

## ОЦЕНКА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫСТРОГО РЕКТОРА НА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ В УРАН-ПЛУТОНИЕВЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ

**А.Е. Помысухина, Ю.П. Сухарев, Г.Н. Власичев**

*ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет*

*им. Р.Е. Алексеева»*

*603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24*



Возможность почти полного использования всего уранового либо ториевого топлива ожидается в реакторах на бегущей волне. Выполнено численное моделирование активной зоны реактора на бегущей волне с быстрым спектром нейтронов в торий-урановом цикле. Активная зона реактора имеет форму прямоугольной призмы, с одного конца которой организована запальная зона для формирования нейтронно-делительной волны. В качестве топлива запальной зоны использован высокообогащенный металлический уран. Получены расчетные зависимости энерговыделения, концентрации нуклидов, участвующих в цепочке превращений, по длине активной зоны в ряде моментов времени. Проведена графическая обработка результатов с целью наглядной демонстрации возникновения и прохождения нейтронно-делительной волны в реакторе. Полученная зависимость энерговыделения представляет собой солитон (уединенную волну), обладающий свойством четкой повторяемости во времени. Показаны спектры нейтронов и плотности делений на начальный момент, когда волна еще не образовалась, и на момент ее образования. Рассчитана скорость волны, на основании которой оценена длительность кампании реактора. Оценена глубина выгорания топлива, сверхвысокое значение которой является проблемой реализации предлагаемой концепции реактора. Выгорание большей части как сырьевого материала, так и образующегося из него делящегося свидетельствует о высокой потенциальной эффективности концепции разработанного реактора в плане топливоиспользования, а также ядерного нераспространения.

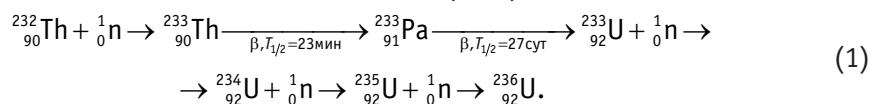
**Ключевые слова:** реактор на бегущей волне, топливоиспользование, торий, волна ядерного горения, ядерная концентрация нуклидов, глубина выгорания, кампания.

В сценариях развития атомной энергетики большое внимание уделяется вопросам топливообеспечения и топливоиспользования на атомных электростанциях. Особенности сгорания ядерного топлива в активной зоне реактора оказывают влияние на условия эксплуатации установки, ее экономические показатели и безопасность. Потенциал ядерной энергетики при использовании только урана-235 весьма ограничен и не обеспечивает решающих преимуществ по сравнению с энерготехнологиями, использующими

© А.Е. Помысухина, Ю.П. Сухарев, Г.Н. Власичев, 2020

ми другие источники энергии. В традиционных ядерных реакторах как в тепловых, так и быстрых в качестве топлива используют переработанный природный уран, обогащенный по изотопу  $^{235}\text{U}$ . При этом делящийся изотоп сжигается лишь частично, что снижает эффективность и экономичность использования ядерного топлива. Так в блоках нового поколения с ВВЭР проектная глубина выгорания топлива составляет не более 5,5% т.а. В реакторах БН достигнуто большее выгорание – до 7% т.а., в модернизированной активной зоне БН-600 увеличено до 12% т.а. с перспективой доведения максимальной глубины выгорания топлива в ТВС до 15% т.а. Сверхвысокое выгорание (десятки процентов) потенциально достижимо лишь в разрабатываемых высокотемпературных газовых реакторах (ВТГР) [1]. Однако в существующих реакторах большая часть потенциального топлива (уран-238) в природном уране не используется. Возможное решение проблемы предлагается путем конверсии сырьевого материала в топливный в быстрых реакторах с соответствующими характеристиками воспроизводства в рамках замкнутого топливного цикла. Такая технология за счет расширенного воспроизводства дает возможность практически полностью использовать природный уран. Возможность почти полного использования всего уранового либо ториевого топлива ожидается в реакторах на бегущей волне (РБВ). В активной зоне такого реактора в процессе ядерных преобразований сырьевой материал с наивысшими характеристиками воспроизводства превращается в делящийся (плутоний-239 либо уран-233), который впоследствии делится, производя энергию и новые нейтроны в той же загрузке, т.е. без выгрузки и переработки, что исключает возможности его переключения на иные цели. Принципиальным технологическим условием реализации сверхвысокого выгорания в таком реакторе является сохранение работоспособности топливных элементов.

Реактор на бегущей волне в первом приближении можно представить как цилиндр (либо параллелепипед) из чистого сырьевого материала, такого как  $^{238}\text{U}$  или  $^{232}\text{Th}$ , облучаемого с торца нейтронами. В приповерхностной области цилиндра, определяемой длиной пробега нейтронов, сырьевой материал (например,  $^{232}\text{Th}$ ) трансмутирует в делящийся в соответствии с цепочкой преобразований:



При достижении критической концентрации делящегося материала возникает самоподдерживающаяся цепная реакция, и нейтроны поступают в соседнюю область, где начинает накапливаться делящийся материал. Таким образом, ядерное деление распространяется через сырьевой материал по всей длине цилиндра. Процесс делений является саморегулирующимся, поскольку любое флуктуационное превышение концентрации делящегося материала над критической должно компенсироваться его выгоранием за время, сравнимое с временем жизни нейтрона, а новый делящийся материал образуется за время, сравнимое с временем  $\beta$ -распада предшественника, и одновременно.

