

ОДНОМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА И РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ УТС НА КОМБИНИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ С ЗАМАГНИЧИВАНИЕМ ДТ-ПЛАЗМЫ

С. Ф. Гаранин, С. Д. Кузнецов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Принцип работы системы MagLIF [1] состоит в сжатии цилиндрическим лайнером предварительно разогретой замагниченной ДТ-плазмы. Проведены расчёты сжатия мишени в этой системе с учётом аксиальной и азимутальной компонент магнитного поля и свойств материала лайнера при навязанном и азимутальной токе через лайнер. В рамках одномерных расчетов с максимальным учётом физических процессов, но без учёта неустойчивостей и перемешивания, получен нейтронный выход $\sim 10^{17}$ при характерной длине мишени ~ 1 см, а также такой нейтронный выход, при котором полная энергия нейтронов превышает максимальную тепловую энергию плазмы.

Введение

В настоящее время усилия ведущих лабораторий мира направлены на достижение зажигания термоядерных мишеней в лабораторных условиях. Для исследований в этом направлении создаются и разрабатываются мощные лазерные установки NIF и УФЛ-2М и мощные стационарные электрофизические установки (Saturn, Atlas, Z, ZR). Экспериментальные и теоретические работы в этой области в течение последних десятилетий выявили целый ряд ограничений, которые ранее не рассматривались как существенные. Это привело к постепенному повышению порога энергетики системы, которая требуется по современным представлениям для достижения зажигания мишеней. Актуальным становится вопрос об улучшении параметров лазерных мишеней для обжаривания путём замагничивания теплопроводности [2], а также создания комбинированных лазерно-электрофизических установок.

Одним из интересных направлений работ является сжатие мегагаусными магнитными полями металлического лайнера, во внутреннем объёме которого находится предварительно нагретая и замагниченная ДТ-плазма [1]. Этот подход по существу совпадает с разрабатываемой у нас системой МАГО [3]. В SNL на установке Z проводится программа исследований по программе MagLIF (Magnetized Laser Inertial Fusion). Нагрузка представляет собой металлический лайнер с внутрен-

ним диаметром $\sim \varnothing 6$ мм. Во внутреннюю полость лайнера накачивается ДТ-газ, в момент начала сжатия лайнера магнитным полем производится нагрев ДТ-газа лазерным импульсом до температуры > 250 эВ, после чего производится сжатие ДТ-газа и доведение его до термоядерных температур. Незамагниченная мишень оказывается в этом случае неработоспособной, поскольку для ограниченной энергетики лабораторных установок и, соответственно, относительно небольших скоростей сжатия мишени скорость потери энергии из плазмы превышает скорость подвода энергии к плазме. Для уменьшения скорости потери энергии в газе мишени создаётся магнитное поле (в системе MagLIF – аксиальное), которое «вмораживается» в плазму в момент создания начальной проводимости газа. Это магнитное поле, как показано, например, в [3, 4], является решающим фактором для уменьшения габаритных и энергетических ограничений при решении проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС).

В данном отчёте представлены одномерные расчёты мишени MagLIF без учёта процесса нагрева ДТ-газа лазерным импульсом, развития неустойчивостей лайнера, а также потерь плазмы и энергии при вытекании вдоль аксиального поля в торцы. Основной целью расчётов являлась проверка и сравнение используемых расчётных моделей, а также получение оценок возможностей предлагаемой системы.

Расчёты сжатия ДТ-плазмы в системе MagLIF

1. Физическая схема нагрузки и постановка одномерных расчётов

Физическая схема мишени, взятая из работы [1] представлена на рис. 1. Как видно из рисунка, в целом, сжатие мишени может быть рассчитано в цилиндрической геометрии.

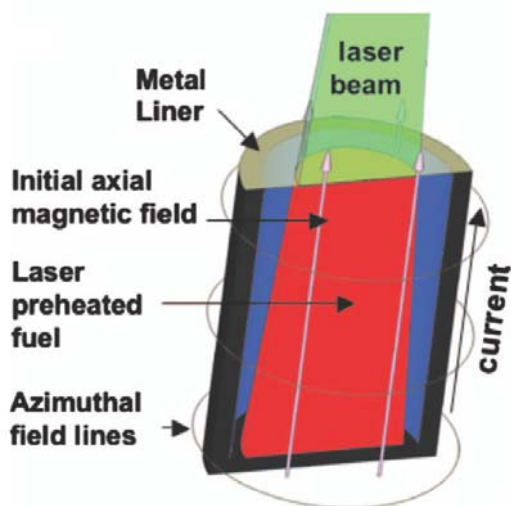


Рис. 1. Мишень системы MagLIF

Расчёты проводились с использованием одномерной программы УП [5], с аксиальным и азимутальным магнитным полем как с навязанным током, так и с заданием эквивалентной электрической цепи установки. В расчетах не учитывались потери плазмы и энергии при вытекании вдоль аксиального поля в торцы

