

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ –
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. Лейпунского»

ФЭИ-3272

И.В. Алексеева, А.П. Будник, А.В. Сипачев, М.Н. Слюняев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УСИЛИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ
ОБЛУЧАЕМОЙ НЕЙТРОНАМИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ,
СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОЧАСТИЦЫ УРАНА, ОТ ПАРАМЕТРОВ
НЕЙТРОННОГО ПОТОКА И СКОРОСТИ ВДУВА**

ОБНИНСК - 2017

УДК 621.039.66 : 621.375.8

И.В. Алексеева, А.П. Будник, А.В. Сипачев, М.Н. Слюняев

Исследование зависимости усилительных свойств облучаемой нейтронами движущейся газовой среды, содержащей наночастицы урана, от параметров нейтронного потока и скорости вдува.

Препринт ФЭИ – 3272. Обнинск, 2017. – 35 с.

В настоящей работе продолжено изучение усилительных свойств пространственно-неоднородной ядерно-возбуждаемой содержащей наночастицы урана облучаемой неоднородным нейтронным полем движущейся аргон-ксеноновой среды.

Целью настоящей работы является исследование зависимости усилительных свойств лазерно-активной среды от начальной скорости движения газовой смеси, длительности импульса нейтронного излучения и пространственно-временной формы распределения нейтронного потока.

In the present work, we continue to study the amplifying properties of a spatially inhomogeneous nuclear-excited containing uranium nanoparticles moving argon-xenon medium irradiated by an inhomogeneous neutron field.

The purpose of this work is to investigate the dependence of the amplifying properties of the laser active medium on the initial velocity of the gas mixture, the duration of the neutron pulse, and the space-time shape of the neutron flux distribution.

Введение

Прошло около 40 лет с тех пор, когда было предложено применять распыленные в активной газовой среде мелкодисперсные урансодержащие частицы для преобразования ядерной энергии в энергию оптического излучения [1].

Использование мелкодисперсных урансодержащих частиц по сравнению с традиционно применяющимися методами гетерогенной ядерной накачки активных газовых сред может повысить долю энергии, выносимой осколками деления из конденсированной фазы в газовую среду, в десять и более раз. Это создает предпосылки для повышения эффективности преобразования ядерной энергии в энергию оптического излучения.

Существенным фактором, препятствующим развитию генерации лазерного излучения, является рассеяние и поглощение лазерного излучения активной средой, содержащей мелкодисперсные урансодержащие частицы.

Недавно было предложено использовать лазерно-активные газовые среды, облучаемые нейтронами и содержащие наночастицы химических соединений урана [2].

В начале расчетно-теоретических исследований были разработаны модели и созданы комплексы программ для математического моделирования кинетических процессов в облучаемой нейтронами аргон-ксеноновой газовой среде, содержащей наночастицы урана [2–6]. С использованием созданных моделей и программ было показано, что возможно получить усиление лазерного излучения в ядерно-возбуждаемой аргон-ксеноновой пылевой газовой плазме [2–6].

Впоследствии методами математического моделирования процессов в лазерно-активном элементе (ЛАЭЛ) было показано, что при генерации лазерного излучения (ЛИ) в аргон-ксеноновой газовой среде, облучаемой нейтронами и содержащей наночастицы урана, эффективность преобразования кинетической энергии осколков деления урана в энергию ЛИ может на порядок превышать эффективность преобразования этой энергии при гетерогенной накачке [7–9].

Однако в исследованиях [7–9] рассматривалась только неподвижная однородная пылевая среда. Для того, чтобы избежать осаждения наночастиц урана в газе под действием силы тяжести, представляется целесообразным продувать эту среду.

Исследованы кинетические процессы в облучаемой нейтронами движущейся аргон-ксеноновой газовой среде, содержащей наночастицы урана. Математическое моделирование кинетических процессов в ЛАЭЛ с движущейся аргон-ксеноновой газовой средой, содержащей наночастицы урана, при установившемся движении было выполнено в работах [10–12].

В процессе облучения неоднородной аргон-ксеноновой газовой среды, движущейся в ЛАЭЛ, осколками деления и, как следствие, при неоднородном нагреве газа, движение пылевой среды будет неустановившимся.

Для исследования такого движения пылевой среды была разработана теоретическая модель и создан комплекс программ для математического моделирования процессов ядерно-оптического преобразования энергии [13].

Модель включает в себя уравнения нестационарной газовой динамики, а также уравнения, описывающие кинетические процессы в неравновесной плазме, возбуждаемой осколками деления урана.

Изучена пространственно-временная эволюция лазерно-активной пространственно-неоднородной ядерно-возбуждаемой содержащей наночастицы урана аргон-ксеноновой среды, находящейся в неоднородном изменяющемся со временем нейтронном поле. Выполнены расчетно-теоретические исследования пространственно-временной эволюции параметров газовой среды (температура, плотность, скорость, давление), а также распределения концентрации наночастиц урана при различных начальных скоростях движения газа и размерах наночастиц.

Проведено математическое моделирование кинетических процессов в облучаемой нейтронами аргон-ксеноновой плазме, содержащей наночастицы урана, при неустановившемся движении среды, обусловленном как прокачкой этой среды через ЛАЭЛ, так и нагревом её осколками деления ядер урана, индуцированного изменяющимся со временем неоднородным в пространстве полем нейтронов. Исследованы усилительные свойства лазерно-активной пространственно-неоднородной ядерно-возбуждаемой содержащей наночастицы урана облучаемой неоднородным нейтронным полем движущейся аргон-ксеноновой среды [13].

В настоящей работе продолжено изучение усилительных свойств пространственно-неоднородной ядерно-возбуждаемой содержащей наночастицы урана облучаемой неоднородным нейтронным полем движущейся аргон-ксеноновой среды.

Целью настоящей работы является исследование зависимости усилительных свойств лазерно-активной среды от начальной скорости движения газовой смеси, длительности импульса нейтронного излучения и пространственно-временной формы распределения нейтронного потока.

Ранее [13] моделирование проводилось для частных случаев параметров системы, и исследование их влияния на усилительные характеристики среды не проводилось.

Результаты математического моделирования пространственно-временной эволюции аргон-ксеноновой газовой среды, содержащей наночастицы урана

В процессе работы было изучено движение смеси инертных газов аргона и ксенона при неустановившемся движении пылевой среды в ЛАЭЛ, который представляет собой вертикальный цилиндрический объект, основные параметры рассматриваемой задачи представлены на рис. 1.

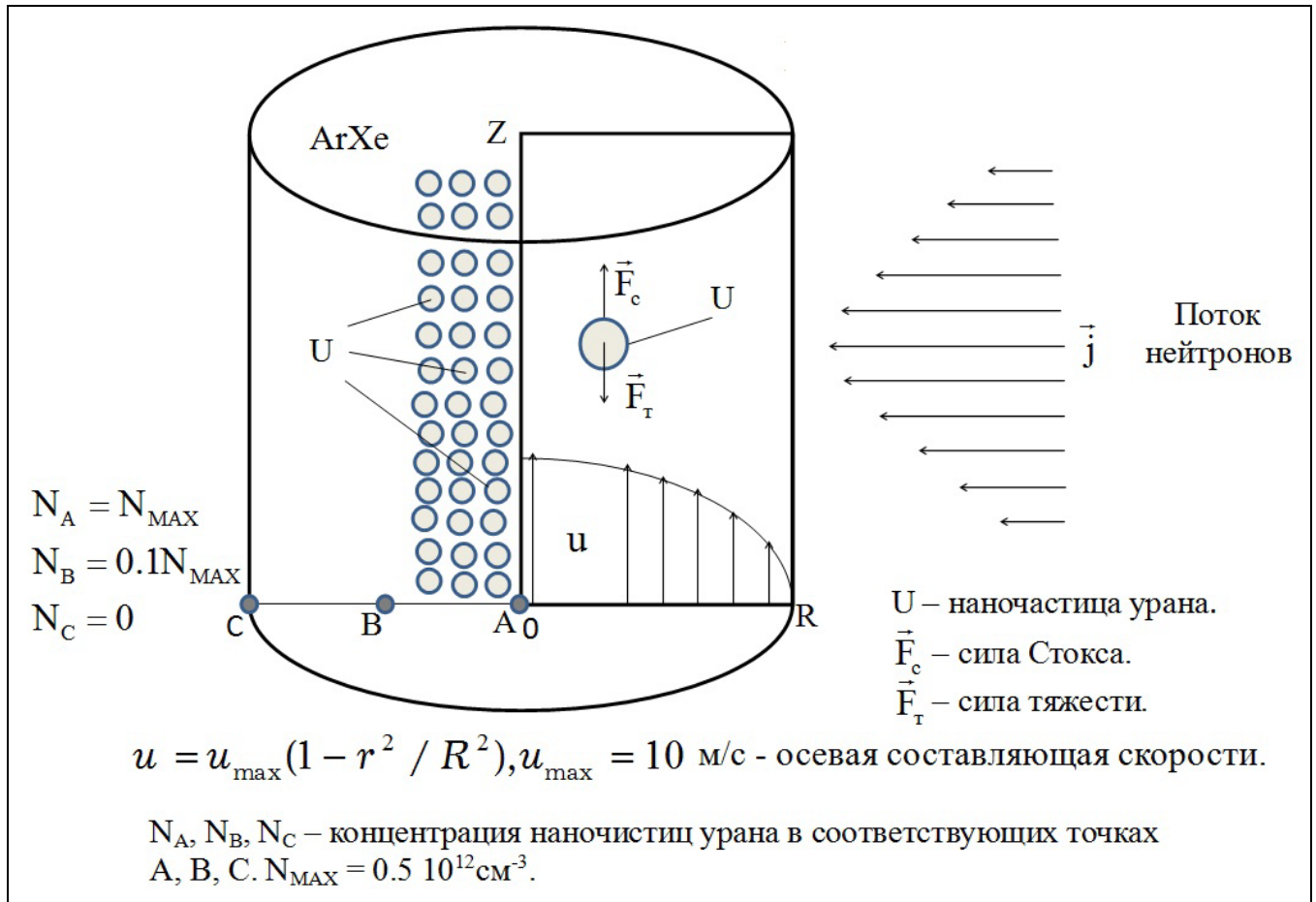


Рис. 1. Основные параметры рассматриваемой задачи

Для описания пространственно-временной эволюции газовой среды использовалась система уравнений включающая в себя: уравнение непрерывности, уравнения Навье-Стокса, уравнение энергетического баланса, а также уравнение переноса наночастиц с учетом конвекции и диффузии [13], которые в цилиндрической системе координат имеют вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p_t}{\partial z} + S_u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p_t}{\partial r} + S_v, \quad (3)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \vec{V} \text{grad } T = \text{div}(\lambda_t \text{grad } T) + \frac{dp_t}{dt} + Q, \quad (4)$$

где

$$S_u = -\frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\mu \text{div } \vec{V}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$S_v = -\frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} (\mu \text{div } \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + 2 \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D_f \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} N + \frac{\partial^2}{\partial z^2} N \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r j_r - \frac{\partial}{\partial z} j_z. \quad (7)$$

Здесь t – время, z, r – цилиндрические (соответственно, осевая и радиальная) координаты, ρ, c_p, T – плотность, удельная теплоемкость при постоянном давлении, температура; u, v – осевая и радиальная составляющие скорости $\vec{V}$; p_t – давление газа; μ – динамический коэффициент вязкости; λ_t – коэффициент теплопроводности газа; Q – объемная мощность энерговыделения осколков деления в газе, идущая на нагрев тяжелых частиц газа (атомов, ионов), N – концентрация наночастиц урана, D_f – их коэффициент диффузии, $\vec{j}$ – плотность потока пылевых частиц.

В ЛАЭЛ с газом, содержащем наночастицы урана, энерговыделение от осколков деления в точке с координатами (r, z) можно найти как дивергенцию плотности потока энергии, переносимой осколками деления, с последующим интегрированием по объему ЛАЭЛ [13]:

$$Q(r, z) = \sum_{i=1}^{n_f} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{z_m} dz_1 \int_0^R r_1 dr_1 \frac{S_0(r_1, z_1)}{\pi l^2} \left| \frac{\partial T_i(l')}{\partial l'} \right| \frac{\rho(r_1, z_1)}{\rho_0}, \quad (8)$$

где z_m – максимальное значение переменной z , при котором осколки деления могут достигать рассчитываемой точки, n_f – число осколков на акт деления, $S_0(r_1, z_1)$ – скорость делений в единице объема в точке с координатами (r_1, z_1) , $T_i(l')$ – энергия i -го осколка, прошедшего эффективное расстояние $l' = \int_0^l \frac{\rho}{\rho_0} dl$, $l = \sqrt{r^2 + r_1^2 - 2rr_1 \cos \varphi + z^2}$ – реальное расстояние, пройденное осколком в газе, r_1 – расстояние от оси ЛАЭЛ до источника осколков деления, φ – угол между направлениями от оси ЛАЭЛ на источник осколков деления и на рассматриваемую точку в поперечном сечении, ρ_0 – нормальная плотность газа, для которой задана зависимость $T_i(l)$.

На рис. 2–37 представлены типичные результаты пространственно-временной эволюции распределений проекции скорости в ЛАЭЛ на его ось, температуры, давления и концентрации наночастиц урана. Результаты расчётов приведены для частиц с радиусом $r_p = 5$ нм при начальном давлении газа $p = 0,5$ атм и следующих значениях переменных: $Z = 300$ см, $R = 12$ см, максимальная концентрация частиц урана на оси ЛАЭЛ полагалась равной $N_{MAX} = 0,5 \cdot 10^{12}$ см⁻³, а также при начальных скоростях движения газовой смеси $u_{max} = 2$ м/с и $u_{max} = 1$ м/с. Зависимость плотности потока тепловых нейтронов J , вызывающих деление ядер урана, от времени задавалась в виде

$$J = J_0 \exp \left(1 - \frac{t}{\tau_0} - \left[\frac{z - \frac{Z}{2}}{Z / 6} \right]^{kg} \right) \frac{t}{\tau_0}, \quad (9)$$

где $\tau_0 = 150$ мкс и $\tau_0 = 300$ мкс, а также kg – параметр, определяющий форму распределения потока нейтронов. При $kg = 2$ – гауссово распределение, при $kg = 4$ – супергауссово распределение.

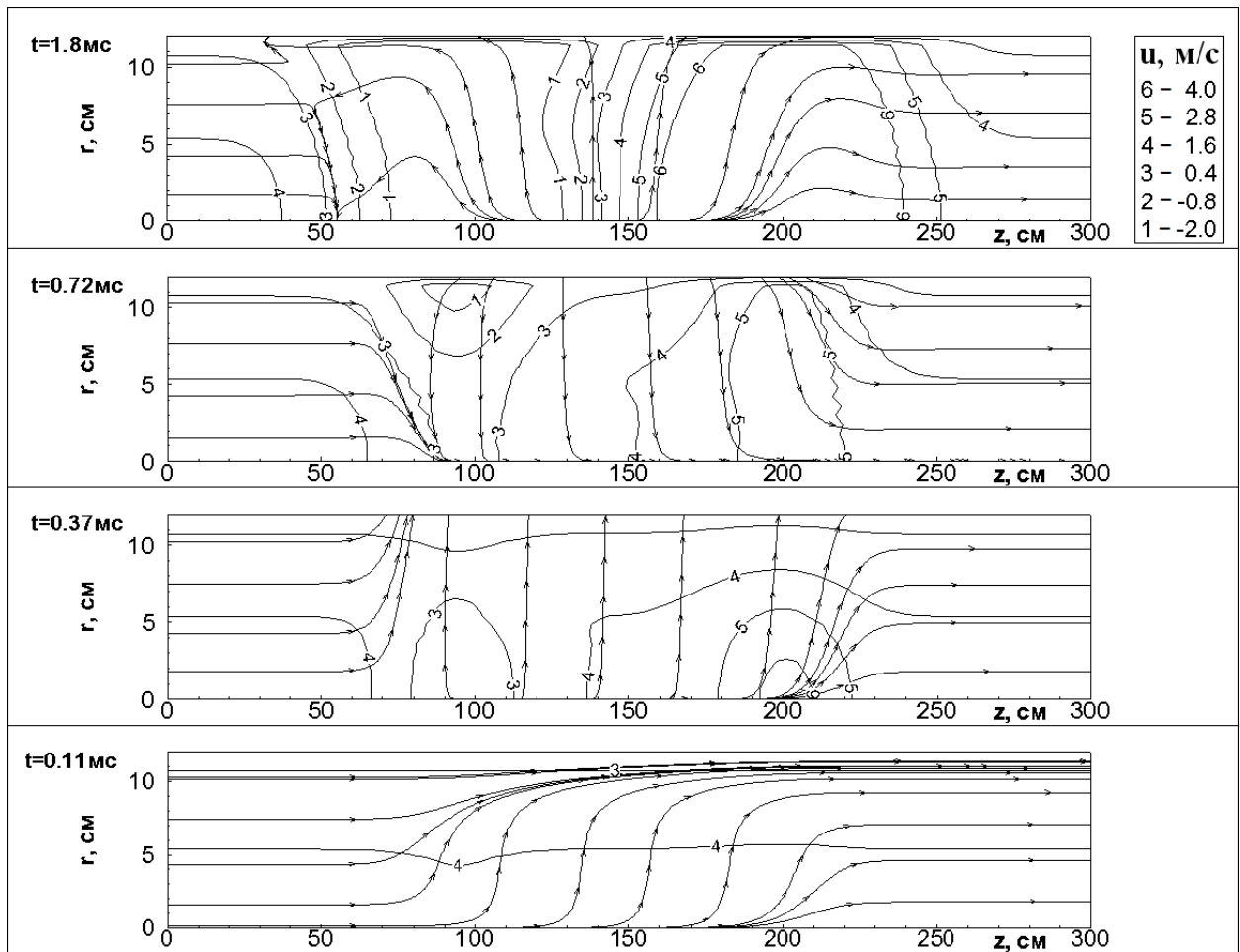


Рис. 2. Распределение продольной скорости в ЛАЭЛ на его ось в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

