/49018166.pdf.
5. Skupov M.V. Fuel for nuclear power plants: promising developments of JSC “VNIINM”. Scientific and Technical Conference under the auspices of the Nuclear Society, 27.06.2019, JSC “SRC RF-FEI”. Available at: <https://nsrus.ru/files/65NP/ppt/du-2706/Skupov.pdf?ysclid=mmqlrt4e3594350111> (accessed 15.01.2026).
6. Karpyuk L.A., Novikov V.V., Kulakov G.V., et al. Splav 42XHM i karbid kremniya kak material obolochek tvelov, ustojchivyh k avariyam [Alloy 42XHM and silicon carbide as tolerant fuel cladding material]. Atomnaya energiya, 2021. Vol. 130. No.4. Pp. 211–215. (in Russian).
7. Karpyuk L.A., Lysikov A.V., Maslov A.A., et al. Perspektivnoe metallichesкое uran-molibdenovoe toplivo, ustojchivoe k avariyam [Prospective accident-tolerant uranium-molybdenum metal fuel]. Atomnaya energiya, 2021. Vol. 130. no. 3. Pp. 148–152. (in Russian).
8. Karpyuk L.A., Novikov V.V., Miheev E.N., et al. Issledovanie svoystv tabletochnogo uran-molibdenovogo topliva dlya VVER [Investigation of the properties of uranium-molybdenum pellet fuel for VVER]. Atomnaya energiya, 2022. Vol. 132. No. 1. Pp. 10–14. (in Russian).
9. Semenov E.V., Kharitonov V.V. Analiticheskoe postroenie setochnykh diagramm dlya vygoraniya yadernogo topliva razlichnogo sostava v vodoohlazhdaemykh reaktorakh [Analytical Construction of Grid Diagrams for Burnup of Nuclear Fuel of Different Compositions in Water-Cooled Reactors]. VANT. Ser. Fizika yadernykh reaktorov, 2024. no.1. Pp. 51–57. (in Russian).
10. Electricity Generation Costs 2025//OGL, UK Government, January 2026. 43 p. Available at: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/696697d19d9b9da37c04c2e4/electricity-generation-costs-report-2025.pdf> (accessed 15.01.2026).
11. Lazard LCOE. Levelized Costs of Energy, June 2025. 48 p. Available at: <https://www.lazard.com/media/5tlbhyla/lazards-lcoeplus-june-2025-vf.pdf> (accessed 15.01.2026).
12. Nuclear Power Economics and Structuring. 2024 Edition. World Nuclear Association. Published: April 2024, Report No. 2024/001. 56 p. Available at: <https://world-nuclear.org/images/articles/economics-report-2024-April.pdf> (accessed 15.01.2026).
13. Semenov E.V., Semenova D.Yu., Kharitonov V.V. Uovershenstvovannaya model' rascheta mikroekonomicheskikh kriteriev effektivnosti investitsiy v energeticheskie proekty [An improved model for calculating microeconomic criteria for the effectiveness of investments in energy projects]. Microeconomics, 2024. No. 3. Pp. 41–68 (in Russian). DOI: 10.33917/mic-3.116.2024.41–68.
14. Petrunin V.V., Sheshina N.V., Fateev S.A., Kurachenkov A.V., Shchekin D.V., Brykalov S.M., Bezrukov A.A. Nauchno-tehnicheskie aspekty sozdaniya innovatsionnoy reaktornoj ustanovki RITM-200N dlya ASMM [Scientific and technical aspects of reactor RITM-200N creation for small nuclear power plants]. Atomnaya energiya, 2023. Vol. 134. No. 1–2. Pp. 3–10. (in Russian). <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5265>.
15. Smirnova L.S., Korolev S.A. Analiz faktorov, vazhnykh dlya kompleksnogo podhoda k ekonomike proektov atomnykh stanciy maloy moshchnosti [Factor analysis for integrated approach to economic of Small nuclear power plant projects]. Atomnaya energiya, 2024. Vol. 137. No. 1–2. Pp. 3–14. (in Russian). <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5410>.
16. Michurina D.A., Semenov E.V., Kharitonov V.V. Ob ekonomicheskoy konkurentosposobnosti malyh modul'nykh AES s tolerantnym toplivom. CHast' 1 [About economic competitiveness of Small Modular Reactor with accident tolerant fuel. Part 1]. Microeconomics, 2025. No. 4. Pp. 67–69. (in Russian) DOI: 10.33917/mic-4.123.2025.62-69.
17. Michurina D.A., Semenov E.V., Kharitonov V.V. Ob ekonomicheskoy konkurentosposobnosti malyh modul'nykh AES s tolerantnym toplivom. CHast' 2. [About economic competitiveness of Small Modular Reactor with accident tolerant fuel. Part 2]. Microeconomics, 2025. No. 5. Pp. 13–20. (in Russian). DOI: 10.33917/mic-5.124.2025.13–20.
18. Very High Burn-ups in Light Water Reactors. Nuclear Science Publication. ISBN 92-64-02303-8. NEA No. 6224., OECD, 2006, 138 p. Available at: <https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/nea6224-burn-up.pdf> (accessed 15.01.2026).
19. Semchenkov Yu., Pavlovich A., Chibinyaev A. Blizost' k scenariyu. Perspektivy evolyucionnogo razvitiya topliva VVER [Proximity to the scenario. Prospects for evolutionary development of VVER fuel]. Atomnaya energetika Rossii. 2011. No.10. Pp. 25–29 (in Russian).
20. Jatuff F.E. High Burnup Fuel Technical and Economical Lessons Learned at SWISS Nuclear Power Plants. Proc. of a Technical Meeting. IAEA, 2016, P. 125–138.