Впервые на возможность образования нейтронно-делительной волны в быстром реакторе указали С.М. Фейнберг и Е.П. Кунегин в работе [2]. Впоследствии Л.П. Феоктистов [3] предложил теоретическое описание и условия образования нейтронно-делительной волны. Нелинейный саморегулирующийся режим РБВ возникает благодаря высокому коэффициенту конверсии из воспроизводящего материала в делящийся за счет поглощения нейтронов и дальнейшего преобразования ядер. Основное преимущество этого типа реактора заключается в том, что после его выхода на режим стационарной волны горения без нейтронов, поступающих из запальной зоны, он не требует контроля реактивности и поэтому исходный топливный состав РБВ будет трансмутировать в соответствии с нейтронно-ядерными процессами без внешнего вмешательства и какой-

либо перезагрузки топлива в течение всей кампании. В этом режиме реактор на постоянной мощности автоматически поддерживается в состоянии, близком к критическому. Вместе с тем требуется система контроля реактивности для компенсации запаса реактивности в запальной зоне, компенсации мощностного эффекта реактивности, а также для изменения мощности реактора. Достоинствами реактора подобного типа являются высокая эффективность использования топлива и отсутствие специальных процедур его обогащения для сырьевой зоны, а также повышенная безопасность РУ. На основании изложенной концепции решались задачи с использованием различных подходов и названий описанного явления: волна ядерного горения [4], свеча (CANDLE) [5], волна критичности [6], бегущая волна [7] и т.д. Например, работа [6] посвящена исследованию устойчивости режима волны ядерного горения на стадии, когда реактор уже достигает стационарного состояния с постоянными значениями потока нейтронов в системе и скорости распространения волны, а также изучению поведения реактора при определенных внешних возмущениях в нейтронных полях и при неоднородности топлива в виде его локального начального обогащения делящимися изотопами на пути распространения нейтронно-делительной волны. Результаты анализа показали замечательную устойчивость реактора на бегущей волне относительно возмущений нейтронного потока и возможной неоднородности топлива. Эта устойчивость является проявлением специфической отрицательной обратной связи, присущей новому режиму. Работа [4] посвящена изучению влияния концентрации поглотителя на скорость распространения нейтронно-делительной волны и, как следствие, на мощность реактора. Авторами рассмотрены конкретные системы, в которых может распространяться нейтронно-делительная волна. На основе полученных условий равновесий развита теория возмущений, позволяющая рассчитать скорость волны делений в зависимости от заданных параметров.

Исследованием характеристик выгорания и скорости распространения волны горения в маломощном высокотемпературном газоохлаждаемом реакторе занимались авторы работы [5]. Особенностью изучаемого реактора стало использование тория в качестве топлива.

Авторами работы [8] был предложен новый способ организации нейтронно-делительной волны. В отличие от вышеупомянутой концепции CANDLE, в реакторе с насыпной активной зоной движение нейтронного потока замещается движением топлива. Очевидно, что вследствие принципа относительного движения эти два вида движений эквивалентны. Рассмотрена краевая задача решения диффузионного уравнения, связанная с упрощенными уравнениями выгорания, и получено более общее решение для одномерного случая, которое называется основным режимом выгорания. Это решение имеет меньше ограничений по характеристикам выгорания топлива и расширяет концепцию выгорания CANDLE до более общих случаев активной зоны с конечными размерами и, следовательно, ненулевыми граничными условиями.

В работе [9] рассмотрены две концепции быстрого реактора, основанные на одном и том же принципе – согласно первой, делящийся изотоп пополняется воспроизводящим за счет движения нейтронного потока или энерговыделения вдоль изначально составленной композиции, состоящей из запальной зоны и зоны воспроизводства (концепция «бегущей волны деления»), второй – движение нейтронного потока заменяется перемещением топливной композиции, состоящей из делящегося и воспроизводящего материалов (концепция «стоячей волны деления»). Расчетным путем обоснованы нейтронно-физические условия реализации предлагаемой концепции быстрого реактора с открытым уран-плутониевым циклом. Основной проблемой реализации реактора с волновым энерговыделением, обеспечивающим выгорание естественного урана на уровне 50 – 60% и длительную кампанию 30 – 40 лет, является радиационная стойкость топлива.

В работе [10] рассматривался реактор на бегущей волне в торий-урановом топливном цикле с помощью разработанной аналитической модели изменения ядерных концентраций в зависимости от обобщенного флюенса в облучаемом с торца нейтронами цилиндре до создания критической массы. Оценена область формирования и существования волны ядерного горения для реакторов с тепловым и быстрым спектрами нейтронов. Главным критерием, отвечающим за возможность организации нейтронно-делительной волны, является превышение в определенный момент времени концентрации делящегося материала (урана-233) своего критического значения в слое, прилегающем к источнику нейтронов. Это говорит о том, что процессы деления в указанном слое топлива будут превышать процессы накопления, а область горения сможет служить источником нейтронов для следующего прилегающего к ней слоя топлива для реализации аналогичных ядерных процессов.