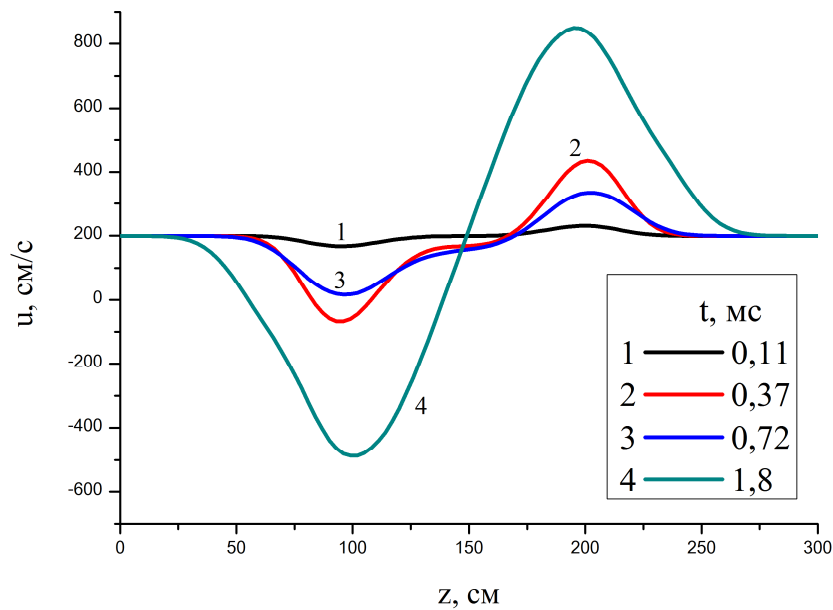


Рис. 3. Распределение продольной скорости на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

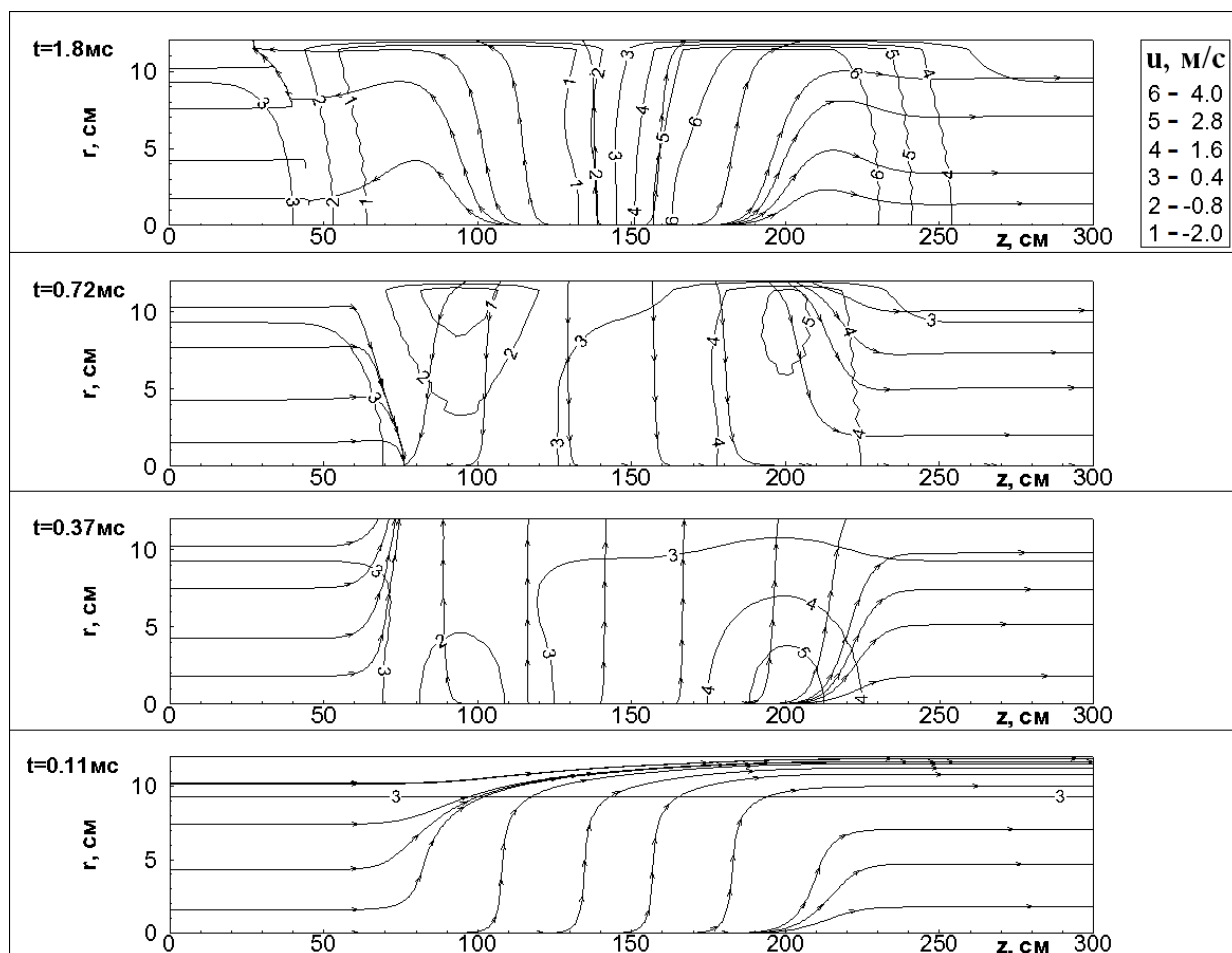


Рис. 4. Распределение продольной скорости в ЛАЭЛ на его ось в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

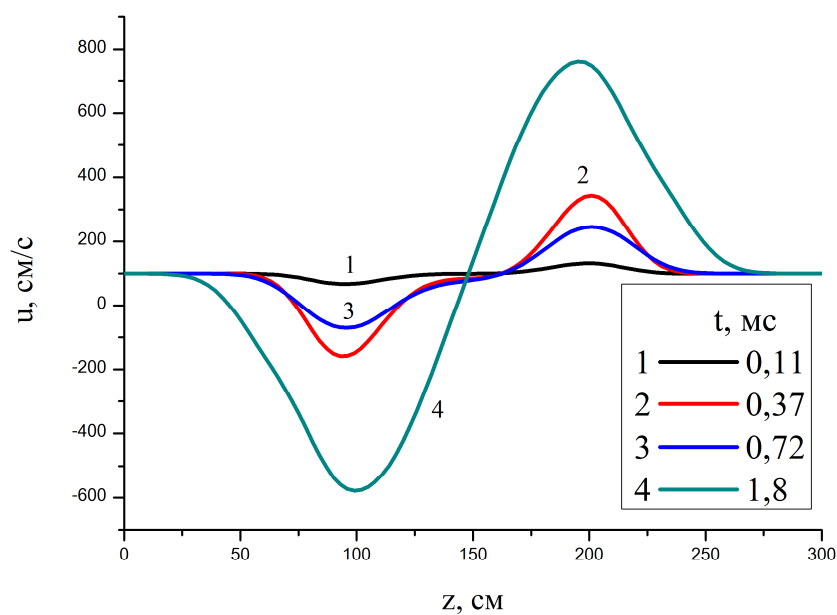


Рис. 5. Распределение продольной скорости на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

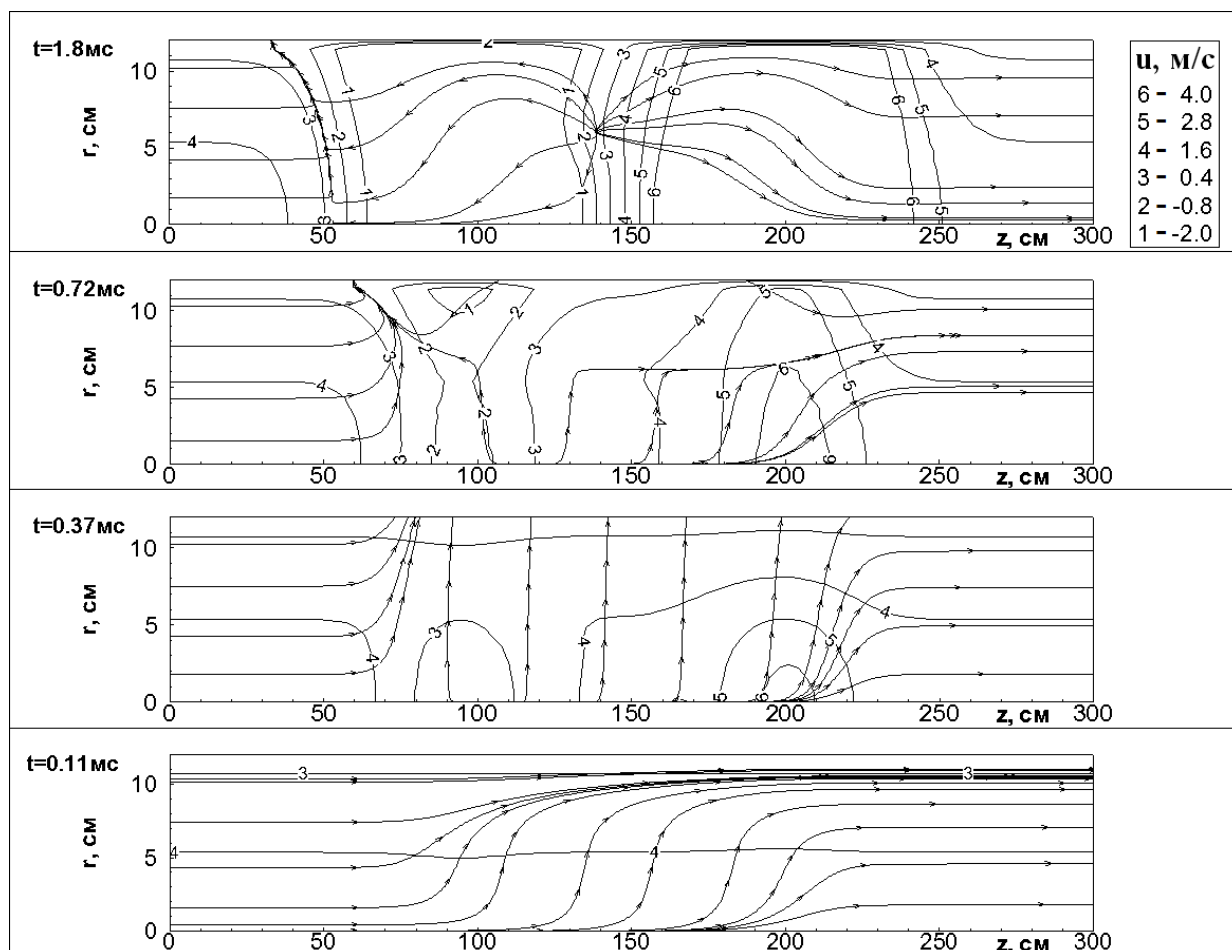


Рис. 6. Распределение продольной скорости в ЛАЭЛ на его ось в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

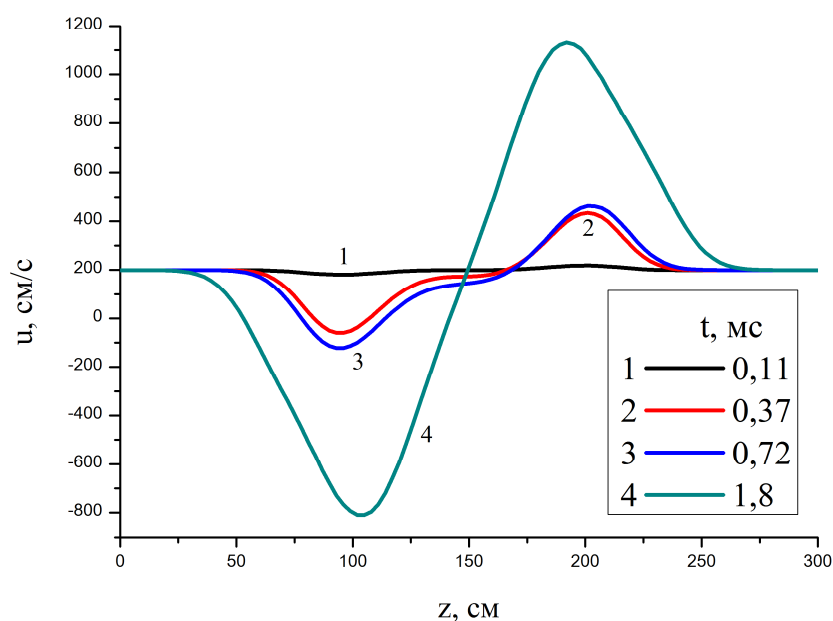


Рис. 7. Распределение продольной скорости на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

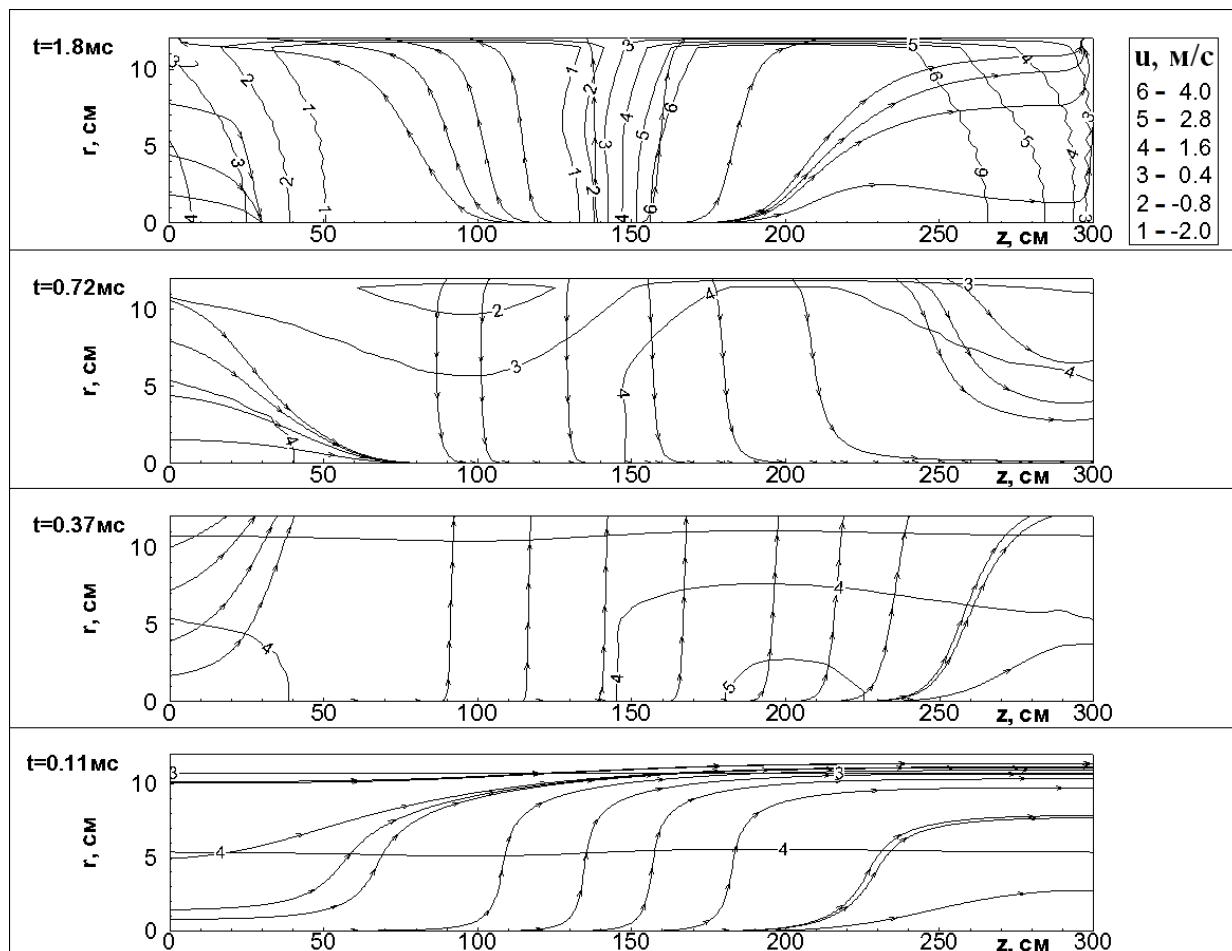


Рис. 8. Распределение продольной скорости в ЛАЭЛ на его ось в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

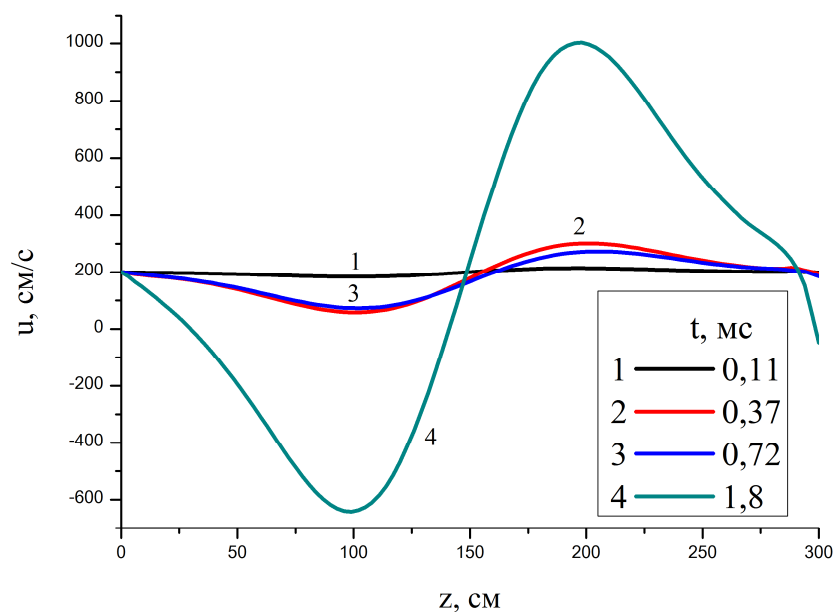


Рис. 9. Распределение продольной скорости на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