21. Burns J.R., Hernandez R., Terrani R.A. *et al.* Reactor and fuel cycle performance of light water reactor fuel with ²³⁵U enrichments above 5 %. *Annals of Nuclear Energy*, 2020. No. 142. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107423>.
22. Gorokhov A.K., Dragunov Yu.G., Lunin G.L., Novikov A.N., Cofin V.I., Anan'ev Ju.A. Obosnovanie nejtronno-fizicheskoy i radiacionnoj chastej proektov VVER: monografiya. [Validation of the Neutron-Physical and Radiation Parts of VVER Designs]. Moscow. IKTs Akademkniga Publ., 2004, 496 p. (in Russian).
23. Semenov E.V., Kharitonov V.V. Analiticheskaya zavisimost' glubiny vygoraniya ot obogashcheniya perspektivnogo topliva i parametrov toplivnoj kampanii reaktorov [Analytical Dependence of the Burnup on the Enrichment of Prospective Fuel and the Parameters of the Fuel Campaign of Reactors]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023. No.3. Pp. 94–105. (in Russian) DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.08>.

УДК 331.108.45

Модель формирования профессиональных навыков у персонала АЭС при использовании натурно-виртуального тренажерного комплекса

© 2026 г. Е. А. Абидова, А. С. Галкин, М. В. Рябышев

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовской обл. 347360, Россия

В статье изложены методические основы обучения оперативного и ремонтного персонала атомных станций с использованием натурно-виртуального тренажерного комплекса (НВТК). Путем анализа рабочего процесса выделены наиболее важные составляющие, которые должны быть воплощены в обучающей системе. С целью повышения эффективности подготовки персонала АЭС сформулированы профессиональные навыки, необходимые для обслуживания и ремонта электроприводного оборудования. На основании отраслевого опыта уточняется, что выполнение данной работы помимо компетенций, непосредственно направленных на работу с оборудованием, совершенно необходимым навыком является умение работать с документацией, подготовка рабочего места и сохранение стрессоустойчивости. В рамках решения данной задачи описаны составляющие рабочего процесса, включая объекты и (мешающие) факторы, которые должны быть воспроизведены в НВТК, а также действия персонала с объектами в условиях действия факторов. Учитывая приоритет безопасности при эксплуатации АЭС, выполнение заданий на тренажере должно обучать персонал использованию инструментов предотвращения ошибок. На основе составляющих рабочего процесса разработана модель формирования навыков обучаемых при проведении занятий на тренажере. Задания на тренажере сформулированы таким образом, чтоб в процессе обучения персонал освоил использование инструментов предотвращения ошибок (ИПО). Показана динамика формирования профессиональных навыков при проведении занятий на тренажере, тем самым продемонстрирована связь функционала тренажера с формированием необходимых навыков.

Ключевые слова: натурно-виртуальный тренажерный комплекс, анализ рабочего процесса, синтез составляющих обучающей системы, модель формирования навыков, инструменты предотвращения ошибок.

Введение

Формирование необходимого уровня профессиональных навыков персонала АЭС является залогом безопасности и экономичности атомной энергетики. Значительную долю работ при эксплуатации АЭС составляет обслуживание и ремонт электроприводного оборудования [1], в связи с чем, обучение ремонту трубопроводной арматуры и насосов (наиболее многочисленные виды электроприводного оборудования) является актуальной проблемой. Обучение «новичков» в производственных условиях создает дополнительную нагрузку на другой персонал и происходит бессистемно. Эффективное формирование необходимого уровня профессиональных навыков возможно при использовании специальных обучающих систем, тренажеров [2, 3]. Накоплен определенный опыт обучения персонала с использованием натуральных тренажеров [4]. Из-за ограничения набора сценариев и невозможности воспроизведения некоторых условий рабочего процесса в стендовых условиях профессиональные навыки не могут быть

✉ Е.А. Абидова: eaabidova@mephi.ru
А.С. Галкин: asgalkin@mephi.ru
М.В. Рябышев: mrvyabyshev@mephi.ru

Поступила в редакцию: 13.11.2025
После доработки: 29.05.2026
Принята к публикации: 02.06.2026

полностью освоены обучаемым. Для реализации разнообразных обучающих сценариев используют виртуальные тренажеры [5, 6]. Однако виртуальные системы не обеспечивают сенсорного контакта с объектами взаимодействия. Целесообразно сочетание функций натурного и цифрового тренажеров, исключающее их недостатки.

При синтезе тренажерных комплексов используется экспертный подход [7], сопряженный с рядом недостатков (продолжительность поиска решения, субъективная оценка качества и вероятность ошибочного выбора компонент системы). Более перспективным подходом к синтезу обучающих систем является изначальный подбор компонентов, исходя из методической целесообразности [8], иначе говоря, наличие каждого компонента должно быть обосновано с точки зрения его участия в формировании профессиональных навыков у обучаемых.

При создании тренажера важно предусмотреть возможность воспроизведения стрессовых факторов. Обычно под влиянием стресса повышается количество ошибок персонала и отказов оборудования [9]. Тренажер должен обеспечить формирование у обучаемых культуры безопасности, основанной в первую очередь на использовании инструментов предотвращения ошибок (ИПО) [10].