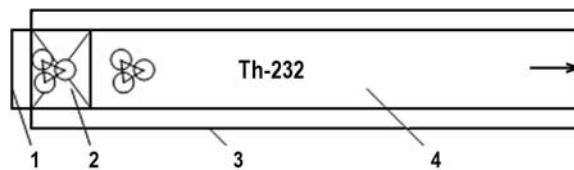


Рис. 1. Расчетная модель реактора с бегущей волной: 1 – зона поглотителя; 2 – запальная зона; 3 – отражатель; 4 – зона с воспроизводящим материалом

В работе выполнено численное моделирование активной зоны реактора на бегущей волне в торий-урановом цикле с использованием программного комплекса WIMS-D4. Активная зона реактора имеет форму прямоугольной призмы длиной 970 см. Для формирования нейтронно-делительной волны с одного конца призмы организована запальная зона длиной 160 см и поперечным размером 186 см. В качестве топлива запальной зоны использовался металлический уран, обогащенный по  $^{235}\text{U}$  до 20%. Зона с воспроизводящим топливом имеет длину 800 см и состоит из чистого сырьевого материала  $^{232}\text{Th}$ . Запальная зона является внешним источником нейтронов, что вызывает в приповерхностном слое призмы трансмутацию сырьевого материала в делящийся в соответствии с ядерными цепочками превращений. Активная зона по краям окружена отражателем (см. рис. 1). Уран и торий в реакторе используются в виде шаровых твэлов диаметром 35 мм в оболочке из карбида кремния.

Содержание и основные характеристики топлива, теплоносителя и конструкционных материалов запальной зоны и зоны с воспроизводящим материалом приведены в табл. 1. Значения основных параметров активной зоны представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Состав запальной зоны и зоны с воспроизводящим материалом**

	Объемные доли	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Атомный вес	Концентрация (барн·см) <sup>-1</sup>
Запальная зона				
Уран металлический	0,438	18,7	U – 235	0,004155
			U – 238	0,01662
Карбид кремния	0,162	3,2	Si – 28,09	0,007785
			C – 12	0,007785
Гелий	0,4	$6,64 \cdot 10^{-5}$	He – 4	$1 \cdot 10^{-5}$
Зона с воспроизводящим материалом				
Торий	0,438	11,5	Th – 232	0,01307
Карбид кремния	0,162	3,2	Si – 28,09	0,007785
			C – 12	0,007785
Гелий	0,4	$6,64 \cdot 10^{-5}$	He – 4	$1 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

**Основные параметры активной зоны**

Название параметра	Значение
Запальная зона	
Поперечный размер, см	186
Длина, см	160
Баклинг, см <sup>-2</sup>	0,000193
Толщина отражателя, см	10
Зона с воспроизводящим материалом	
Поперечный размер, см	186
Длина, см	800
Баклинг, см <sup>-2</sup>	0,000193
Толщина отражателя, см	10
Удельная мощность, МВт/т	66,7

Расчет выгорания описанной модели реактора в программном комплексе WIMS-D4 проводился в опции расчета плоской геометрии. Композиции запальной зоны и зоны с воспроизводящим материалом гомогенизируются. Вся активная зона разбивается по длине на 31 область с шагом 32 см. При уменьшении шага разбиения с 32 см до 16 см энерговыделение в его максимуме снижается не более, чем на 4%, а в области «хвоста» волны энерговыделения (где оно мало) меняется примерно на 20%. Транспортная задача решалась на каждом шаге выгорания в двухгрупповом энергетическом приближении. Границей раздела групп служит энергия 0,0091 МэВ, соответствующая концу спектра деления. Следует заметить, что расчет в 26-групповом приближении дает практически те же результаты.

На этапе подготовки макросечений методом вероятности столкновений решалось уравнение переноса в интегральной форме для расчета спектра в 69-ти энергетических группах. В настоящее время программа WIMS-D4 использует базовую библиотеку ядерных констант в 69-ти группах, собранную на основе данных UKNDL и ENDFB6.

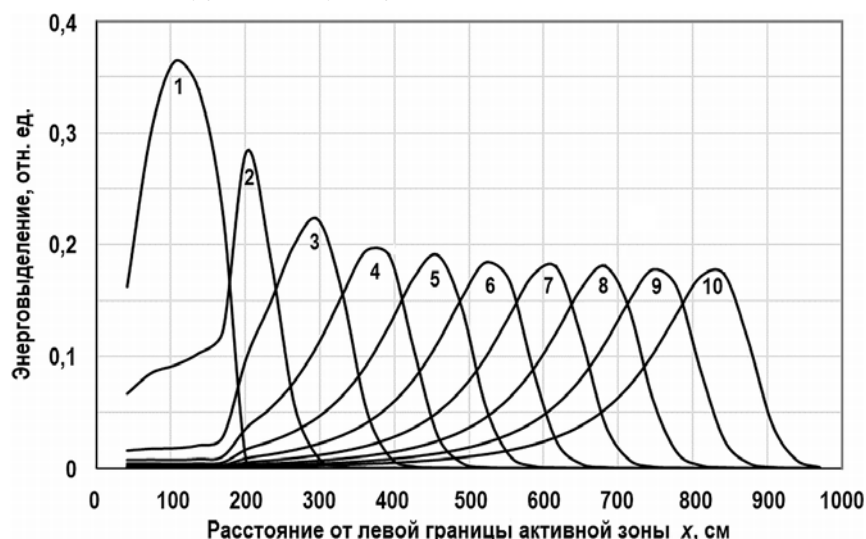


Рис. 2. Распределение энерговыделения по длине активной зоны через 100 сут (1), 1000 сут (2), 2000 сут (3), 3000 сут (4), 4000 сут (5), 5000 сут (6), 6000 сут (7), 7000 сут (8), 8000 сут (9), 9000 сут (10)

Для наглядной демонстрации существования и характера волнового процесса в

быстром реакторе проведена графическая обработка результатов численного моделирования. На рисунке 2 показана функциональная зависимость энерговыделения от расстояния для различных моментов кампании реактора. Именно на графике энерговыделения лучше всего просматривается волновой характер динамики реактора. Из рисунка видно, что полученная зависимость представляет собой солитон (уединенную волну), обладающий свойством четкой повторяемости во времени. На практике же мы сталкиваемся с дисперсией волны, из-за чего со временем положение максимумов энерговыделения понижается.