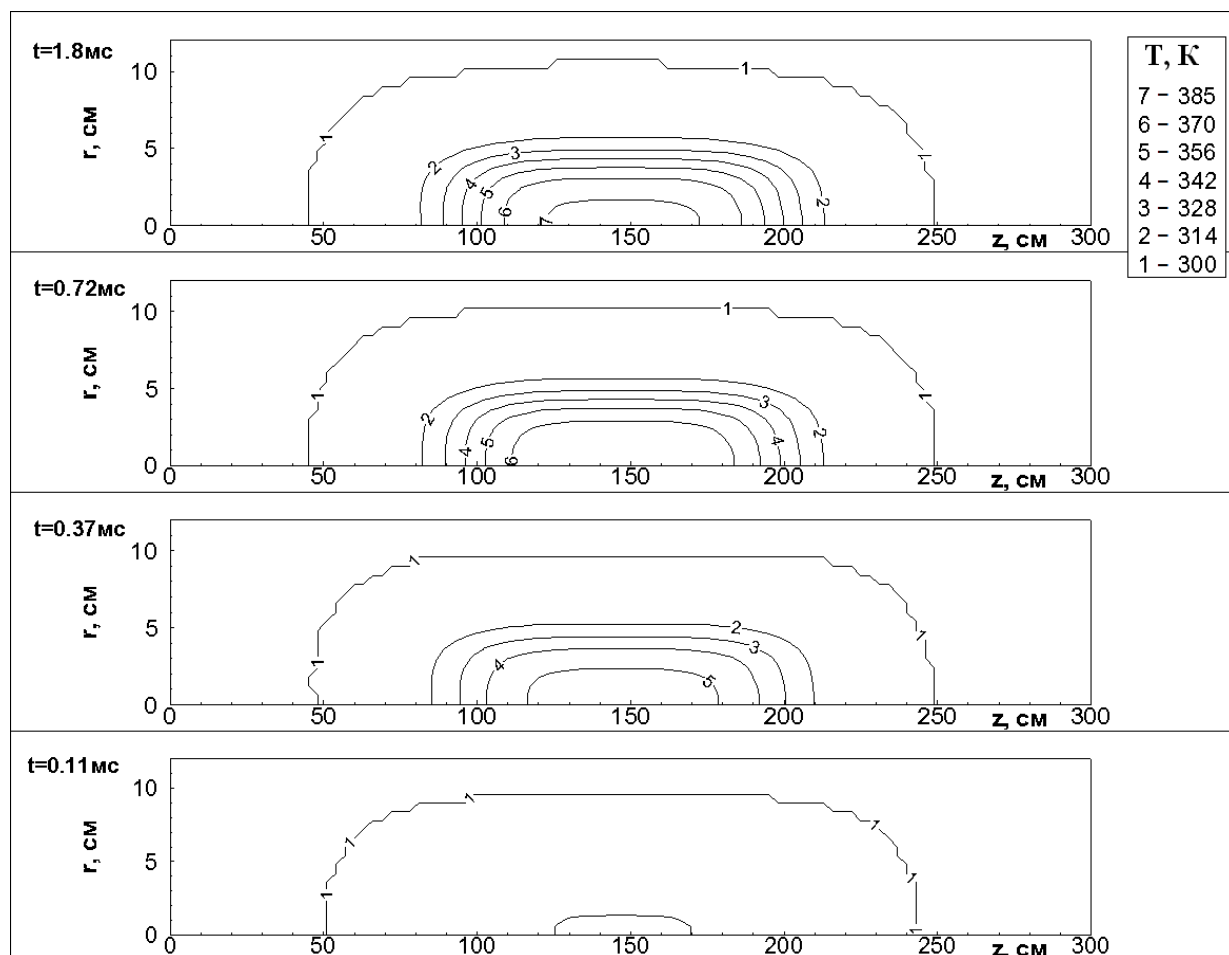


Рис. 10. Распределение температуры в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

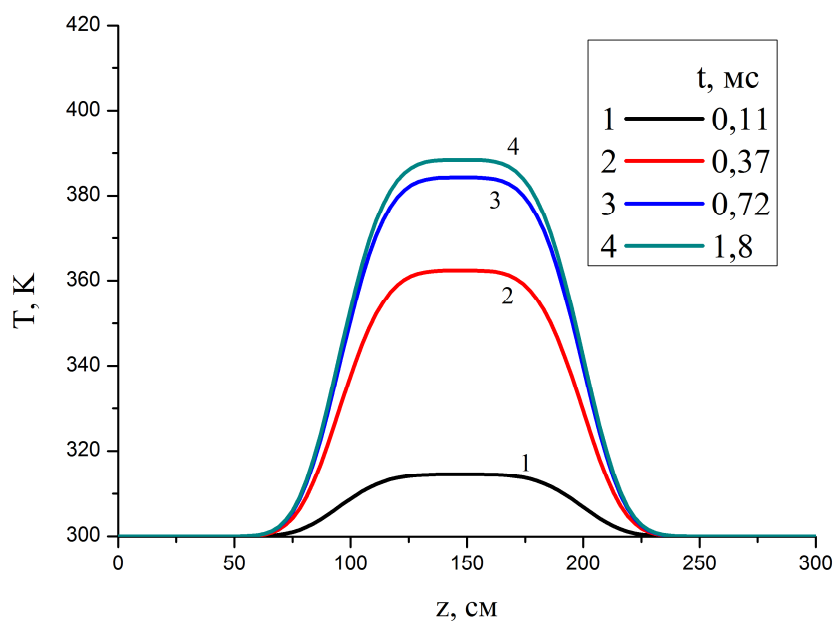


Рис. 11. Распределение температуры на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

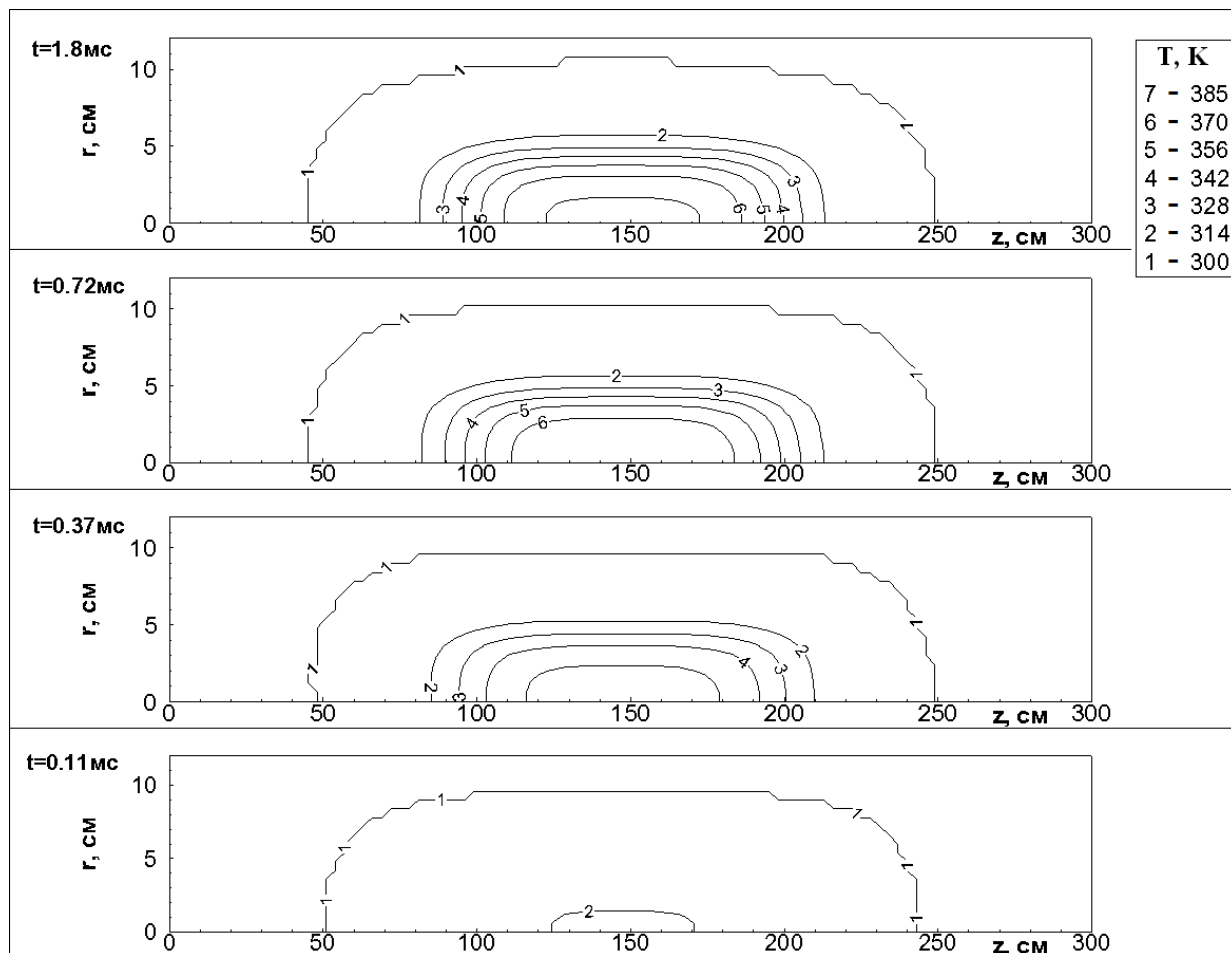


Рис. 12. Распределение температуры в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

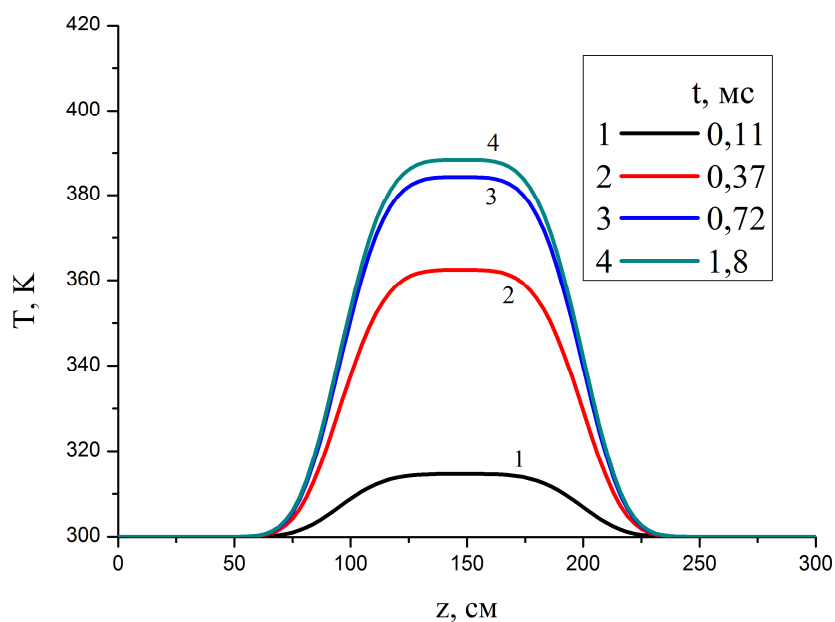


Рис. 13. Распределение температуры на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

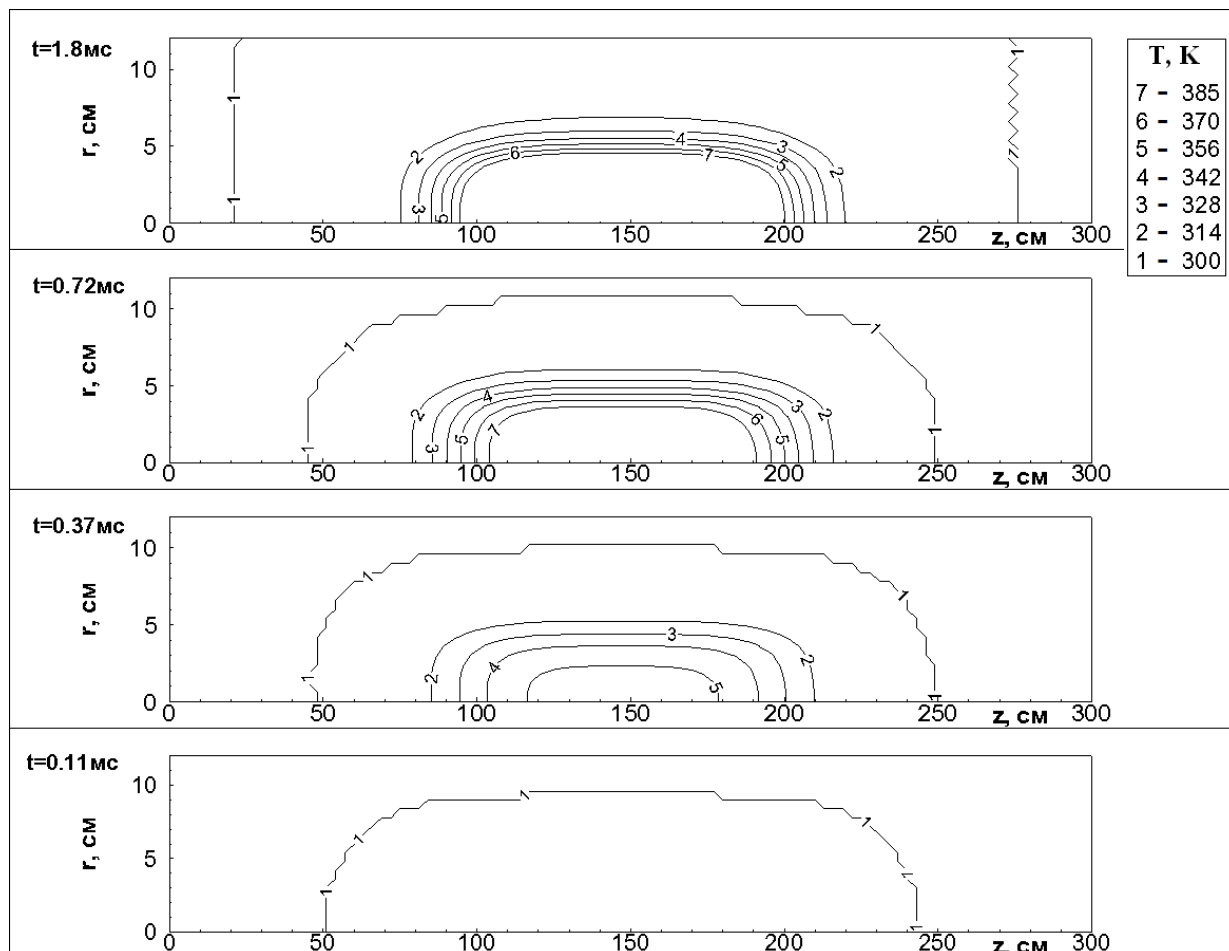


Рис. 14 Распределение температуры в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

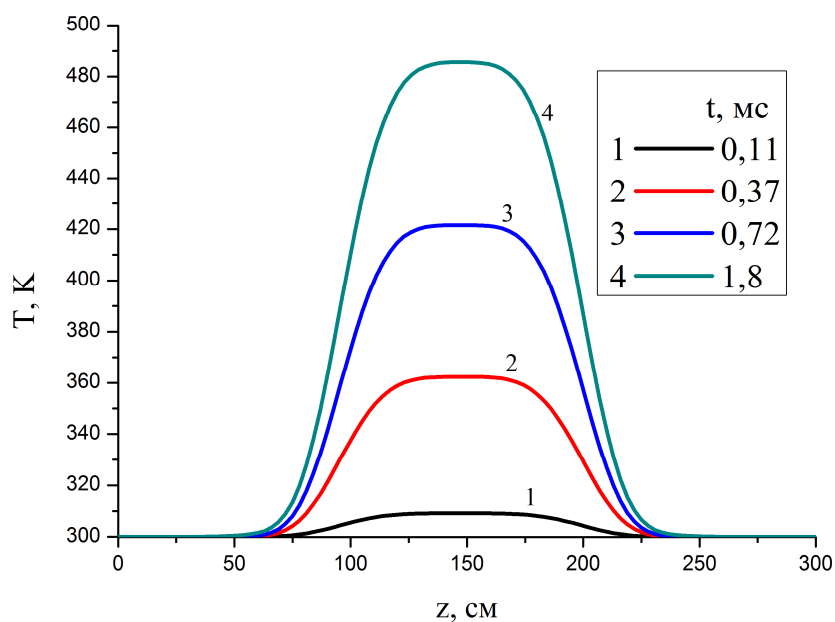


Рис. 15. Распределение температуры на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

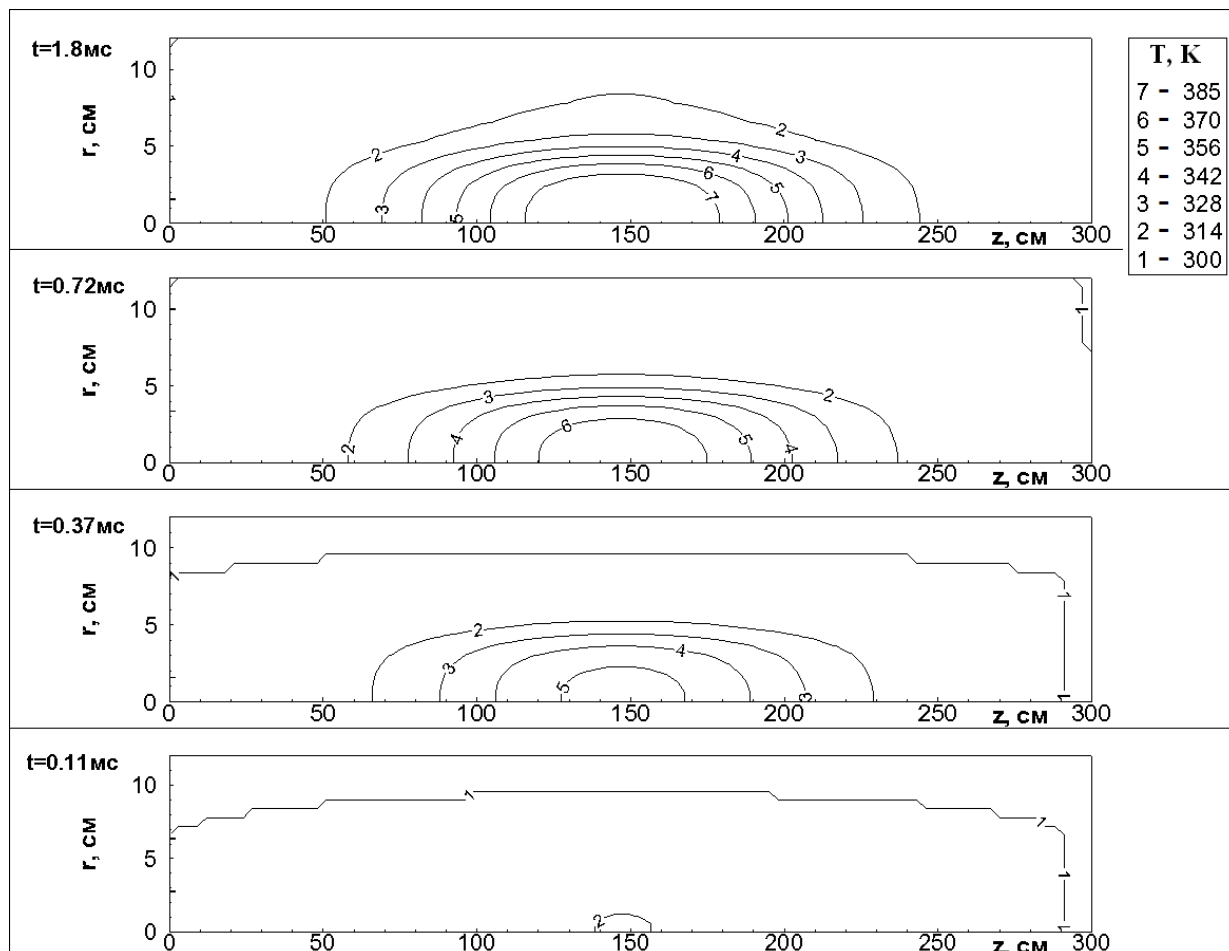


Рис. 16. Распределение температуры в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