Таким образом, для снижения рисков возникновения несчастных случаев и отказов оборудования на АЭС должен быть синтезирован натурно-виртуальный тренажерный комплекс (НВТК) обучения персонала. В основу синтеза тренажерного комплекса закладывается возможность отработки самых необходимых профессиональных навыков с учетом специфики функционирования оборудования в условиях АЭС [11].

То есть первоочередной задачей при проектировании комплекса является анализ рабочего процесса деятельности персонала АЭС при обслуживании электроприводного оборудования, который позволит сформулировать требуемый состав и уровень навыков. Формализация рабочего процесса деятельности персонала АЭС также решает задачу описания составляющих рабочего процесса, включая объекты и условия, которые должны быть воспроизведены в НВТК.

Наконец в рамках настоящей работы реализуется разработка методических основ функционирования обучающей системы. Последняя задача решается путем разработки модели формирования навыков обучаемых при проведении занятий на тренажере. Данное представление позволяет продемонстрировать связь функционала НВТК с формированием необходимых навыков, а также оценить прогресс в формировании навыков при проведении занятий на тренажере.

1. Формализация рабочего процесса деятельности персонала АЭС при обслуживании электроприводного оборудования

1.1. Навыки при обслуживании электроприводного оборудования

Анализ протоколов пооперационного контроля (ППК) при ремонте различных видов оборудования АЭС позволяет выделить следующие шаги при выполнении работ [4]:

- 1) получение задания;
- 2) подготовка рабочего места;
- 3) допуск к работе;
- 4) разборка оборудования;
- 5) очистка демонтированных деталей;
- 6) дефектация демонтированных деталей;
- 7) сборка оборудования;
- 8) уборка рабочего места;
- 9) проверка работоспособности;
- 10) оформление результата работ.

На основании отраслевого опыта можно судить, что осуществление данного вида деятельности помимо компетенций, непосредственно направленных на работу с оборудованием, совершенно необходимым навыком является работа с документацией. Выполнение шагов 1, 2, 10 целиком направлено на работу с документами. Манипуляции с оборудованием выполняются на основе контрольно-технологической документации (КТД). Учитывая виды оборудования и ремонта, сформулированы основные навыки

оперативно-ремонтного персонала АЭС: анализ технологической документации Р1; подготовка и уборка рабочего места Р2; текущий ремонт арматуры Р3; капитальный ремонт арматуры Р4; капитальный ремонт насоса Р5; анализ состояния арматуры Р6; анализ состояния насоса Р7; стрессоустойчивость Рs.

Учитывая приоритет безопасности в любой сфере деятельности на АЭС, выполнение заданий на тренажере должно обучать персонал использованию ИПО [12]. В соответствии с приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 02.04.2020 №9/01/511-П инструментами предотвращения ошибок персонала являются следующие виды поведения: критический подход А1; инструктаж перед выполнением работ А2; четкие коммуникации А3; приверженность процедурам и инструкциям А4; контроль и самоконтроль А5; анализ выполненной работы А6; использование опыта эксплуатации А7.

Выполнение заданий на тренажере должно формировать навыки Р1-Р7, Рs и обучать использованию ИПО А1-А7.

1.2. Описание составляющих рабочего процесса

Формализация рабочего процесса, включающего применение инструментов предотвращения ошибок, требует выделения и описания главных составляющих данного процесса: субъектов, объектов, необходимых действий и взаимодействий, а также сопровождающих (мешающих) факторов. Основные составляющие процессов обслуживания электроприводного оборудования должно быть воспроизведено в реальной и виртуальной версии тренажера.

На схеме (рис. 1) показано, что процесс контролируется субъектом SC, который дает указания тренируемому ST. Тренируемый в свою очередь тоже является субъектом, он обменивается информацией I с контролирующим субъектом, анализирует документацию D, использует инструменты и СИЗ на рабочем месте W. Используя документацию и инструменты, тренируемый персонал осуществляет воздействие М на оборудование Е. Дополнительными факторами являются ошибки несоответствия, неисправности объектов е и внешние стрессовые факторы О.

Таким образом, субъектами процесса обучения являются: контролирующий данный процесс в образах «мастер» SC1, «допускающий» SC2, «представитель цеха-владельца» SC3, «инспекционная проверка руководителей верхнего уровня» SC4; и тренируемые в ролях: «руководитель» ST1, «производитель» ST2.

Основными объектами, представленными в тренажере, должно быть оборудование Е. Обозначим арматуру двух разных видов Е1, Е2 и насос Е3.

Арматура разных конструкций используется для более эффективного формирования навыков ремонта. Кроме данных объектов тренажер должен воспроизводить инструменты и СИЗ на рабочем месте W, с помощью которых тренируемые будут выполнять необходимые действия: спецодежда и СИЗ W1; инструмент, приспособления, оснастка W2; запчасти и принадлежности W3; Огнетушитель W4; ограждения W5; знаки безопасности W6; лотки для инструментов, поддоны для деталей W7. Для эффекта реального погружения тренажер должен имитировать элементы на месте установки оборудования (верстаки, панели, рабочие поверхности), с которыми не предполагается взаимодействовать.

Документация D: задание D1ij; контрольно-технологическая документация КТД D2i; протокол пооперационного контроля D3ij; наряд D4ij (вид ремонта текущий j = 1, капитальный j = 2; вид оборудования i = 1 или 2 – арматура, 3 – насос); ведомости материалов, паспорт работ, сменно-суточный журнал. Полный комплект на каждый вид работ включает двадцать шесть документов доступных обучаемым до начала занятий.