2. Сжатие газовой мишени при имплозии лайнера, разгоняемого током установки Z

В работе [1] предполагается использовать лайнер из Be, так как низкая плотность Be наряду с хорошей металлической проводимостью позволит применять более толстый лайнер, что улучшает условия по устойчивости лайнера. Кроме того, малый заряд ядра Be уменьшает потери на излучение при загрязнении термоядерной плазмы веществом лайнера. Для расчётов Be на основе комплекса УРС, проводимости и теплопроводности [6] были подобраны параметры УРС, проводимости и теплопроводности для Be, подобрана таблица потенциалов ионизации для ионов Be. Этот комплекс использовался в расчё-

тах различных лайнерных систем, сжимаемых магнитными полями, кроме того, с использованием этого комплекса проводились расчёты других гидродинамических систем с замагниченной плазмой для решения проблемы УТС.



Рис. 2. Разрез мишени с Be-лайнером

Расчёты проводились с учётом всех процессов в постановке, соответствующей [3], для цилиндрического одномерного разреза, приведенного на рис. 2. Внешний радиус лайнера $r_0=3,48$ мм, внутренний радиус лайнера $r_i=2,9$ мм, что обеспечивает отношение $r_0/(r_0-r_i)=6$. В ДТ-плазме и веществе лайнера в начальный момент задается начальное аксиальное магнитное поле $B_z=30$ Т, а на внешней границе лайнера задавался навязанный, создающий азимутальное магнитное поле, ток, взятый из работы [1] и показанный на рис. 3, максимальное значение тока составляет 27 МА. На рис. 2 схематично показаны магнитные поля, возникающие в мишени. Расчёт разбивался на два этапа, на первом происходит сжатие лайнером холодного ДТ-газа, после чего в момент 80 нс (на рис. 3 отмечен звёздочкой на кривой тока) происходит мгновенный разогрев ДТ-газа с заданной начальной плотностью (для сравнения с работой [1] была взята плотность $3 \cdot 10^{-3}$ г/см³) до 250 эВ и начинается второй этап со счётом сжатия газовой мишени.