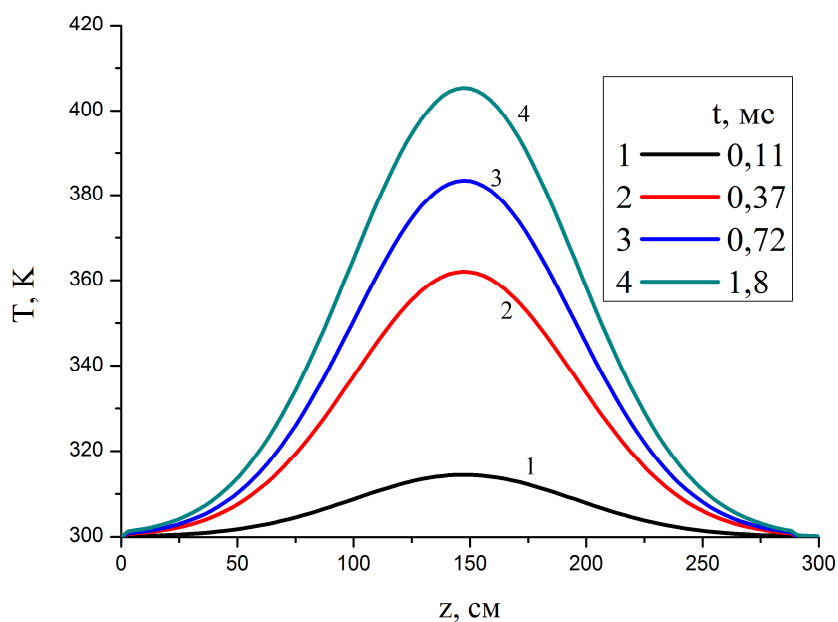


Рис. 17. Распределение температуры на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

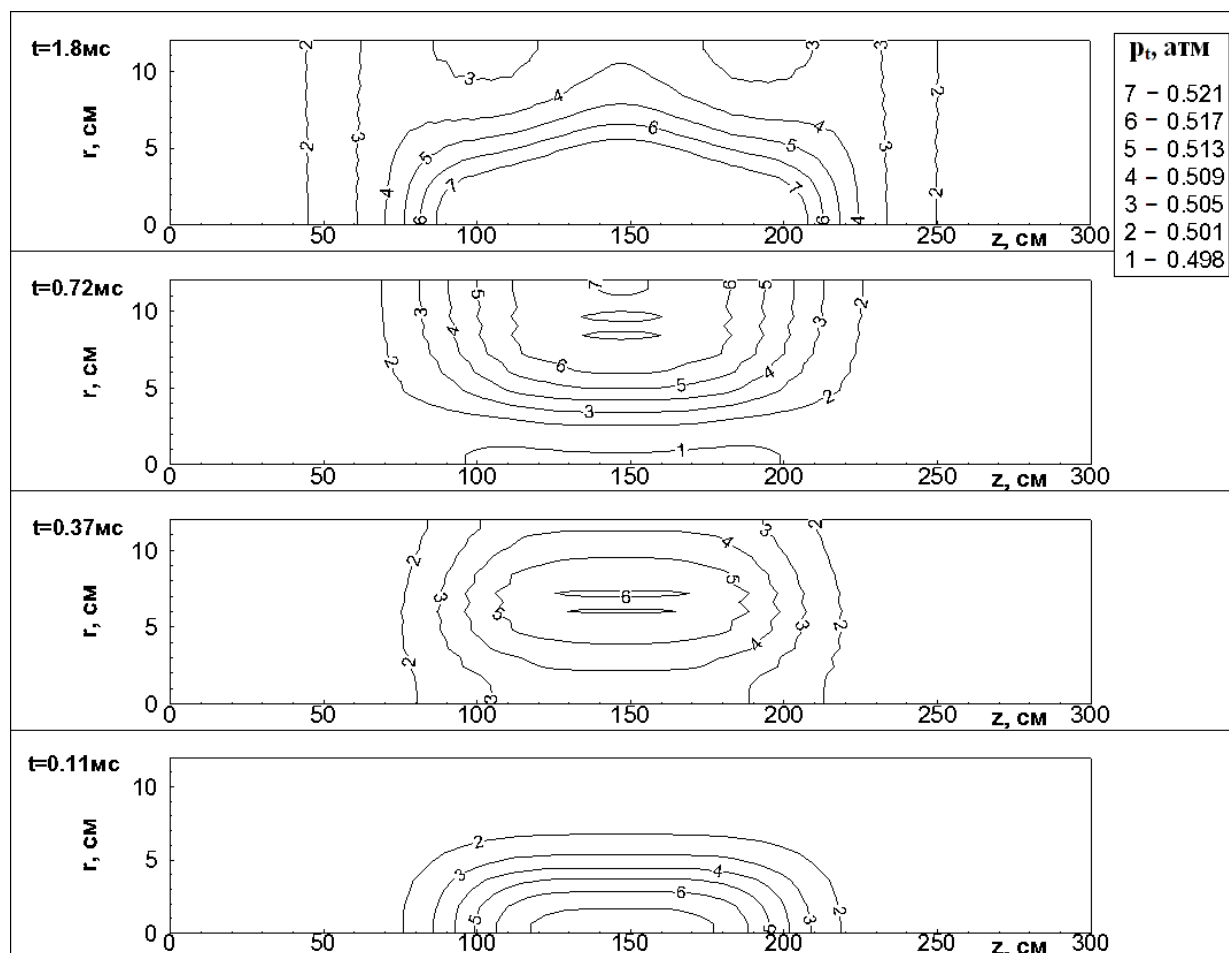


Рис. 18. Распределение давления в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

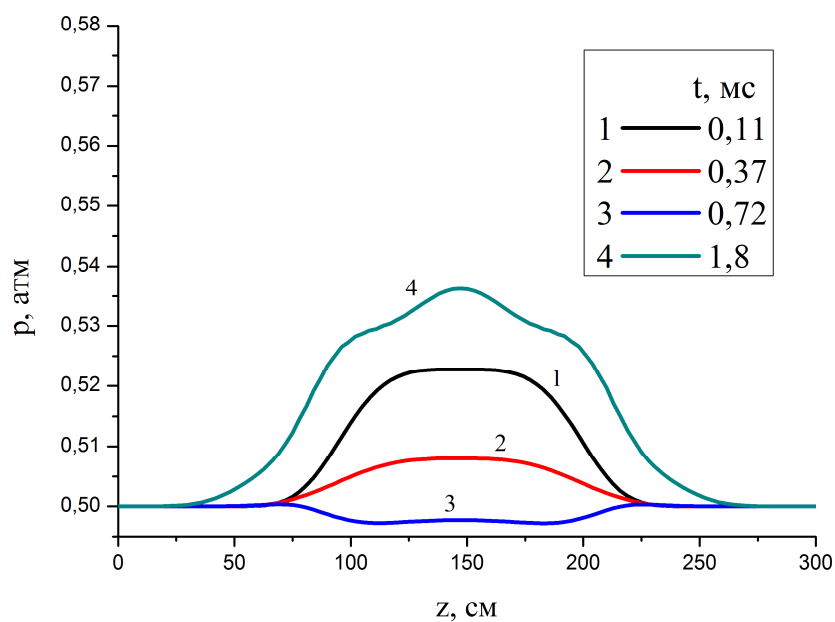


Рис. 19. Распределение давления на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

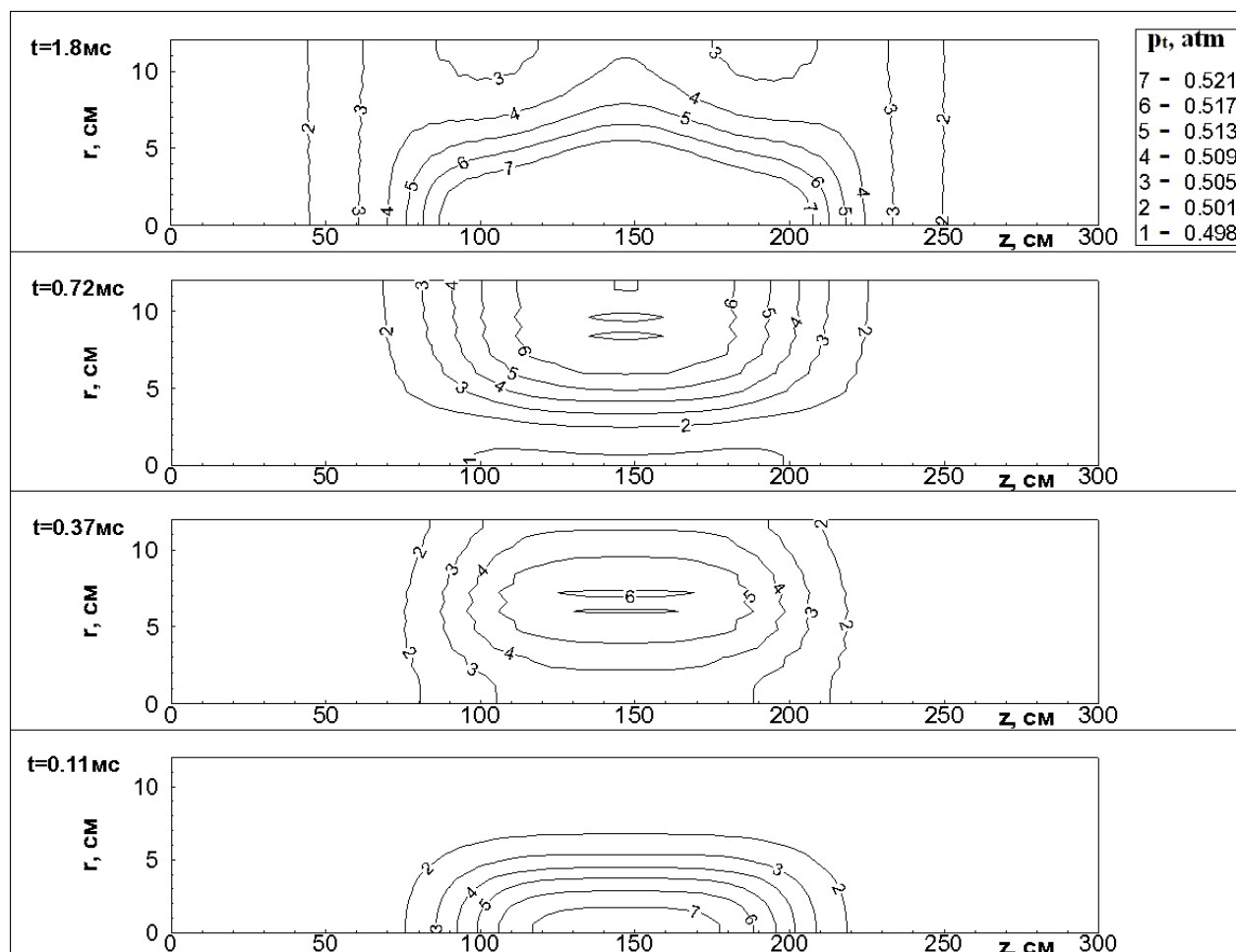


Рис. 20. Распределение давления в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

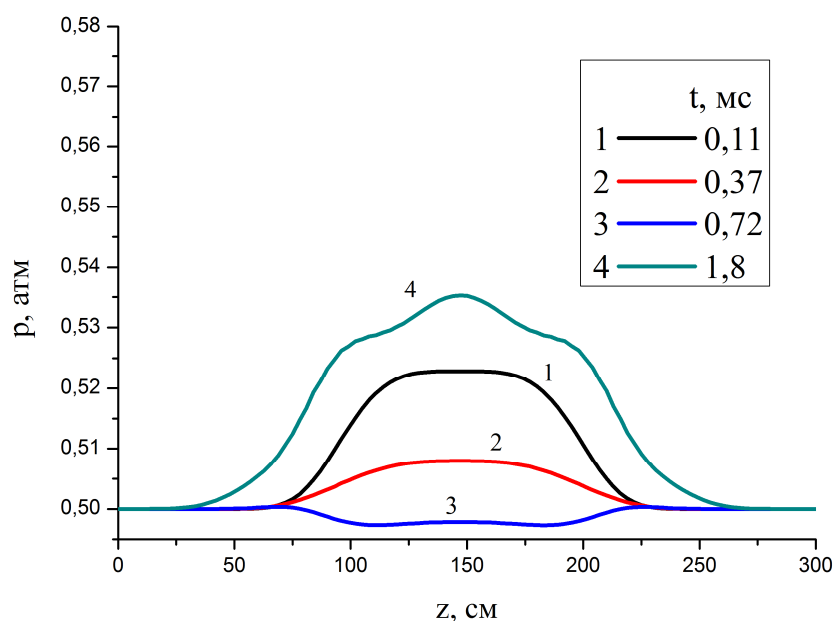


Рис. 21. Распределение давления на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

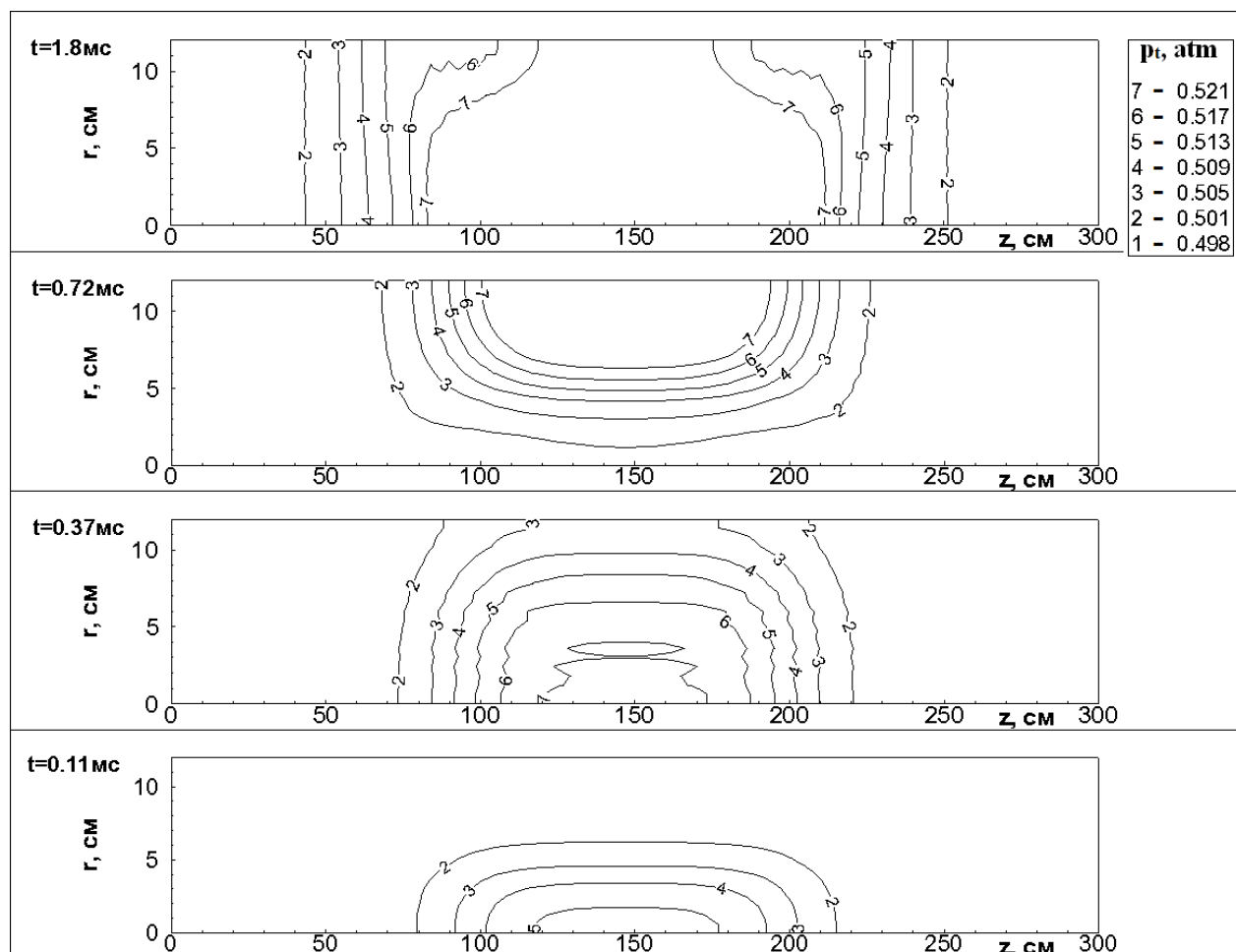


Рис. 22. Распределение давления в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

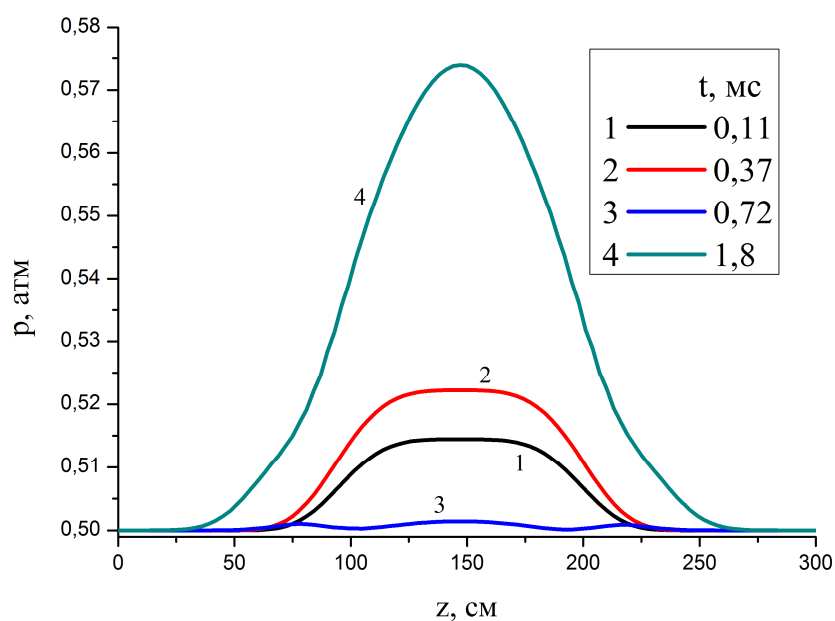


Рис. 23. Распределение давления на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