Действия с оборудованием ME, которые являются критически важными: подготовить ME1; разобрать ME2; очистить детали ME3; провести дефектацию деталей ME4; отремонтировать и заменить детали ME5; собрать оборудование ME6; проверить работоспособность оборудования ME7.

Действия с документами MD: устно продублировать MD1; проверить соответствие MD2; расписаться MD3, сделать запись MD4.

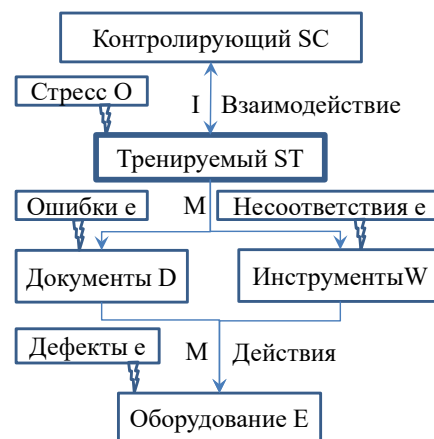


Рис. 1. Воспроизведение рабочего процесса в учебном тренажере

Действия с предметами на рабочем месте MW: получить MW1; проверить состояние (наличие) MW2; установить (уложить) MW3; уборка и сдача MW4.

Взаимодействие субъектов I: выдать I1(SCi → STj); доложить/предупредить I2(STi → SCj); провести инструктаж I3(SCi → STj); сдать I4(STi → SCj). Индекс i – образ контролирующего процесс обучения, j – роль тренируемого.

К дополнительным факторам могут относиться: стресс, ошибки в документах, неправильная организация рабочего места, неисправности оборудования. К внешним стрессовым факторам могут относиться О: таймер обратного отсчета O1; шумовые O2 или световые отвлекающие факторы O3; Эвакуация O4; более срочное задание O5; контрольная проверка O6; протечка рабочей среды O7.

Ошибки в документах D: неправильная копия КТД De1; неправильная версия наряда De2; неправильный комплект оформительской документации De3.

Неправильная организация рабочего места W: неправильный комплект СИЗ We1; неправильный комплект инструментов и приспособлений We2; захламленное рабочее место We3; отсутствие освещения We4.

Неисправности в обслуживаемом оборудовании E: Ee1, Ee2, Ee3 – в разных видах арматуры и в насосе.

Действия при возникновении стрессовых факторов: игнорируя фактор, продолжать работу (т.е. специальных действий выполнять не нужно), либо безопасно прервать работу МО (O4, O5, O6, O7) доложить результаты и покинуть помещение.

При ошибках в документах и неправильной организации рабочего места, неисправностях в обслуживаемом оборудовании тренируемые должны выявить данные несоответствия: MDei (i – вид ошибки в документах); MWei (в данном случае i – вид несоответствия на рабочем месте); MEei (i – вид оборудования).

Объекты, относящиеся к оборудованию и рабочему месту, входят в состав натурального тренажера и воспроизводятся в виртуальном пространстве. Документы в бумажном виде в двух комплектах – «правильный» и «с несоответствиями». Факторы, кроме протечки, воспроизводятся в реальных и виртуальных условиях.

Неисправности в оборудовании являются комплексными факторами, подробное описание которых в настоящей работе не предусмотрено. Действия, направленные на разборку, ремонт и сборку оборудования, проверку работоспособности, являются своего рода макрооперациями, подробное описание которых также не предусмотрено.

2. Модели формирования навыков и овладение ИПО

Все действия тренируемых над объектами, их взаимодействие с инструктором в различных образах способствуют формированию требуемых навыков. Предполагается, что в результате работы с тренажером будут сформированы профессиональные навыки P1 – P7, Ps (табл. 1).

Выполняя и повторяя определенные действия, тренируемые также обучаются применению ИПО A1 – A7. Действия, которые в наибольшей степени способствуют формированию культуры безопасности, представлены в табл. 2.

Основные виды деятельности персонала при обслуживании электроприводного оборудования описаны в форме модели формирования навыков 1 – 8.

При описании используются следующие обозначения. В фигурных скобках {*} записаны совокупности либо субъектов действий (до стрелочки), либо объектов действий (после стрелочки), участвующих в формировании навыка в левой части выражения. В круглых скобках (*) обозначены оборудование, документы, инструменты, необходимые для формирования соответствующего навыка. Знак дизъюнкции $\cup$ используется тогда, когда действие производится в условиях дополнительных факторов. Формирование навыка анализа документации и организации рабочего пространства (1) и (2) осуществляется тренируемыми ST при выполнении действий (MD и MW) с документами и объектами на рабочем месте в условиях специально внесенных ошибок и несоответствий:

$$P1 = \{ST\} \rightarrow \{MD(D \cup De)\}. \quad (1)$$

$$P2 = \{ST\} \rightarrow \{MW(W \cup We)\}. \quad (2)$$

Таблица 1. Навыки, формируемые у тренируемого персонала

№	Название, обозначение	Объекты	Факторы	Действия
1	Анализ технологической документации, P1	D1ij – D4ij, D5 – D10 (26)	De1 – De3 O6 (4)	MD1–MD4, MDe, I1, I4 (9)
2	Подготовка и уборка рабочего места, P2	W1 – W7 (7)	We1 – We4 (4)	MW1–MW4, MWe, MO2, I2, I4 (8)
3	Текущий ремонт арматуры, P3	E1, E2, W1–W4, D11j – D41j (10)	O1 – O3, O6 (4)	ME1–ME6 (6)
4	Капитальный ремонт арматуры, P4	E1, E2, W1–W4, D12j – D42j (10)	Ee1, Ee2, O1 – O3, O6 (6)	ME1–ME6, MEe, I2 (8)
5	Капитальный ремонт насоса, P5	E3, W1–W4, D13j – D43j (10)	Ee3, O1 – O3, O6 (5)	ME1–ME6, MEe, I2 (8)
6	Анализ состояния арматуры, P6	E1, E2, D7, D8 (4)	Ee1, Ee2	ME7, MEe (2)
7	Анализ состояния насоса, P7	E3, D7, D8 (3)	Ee3	ME7, MEe (2)
8	Стрессоустойчивость, Ps	O4 – O7 (4)		MO

Таблица 2. Применение инструментов предотвращения ошибок при работе в НВТК

№	Инструмент	Работа на тренажере
1	Критический подход A1	MD2, MDe, MW2, MWe, ME4, MEe
2	Инструктаж перед выполнением работ A2	MW1, I3
3	Четкие коммуникации A3	I1 – I4
4	Приверженность процедурам и инструкциям A4	I1, ME1 – ME7, MW3
5	Контроль и самоконтроль A5	MD1 – MD4, MO
6	Анализ выполненной работы A6	MD3, MD4, ME7
7	Использование опыта эксплуатации A7	I1, ME3 – ME7 (повторение)

Навыки выполнения ремонта (3–5) различного вида оборудования (E1 – E3), в котором присутствуют дефекты (Ee1, Ee2, Ee3) формируются путем выполнения макроопераций Me посредством инструментов W в условиях действия стрессовых факторов O:

$$P3 = \{ST\} \xrightarrow{W} \{ME(E1 \cup Ee1 \cup O)\}. \quad (3)$$

$$P4 = \{ST\} \xrightarrow{W} \{ME(E2 \cup Ee2 \cup O)\}. \quad (4)$$

$$P5 = \{ST\} \xrightarrow{W} \{ME(E3 \cup Ee3 \cup O)\}. \quad (5)$$

Приобретение навыков анализа состояния оборудования (6) и (7) достигается тренируемыми путем выполнения операций, принадлежащих макрооперации ME, направленных на выявление дефектов:

$$P6 = \{ST\} \rightarrow \{ME(E1 \cup Ee1, E2 \cup Ee2)\}. \quad (6)$$

$$P7 = \{ST\} \rightarrow \{ME(E3 \cup Ee3)\}. \quad (7)$$

Стрессоустойчивость тренируемые приобретают, выполняя действия MO при возникновении стрессовых факторов на рабочем месте:

$$Ps = \{ST\} \rightarrow \{MO(W \cup O)\}. \quad (8)$$

Овладение ИПО «Критический подход» описано выражением (9) как процесс выявления ошибок, несоответствий и дефектов:

$$A1 = \{ST\} \rightarrow \{MD(MDe), MW(We), ME1(Ee1), ME2(Ee2), ME3(Ee3))\}. \quad (9)$$

Примерами применения ИПО являются инструктажи (10), выдаваемые контролирующими лицами SC тренируемым, а также четкие коммуникации (11) со стороны тренируемых:

$$A2 = \{ST\} \rightarrow \{I(ST)\}. \quad (10)$$

$$A3 = \{ST\} \rightarrow \{I(SC)\}. \quad (11)$$

Приверженность процедурам и инструкциям (12), Контроль и самоконтроль (13), анализ выполненной работы (14) формируются путем следования НТД, заполнения журнала пооперационного контроля и оформления итоговых документов:

$$A4 = \{ST\} \rightarrow \{ME(E \cup D)\}. \quad (12)$$

$$A5 = \{ST\} \rightarrow MD3(D). \quad (13)$$

$$A6 = \{ST\} \rightarrow MD(D8). \quad (14)$$

Опыт эксплуатации (15) закладывается путем включения в инструктажи информации о часто встречающихся ошибках De, несоответствиях We и дефектах Ee:

$$A7 = \{SC\} \xrightarrow{De, We, Ee} I1(ST). \quad (15)$$

Таким образом, продемонстрирована связь функционала НВТК с формированием необходимых навыков обслуживания оборудования и предотвращением ошибок персонала.

3. Динамика изменения профессиональных навыков при использовании НВТК

Воспроизведение объектов и факторов, описанных в параграфе 1.2, создает возможность реализации пяти сценариев обучения в НВТК.

1. Текущий ремонт задвижки (1.1 на виртуальном тренажере, 1.2 на реальном).
2. Капитальный ремонт задвижки (2.1 на виртуальном тренажере, 1.2 на реальном).
3. Капитальный ремонт клапана (3.1 на виртуальном тренажере, 3.2 на реальном).
4. Текущий ремонт клапана (4.1 на виртуальном тренажере, 4.2 на реальном).
5. Текущий ремонт насоса (5.1 на виртуальном тренажере, 5.2 на реальном).

В качестве примера в табл. 3 приводятся описания одного (из десяти) шагов первого сценария.