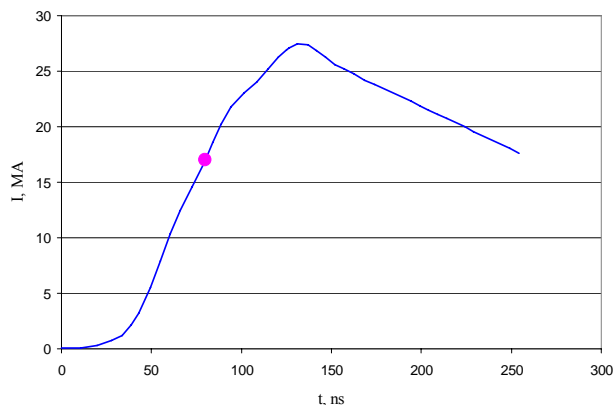


Рис. 3. Ток на границе лайнера

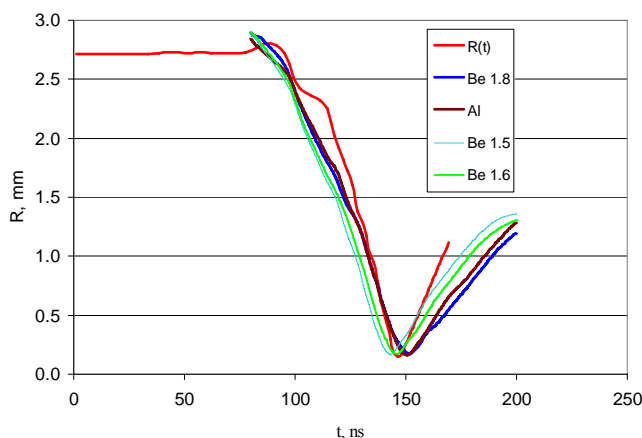
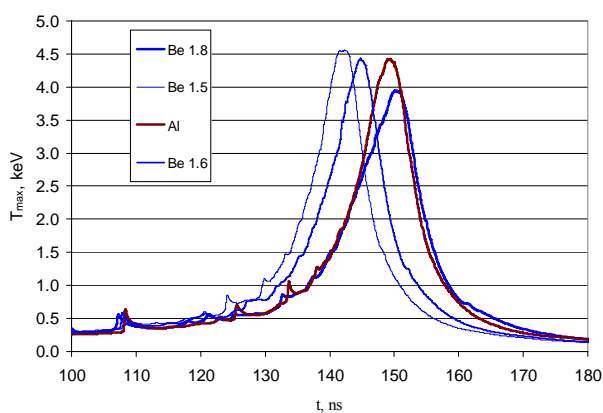
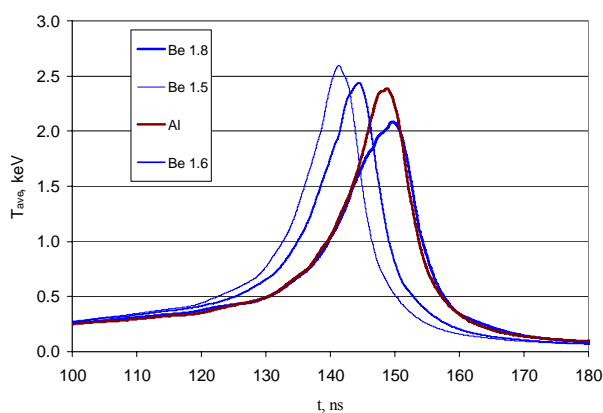


Рис. 4. Радиус движения внешней границы в расчётах с различными вариантами лайнера



а



б

Рис. 5. Максимальная (а) и средняя (б) температура ДТ-плазмы

В работе [1] ввод энергии от лазерного импульса производится в плазму в течение 10 нс и может приводить к большему начальному разогреву внутренней поверхности лайнера, чем в использовавшейся расчётной постановке. В расчётах учитывался разогрев от термоядерного энерговыделения, при этом энергия α -частиц вводилась в плазму локально в ячейке, в которой происходит энерговыделение. Расчётная сетка в лайнере задавалась со сгущением к наружной границе лайнера, для правильного описания процессов электровзрыва внешней поверхности лайнера, а также со сгущением к границе лайнер-плазма, для правильного описания процессов теплопередачи и магнитной диффузии из малоплотной ДТ-плазмы в металл.

На рис. 4 показан радиус движения внешней границы ДТ-плазмы в номинальном расчёте с на-

чальной плотностью Ве-лайнера 1,8 г/см³ в сравнении с кривой из работы [1]. Основное отличие кривых состоит в том, что в наших расчётах к моменту разогрева ДТ-плазмы уже происходит выход ударной волны на внутреннюю поверхность лайнера, в отличие от кривой из работы [1], на которой видно расширение ДТ-плазмы. На рис. 4 приведены также расчётные графики движения границы ДТ-плазмы при варьировании начальной плотности Ве лайнера (с сохранением толщины), которая позволяет более точно согласовать момент максимального сжатия, приведенный в работе [1]. Эти кривые промаркированы на рис. 4 величиной плотности. Для проверки используемой модели УРС Ве также были проведены расчёты с заменой Ве-лайнера на Al (при сохранении массы лайнера). Из рис. 4 видно, что кривая внешнего радиуса ДТ-мишени мало изменяется от такой замены. Максимальные и средние температуры

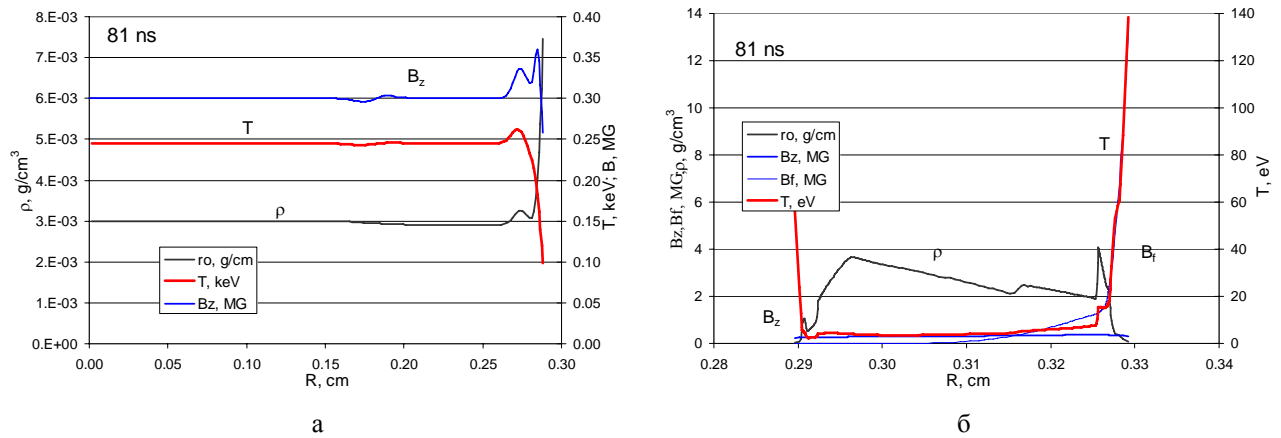


Рис. 6. Распределение МГД величин по сечению ДТ-плазмы (а) и лайнера (б) на момент времени 81 нс, близкий к моменту начального разогрева ДТ-плазмы лазером

ДТ-плазмы из этих расчётов показаны на рис. 5. Максимальное значение температура плазмы достигается в центре мишени и спадает к лайнеру, среднее значение температуры примерно в 2 раза ниже максимального.

На рис. 6–9 показаны профили характерных величин по сечению лайнера и мишени на несколько характерных моментов времени. В качестве таких моментов выбраны момент близкий к началу сжатия ДТ-плазмы, соответствующий времени 81 нс (рис. 6, 7), и момент 148 нс, близкий к моменту максимального сжатия (рис. 8, 9).

На рис. 6а показаны профили характерных величин в ДТ-плазме на момент времени, близкий к начальному, который соответствовал равномерному распределению параметров по сечению мишени. На рисунке 6б изображены аналогичные величины по сечению лайнера, который в этот момент уже находится в состоянии плазмы, при этом основная масса лайнера имеет температуру ~ 4 эВ и

плотность 2–4 г/см³. Внешняя граница лайнера разогревается джоулевым теплом до температуры ~ 100 эВ, нагревается до высоких температур и граница лайнера в контакте с ДТ-плазмой мишени. При этом вещество лайнера и мишени содержит введенное аксиальное поле $B_z \approx 30$ Т. На рис. 7 показаны распределения проводимости и электрических полей по сечению мишени и лайнера.

На рис. 8а показаны профили характерных величин в ДТ-плазме на момент времени 148 нс, близкий к моменту максимального сжатия мишени. Распределение температуры имеет максимум ~ 4 кэВ в центральной области мишени и плавно спадает до $\sim 0,45$ кэВ к границе, находящейся в контакте с плотной металлической плазмой, при этом плазма в центре мишени имеет минимальную плотность $\sim 0,5$ г/см³. Аксиальное магнитное поле B_z при этом имеет характерный профиль с плато у оси с характерной величиной 60 МГс и максимумом 120 МГс в районе границы с лайнером, для

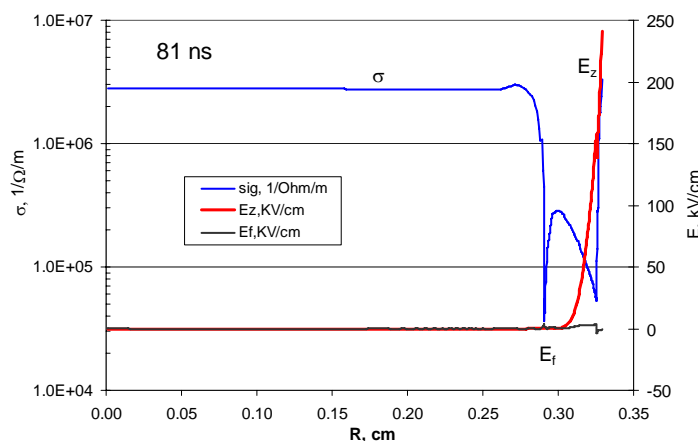


Рис. 7. Проводимость и компоненты напряжённости электрического поля по сечению мишени на момент времени 81 нс, близкий к моменту начального разогрева ДТ-плазмы лазером

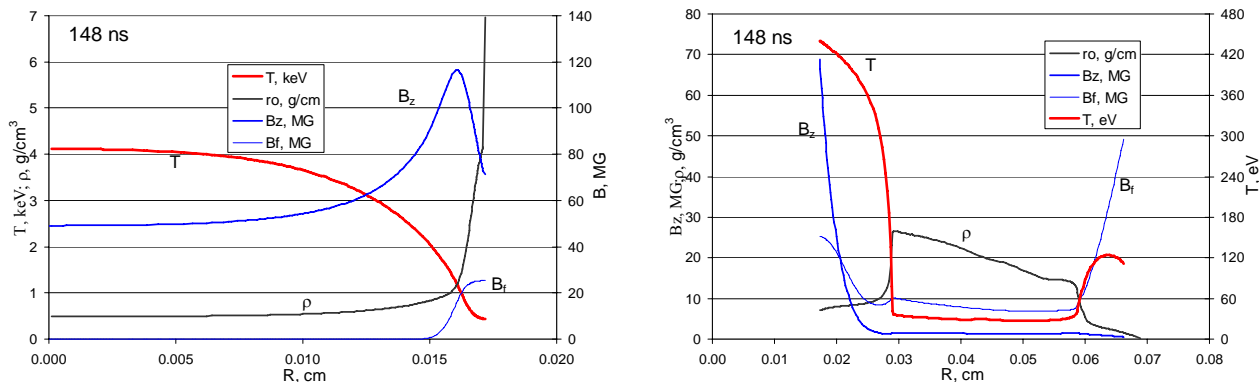


Рис. 8. Распределение МГД величин по сечению ДТ-плазмы (а) и лайнера (б) на момент времени, близкий к моменту максимального сжатия

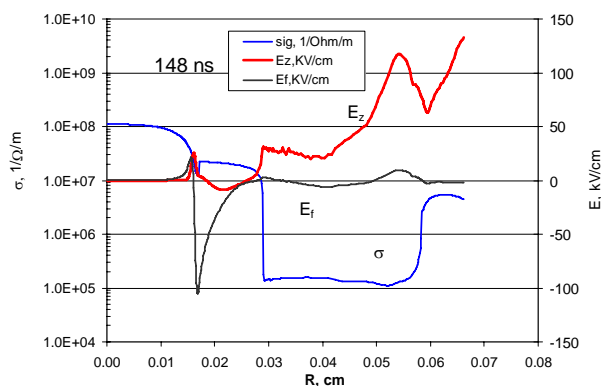


Рис. 9. Проводимость и компоненты напряжённости электрического поля по сечению мишени на момент времени, близкий к моменту максимального сжатия

сравнения характерная величина поля на плато в толщине лайнера (рис. 8,б) составляет 1,5 МГс. Азимутальное магнитное поле B_ϕ проникает лишь во внешнюю часть хорошо проводящей уже к моменту начала сжатия ДТ-плазмы. На рис. 8б изображены аналогичные величины по сечению лайнера, который в этот момент уже находится в состоянии плазмы, основная масса лайнера имеет температуру ~ 50 эВ и плотность $20\text{--}30$ г/см³. На рисунке 9 показаны распределения проводимости и электрических полей по сечению мишени и лайнера на момент 148 нс. По величине проводимости выделяются области горячей термоядерной ДТ-плазмы, а также области вещества лайнера с металлической плазмой с температурой в несколько десятков эВ. Внешняя граница лайнера сохраняет температуру, близкую к температуре, имевшейся на момент начала сжатия ~ 100 эВ, а во внутренней части лайнера происходит сильный нагрев переносом тепла из мишени.

Были проведены расчёты с заменой части ДТ-газа на более плотную плазму, имитирующую использование ДТ-льда в мишени, который может улучшить теплоизоляцию горячего ДТ-газа, а также улучшить чистоту газа, изолировав его от поступления вещества лайнера. Для этого 0,2 мм на внешней границе были заменены на плазму, имеющую на порядок большую плотность и температуру 3 эВ, что позволяет повысить нейтронный выход из мишени в $\sim 1,3$ раза.

3. Оптимизация параметров мишени для увеличения расчётного нейтронного выхода

Расчёты представленные в предыдущем разделе показывают, что имеются некие запасы по увеличению нейтронного выхода из системы при варьировании начальной плотности газа при сохранении той же самой температуры предварительного нагрева. Изменение плотности осуществлялось для подобранных оптимальных размеров

мишени и лайнера. Внешний радиус лайнера $r_0 = 3,48$ мм, внутренний радиус лайнера $r_i = 2,9$ мм, что обеспечивает аспектное отношение $r_0/(r_0-r_i) = 6$. Проводилось также варьирование

также в целом положительно сказывается на нейтронном выходе, позволяя повысить его при меньшем сжатии мишени, но величина начального разогрева зависит от возможностей лазерной сис-

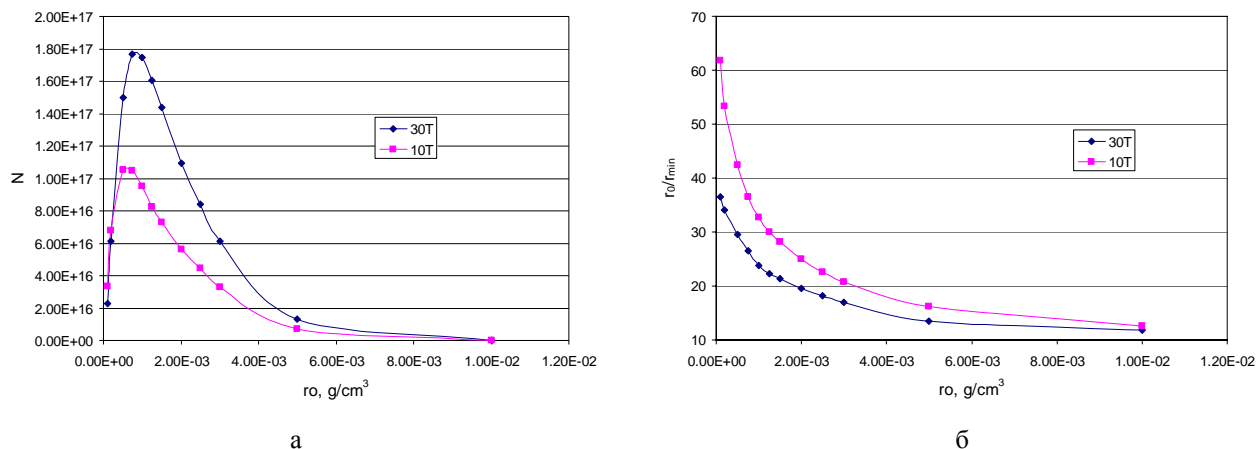


Рис. 10. Зависимость нейтронного выхода (а) и максимального сжатия (б) от начальной плотности ДТ-газа

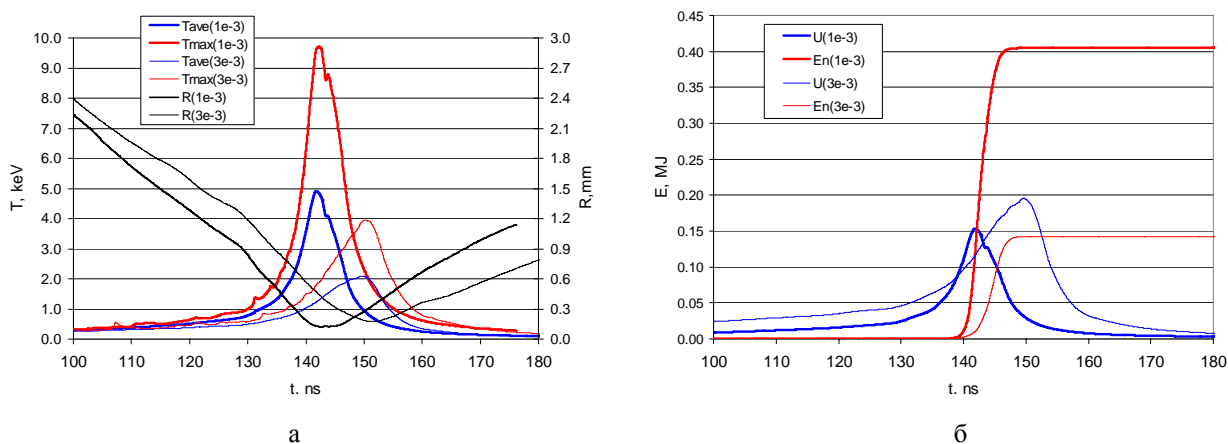


Рис. 11. Зависимость от времени (а) максимальной, средней температур и внешнего радиуса ДТ-плазмы и б) средней энергии в ДТ-плазме U и полной энергии, содержащейся в генерируемых нейтронах E_n для расчётов с начальной плотностью ДТ-плазмы 10^{-3} г/см^3 и $3 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$

магнитного поля: помимо расчётов с магнитным полем 30 Т, которое, по-видимому, является предельно достижимым для систем создания постоянного магнитного поля, поле было уменьшено до 10 Т.

На рис. 10а показано влияние плотности ДТ-плазмы в мишени на нейтронный выход. На рис. 10,б показана зависимость максимального сжатия ДТ-плазмы по радиусу от начальной плотности в мишени. Максимальное значение нейтронного выхода достигается при плотности $7,5 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ г/см}^3$ и при сжатии по радиусу ~ 25 . Увеличение начальной температуры ДТ-плазмы

темы предварительного нагрева плазмы и, скорее всего, выбрано на уровне максимально достигнутого в данной установке.

На рис. 11 показано сравнение некоторых интегральных характеристик мишени для системы с оптимальной для нейтронного выхода начальной плотностью ДТ-плазмы 10^{-3} г/см^3 и системы, подробно рассмотренной в разделе 3 данного отчёта с начальной плотностью ДТ-плазмы $3 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$. На рис. 11а показано сравнение средних и максимальных температур в мишени с номинальной начальной плотностью ДТ-плазмы и мишени с уменьшенной начальной плотностью до 10^{-3} г/см^3 ,

а также зависимости радиусов внешней границы ДТ-плазмы от времени. Максимальная и средняя температура ДТ-плазмы увеличиваются в два раза при возрастании степени сжатия с ~ 17 до ~ 24 . Увеличение температуры даже с учётом меньшей максимальной плотности мишени значительно сказывается на нейтронном выходе, который возрастает в ~ 3 раза. Рис. 11,б показывает сравнение энергии, которая выделяется в нейтронах, с максимальной энергией, которая находится в ДТ-плазме. Для обеих мишеней энергия в нейтронах и максимальная энергия в плазме величины одного порядка, но для мишени с уменьшенной плотностью энергия в нейтронах в $\sim 2,5$ раза выше, чем энергия в плазме, что позволяет говорить о выполнении некоего технического критерия зажигания мишени.

Заключение

Проведены расчёты сжатия мишени MagLIF с учётом аксиальной и азимутальной компонент магнитного поля и свойств материала Be или Al-лайнера при навязанном токе на границе лайнера. Произведена расчётная оптимизация мишени на основе одномерных лагранжевых расчётов с максимальным учётом физических процессов, но без учёта неустойчивостей, перемешивания и потерь плазмы и энергии через торцы цилиндрической мишени. Согласно одномерным расчетам выход нейтронов в этой системе составляет $\sim 10^{17}$ на 1 см длины мишени и при этом полная энергия нейтронов в некоторых случаях превышает максимальную тепловую энергию плазмы. Проведено

сравнение с имеющимися в литературе результатами расчётов.

Список литературы

1. Slutz S. A., Herrmann M. C., Vesey R. A., Sekow A. B., Sinars D. B., Rovang D. C., Peterson K. J., Cuneo M. E. Pulsed-power-driven cylindrical liner implosions of laser preheated fuel magnetized with an axial field // *Phys. Plasmas*. 2010. Vol. 17. P. 056303.
2. Chang P. Y., Fiksel G., Hohenberger M., Knauer J. P., et al. Fusion Yield Enhancement in Magnetized Laser-Driven Implosions // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 107. P. 035006.
3. Garanin S. F., Mamyshev V. I., Yakubov V. B. The MAGO system: current status // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2006. Vol. 34. P. 2273.
4. Lindemuth I. R., Siemon R. E. The fundamental parameter space of controlled thermonuclear fusion // *American J. Phys.* 2009. Vol. 77. P. 5.
5. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа UP-Ok для решения одномерных программ механики сплошной среды в одномерном комплексе // ВАНТ, Серия: Методики и программы. 1982. № 3(4). С. 11–14.
6. Buyko A. M., Garanin S. F., Demidov V. A., et al. Investigation of the dynamics of a cylindrical exploding liner accelerated by a magnetic field in the megagauss range // in *Megagauss Fields and Pulsed Power Systems*, ed. V. M. Titov, G. A. Shvetsov (New York: Nova Science Publishers, 1990). P. 743–748.