

**РЕАКТОР НА СФЕРИЧЕСКОЙ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЕ
ЯДЕРНОГО ГОРЕНИЯ С ВНЕШНЕЙ
ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО
РЕАКТИВНОСТИ**

ЛЕЛЕКО Ю.Я., ГАНН В.В., ГАНН А.В.

e-mail: makswell.com@gmail.com

gann@kipt.kharkov.ua

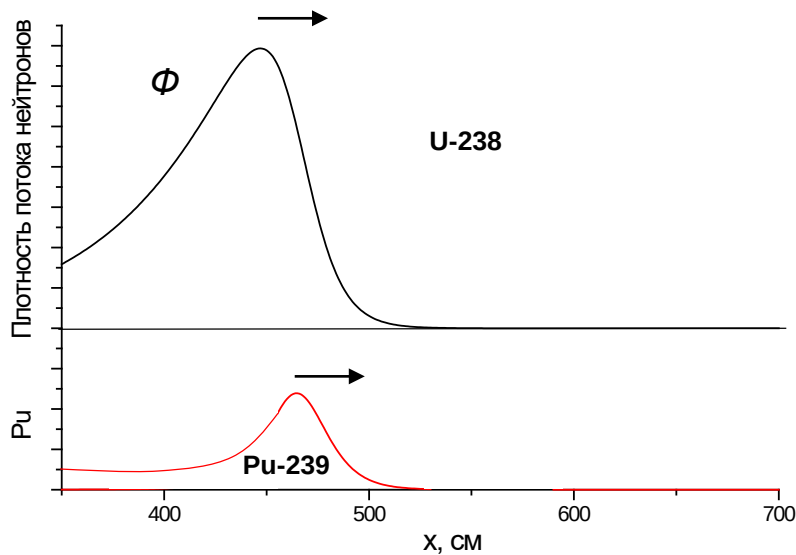
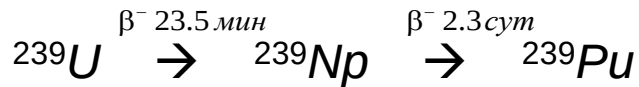
Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”
Научно-технический комплекс “Ядерный топливный цикл”
Центр проектирования активных зон, 61108, Харьков, Украина

Введение

- В работе развита нейтронная кинетика волны ядерного горения в движущейся несжимаемой нейтроно-размножающей среде при наличии ядерных реакций с участием делящихся изотопов.
- Рассмотрен сферический реактор, в котором ядерное горение распространяется радиально от центра, а топливо движется по направлению к началу координат. Показано, что в такой системе, подпитываемой с периферии изотопом ^{238}U , может существовать стоячая волна ядерного горения, в которой происходит цепочка ядерных превращений неделящегося изотопа ^{238}U в изотоп ^{239}Pu - $^{238}\text{U} + n = ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ с последующим его делением и выделением энергии - $^{239}\text{Pu} + n \rightarrow \text{Fis}$.
- С использованием кода MCNPX выполнено математическое моделирование сферического реактора на стоячей волне горения с внешней отрицательной обратной связью по реактивности и проведено сопоставление теоретических результатов с данными численного моделирования.

1. Одномерная бегущая волна горения

Принцип работы реактора на бегущей волне



$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \hat{D}\Phi + (v\Sigma_f - \Sigma_a)\Phi + S$$

$$\frac{\partial n_8}{\partial t} = -n_8 \sigma_{a8} \Phi \quad ({}^{238}\text{U})$$

$$\frac{\partial \tilde{n}_9}{\partial t} = \sigma_{89} n_8 \Phi - \frac{\tilde{n}_9}{\tau_{89}} \quad ({}^{239}\text{Np})$$

$$\frac{\partial n_9}{\partial t} = \frac{\tilde{n}_9}{\tau_{89}} - \sigma_{a9} n_9 \Phi \quad ({}^{239}\text{Pu})$$