Предполагается, что в процессе первого занятия обучаемый 12 раз отрабатывает навык P1, 3 раза P2, 5 раз P3, 3 раза P6, один раз P7 и один раз Ps. Следует учесть, что навыки P3-P7, связанные с сенсорным контактом с объектами взаимодействия на виртуальном тренажере, формируются не более чем на 50%. Также сценарий первого занятия предполагает отработку ИПО: A1 9 раз, A2 2 раза, A3 – 18, A4 – 5, A5 – 7, A6 – 3. A7 – 1.

Аналогично по форме табл. 3 были описаны другие четыре занятия. Для каждого i -го навыка подсчитано число отработок в рамках каждого j -го занятия NP_{ij} , это число соотнесено с общим числом отработок i -го навыка NP_i . Предлагается для визуализации прогресса в обучении использовать соотношение:

Таблица 3. Сценарий обучения «Текущий ремонт задвижки» (фрагмент)

№	Содержание	Субъекты	Объект	Действия	Факторы	Навык	ИПО
Шаг 2. Допуск к работе							
2.1	Выдача наряда	SC2 → ST2	D411	I1			A3
2.2	Проверка соответствия наряда	ST2	D411	MD2, MDe	De2	P1	A1
2.3	Доклад о несоответствиях	ST2 → SC2		I2			A3
2.4	Целевой инструктаж	SC2 → ST2		I3			A2
2.5	Роспись в ППК за инструктаж	ST2	D311	MD3		P1	A5
2.6	Получение рабочего места	ST1	W1 – W7	MW1		P2	A1
2.7	Проверка соответствия рабочего места	ST1	W1 – W7	MW2, We	We1, We2	P2	A1
2.8	Доклад о несоответствиях	ST1 → SC3		I2			A3
2.9	Подготовка объекта к ремонту	ST1	E1	ME1		P3	
2.10	Роспись в наряде за инструктаж	ST1, ST2	D411	MD3		P1	A5
2.11	Целевой инструктаж	SC2 → ST1		I3			A2
2.12	Роспись в наряде за инструктаж	ST1	D411	MD3		P1	A5
2.13	Допуск к работе	SC2 → (ST1, ST2)		I5			A3
2.14	Расписаться в наряде за допуск	ST1, ST2	D411	MD3		P1	A5

$$T_{ij} = \frac{NP_j}{\sum_{j=1}^{10} NP_{ij}}. \quad (16)$$

Предварительно динамика изменения профессиональных навыков при использовании НВТК выглядит так, как показано на рис. 2 (нумерация занятий соответствует перечню в начале данного параграфа).

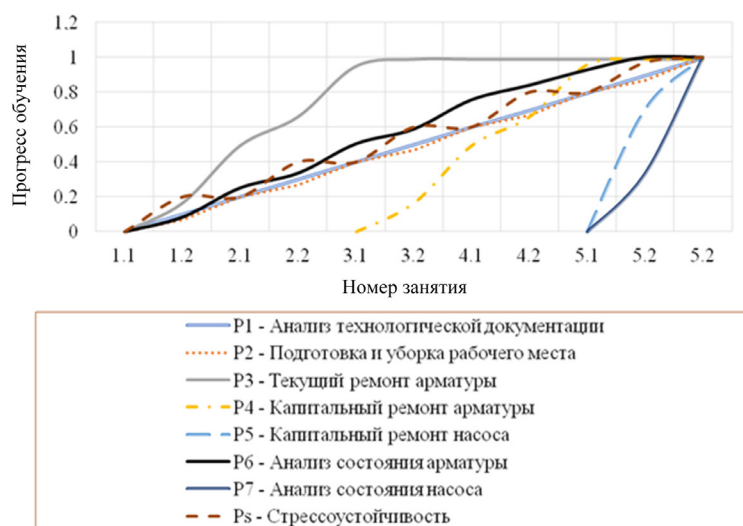


Рис. 2. Прогресс в формировании навыков при проведении занятий на тренажере

Некоторыми навыками P1, P2, PS обучаемые овладевают постепенно на протяжении всех занятий, другие навыки формируются в периоды работы с определенным видом оборудования. Ступенчатый характер показывает, что начальное освоение происходит при работе с виртуальной версией, а окончательное освоение на натурном тренажере.

Заключение

С целью повышения эффективности подготовки персонала АЭС сформулированы профессиональные навыки, необходимые для обслуживания электроприводного оборудования. На основании отраслевого опыта уточняется, что выполнение данной работы помимо компетенций, непосредственно направленных на работу с оборудованием, совершенно необходимым навыком является умение работать с документацией, организация рабочего пространства и сохранение стрессоустойчивости.

Поскольку обучение нового персонала в производственных условиях не вполне эффективно, предложено воспроизвести рабочие процессы с использованием натурно-виртуального тренажера. Задача проектирования НВТК потребовала формализации рабочего процесса при обслуживании электроприводного оборудования. В рамках решения данной задачи описаны составляющие рабочего процесса, включая объекты и (мешающие) факторы, которые должны быть воспроизведены в НВТК, а также действия персонала с объектами в условиях действия факторов. Учитывая приоритет безопасности при эксплуатации АЭС, выполнение заданий на тренажере должно обучать персонал использованию инструментов предотвращения ошибок.

Основные виды работ при обслуживании электроприводного оборудования описаны в форме моделей формирования навыков и овладения ИПО. Показана ожидаемая динамика формирования профессиональных навыков при проведении занятий на тренажере.