Скорость нейтронно-делительной волны получена равной 29 см/год, а продолжительность кампании рассмотренного реактора составляет около 30-ти лет. Данные результаты значительно отличаются от результатов, полученных в работе [11] для подобного реактора, работающего в уран-плутониевом топливном цикле, где скорость делительной волны составляла 11 см/год. Более высокая скорость волны горения в рассматриваемом реакторе, работающем в торий-урановом топливном цикле, обусловлена меньшей концентрацией ядер тория, поскольку плотность тория ( $11,5 \text{ г/см}^3$ ) значительно меньше плотности металлического урана ( $18,7 \text{ г/см}^3$ ). В работе [4] показано, что скорость волны можно приблизительно оценить по формуле

$$u = P_T / (ESN_0\eta), \quad (2)$$

где  $P_T$  – тепловая мощность;  $E$  – энергия одного акта деления;  $S$  – площадь поперечного сечения волны;  $N_0$  – начальная концентрация тяжелых ядер в зоне волны;  $\eta$  – доля разделившихся ядер при прохождении волны. В соответствии с этой формулой скорость волны в ториевой зоне при прочих равных параметрах должна быть почти в два раза больше, чем в урановой, что удовлетворительно согласуется с нашими численными оценками.

На рисунке 3а показано распределение урана-233 по длине активной зоны для ряда моментов кампании реактора. Из рисунка видно, что распределение урана-233 имеет ярко выраженные максимумы, которые соответствуют области горения. При этом продольный профиль концентрации урана-233 перемещается со временем от левой границы активной зоны к противоположной. Таким же образом происходит и перемещение нейтронно-делительной волны по длине реактора.

Рисунок 3б демонстрирует распределение тория-232 по длине активной зоны в различные моменты кампании реактора. Из рисунков видно, что в значительной части активной зоны выгорает большая часть как сырьевого материала, так и образующегося из него топлива – урана-233, что свидетельствует о высокой потенциальной эффективности рассмотренного реактора в плане топливоиспользования, а также ядерного нераспространения. В то же время исключительно высокая глубина выгорания тория (около 90%) делает реализацию такого реактора трудноосуществимой.

Одной из наиболее важных задач при исследовании возможности реализации волнового процесса является вывод реактора в критическое состояние. Возможность достижения критичности реактора во время выхода в режим стационарной волны показана на рис. 4.

Особенностью поведения смоделированной системы является тот факт, что в начальный период времени по мере того, как выгорает топливо в запальной зоне, эффективный коэффициент размножения падает, а волновой режим энерговыделения еще не сформировался. В момент, когда падение  $k_{эфф}$  прекращается, реактор выходит в режим волнового энерговыделения и профиль эффективного коэффициента размножения стабилизируется. Наличие запальной зоны благодаря начальному запасу реактивности до формирования волнового режима понижает уровень безопасности реактора. При этом требуются присущие традиционным установкам меры и средства контроля и управления реактивностью, в том числе и на случай маловероятных аварий.