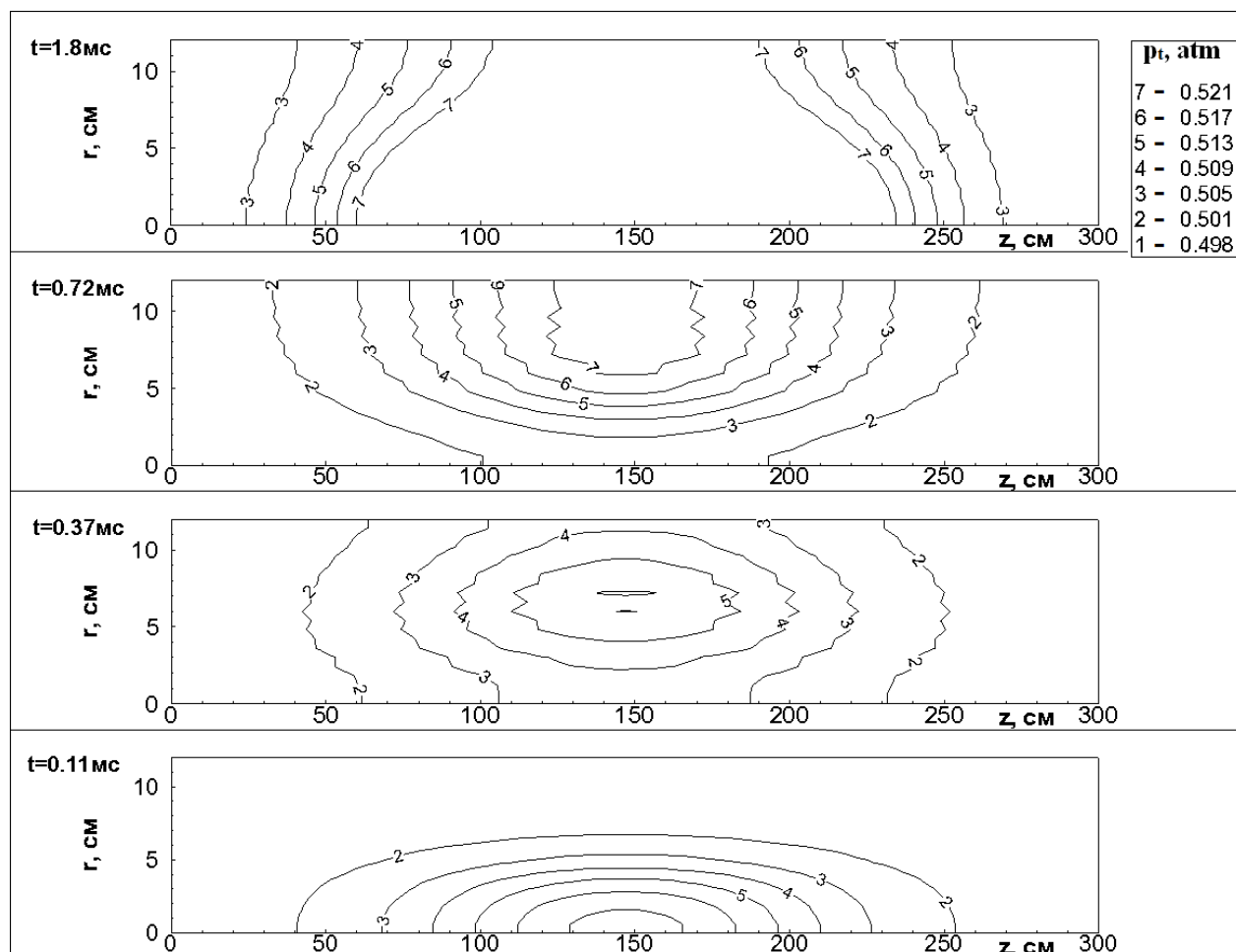


Рис. 24. Распределение давления в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

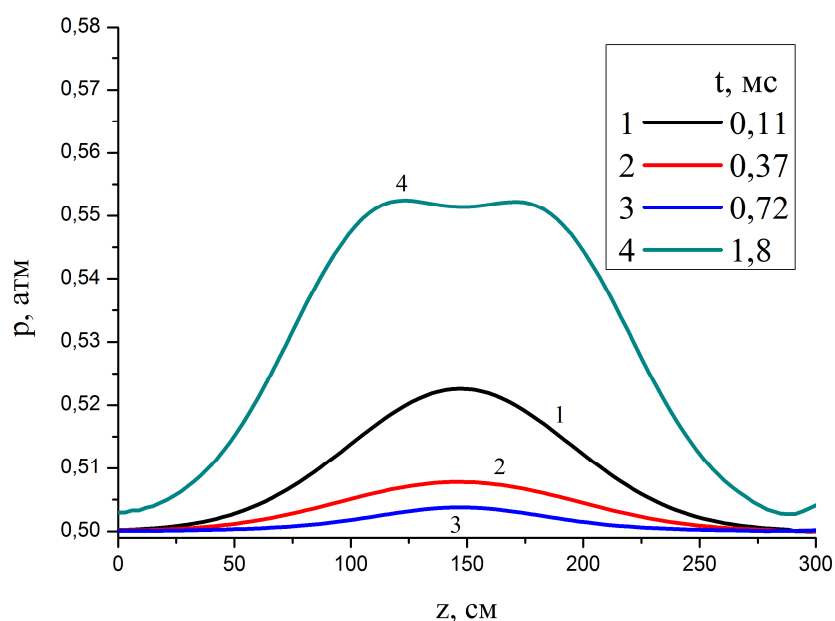


Рис. 25. Распределение давления на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

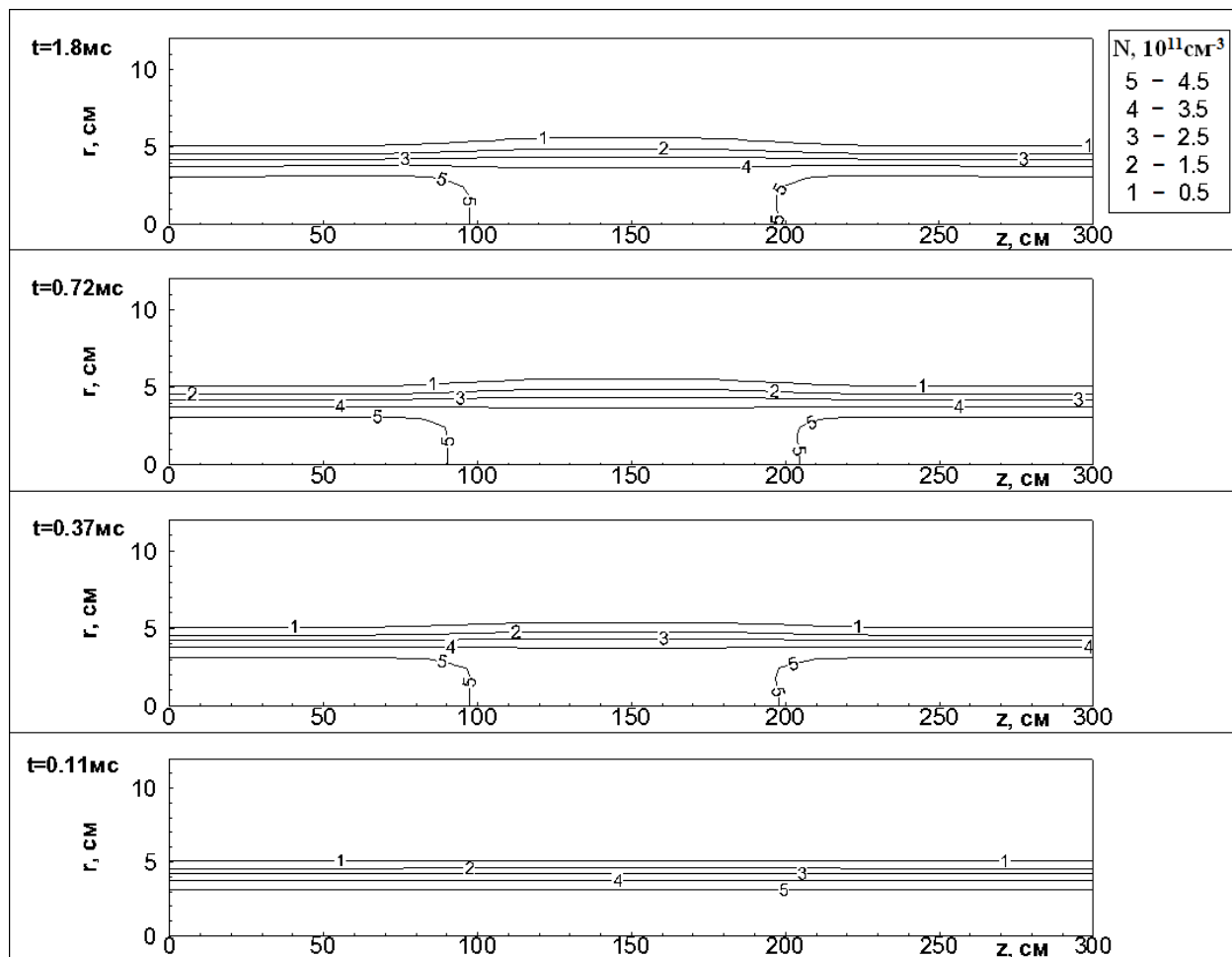


Рис. 26. Распределение концентрации наночастиц урана в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

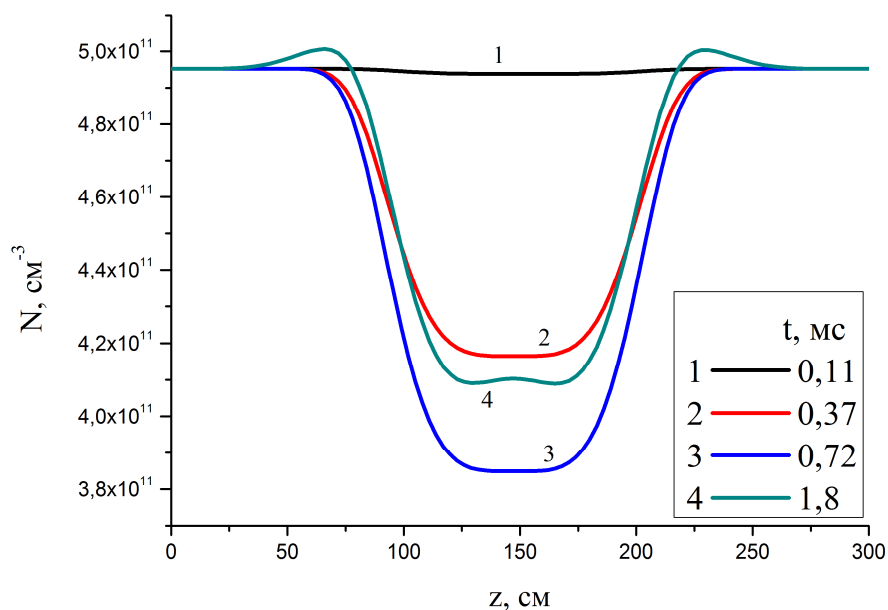


Рис. 27. Распределение концентрации наночастиц урана на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

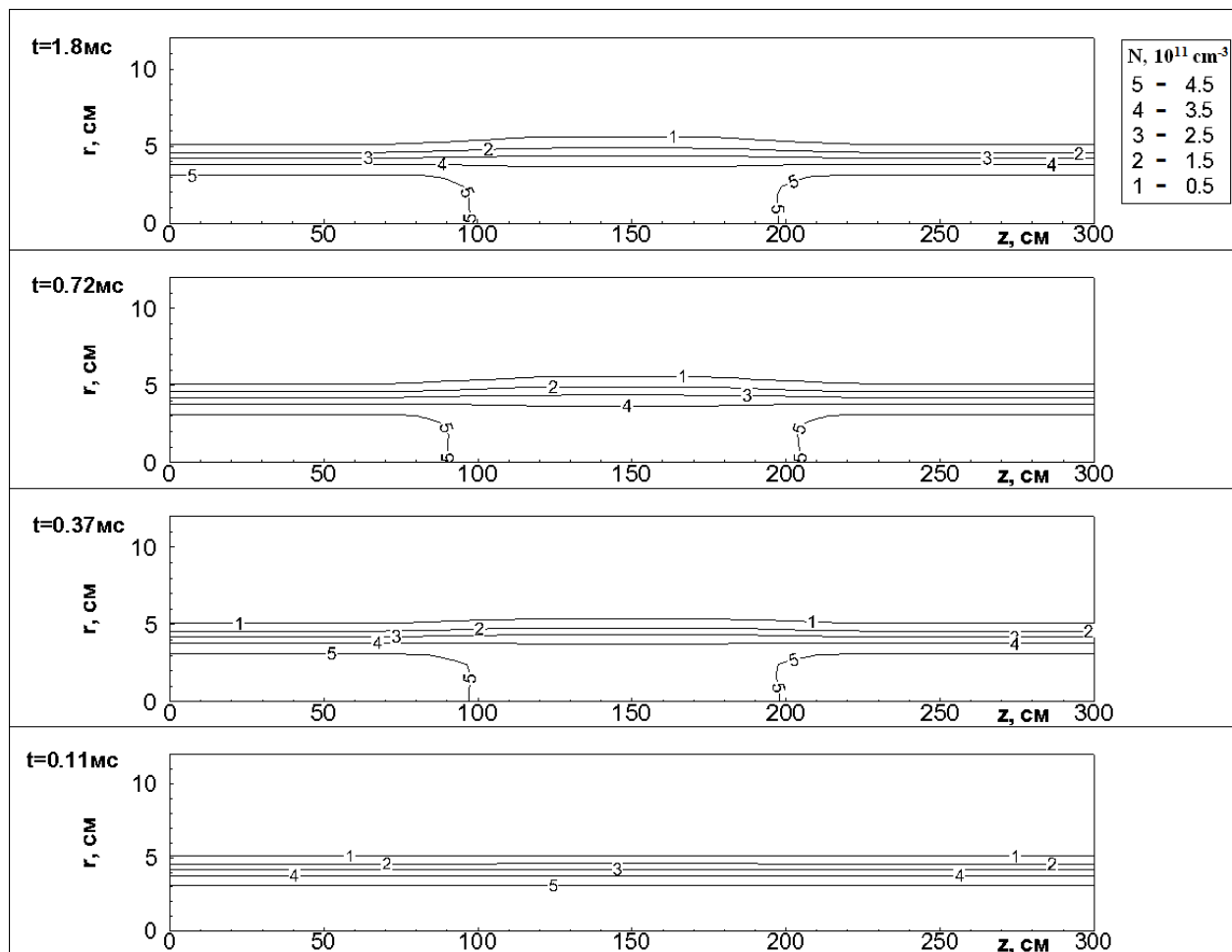


Рис. 28. Распределение концентрации наночастиц урана в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

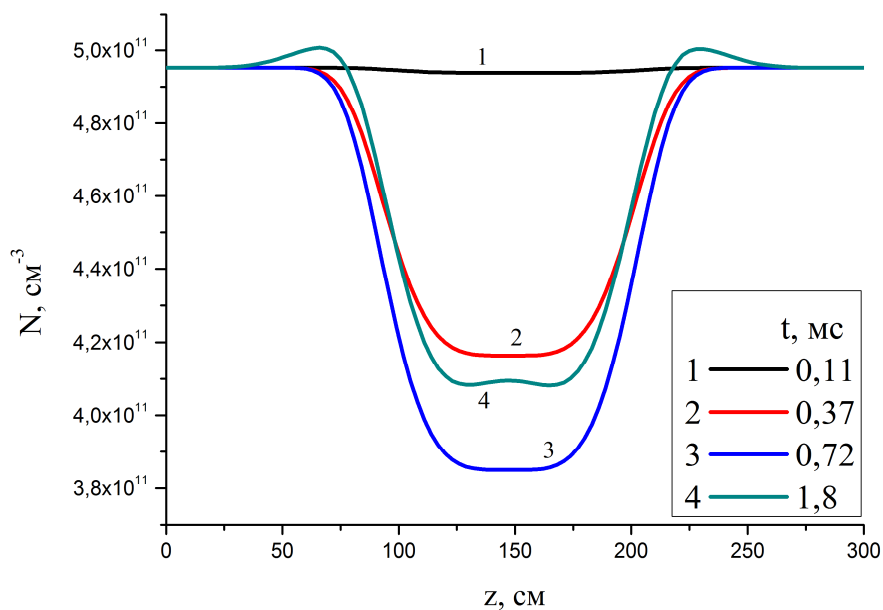


Рис. 29. Распределение концентрации наночастиц урана на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