Таким образом, заложены методические основы функционирования обучающей системы. Продемонстрирована связь функционала НВТК с формированием необходимых навыков обслуживания оборудования и предотвращением ошибок персонала.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

М.В. Рябышев – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, участие в обсуждении результатов.

Е.А. Абидова – выбор методов исследования, разработка математической модели.

А.С. Галкин – разработка математической модели, подготовка текста статьи и участие в обсуждении результатов.

Список литературы

1. Поваров В.П., Терехов Д. В., Бабушкин Е. А., Пономарев Н. А. и др. Техническое обслуживание и ремонт оборудования АЭС ВВЭР-1200 (Из опыта проведения ТОиР в 2016–2021 гг.). Воронеж: Диамант, 2022. 528 с., ил.
2. Тацлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Тучков А.М., Титов Г.П., Носов Д.А. Использование программно-тренажерных средств при подготовке специалистов для атомной энергетики // Материалы научно-практической конференции «Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров – 2016», Екатеринбург: УрФУ, 2017 С. 20–23.
3. Алексеев С.А., Парфенов Н.П., Стахно Р.Е. Анализ управления тренажерной подготовкой, как социальной организационно-технической системой. // Синергия наук, 2018. № 23. С. 1307–1313.
4. Лапкин А.А., Калашиников М.В., Микишин И.А. Перспективы создания натурального тренажера диагностики электроприводного оборудования АЭС // Глобальная ядерная безопасность, 2022. № 3 (44). С. 30–42. DOI: 10.26583/gns-2022-03-03
5. Ксенз Н.С., Савич К.В. Обучение охране труда и технике безопасности сотрудников производственных предприятий с использованием технологий виртуальной реальности // Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии». Южный федеральный университет, 2022. С. 100–104.

6. Яковлева Е.В., Чубова Е.В. Снижение уровня травматизма с помощью внедрения виртуальной реальности в процесс обучения по охране труда [Электронный ресурс]: Вестник техносферной безопасности и сельского развития. 2023. № 3 (34). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-urovnya-travmatizma-s-pomoschyu-vnedreniya-virtualnoy-realnosti-v-protsess-obucheniya-po-ohrane-truda> (дата обращения: 31.08.2025).
7. Трашкова А.В., Вицентий А.В. Выбор способа реализации тренажера-симулятора для системы трехмерного моделирования открытых горных работ. // Труды Кольского науч. центра РАН, 2020. Т. 11. № 8–11. С. 83–90.
8. Архипов А.Е., Карпушкин С.В. Структурно-параметрический синтез систем визуализации для тренажерных комплексов // Вестник ТГТУ. 2022. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strukturno-parametricheskii-sintez-sistem-vizualizatsii-dlya-trenazhernyh-kompleksov> (дата обращения: 31.08.2025).
9. Human Factors Engineering in the Design of Nuclear Power Plants. Safety Standards Series No. SSG-51. Vienna: IAEA, 2019. 81 p. URL: <https://www.iaea.org/publications/12331/human-factors-engineering-in-the-design-of-nuclear-power-plants> (дата обращения: 31.08.2025).
10. Машин В.А. Культура безопасности: Принцип организационного обучения // Электрические станции, 2021. № 10. С. 34–50. DOI: 10.34831/EP.2021.1083.10.005.
11. Подчуфаров А.Ю., Галкина А.Н., Ванина С.С. Опережающее развитие атомной энергетики как необходимый фактор обеспечения устойчивого развития человечества // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2024. № 1. С. 132–146. DOI: 10.26583/npe.2024.1.11.
12. Галкин А.С., Калашиников М.В., Арженевская Е.В., Пугачева О.Ю. Перспективный тренажер профессиональной подготовки ремонтного персонала // Тезисы докладов XXI МНПК «Безопасность ядерной энергетики», Волгоград, 2025. С. 138–141.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2026, vol. 15, no. 3, pp. 271–280

Model for developing professional skills of nuclear power plant personnel using a physical-virtual training complex

E. A. Abidova[✉], A. S. Galkin[✉], M. V. Ryabyshev[✉]

Volgodonsk Engineering and Technical Institute – Branch of the National Research Nuclear University MEPhI,
Volgodonsk, Rostov region, 347360, Russia

[✉] eaabidova@mephi.ru

[✉] asgalkin@mephi.ru

[✉] mvyabyshev@mephi.ru

Received November 11, 2025; revised May 29, 2026; accepted June 2, 2026

The article presents the methodological foundations for training operational and maintenance personnel of nuclear power plants using a physical-virtual training complex (PVTC). By analyzing the workflow, the most important components that should be implemented in the training system were identified. Based on the elements of the workflow, a model for developing trainees' skills during simulator sessions was developed. In order to improve the effectiveness of nuclear power plant staff training, professional skills required for servicing electric drive equipment have been formulated. Based on industry experience, it is clarified that in addition to competencies directly related to working with equipment, an absolutely essential skill is the ability to work with documentation, organize the workspace, and maintain stress resilience. As part of addressing this task, the components of the work process are described, including the objects and (interfering) factors that should be reproduced in the training simulator, as well as the actions of personnel with the objects under the influence of these factors. Considering the priority of safety in nuclear power plant operations, performing tasks on the simulator should train personnel to use error-prevention tools. Simulator tasks are formulated in such a way that during the training process, personnel learn to use error prevention tools (EPT). The dynamics of professional skill development during training on the simulator are shown, thereby demonstrating the connection between the simulator's functionality and the formation of necessary skills.