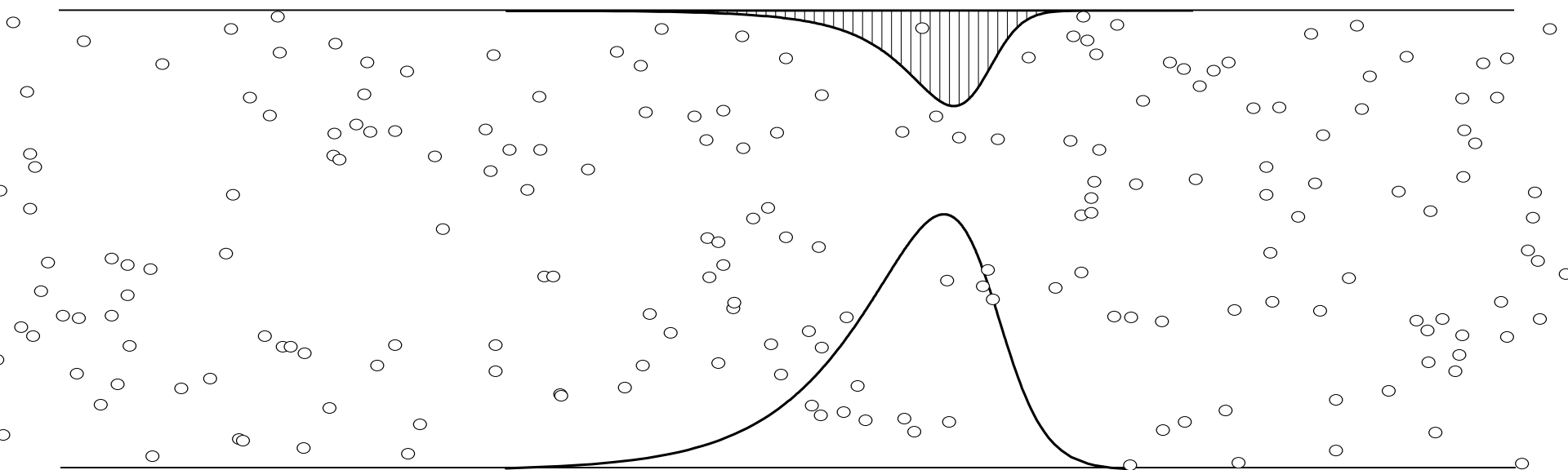
$$\frac{\partial n_c}{\partial t} = 2\sigma_{f9} n_9 \Phi$$

$$\varphi(x) = \frac{\sigma_a}{V} \int_x^\infty \Phi(x') dx'$$

$$\frac{1}{\Phi(\varphi)} = B \left(\frac{A}{\varphi} + \frac{1}{\varphi_{\max} - \varphi} \right)$$

2. Одномерная стоячая волна горения

1) Простейший пример стоячей волны горения мы получим, перейдя в подвижную систему координат, движущуюся вместе с волной.



Решение для стоячей волны в этом случае получается из известных формул для бегущей волны простым преобразованием координат.

3. Одномерная стоячая волна горения в навстречу движущихся нейтроно-размножающих средах



Приложение

В данном случае система может быть описана прежними уравнениями в полупространстве $x \geq 0$ с зеркальными граничными.

Решение имеет вид:

$$\int_{\varphi}^{\varphi_0} \frac{d\varphi'}{\sqrt{f(\varphi')}} = \sqrt{\frac{2\sigma_a n_0}{D}} |x|$$