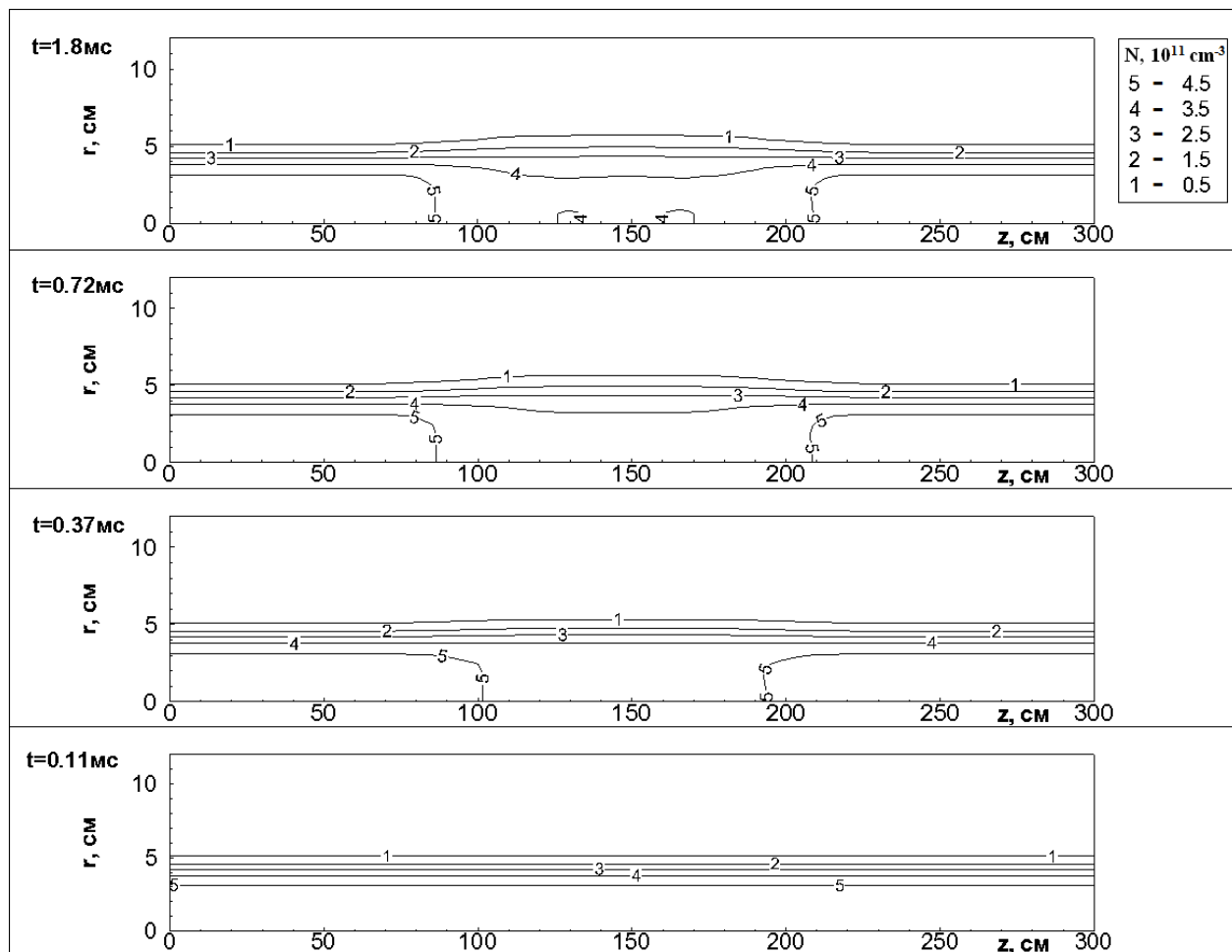


Рис. 30. Распределение концентрации наночастиц урана в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

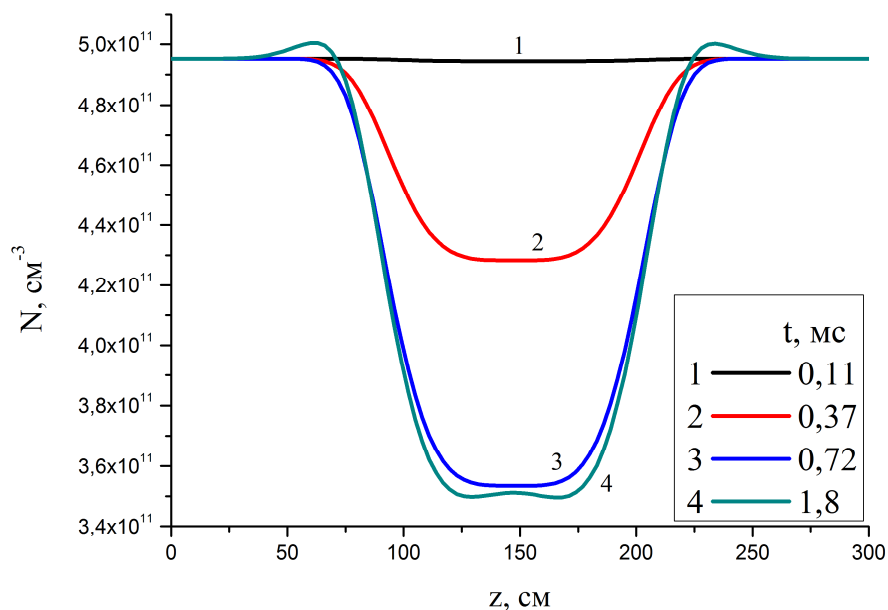


Рис. 31. Распределение концентрации наночастиц урана на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

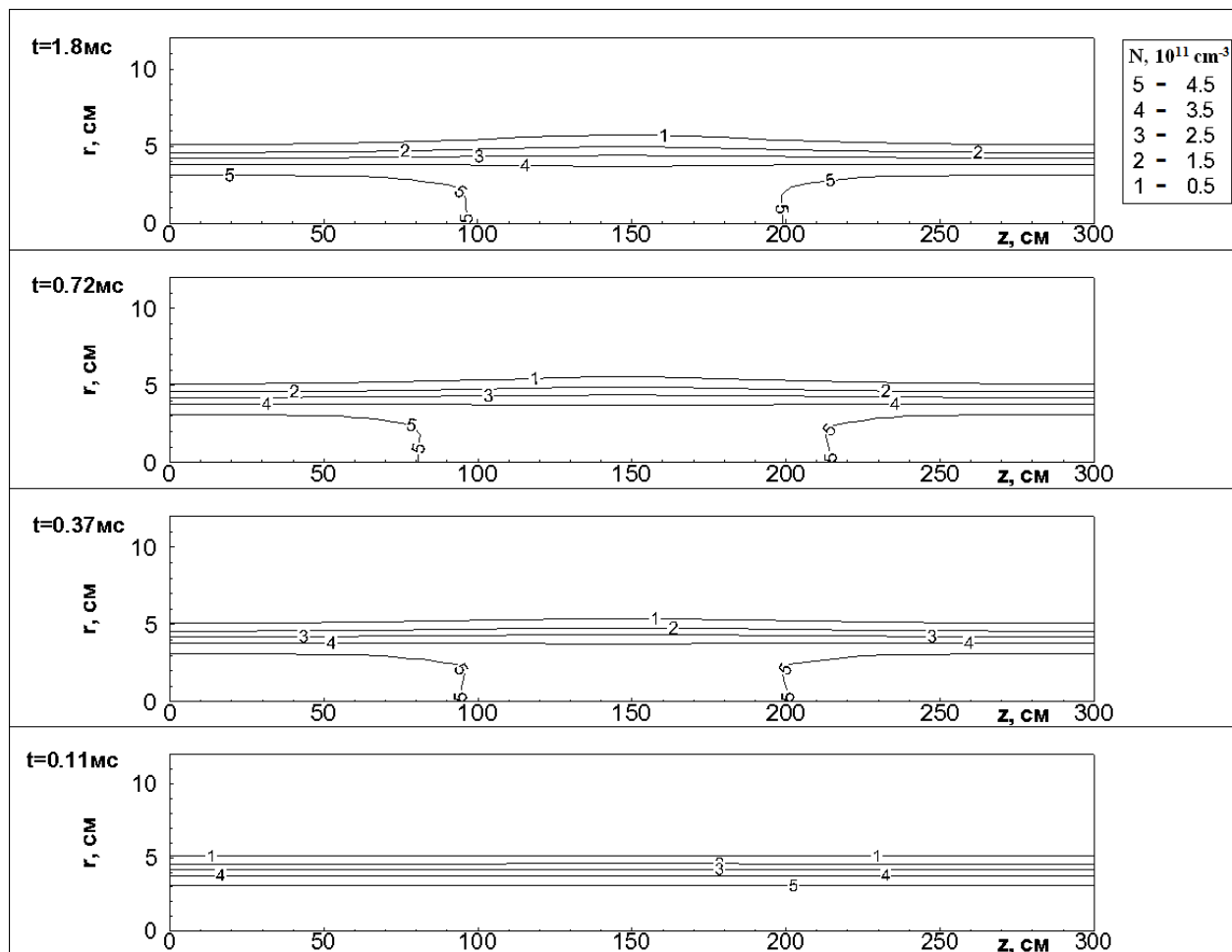


Рис. 32. Распределение концентрации наночастиц урана в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

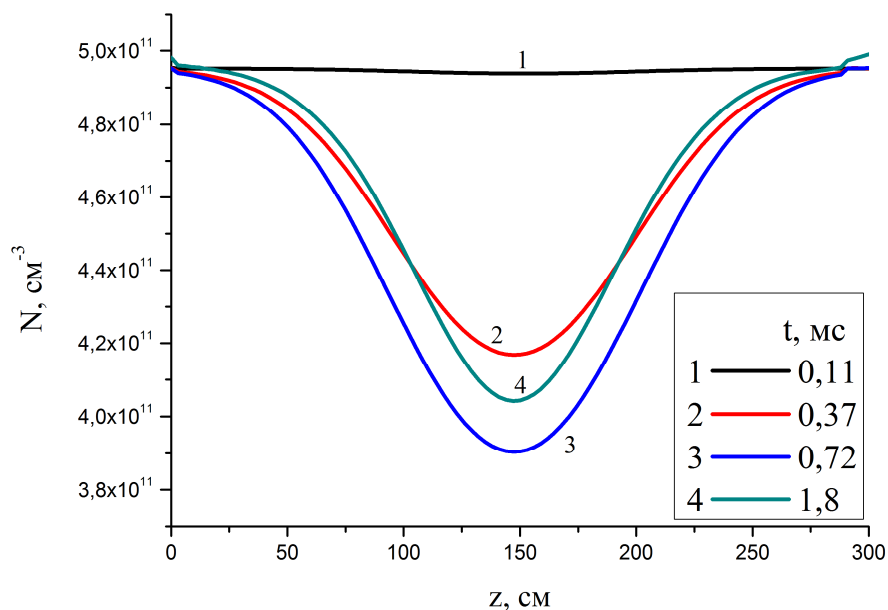


Рис. 33. Распределение концентрации наночастиц урана на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

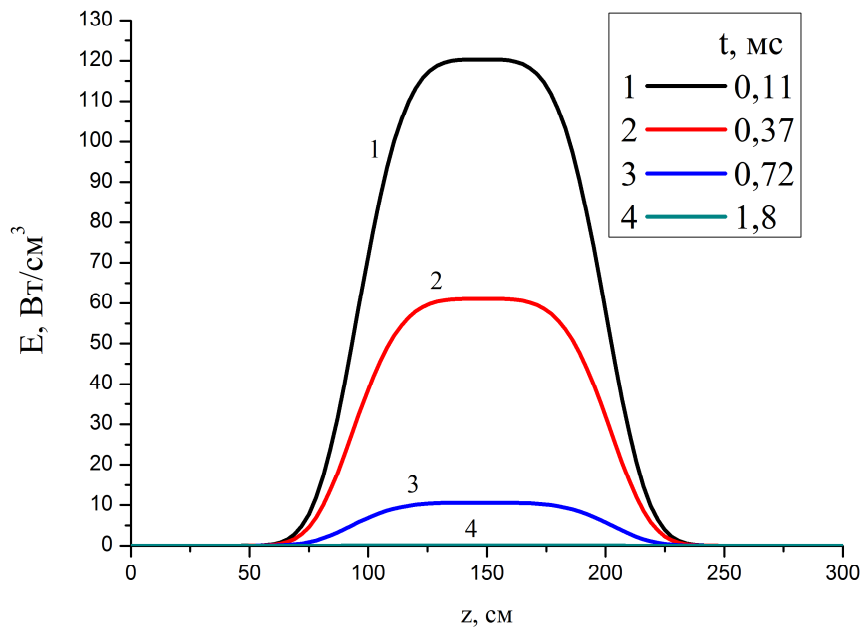


Рис. 34. Распределение энергосвечения на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

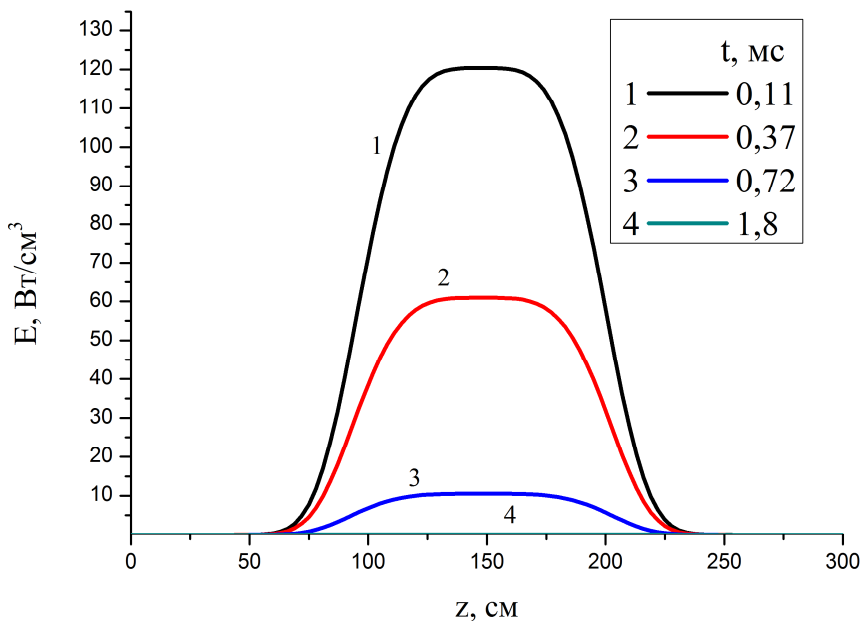


Рис. 35. Распределение энергосвечения на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

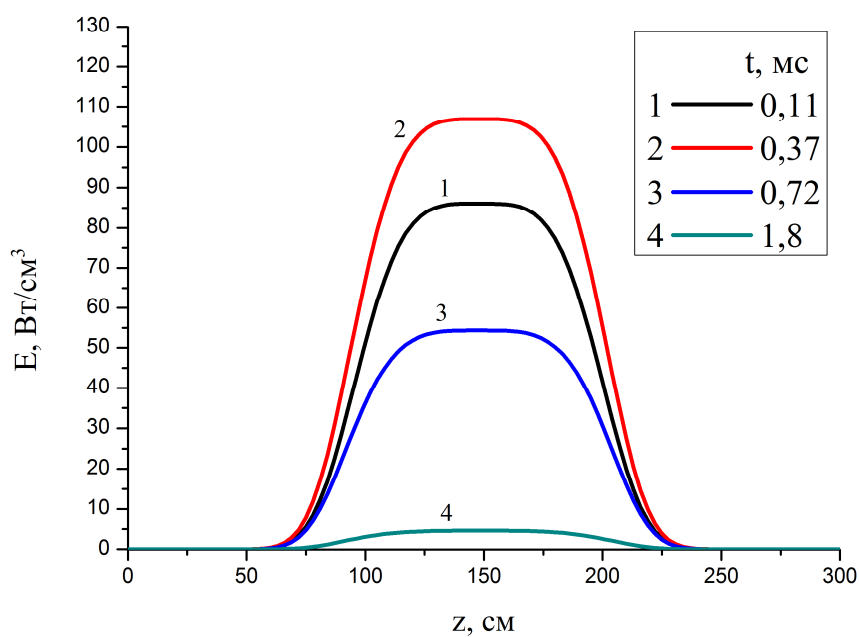


Рис. 36. Распределение энергосвечения на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

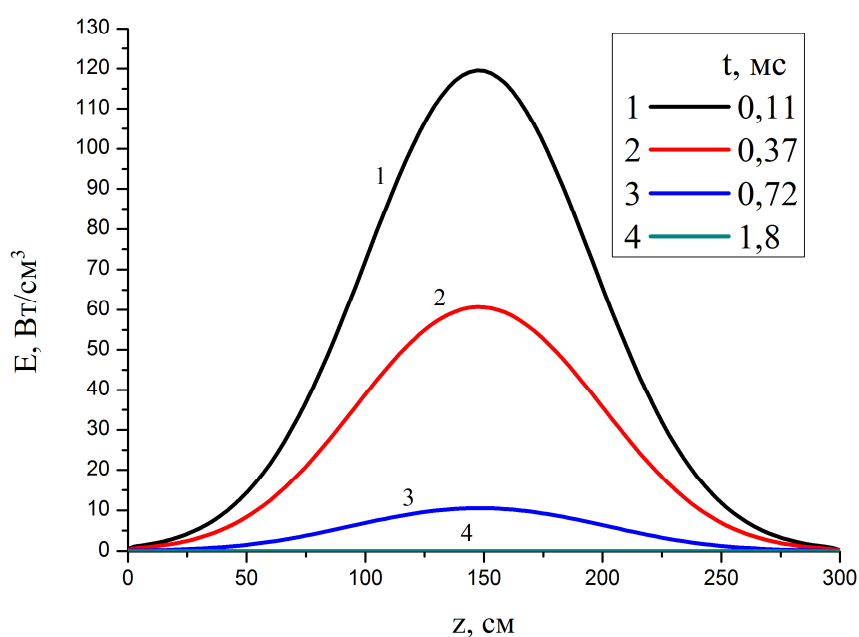


Рис. 37. Распределение энергосвечения на оси ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

Результаты расчёта коэффициента линейного усиления ЛИ средой

Важной характеристикой лазерно-активной среды является линейный коэффициент усиления ЛИ. Используя модель кинетических процессов в аргон-ксеноновой плазме, содержащей наночастицы урана, возможно определить ненасыщенный линейный коэффициент усиления ЛИ.

В ходе работы были рассчитаны квазистационарные значения линейного коэффициента усиления ЛИ на длине волны 1,73 мкм при концентрации наночастиц урана в диапазоне от $0,125 \cdot 10^{11}$ до 10^{12} см^{-3} , давлении газа в ЛАЭЛ от 0,5 до 0,6 атм и при удельной мощности энерговыклада от 23 до 277 Вт/см^3 .

В таблице 1 представлены типичные результаты расчёта квазистационарных значений линейного коэффициента усиления ЛИ α газовой средой на длине волны 1,73 мкм в зависимости от концентрации наночастиц урана в лазерно-активной аргон-ксеноновой газовой среде при удельной мощности энерговыклада 230 Вт/см^3 , температуре $T=300 \text{ К}$ при различном давлении газа в ЛАЭЛ.