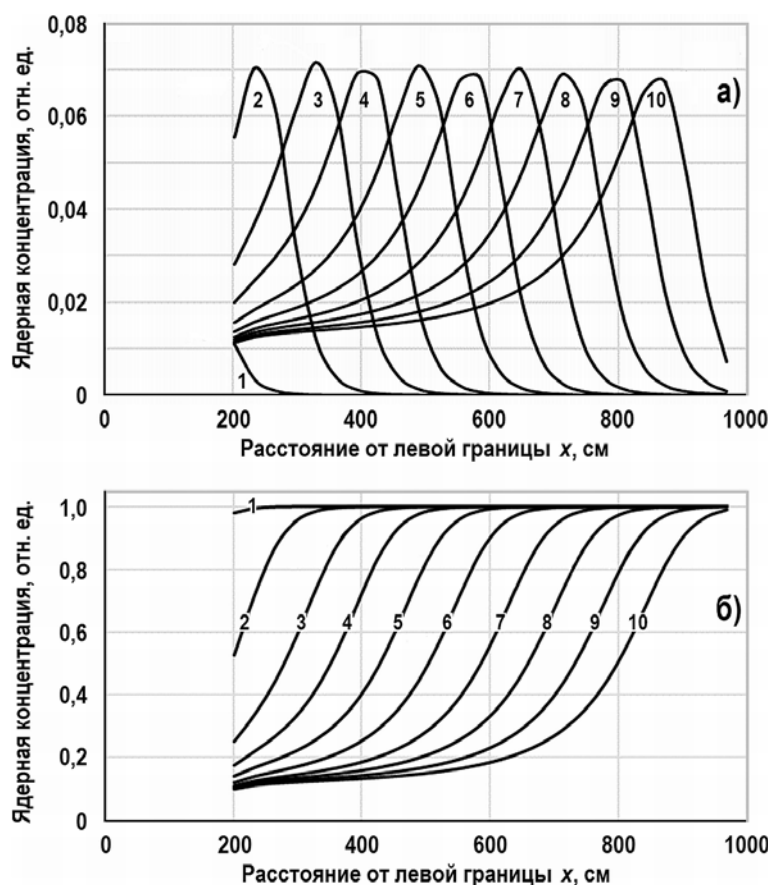


Рис. 3. Изменение ядерной концентрации урана-233 (а) и тория-232 (б) по длине активной зоны через 100 сут (1), 1000 сут (2), 2000 сут (3), 3000 сут (4), 4000 сут (5), 5000 сут (6), 6000 сут (7), 7000 сут (8), 8000 сут (9), 9000 сут (10)

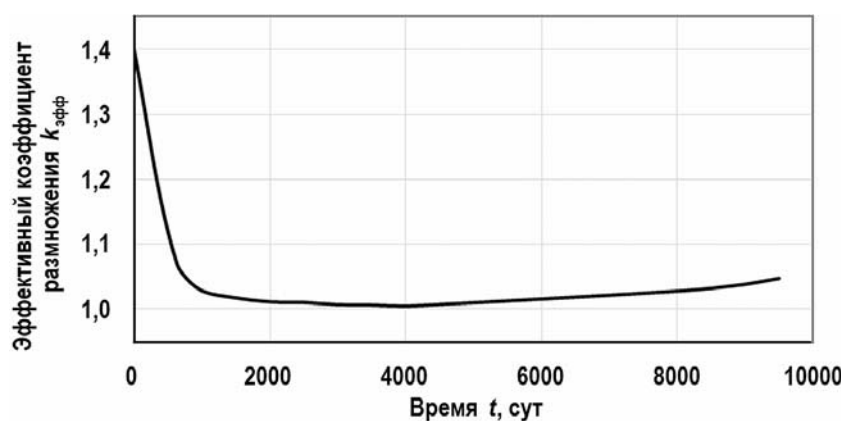


Рис. 4. Поведение эффективного коэффициента размножения во времени

Время горения запальной зоны прослеживается на рис. 5 с зависимостями изменения концентрации урана-235 по длине активной зоны в ряд моментов кампании. Из рисунка видно, что спустя 1000 сут по длине запальной зоны концентрация урана-235 становится практически нулевой. В зоне с сырьевым материалом образуется также некоторое количество урана-235 в связи с радиационными захватами нейтронов ураном-234.

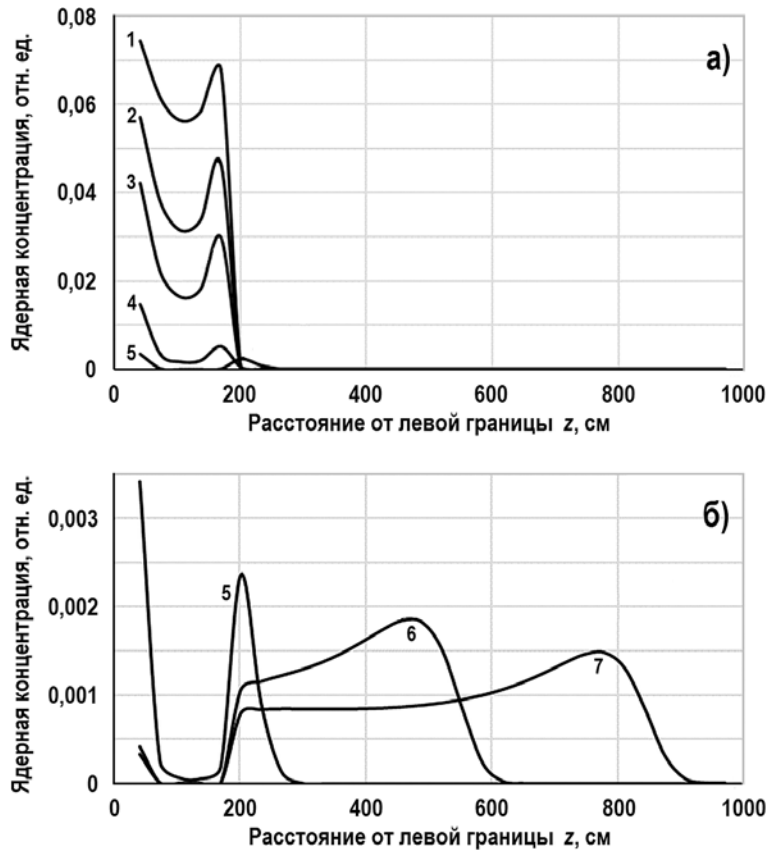


Рис. 5 Изменение ядерной концентрации урана-235 по длине активной зоны через 100 сут (1), 200 сут (2), 300 сут (3), 500 сут (4), 1000 сут (5), 5000 сут (6), 9000 сут (7): а) – в запальной зоне; б) – в сырьевой зоне