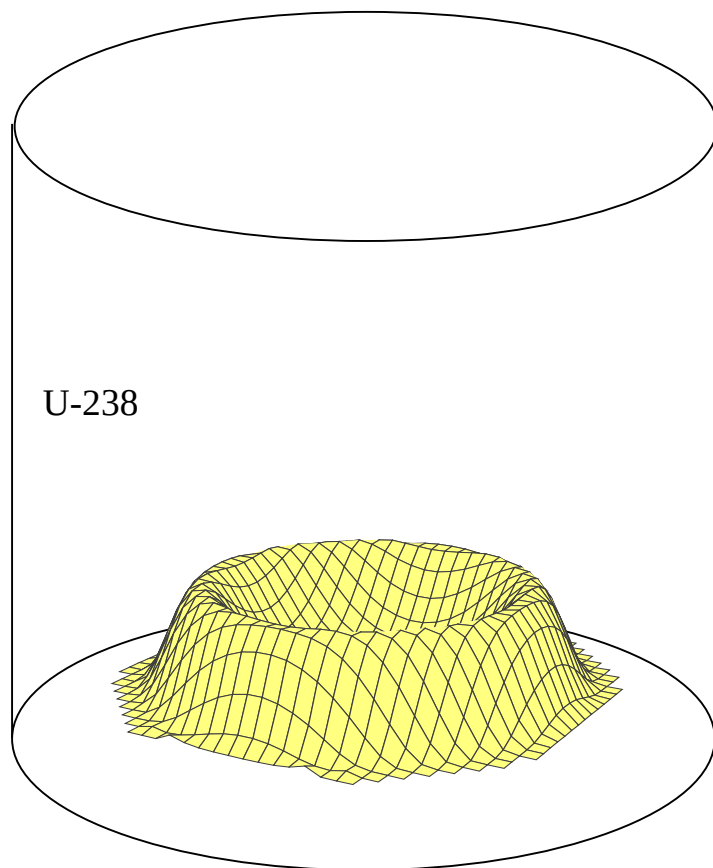
однако, теперь появляется новый параметр φ_0 – максимальная величина флюенса нейтронов, которая достигается в начале координат.

Мощность в стационарном режиме определяется скоростью движения сред V :

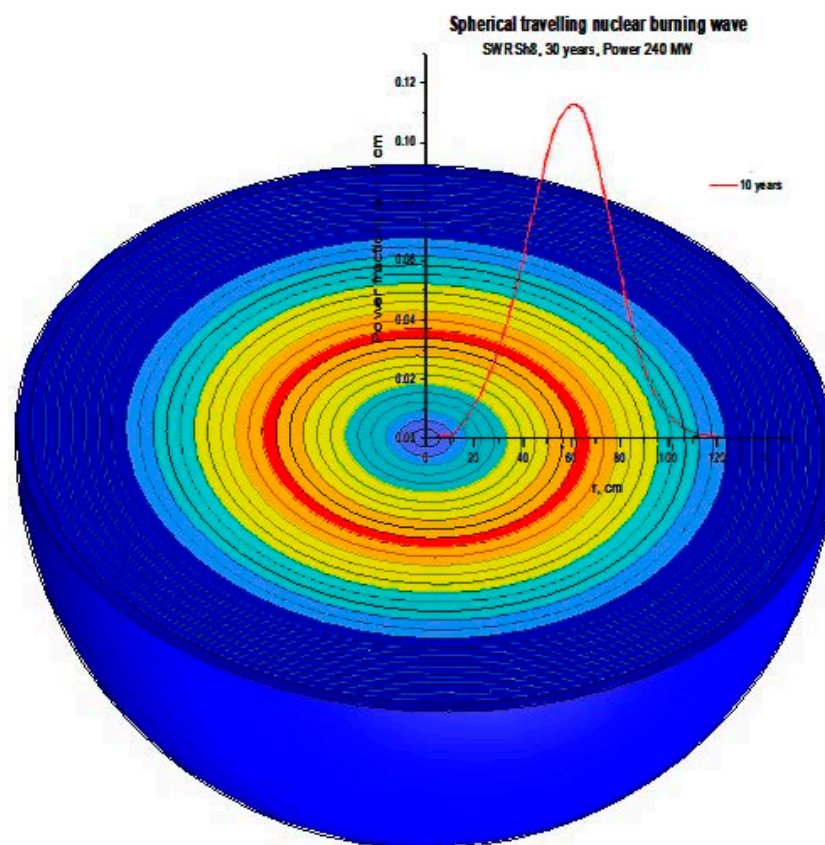
$$P = 2VQ n_0 (1 - e^{-\varphi_0} - \varphi_0 e^{-\varphi_0}) \sigma_f \sigma_{89} / \sigma_a^2$$

4. Сферическая бегущая волна ядерного горения

Прямым моделированием в MCNPX показано, что бегущие волны ядерного горения могут существовать также в цилиндрической и сферической симметрии



Ядерное горение распространяется радиально от оси к стенкам цилиндра реактора. Образуя цилиндрическую бегущую волну горения.



В режиме бегущей сферической волны ядерное горение начинается в центральной области активной зоны, содержащей обогащенный уран. Когда концентрация Pu-239 в U-238 становится достаточно высокой, тогда появляется сферическая волна горения

5. Теория сферической стоячей волны горения

$$\frac{\partial}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V}(\mathbf{r}) \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\vec{V}}{v} \frac{\partial \Psi}{\partial \vec{r}} = \hat{D} \Psi + (v \Sigma_f - \Sigma_a) \Psi + S$$

$$\varphi(r) = \sigma_a \int_r^\infty \frac{\Psi(r')}{V(r')} dr' = \frac{\sigma_a}{V_R R^2} \int_r^\infty \Psi(r') r'^2 dr'$$

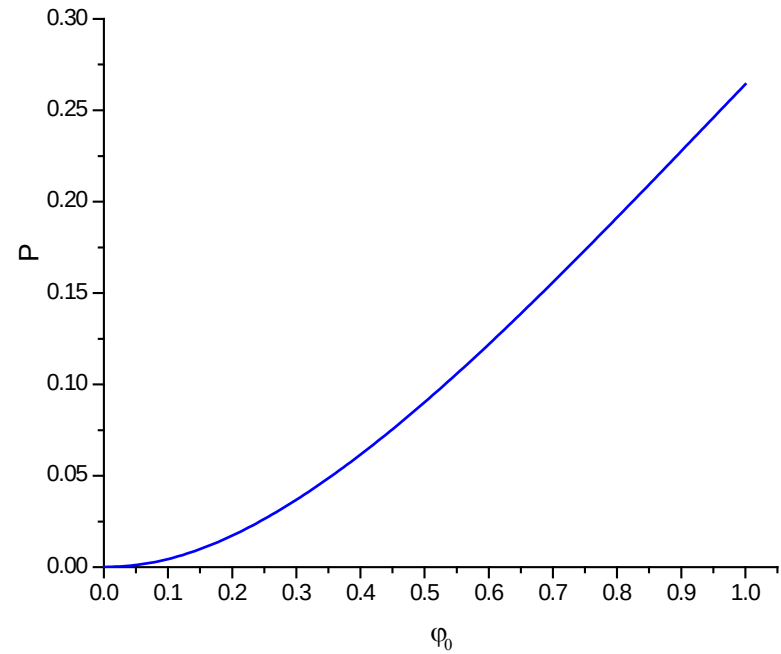
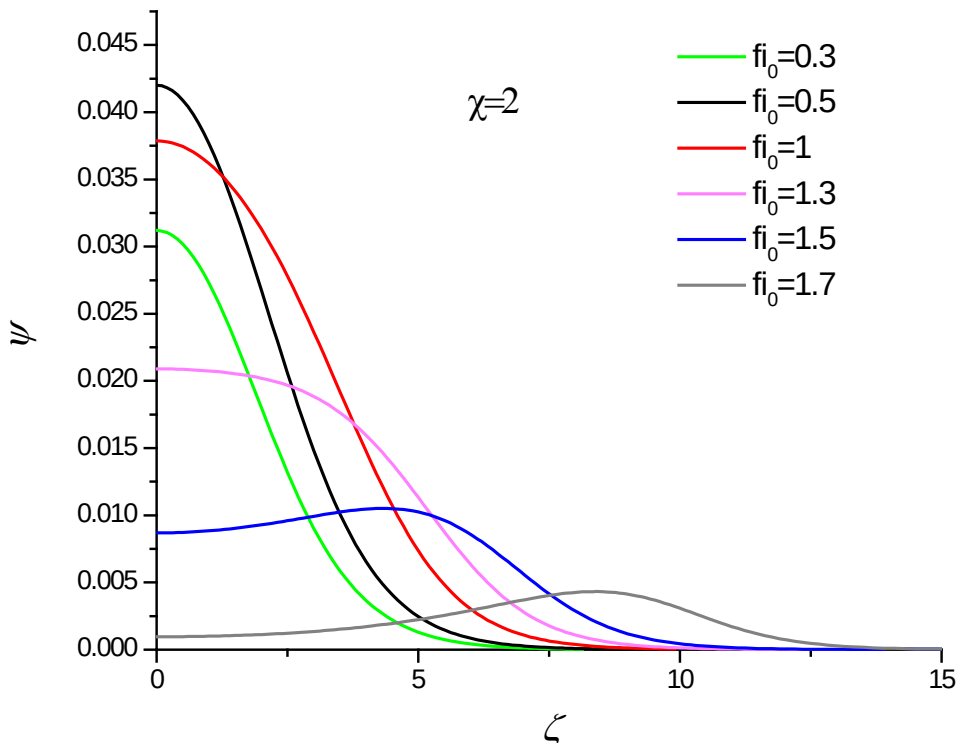
$$\frac{D\sigma_a}{2n_0 V_R^2} \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{r^4(\varphi)}{R^4} \frac{d\Psi^2}{d\varphi} \right) = 2\beta + (1 - 2\beta)e^{-\varphi} + \left(\frac{\sigma_{89}}{\sigma_a} - 2\beta \right) \varphi e^{-\varphi} - \frac{\sigma_f \sigma_{89}}{\sigma_a^2} \nu (1 - \rho) \varphi e^{-\varphi}$$

$$\beta = \frac{\sigma_c \sigma_f \sigma_{89}}{\sigma_a^3}$$

6. Сферический реактор на стоячей волне горения

Радиальные распределения нейтронного потока в сферическом реакторе на стоячей волне горения. Из рисунка слева видно, что с увеличением значения φ_0 максимум волны горения удаляется от центра зоны и уходит на бесконечность при $\varphi_0 = \chi$. При этом, минимальные размеры зоны:

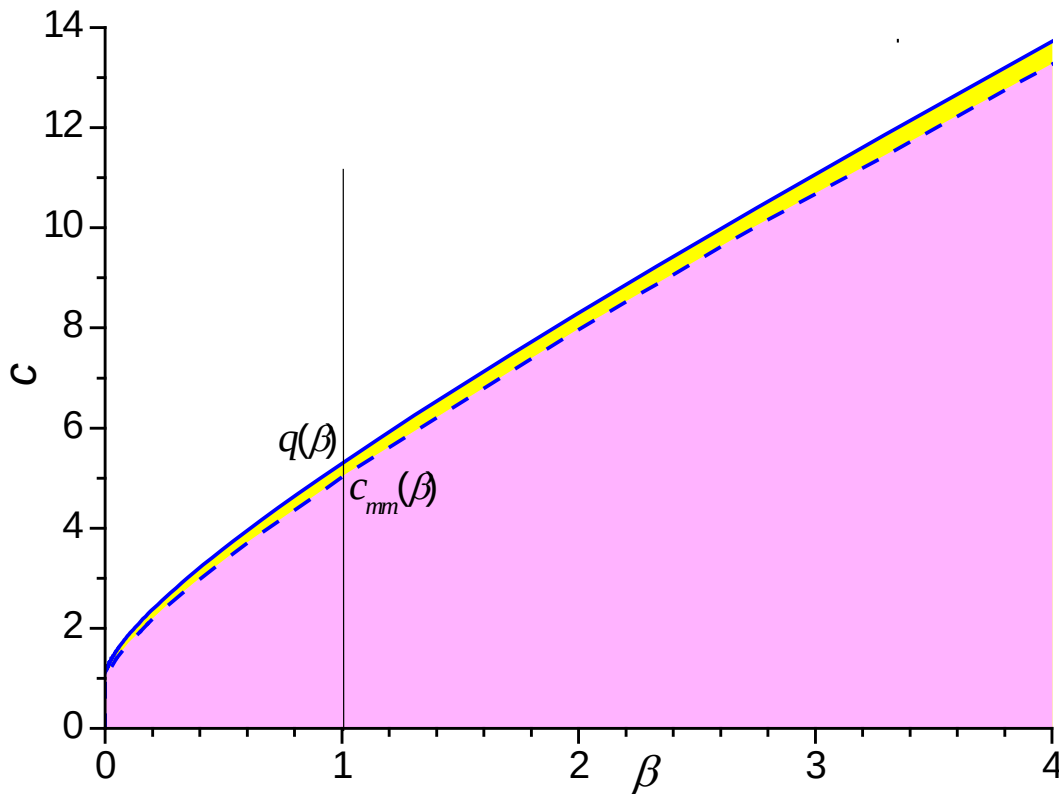
$$r_{\min} \sim 1.54 \sqrt{\frac{D}{\sigma_a n_0}} \text{ достигаются уже при } \varphi_0 \sim 0.4$$



Показана зависимость мощности стоячей волны горения от флюенса φ_0 при $\chi = 1$.

7. Диаграмма состояний сферического реактора на стоячей волне горения

$$\beta = \frac{\sigma_c \sigma_f \sigma_{89}}{\sigma_a^3} \quad \text{- коэф. поглощения нейтронов ;} \quad c = \nu \frac{\sigma_f \sigma_{89}}{\sigma_a^2} - \frac{\sigma_{89}}{\sigma_a} + 2\beta \quad \text{- коэф. трансмутации}$$



$$q = \frac{2\beta\chi(\beta) - (1 - 2\beta)[e^{-\chi(\beta)} - 1]}{1 - [1 + \chi(\beta)]e^{-\chi(\beta)}}$$

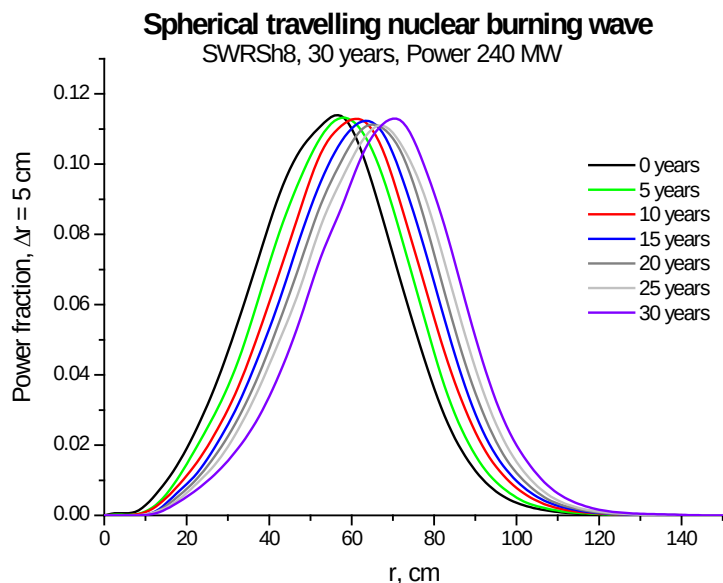
Показано, что реактор на стоячей волне горения характеризуется всего двумя комбинациями ядерных сечений β и c и одной универсальной функцией, определяющей границу устойчивости такой системы.

Стоячая волна существует в области:

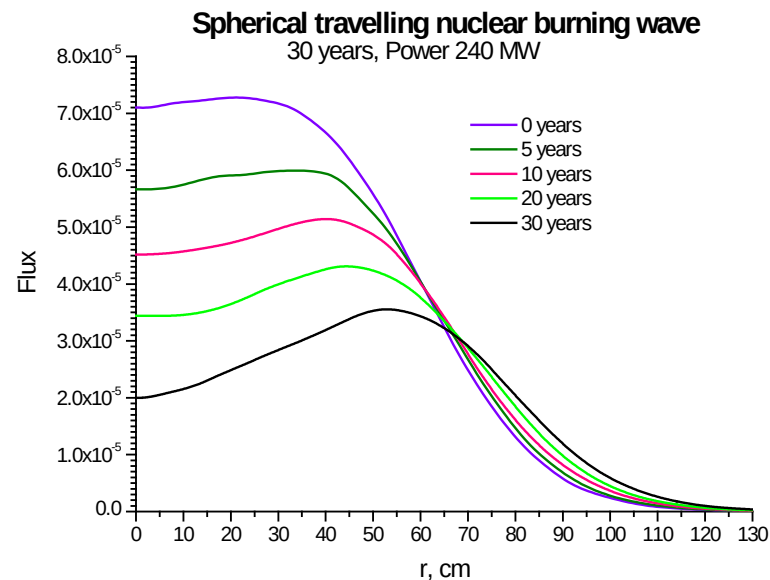
$$c \geq q(\beta)$$

8. Компьютерное моделирование сферического реактора на стоячей волне горения

- Компьютерная модель TWR/SWR представляет собой сферу, радиусом – 2 м, заполненный топливом на основе двуокиси урана.
- В режиме бегущей волны (TWR), когда концентрация ^{239}Pu в ^{238}U становится достаточно высокой благодаря его наработке по схеме $^{239}\text{U} + n = ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$, тогда возникает сферическая волна горения, она отрывается от запальной области и продолжает движение к краям активной зоны и продолжает движение к краям активной зоны в течение 150 лет.
- В наших модельных расчётах скорость волны горения составляла ~ 0.5 см/год при мощности 240 МВт.
- В режиме стоячей волны (SWR) форма волны определяется значением непрерывного параметра ϕ_{max} .
- В процессе горения этот профиль остается неизменным. Реактор состоял из 29 слоёв в каждом из которых моделировались ядерные реакции на ~ 200 -ах изотопах.

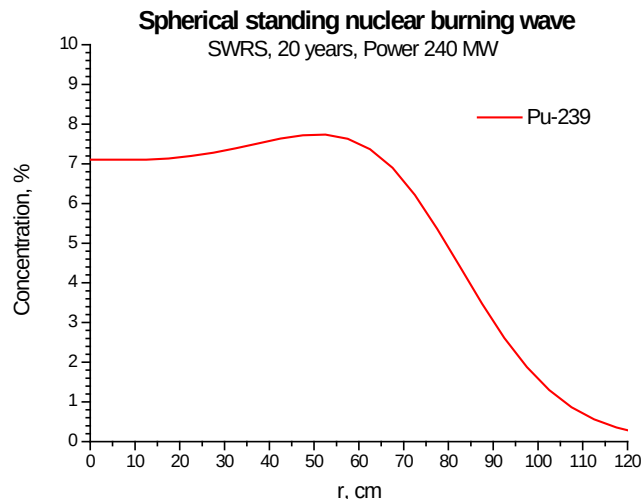


Профиль волны TWR в установившемся режиме

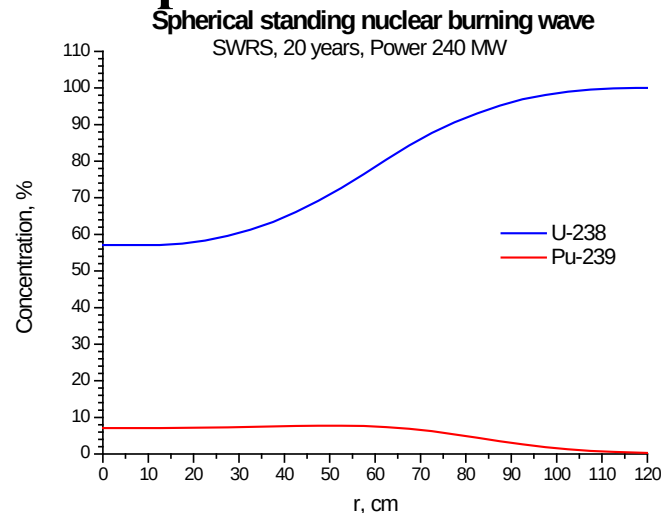


Профили стоячих волн при различных начальных условиях

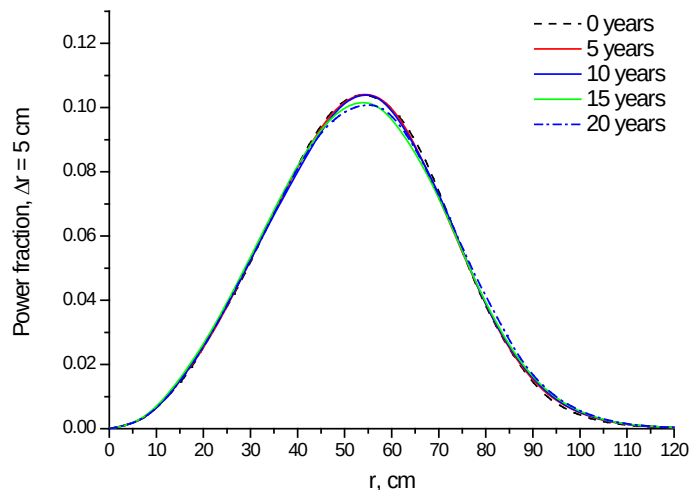
9. Компьютерное моделирование сферического реактора на стоячей волне горения



Профиль концентрации плутония.



Профили концентраций урана и плутония



Профиль мощности по слоям стоячей сферической волны горения

- На верхних рисунках показаны профили концентраций ^{239}Pu и ^{238}U в стоячей волне. Из рисунков следует, что обеднённый уран выгорает в реакторе на 60 %, а выгруженное топливо ещё содержит 6 % невыгоревшего изотопа ^{239}Pu .

- Рассмотрена активная зона, содержащая конструкционные материалы и теплоноситель. Стоячая волна горения в такой зоне сохраняет необходимый запас критичности.

Выводы

- Волна ядерного горения может существовать не только в одномерной геометрии, но и в системах с цилиндрической и сферической симметрии.
- Построена феноменологическая теория сферической волны ядерного горения.
- Показана возможность существования стоячей сферической волны горения.
- Получены простые зависимости нейтронного потока, удельной мощности и концентрации урана и плутония в стоячей волне горения
- Проведено математическое моделирование сферического реактора на стоячей и бегущей волне горения. Получено хорошее согласие аналитических результатов с данными численного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Феокистов Л. П. Нейтронно-делительная волна // Докл. Акад. Наук СССР. 1989, т. 309, с. 864-867..
- 2. Ellis T., Petroski R. Traveling-Wave Reactors: A Truly Sustainable and Full-Scale Resource for Global Energy Needs // Proceedings of ICAPP '10 San Diego, CA, USA, June 13-17, 2010 Paper 10189.
- 3. Gann V. V., Gann A. V. BENCHMARK on traveling wave fast reactor with negative reactivity feedback obtained with MCNPX code // 4 International Conference “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (NPAE-Kyiv2012) September 3 - 7, 2012, Kyiv, Ukraine. Proceedings Part II. P. 421-425.
- 4. Лелеко Ю.Я., Ганн В.В., Ганн А.В. Моделирование реактора на стоячей волне ядерного горения // Труды Международной Научно-Технической Конференции «Компьютерное моделирование в наукоёмких технологиях». Харьков, 26-31мая 2016, Харьков 2016, стр.206-209
- 5. TERRAPOWER, LLC Traveling Wave Reactor Develop Program Overview // <http://dx.doi.org/10.5516/NET.02.2013.520>
- 6. Yu.Y. Leleko, V.V. Gann, A.V. Gann. NUCLEAR REACTOR ON CYLINDRICAL STANDING BURNING WAVE WITH AN EXTERNAL NEGATIVE REACTIVITY FEEDBACK // Problems of Atomic Science and Technology. 2017, № 2 (108), pp. 138-143.
- 7. V.V.Gann, Yu.Y.Leleko, A.V.Gann COMPUTER SIMULATION OF NUCLEAR REACTOR ON CYLINDRICAL STANDING BURNING WAVE // Proceedings of NUCLEAR 2017 The 10th International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Pitesti, 2017, May 24-26, pp. 161-168