ТАБЛИЦА 1. Линейные коэффициенты усиления (α) и ослабления (β) газовой средой излучения в зависимости от концентрации наночастиц N и давления газа, а также полный коэффициент усиления среды k при температуре $T=300 \text{ К}$ и удельной мощности энерговыклада 230 Вт/см^3

Р, атм	$N, 10^{10} \text{ см}^{-3}$	$\alpha, 10^{-2} \text{ см}^{-1}$	$\beta, 10^{-3} \text{ см}^{-1}$	$k, 10^{-2} \text{ см}^{-1}$
0,5	100	4,4	2,1	4,2
	50	4,5	1,09	4,4
	25	4,5	0,5	4,5
	12,5	4,6	0,2	4,5
	10	4,6	0,2	4,6
	5	4,6	0,109	4,6
	2,5	4,6	0,05	4,6
	1,25	4,6	0,02	4,6
0,6	100	4,3	2,1	4,1
	50	4,4	1,09	4,3
	25	4,4	0,5	4,4
	12,5	4,5	0,2	4,4
	10	4,5	0,2	4,5
	5	4,5	0,109	4,5
	2,5	4,5	0,05	4,5
	1,25	4,5	0,02	4,5

Коэффициент усиления ЛИ газовой среды рассчитан в пренебрежении ослаблением излучения наночастицами. Также в таблице представлены рассчитанные данные о зависимости коэффициента ослабления ЛИ β наночастицами

урана (радиус частиц 5 нм) от их концентрации для длины волны 1,73 мкм [2, 3, 5, 6] и значения полного коэффициента усиления среды.

На рис. 38–45 представлены результаты расчётов распределения полного коэффициента усиления среды k , а также радиальной зависимости коэффициента усиления интенсивности $K(z, r, t)$ ЛИ в различные моменты времени на выходе из ЛАЭЛ и при различных исходных параметрах среды: при начальных скоростях движения газовой смеси $u_{\max}=2$ м/с и $u_{\max}=1$ м/с, длительностях импульса $\tau_0=150$ мкс и $\tau_0=300$ мкс и параметрах $kg=2$, $kg=4$, определяющих форму распределения потока нейтронов.

На рис. 46–48 представлено сравнение радиальной зависимости коэффициента усиления интенсивности $K(z, r, t)$ ЛИ для рассматриваемых вариантов начальных параметров системы в моменты времени 0,11, 0,30 и 0,37 мс соответственно.

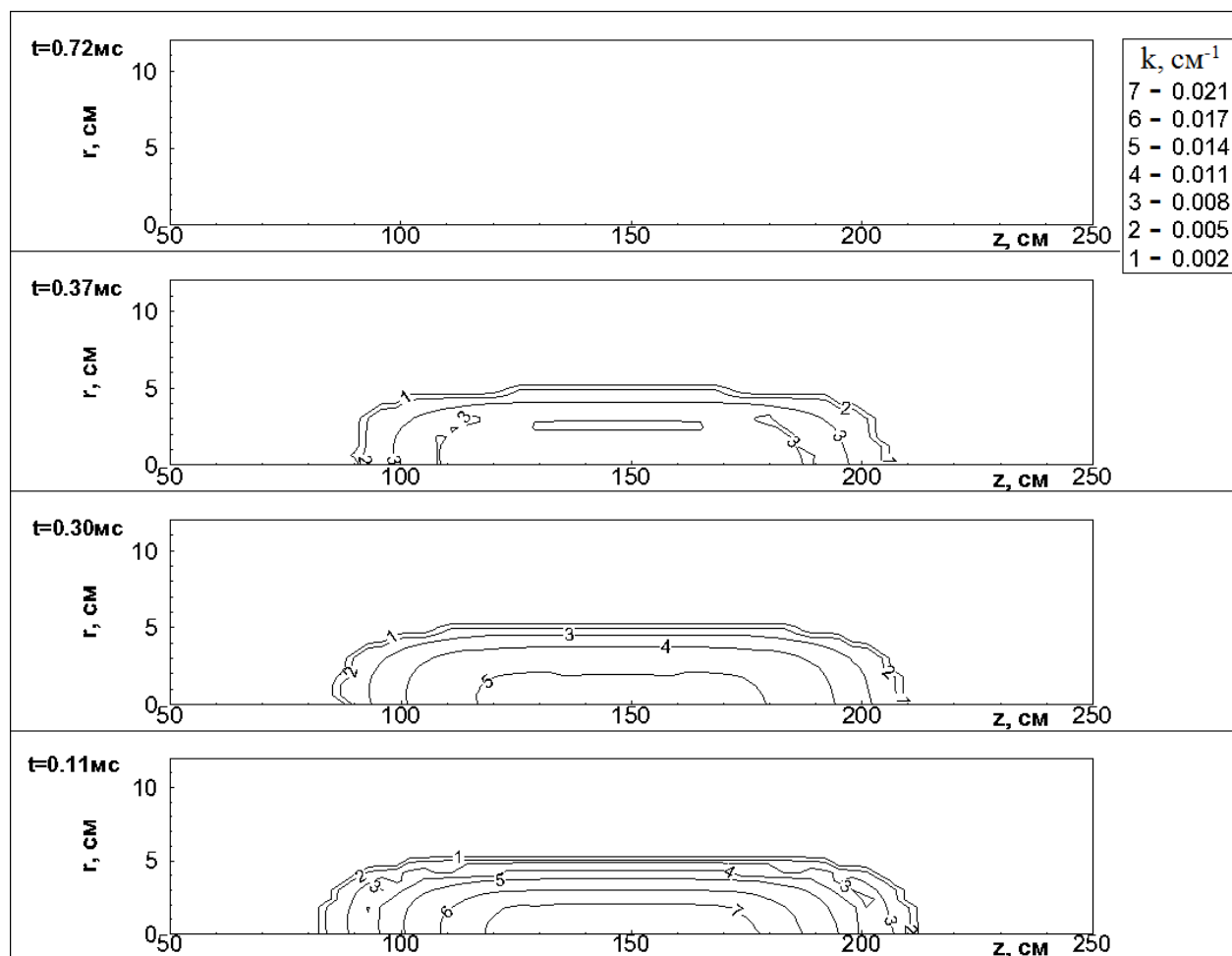


Рис. 38. Распределение полного коэффициента усиления среды в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

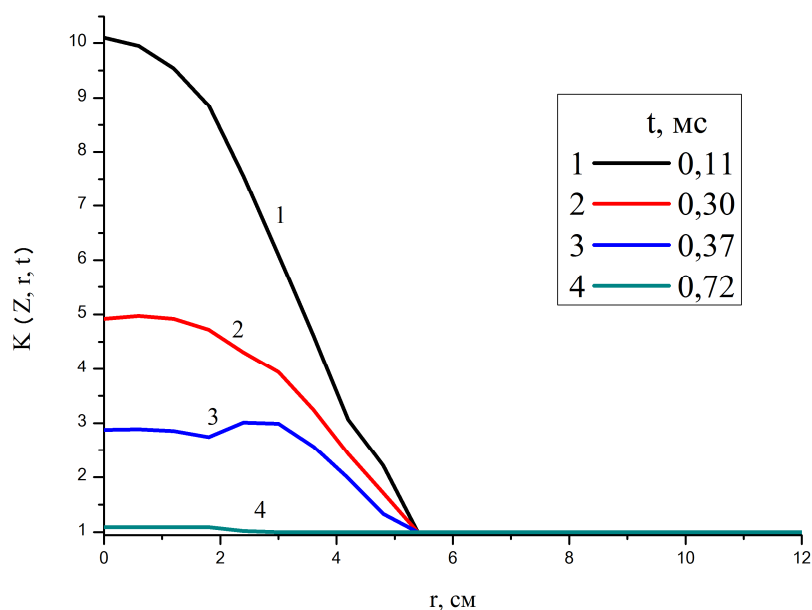


Рис. 39. Радиальная зависимость коэффициента усиления интенсивности ЛИ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

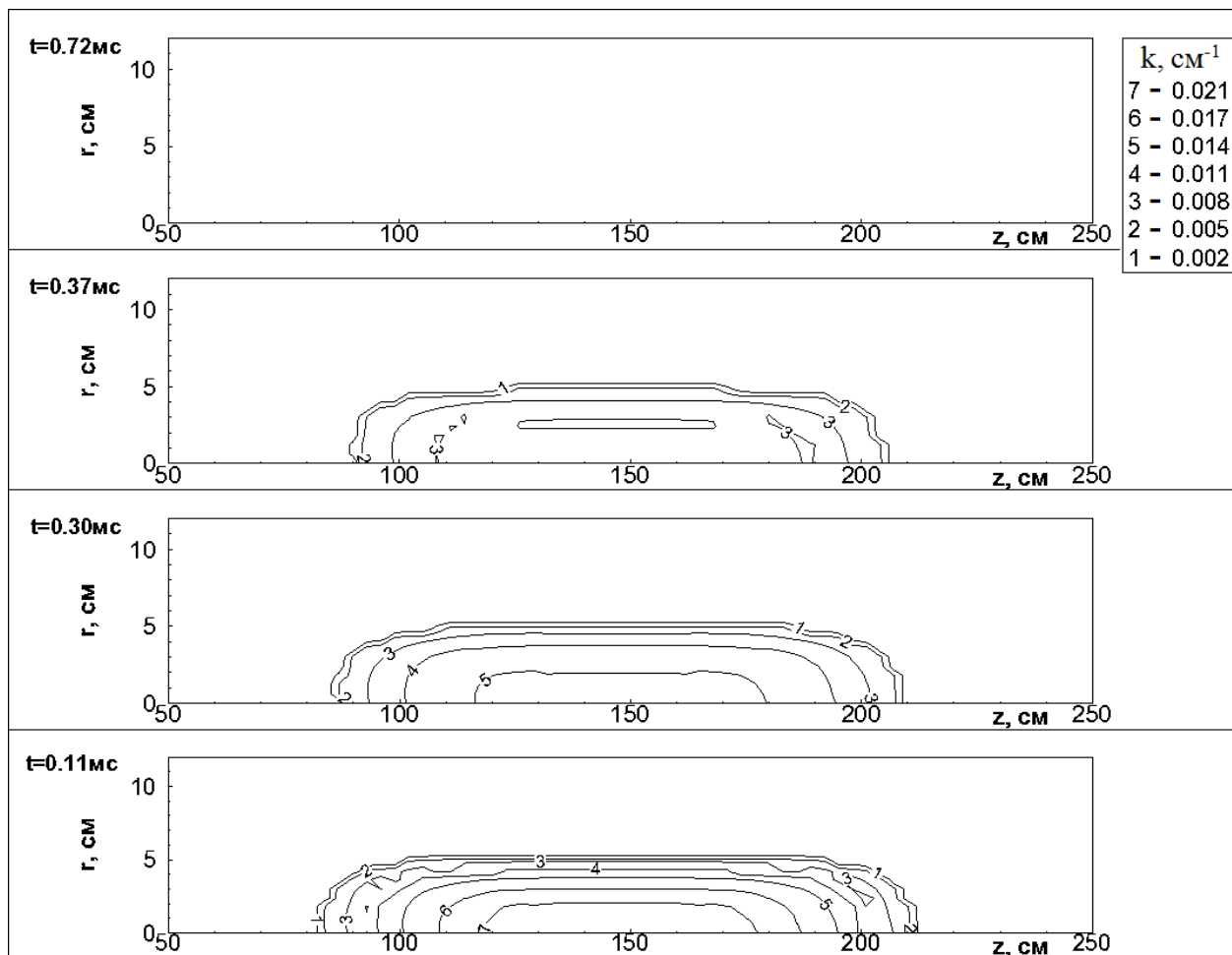


Рис. 40. Распределение полного коэффициента усиления среды в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

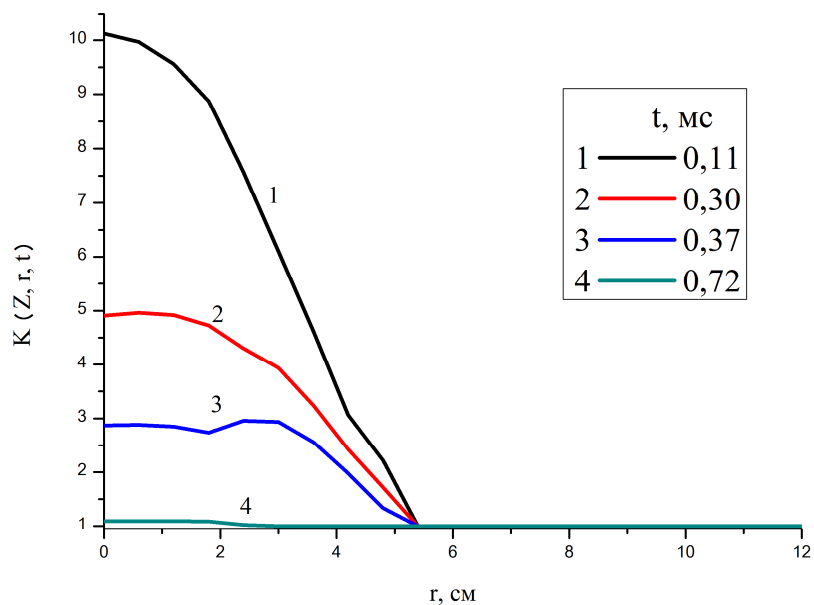


Рис. 41. Радиальная зависимость коэффициента усиления интенсивности ЛИ в различные моменты времени при начальной скорости движения 1 м/с, длительности импульса 150 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

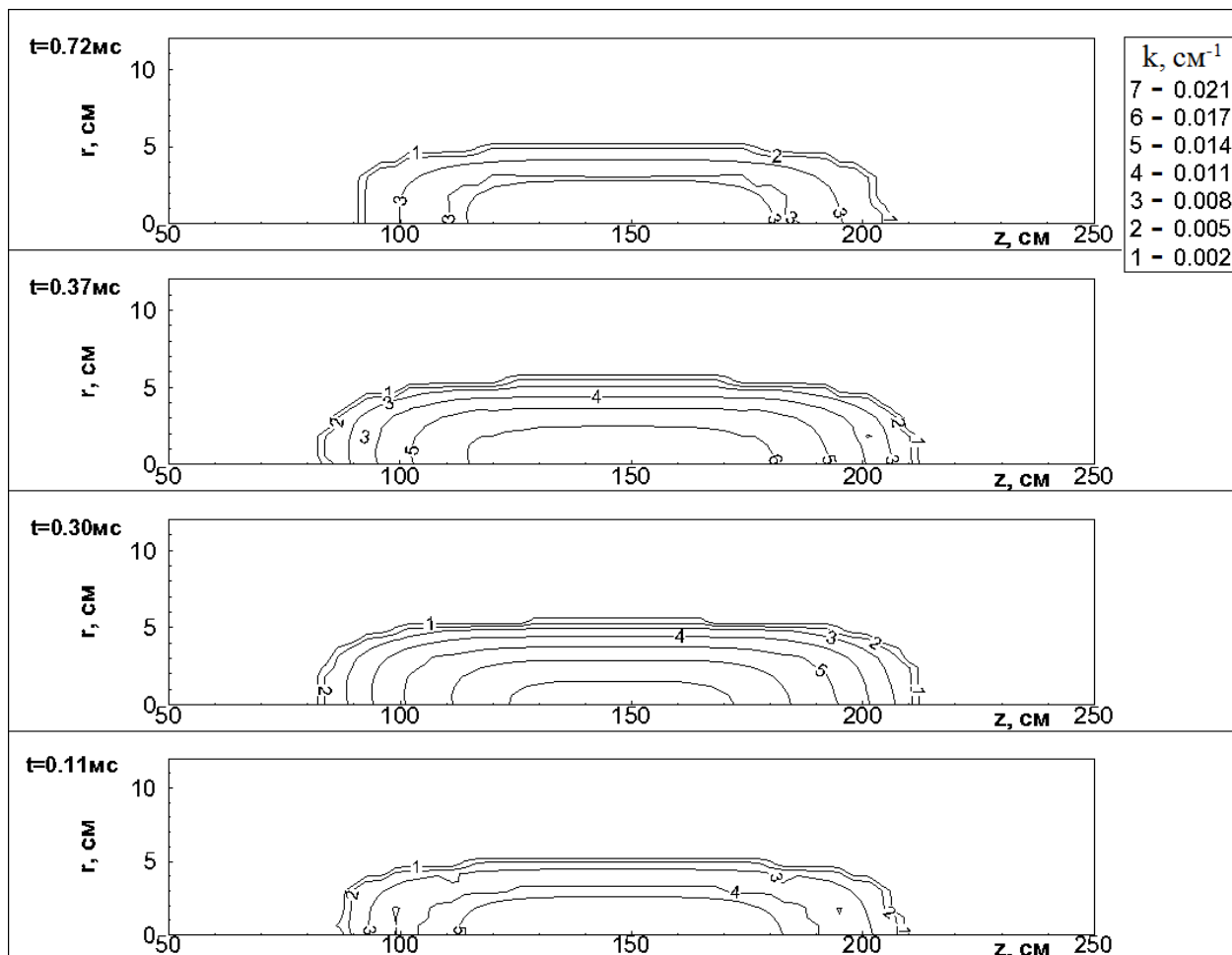


Рис. 42. Распределение полного коэффициента усиления среды в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

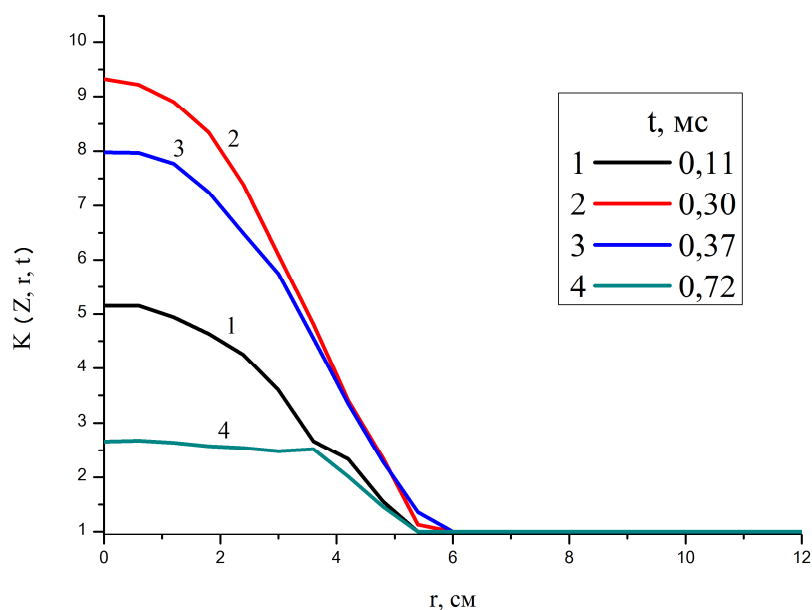


Рис. 43. Радиальная зависимость коэффициента усиления интенсивности ЛИ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 300 мкс и супергауссовом распределении нейтронного потока