Keywords: real-virtual simulator complex, work process analysis, synthesis of training system components, skill formation model, error prevention tools.

References

1. *Povarov V.P., Terekhov D.V., Babushkin E.A., Ponomarev N.A. et al.* Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont oborudovaniya AES VVER-1200 (Iz opyta provedeniya TOiR v 2016–2021 gg.) [Maintenance and repair of WER-1200 NPP equipment (Based on the experience of maintenance and repair in 2016–2021)]. Voronezh: Diamant Publ., 2022. 528 p.
2. *Tashlykov O.L., SHCHeklein S.E., Tuchkov A.M., Titov G.P., Nosov D.A.* Ispol'zovanie programmno-trenazhernykh sredstv pri podgotovke specialistov dlya atomnoj energetiki [Using software and simulation tools in training specialists for the nuclear energy sector]. Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivnye energeticheskie tekhnologii. Ekologiya, ekonomika, bezopasnost' i podgotovka kadrov – 2016» [Proceedings of the scientific and practical conference «Advanced Energy Technologies. Ecology, Economics, Safety, and Personnel Training – 2016»], Ekaterinburg, UrFU Publ., 2017. Pp. 20–23 (in Russian).
3. *Alekseev S.A., Parfenov N.P., Stahno R.E.* Analiz upravleniya trenazhernoj podgotovkoj, kak social'noj organizacionno-tekhnicheskoy sistemoy [Analysis of the management of simulator training as a social organizational and technical system]. Sinerhiya nauk. 2018. No. 23. Pp. 1307–1313 (in Russian).
4. *Lapkis A.A., Kalashnikov M.V., Mikshin I.A.* Perspektivy sozdaniya naturnogo trenazhera diagnostiki elektroprivodnogo oborudovaniya AES [Prospects for the creation of a full-scale simulator for diagnostics of electric drive equipment of nuclear power plants]. Global'naya yadernaya bezopasnost', 2022. No. 3 (44). Pp. 30–42 (in Russian). DOI: 10.26583/gns-2022-03-03.
5. *Ksenz N. S., Savich K. V.* Obuchenie ohrane truda i tekhnike bezopasnosti sotrudnikov proizvodstvennykh predpriyatij s ispol'zovaniem tekhnologij virtual'noj real'nosti [Occupational health and safety training for employees of manufacturing enterprises using virtual reality technologies]. Sbornik trudov XIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Innovacionnye, informacionnye i kommunikacionnye tekhnologii» [Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference «Innovative, Information and Communication Technologies»]. Yuzhnyj federal'nyj universitet. 2022. Pp. 100–104 (in Russian).
6. *Yakovleva E.V., Chubova E.V.* Snizhenie urovnya travmatizma s pomoshch'yu vnedreniya virtual'noj real'nosti v process obucheniya po ohrane truda [Reducing injury rates by incorporating virtual reality into occupational safety training]. Vestnik tekhnosfernoj bezopasnosti i sel'skogo razvitiya, 2023. № 3 (34) (in Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-urovnya-travmatizma-s-pomoschyu-vnedreniya-virtualnoy-realnosti-v-protsess-obucheniya-po-ohrane-truda> (accessed 31.08.2025)
7. *Trashkova A.V., Vicentij A.V.* Vybora sposoba realizacii trenazhera-simulyatora dlya sistemy trekhmernogo modelirovaniya otkrytykh gornyh rabot [Selecting a method for implementing a simulator for a 3D open-pit mining modeling system]. Trudy Kol'skogo nauch. centra RAN, 2020. Vol. 11. No. 8–11. Pp. 83–90 (in Russian).
8. *Arhipov A.E., Karpushkin S.V.* Strukturno-parametricheskij sintez sistem vizualizacii dlya trenazhernykh kompleksov [Structural-parametric synthesis of visualization systems for training complexes]// Vestnik TGTU. 2022. No.3. (in Russian) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strukturno-parametricheskij-sintez-sistem-vizualizatsii-dlya-trenazhernykh-kompleksov> (accessed 31.08.2025).
9. Human Factors Engineering in the Design of Nuclear Power Plants. Safety Standards Series No. SSG-51. Vienna, IAEA, 2019. 81 p. Available at: : <https://www.iaea.org/publications/12331/human-factors-engineering-in-the-design-of-nuclear-power-plants> (accessed 31.08.2025).
10. *Mashin V.A.* Kul'tura bezopasnosti: Princip organizacionnogo obucheniya [Safety Culture: A Principle of Organizational Learning]. Elektricheskie stancii, 2021. No. 10. Pp. 34–50 (in Russian).
11. *Podchufarov A.Yu., Galkina A.N., Vanina S.S.* Operezhayushchee razvitie atomnoj energetiki kak neobhodimyj faktor obespecheniya ustojchivogo razvitiya chelovechestva [Advanced development of nuclear energy as a necessary factor in ensuring sustainable development of humanity]. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Yadernaya energetika. 2024. No. 1. Pp. 132–146 (in Russian).
12. *Galkin A.S., Kalashnikov M.V., Arzhenovskaya E.V., Pugacheva O.YU.* Perspektivnyj trenazher professional'noj podgotovkiremontnogo personala [A promising simulator for professional training of repair personnel]. Tezisy dokladov XXI MNPK «Bezopasnost' yadernoj energetiki» [Abstracts of reports of the XXI International Scientific and Practical Conference “Nuclear Energy Safety”]. Volgodonsk, 2025. Pp. 138141 (in Russian).