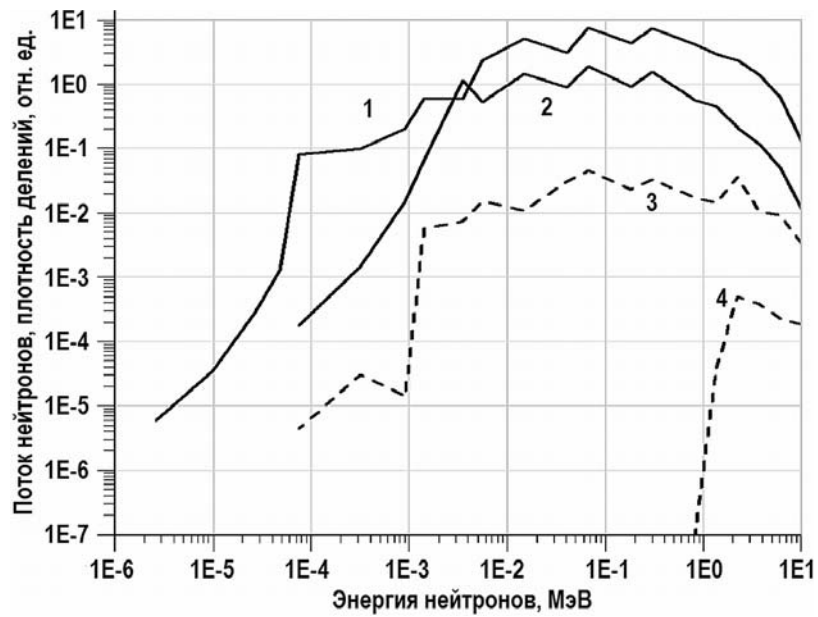


Рис. 6. Спектры нейтронов и плотности делений в начале формирования волны деления: 1, 2 – спектры потока в области запальной зоны и граничащей с ней зоне воспроизводства соответственно; 3, 4 – спектры плотности делений в запальной зоне и зоне воспроизводства



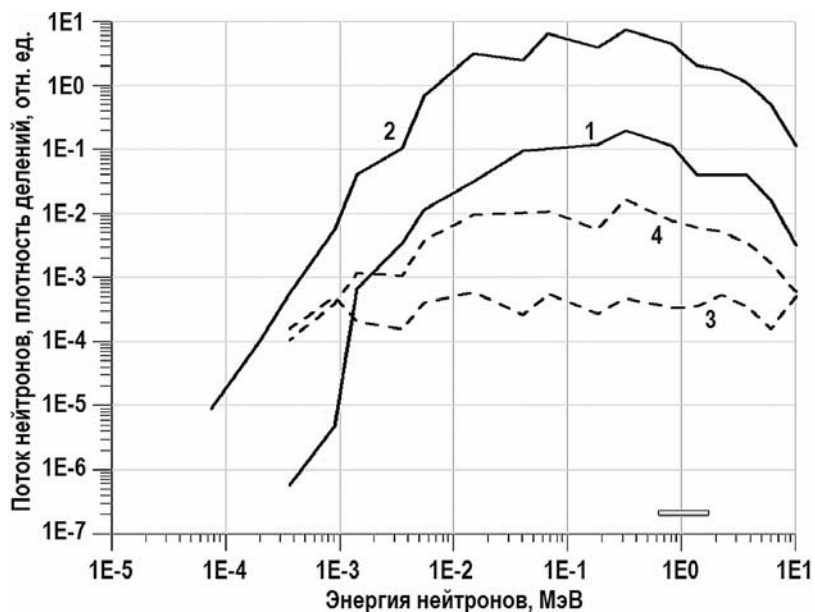


Рис. 7. Спектры нейтронов и плотности делений через 2000 сут с начала работы реактора на волне деления: 1, 2 – спектры потока в области запальной зоны и в зоне воспроизводства соответственно; 3, 4 – спектры плотности делений в запальной зоне и зоне воспроизводства

На рисунках 6 и 7 показаны спектры нейтронов и плотности делений для различных положений делительной волны – в начальный момент, когда волна еще не образовалась, и примерно через 2000 суток, когда реактор работает на волне деления.

Как следует из сравнения двух последних графиков, по мере прохождения волны деления существенно меняется спектр нейтронов и спектр плотности делений. Количество нейтронов в зоне воспроизводства растет, хотя вид спектров сохраняется. Интересным становится то, что плотность делений в запальной зоне становится постоянной для нейтронов всех энергий.

Значения выгорания топлива в активной зоне рассчитывается по формуле

$$q(x) = \frac{N^{Th2}(0) - (N^{Th2}(x) + N^{U3}(x) + N^{U4}(x) + N^{U5}(x) + N^{U6}(x))}{N^{Th2}(0)}, \quad (3)$$

где  $N^{Th2}(0)$  – начальная концентрация тория-232;  $N^{Th2}(x)$ ,  $N^{U3}(x)$ ,  $N^{U4}(x)$ ,  $N^{U5}(x)$ ,  $N^{U6}(x)$  – концентрации тория-232, урана-233, урана-234, урана-235 и урана-236 соответственно на разных участках активной зоны.

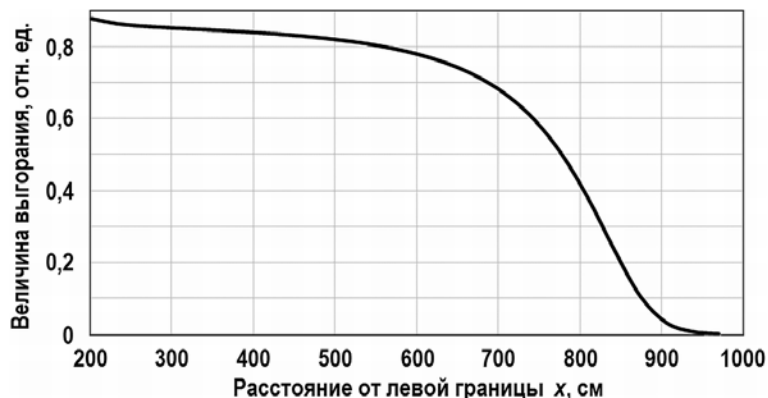


Рис. 8. Выгорание топлива по длине активной зоны через 9000 сут

Результаты расчета глубины выгорания в конце кампании показаны на рис. 8. Как видно из графика, спустя 9000 сут работы глубина выгорания достигает почти 90%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование реактора на бегущей волне подтверждает возможность существования волнового процесса в быстром реакторе с ториевым топливом. Рассчитана скорость нейтронно-делительной волны в реакторе с запальной зоной, содержащей обогащенное по изотопу  $^{235}\text{U}$  топливо, которая равняется 29 см/год. При этом приблизительная продолжительность кампании рассмотренного реактора составит примерно 30 лет. В значительной части активной зоны выгорает большая часть как сырьевого материала, так и образующегося из него топлива – урана-233, что свидетельствует о высокой потенциальной эффективности рассмотренного реактора в плане топливоиспользования, а также ядерного нераспространения. В конце кампании глубина выгорания достигает почти 90%. Решение задачи технического обеспечения такого сверхвысокого выгорания и, соответственно, длительной кампании 30-ти и более лет следует искать на пути использования микротвэльного топлива с оболочкой из карбида кремния в быстром реакторе.

Вместе с тем следует отметить, что рассмотренная концепция ториевого реактора на бегущей волне не является замкнутой, поскольку для запуска каждого такого реактора, сжигающего торий, требуется запальная зона, содержащая уран, обогащенный до 20% ураном-235, для чего должны дополнительно функционировать три производства – добычи урана, обогащения урана и изготовления уранового топлива. Нужно также отметить, что использование в запальной зоне металлического урана, не отличающегося высокой радиационной стойкостью, может оказаться непригодным. Повышения его радиационной стойкости можно добиться легирующими добавками. Кроме того, требует отдельного рассмотрения проблема обращения с выгруженным ОЯТ, имеющим высокое остаточное тепловыделение и содержащим большое количество урана-233, вполне пригодного для изготовления ядерного оружия.

## Благодарность

Авторы выражают глубокую признательность рецензенту за чуткость, внимательность и высочайший профессионализм при рассмотрении материала статьи, за полезные замечания и предложения, которые позволили значительно улучшить ее качество.

## Литература

1. *Зверев Д.Л.* Ключевые задачи совершенствования технологий реакторов на быстрых нейтронах, высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, энергоисточников малой и средней мощности на базе водо-водяных реакторов. / XI Межд. науч.-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики (МНТК-2018)», Москва, 23-24 мая 2018. Электронный ресурс: [http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2018/Materials/Zverev\\_D.L.\\_MNTK\\_2018.pdf](http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2018/Materials/Zverev_D.L._MNTK_2018.pdf) (дата доступа 20.06.2019).
2. *Feynberg S.M., Kunegin E.P.* // Proc. of the Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy. – 1958. – Vol. 9, Nuclear Power Plants, Part 2, Discussion, – PP. 447-448, United Nation, Geneva.
3. *Феоктистов Л.П.* Нейтронно-делительная волна. // Докл. Акад. наук СССР. – 1989. – Т. 309. – № 4. – С. 864-867.
4. *Павлович В.Н., Хотяинцев В.Н., Хотяинцева Е.Н.* Физические основы реактора на волне ядерного горения (РВЯГ). II. Конкретные модели. // Ядерная Физика та Энергетика. – 2008. – №3(25). – С. 62-70 (на болгарском).
5. *Ismail, Yasunori Ohoka, Peng Hong Liem, Hiroshi Sekimoto* Long Life Small CANDLE-HTGRs with Thorium. // Ann. Nucl. Energy. – 2007. – No. 34. – PP. 120-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.10.006>

6. *Van Dam H.* Self-Stabilizing Criticality Waves. // *Ann. Nucl. Energy.* – 2000. – No. 27. – PP. 1505-1521. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(00\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0306-4549(00)00035-9)
7. *Gilleland J., Petroski R., Weaver K.* The Traveling Wave Reactor: Design and Development. // *Engineering.* – 2016. – No. 2. – PP. 88-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.024>
8. *Chen X.-N., Kiefhaber E., Maschek W.* Fundamental Burn-Up Mode in a Pebble-Bed Type Reactor. // *Progress in a Nuclear Energy.* – 2008. – No. 50. – PP. 219-224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.11.064>
9. *Кодочигов Н.Г., Сорокин С.Е., Сухарев Ю.П.* Нейтронно-физические аспекты обоснования концепции быстрого реактора с открытым топливным циклом. // *Атомная энергия.* – 2014. – Т. 117. – № 4. – С. 183-188. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-9914-8>
10. *Помысухина А.Е., Сухарев Ю.П., Власичев Г.Н.* Реактор на основе волны ядерного горения в U-Th-топливном цикле. // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева.* – 2019. – № 2 (125). – С. 136-147.
11. *Петров К.Г.* Нейтронно-физическое обоснование концепции быстрого реактора типа «бегущей делительной волны»: диссертация магистра. – Н.Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014.

Поступила в редакцию 25.06.2019 г.

Помысухина Алина Евгеньевна, магистрант

E-mail: [alina.p@nstuedu.com](mailto:alina.p@nstuedu.com)

Сухарев Юрий Петрович, профессор, доктор технических наук

E-mail: [y.sukharev@yandex.ru](mailto:y.sukharev@yandex.ru)

Власичев Герман Николаевич, профессор, доктор технических наук

E-mail: [vlas@mts-nn.ru](mailto:vlas@mts-nn.ru)

UDC 621.039.5

## **ESTIMATION OF NEUTRONIC PERFORMANCE OF FAST TRAVELING WAVE REACTOR IN Th-U FUEL CYCLE**

Pomysukhina A.E., Sukharev Yu.P., Vlasichev G.N.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
24 Minin str., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

### ABSTRACT

The possibility of using nearly all of the uranium or thorium fuel is expected in traveling wave reactors. A traveling wave reactor core with a fast neutron spectrum in a thorium-uranium cycle has been simulated numerically. The reactor core has the shape of a rectangular prism with the ignition zone arranged at one of its ends for forming a neutron-fission wave. Highly enriched uranium metal is used as the ignition zone fuel. Calculated power density dependences and concentrations of nuclides taking part in the transformation chain along the core length at a number of time points have been obtained. The results were graphically processed for the illustrative demonstration of the neutron-fission wave occurrence and transmission in the reactor. The obtained power density dependence is a soliton (solitary wave) featuring a clear time repeatability property. Neutron spectra and fission densities are shown at the initial time point when no wave has yet been formed and at the time of its formation. The wave velocity was calculated based on which the reactor life has been estimated. The fuel burn-up has been estimated the ultra-high value of which makes the proposed reactor concept hard to implement. The burn-up of most of both the raw material and the fissile material produced from it indicates a

high potential efficiency of the developed reactor concept in terms of fuel utilization, as well as in terms of nuclear nonproliferation.

**Key words:** traveling wave reactor, fuel utilization, thorium, nuclear burning wave, nuclear concentration of nuclides, burn-up, reactor life.

#### REFERENCES

1. Zverev D.L. Key objectives of improving the technology of fast-neutron reactors, high-temperature gas-cooled reactors, energy sources of small and medium power based on water-cooled reactors. *Proc. of the XI Intern. Scientific.-Tech. Conf. «Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy (MNTK-2018)», Moscow, May 23-24, 2018.* Available at: [http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2018/Materials/Zverev\\_D.L.\\_MNTK\\_2018.pdf](http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2018/Materials/Zverev_D.L._MNTK_2018.pdf) (accessed Jun 20, 2019) (in Russian).
2. Feynberg S.M., Kunegin E.P. *Proceeding of the Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy.* 1958. v. 9, Nuclear Power Plants, part 2, Discussion, pp. 447-448, United Nation, Geneva.
3. Feoktistov L.P. Neutron Fission Wave. *Doklady Akademii Nauk SSSR.* 1989, v. 309, no. 4, pp. 864-867 (in Russian).
4. Pavlovich V.N., Khotyaintsev V.N., Khotyaintseva E.N. Physical Bases of the Reactor on the Wave of Nuclear Combustion (RVYAG). II. Specific Models. *Yaderna Fizika ta Energetika.* 2008, no. 3(25), pp. 62-70 (in Bulgarian).
5. Ismail, Yasunori Ohoka, Peng Hong Liem, Hiroshi Sekimoto. Long Life Small CANDLE-HTGRs with Thorium. *Ann. Nucl. Energy.* 2007, no. 34, pp. 120-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.10.006>
6. Van Dam H. Self-Stabilizing Criticality Waves. *Ann. Nucl. Energy.* 2000, no. 27, pp. 1505-1521. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(00\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0306-4549(00)00035-9)
7. Gilleland J., Petroski R., Weaver K. The Traveling Wave Reactor: Design and Development. *Engineering.* 2016, no. 2, pp. 88-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.024>
8. Chen X.-N., Kiefhaber E., Maschek W. Fundamental Burn-Up Mode in a Pebble-Bed Type Reactor. *Progress in a Nuclear Energy.* 2008, no. 50, pp. 219-224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.11.064>
9. Kodochigov N.G., Sorokin S.E., Sukharev Yu.P. Neutron-Physical Aspects of the Rationale for the Concept of an Open-Cycle Fuel Cycle Reactor. *Atomnaya Energiya.* 2014, v. 117, no. 4, pp. 183-188. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-9914-8> (in Russian).
10. Pomysukhina A.E., Sukharev Yu.P., Vlasichev G.N. Nuclear Burning Wave Reactor in U-Th Fuel Cycle. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva.* 2019, no. 2 (125), pp. 136-147 (in Russian).
11. Petrov K.G. *Neutronics Justification of Conception of Fast Reactor of Traveling Wave Type:* Magisterial diss. Nizhny Novgorod. NGTU im. R.E. Alekseeva Publ., 2014.

#### Authors

Pomysukhina Alina Evgenievna, Master Student

E-mail: [alina.p@nstuedu.com](mailto:alina.p@nstuedu.com)

Sukharev Yury Petrovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [y.sukharev@yandex.ru](mailto:y.sukharev@yandex.ru)

Vlasichev German Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [vlas@mts-nn.ru](mailto:vlas@mts-nn.ru)