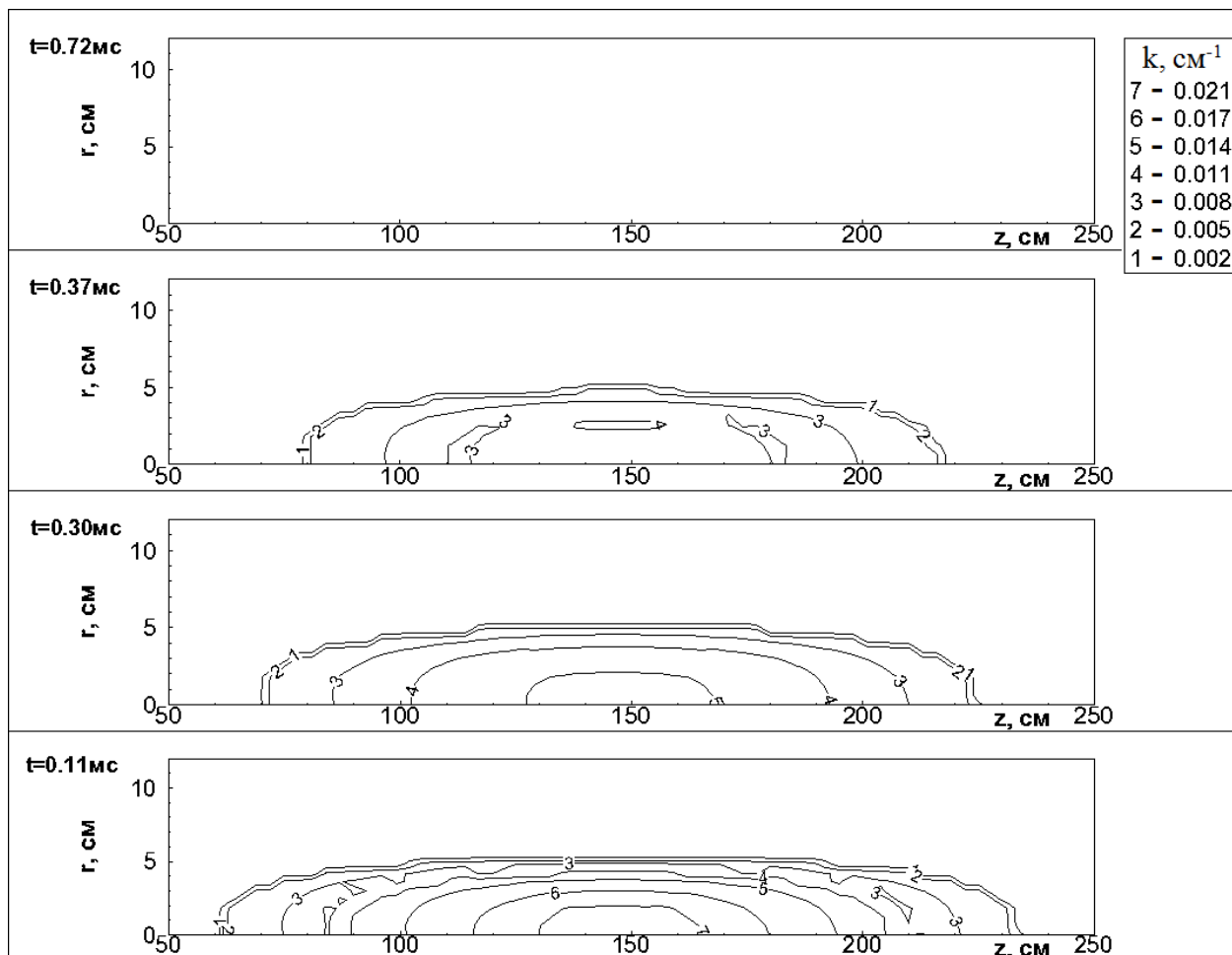


Рис. 44. Распределение полного коэффициента усиления среды в ЛАЭЛ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

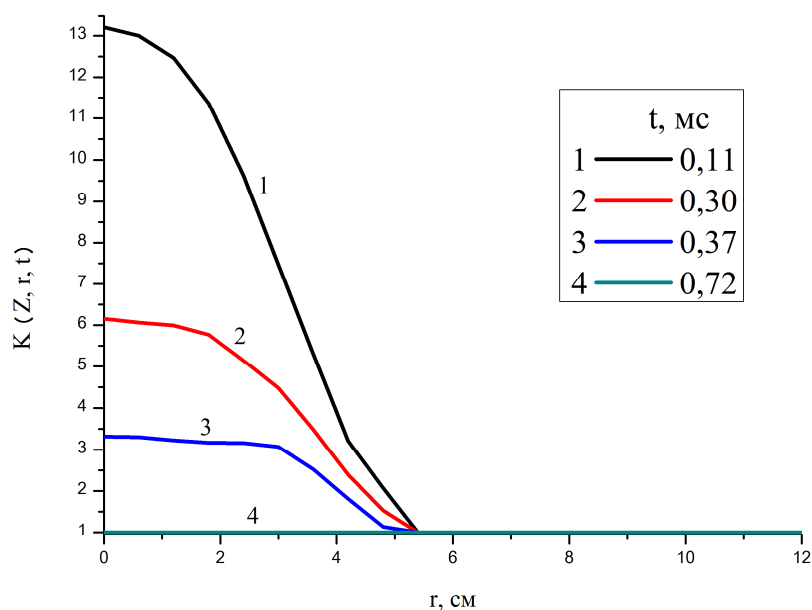


Рис. 45. Радиальная зависимость коэффициента усиления интенсивности ЛИ в различные моменты времени при начальной скорости движения 2 м/с, длительности импульса 150 мкс и гауссовом распределении нейтронного потока

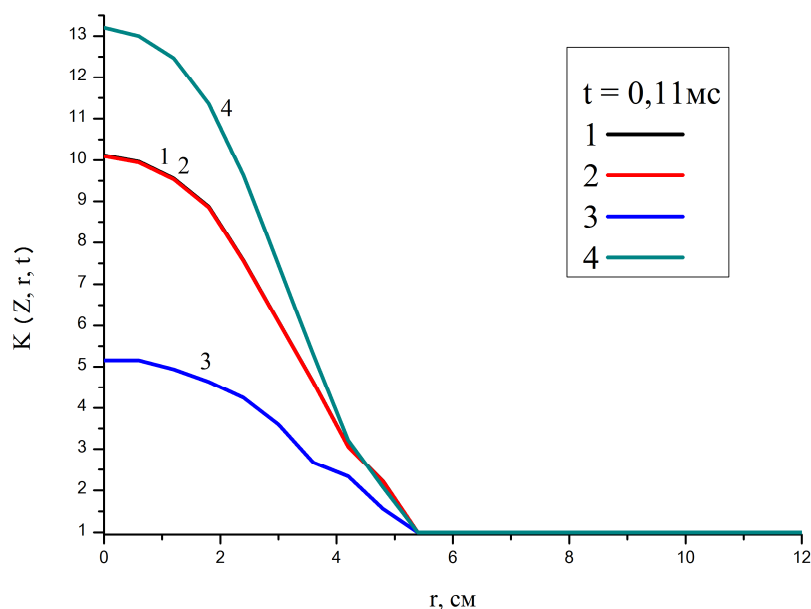


Рис. 46. Радиальная зависимость коэффициента усиления интенсивности ЛИ в момент времени 0,11 мс для следующих вариантов начальных параметров системы:

- 1 – $u_{\max}=2$ м/с, $\tau_0=150$ мкс, $kg=4$; 2 – $u_{\max}=1$ м/с, $\tau_0=150$ мкс, $kg=4$;
 3 – $u_{\max}=2$ м/с, $\tau_0=300$ мкс, $kg=4$; 4 – $u_{\max}=2$ м/с, $\tau_0=150$ мкс, $kg=2$

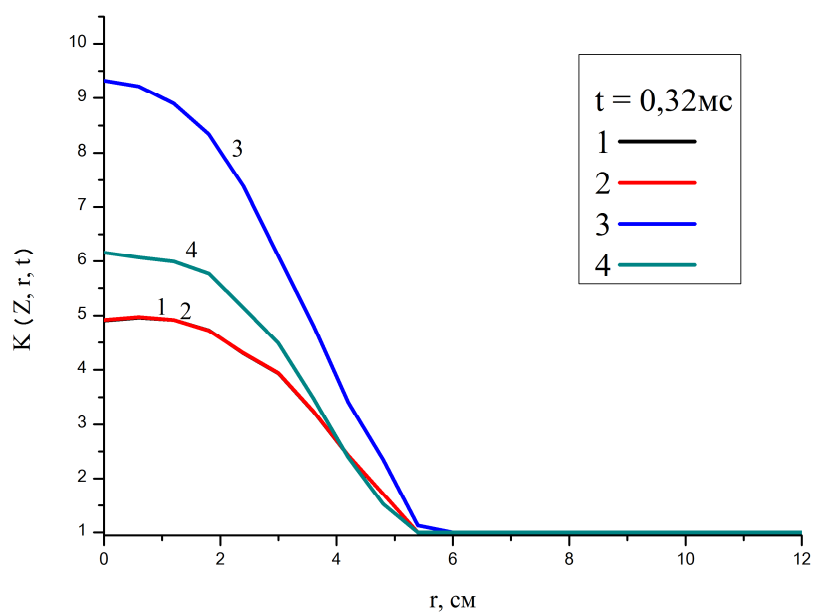


Рис. 47. Радиальная зависимость коэффициента усиления интенсивности ЛИ в момент времени 0,30 мс для следующих вариантов начальных параметров системы:

- 1 – $u_{\max}=2$ м/с, $\tau_0=150$ мкс, $kg=4$; 2 – $u_{\max}=1$ м/с, $\tau_0=150$ мкс, $kg=4$;
 3 – $u_{\max}=2$ м/с, $\tau_0=300$ мкс, $kg=4$; 4 – $u_{\max}=2$ м/с, $\tau_0=150$ мкс, $kg=2$

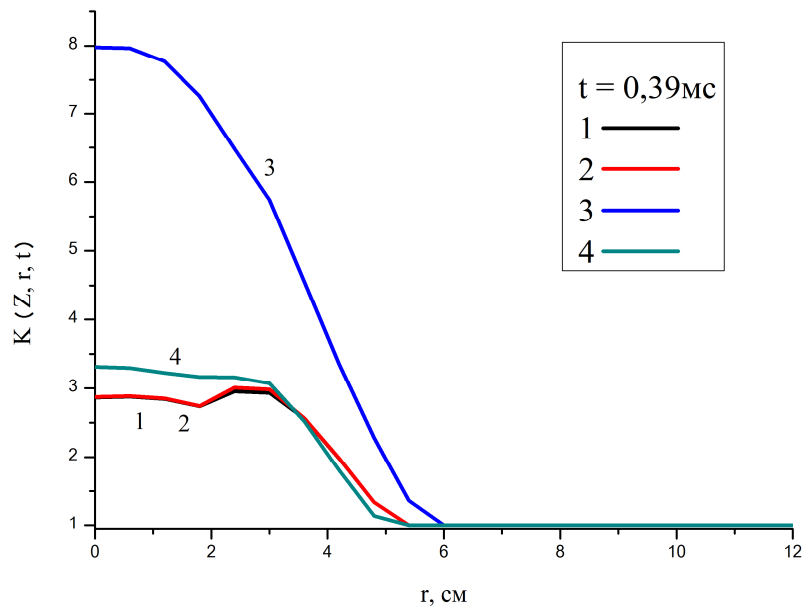


Рис. 48. Радиальная зависимость коэффициента усиления интенсивности ЛИ в момент времени 0,37 мс для следующих вариантов начальных параметров системы:

1 – $u_{\max}=2$ м/с, $\tau_0=150$ мкс, $kg=4$; 2 – $u_{\max}=1$ м/с, $\tau_0=150$ мкс, $kg=4$;
 3 – $u_{\max}=2$ м/с, $\tau_0=300$ мкс, $kg=4$; 4 – $u_{\max}=2$ м/с, $\tau_0=150$ мкс, $kg=2$

Закключение

В настоящей работе были изучены усилительные свойства пространственно-неоднородной ядерно-возбуждаемой содержащей наночастицы урана облучаемой пространственно неоднородным изменяющимся со временем нейтронным полем движущейся аргон-ксеноновой среды.

С использованием разработанных модели [13] и комплекса программ, выполнены расчетно-теоретические исследования пространственно-временной эволюции параметров газовой среды (температура, плотность, скорость, давление, удельная мощность энерговклада осколков деления), а также распределения концентрации наночастиц урана при различной начальной скорости движения газовой смеси, длительности импульса нейтронного излучения и пространственно-временной формы распределения нейтронного потока.

Использование результатов расчетов пространственно-временной эволюции параметров газовой среды в квазистационарном приближении локальной микроскопической плазмохимической кинетики позволило исследовать пространственно-временную эволюцию важнейшей характеристики активной среды — линейного коэффициента усиления ЛИ на длине волны 1,73 мкм.

Из представленных результатов расчётов коэффициента усиления интенсивности ЛИ следует, что лазерно-активная среда длиной в 1 м обеспечивает значительное усиление (в 10 и более раз) ЛИ за один проход.

В пределах рассматриваемых значений (несколько см/с), изменение начальной скорости движения среды, т. е. скорости на входе в ЛАЭЛ, слабо влияет на усилительные характеристики системы.

При варьировании формы (изменении ширины) распределения нейтронного потока существенно изменяется максимальное значение коэффициента усиления интенсивности ЛИ.

При различных значениях длительности импульса нейтронного потока изменяется возможное время получения усиления в среде, момент времени, когда достигается максимальное усиление и увеличивается максимальная температура среды.

Усилительные свойства лазерно-активной облучаемой неоднородным нейтронным полем пространственно-неоднородной содержащей наночастицы урана движущейся аргон-ксеноновой среды позволяют, как указывалось ранее, использовать такую среду не только в лазерах с ядерной накачкой, но и в оптических квантовых усилителях с ядерной накачкой.

С учётом полученных результатов, целесообразно продолжить исследование усилительных свойств лазерно-активной среды с учётом волновой природы ЛИ.

Список литературы

1. Miley G.H., McArthur D., DeYuong R., Prelas M. Fission reactor pumped laser: History and prospects: Proceedings Conferences 50 Years with nuclear fission. Washington 25-28 April. Pub. American Nuclear Society. – 1989. – P. 333–342.
2. А. П. Будник, В.А. Косарев, В.П. Лунев. Математическое моделирование генерационных характеристик активных газовых сред, содержащих нанокластеры соединений урана / Труды IV международной конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы» (ЛЯН-ИР-2007) в 2-х томах. ГНЦ РФ - ФЭИ, Обнинск, 2009, т. 1. С. 177–184.
3. Будник А.П., Косарев В.А., Лунев В.П. Математическое моделирование кинетических процессов в газовой аргон-ксеноновой плазме, содержащей нанокластеры химических соединений урана: Препринт ФЭИ–3141. – Обнинск. 2008. 23 с.
4. Budnik A.P., Deputatova L.V., Fortov V.E., Lunev V.P., Vladimirov V.I. Simulation of kinetic processes, optical and neutron properties of the nuclear-excited uranium dusty plasma of the argon-xenon gas mixture // Ukrainian Journal of Physics. 56 (2012). № 12. P. 1260–1264.
5. Budnik A.P., Deputatova L. V., Fortov V.E., Kosarev V.A., Rykov V.A., Vladimirov V.I. Simulation of kinetic processes in the Nuclear-Excited Helium Non-Ideal Dusty Plasma // Contribution to Plasma Physics. 2009. № 10. P. 765-768
6. Будник А.П., Лунев В.П. Расчётно-теоретические исследования методом Монте-Карло оптических и нейтронно-физических свойств аргон-ксеноновой газовой среды, содержащей нанокластеры урана и его химических соединений // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т.11 ; http://chemphys.edu.ru/media/files/2011-02-01-006_Budnik_Lunev.pdf
7. Будник А.П., Сипачев А.В. Математическое моделирование кинетических процессов в аргон-ксеноновой ядерно-возбуждаемой плазме, содержащей нано-

- кластеры урана // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т.13. Вып.3. http://chemphys.edu.ru/media/files/2012-11-20-003_Budnik_Sipachev.pdf
8. Будник А.П., Сипачев А.В. Математическое моделирование кинетических процессов при генерации лазерного излучения в аргон-ксеноновой активной газовой среде, содержащей наночастицы урана // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т. 14. Вып. 2 ; http://chemphys.edu.ru/media/files/04_Budnik_Sipachev_aphm2011.pdf
 9. Будник А.П., Сипачев А.В. Математическое моделирование кинетических процессов при генерации лазерного излучения в гелий-аргон-ксеноновой активной газовой среде, содержащей наночастицы урана // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15. № 5, с. 10.
 10. Будник А.П., Сипачев А.В., Слюняев М.Н. Математическое моделирование кинетических процессов в движущейся аргон-ксеноновой пылевой плазме, содержащей наночастицы урана // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2014. – Т.15, № 6, с. 4 ; www.chemphys.edu.ru/pdf/2014-11-30-004.pdf
 11. Слюняев М.Н., Будник А.П., Сипачёв А.В. Моделирование прямого преобразования кинетической энергии осколков деления урана в энергию лазерного излучения в аргон-ксеноновой пылевой плазме с наночастицами урана //Известия вузов, Ядерная энергетика. – 2015. – № 2. С. 71–80.
 12. M.N. Slyunyaev, A.P. Budnik, A.V. Sipachev. Modeling of direct conversion of the uranium fission product kinetic energy to laser radiation energy in an argon–xenon dusty plasma with uranium nanoparticles // Nuclear Energy and Technology. –2015. – № 1. P. 272–276.
 13. I. V. Alexeeva, A. P. Budnik, A. V. Sipachev, M. N. Slyunyaev. Mathematical simulation of kinetic processes in moving irradiated by neutrons gas medium containing uranium nanoparticles // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – № 815 012010.

Подписано к печати 30.05.2017 г. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,8.
Тираж 38 экз. Заказ № 174

Отпечатано в ОНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского.