

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ  
МАГНИТНО-ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

Н.В. Батрак

nik.nikita02@mail.ru

Н.Г. Копалейшвили

nikitakopaleyshvili@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Аннотация**

Выполнен сравнительный анализ различных вариантов магнитно-инерционного термоядерного синтеза. Описаны некоторые эксперименты, которые проводятся на установках, используемых при магнитно-инерционном удержании плазмы. Представлена информация о таких устройствах, как NIF, OMEGA, OMEGA EP и Z-Machine. Определены основные теплофизические параметры установок, оснащенных лазерами с высокой энергией импульса и высокоскоростными плазменными струями. Показано, что современные термоядерные установки, как и разрабатываемые, могут быть использованы для широкого круга исследований и направлений. Представлена информация о новейших концептах термоядерных установок, предназначенных для магнитно-инерционного термоядерного синтеза.

**Ключевые слова**

Магнитно-инерционный термоядерный синтез, термоядерная установка, лайнер, драйвер, мишень, энергетическая установка, лазерный драйвер, плазменные струи

Поступила в редакцию 07.06.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

**Введение.** Управляемый термоядерный синтез (УТС) в настоящее время интересует тысячи ученых по всему миру. С самого основания теории УТС люди провели десятки тысяч экспериментов и выдвинули сотни гипотез о возможности воплощения этой технологии в реальность. Всего существуют три концепции термоядерного синтеза: магнитный УТС, инерционный УТС и магнитно-инерционный УТС (МИТС). Если первые две концепции изучены почти в полном объеме, то МИТС — довольно новая тема, которая требует тщательной проработки.

**Описание МИТС.** Одной из концепций термоядерного синтеза является МИТС. Это направление инерциального УТС, основанное на магнитно-инерционном удержании горячей плазмы. В последние годы учеными достигнут действительный прогресс в экспериментах по сжатию магнитного потока лазерными пучками и плазменными струями, использовании современных лазерных установок, плазменных пушек и лайнеров, что делает исследования МИТС еще более значимыми. Существует множество вариантов источников энергии (драйверов), магнитных конфигураций в качестве мишени и лайнеров для систем МИТС. В качестве мощных драйверов следует выделить лазерный, плаз-

менный, тяжелоионный, Z-пинч; в качестве мишеней — криогенную мишень, компактный тор, открытые ловушки, пинчи; в качестве лайнеров — твердый, жидкий, газообразный, плазменные струи [1–6].

**Варианты реализации МИТС.** Особенность МИТС заключается в том, что для его реализации необходим лайнер для сжатия и нагрева замагниченной плазмы (мишени). Одним из вариантов МИТС является проект MagLIF (Magnetized liner inertial fusion — инерционный термоядерный синтез с намагниченным вкладышем) с лазерным драйвером. Это концепция, в которой используется импульсный драйвер Z-пинч лайнера для сжатия дейтерий-тритий (DT) до температур и давлений, соответствующих термоядерному синтезу. Этот Z-пинч подход, названный так потому, что ток сжимает плазму вдоль третьей оси трехмерной сетки Z, потенциально может производить энергию в устройстве, которое меньше, проще и дешевле, чем массивные токамаки и установки для лазерного синтеза. Из-за того что плазма Z-пинч нестабильна, без равномерного сжатия она распадается в течение десятков наносекунд, что слишком мало для производства полезной электроэнергии.

В статье [7] представлена информация о платформе, предназначенной для изучения физики MagLIF с помощью установки OMEGA. В конце работы приведены следующие данные после обработки полученной информации:

- 1) обзор результатов решения одномерных уравнений магнитогаидродинамики (МГД), которые использовались для проектирования платформы;
- 2) предварительные результаты экспериментов, проведенных для достижения требуемого предварительного нагрева и равномерного цилиндрического сжатия;
- 3) первые результаты полного интегрирования имплозии MagLIF с помощью установки OMEGA;
- 4) запланированные на будущее эксперименты, которые будут проводиться с помощью новой платформы.

Первыми экспериментами MagLIF на установке OMEGA были опыты по определению синхронности предварительно нагретого пучка относительно управляемого пучка. Моделирование и эксперимент показали, что оптимальное время для запуска предварительно нагретого лазера составляло 1,0 нс до запуска управляемого пучка, что соответствует завершению предварительного нагрева из-за начала взрыва оболочки. Это позволило осуществить предварительный нагрев без введения в газ слишком большого количества смеси стенового материала.

Другим вариантом МИТС является МИТС с использованием драйверов на основе плазменной струи (ПСМИТС). В ПСМИТС замагниченная плазменная мишень сначала формируется в центре вакуумного сферического сосуда. Сферический массив гиперзвуковых плазменных струй, который в общей слож-

ности может насчитывать около 600 шт., со скоростями до 100 км/с запускается с края сосуда, радиус которого равен около 3 м. Плазменные струи сливаются в радиусе примерно 1,5 м, образуя плазменную оболочку, которая продолжает сходить к центру, и когда в мишени происходит плавление, сжимает предварительно сформированную замагниченную мишень до диаметра примерно 1 см.

В статье [8] описаны достижения в исследованиях, направленных на разработку плазменных пушек для ПСМИТС. Так, в 2016–2018 гг. с использованием плазменной пушки Alpha2Gun на объекте PLX-α в Лос-Аламосе были выполнены эксперименты с несколькими пушками для формирования конической секции плазменного лайнера. Были получены высокоскоростные кадрированные ПЗС-изображения (изображения с матрицы прибора с зарядовой связью) слияния шести струй. На этих изображениях было четко видно образование первичных толчков при первом слиянии струй. Пораженная область струи распространялась в боковом направлении, и вскоре удар обрабатывал всю струю. Поток ударной плазмы продолжали сливаться и наносить вторичные удары, которые обрабатывали плазму аналогично первичным, что приводило к каскаду ударов.

Возникновение каскада ударов поднимает важную физическую проблему. Удары нагревают плазменную оболочку, увеличивая ее внутреннее давление, которое сопротивляется самосжатию лайнера, тем самым снижая ее эффективность при сжатии плазменной мишени, когда она используется для взрыва целевой плазмы. Безразмерной величиной, которую можно применять для оценки серьезности этого эффекта, является число Маха, представляющее собой отношение скорости потока плазменного лайнера к его внутренней скорости звука. Нагрев плазменного лайнера повышает его внутреннюю скорость звука, уменьшая число Маха.

Кроме того, ПСМИТС — это единственное воплощение МИТС, которое обладает высокой скоростью взрыва и стойкостью. К отличительным особенностям ПСМИТС также можно отнести недорогие плазменные пушки для всех видов плазменного образования и имплозии; толстый жидкий бланкет; возможность обеспечения высокой частоты повторений (например, 1 Гц); очень большое значение  $\beta$  (отношение давления плазмы к давлению магнитного поля), способствующее подавлению микро- и МГД-нестабильности; возможность проведения быстрых исследований и разработок. При наличии большого числа преимуществ у данного варианта МИТС есть несколько недостатков, которые необходимо устранить в ближайшем будущем. Предстоит разработать плазменные пушки, способные запускать плазменные струи с требуемыми свойствами, уменьшить степень сжатия мишени; очистить камеру от остаточного газа с высоким  $Z$ -пинчем лайнера между выстрелами. В настоящее время разработка находится на ранней стадии и имеет низкий уровень готовности технологии (TRL — Technology readiness level) как для лайнера, так и для мишени [9].

**Установки МИТС.** В мире существует много различных типов установок для реализации МИТС. Поскольку для реализации данного процесса необходимо обращать внимание на тип установок и их параметры, выделяют две основные разновидности установок для МИТС: лазерные и Z-пинч.

Среди лазерных установок и генераторов довольно известными являются NIF, OMEGA. Среди Z-пинч — Z Machine, Sandia, Ангара 5-1.

NIF (National Ignition Facility — Национальный комплекс лазерных термоядерных реакций) — научный комплекс для осуществления инерциального и магнитно-инерциального термоядерного синтеза с помощью различных лазеров. В комплексе находятся 192 мощных лазера, которые направляют импульсы после многокаскадного усиления на миллиметровую мишень с термоядерным топливом. Параметры лазеров приведены ниже [10]:

Энергия лазерного импульса, МДж, не менее .....	1,8
Мощность лазерного импульса, ТВт, не менее .....	500
Длина волны лазера, мкм .....	0,35
Максимальная длительность лазерного импульса, нс .....	20
Размер пятна лазерного импульса, мкм, не более .....	600
Индукция магнитного поля, Тл, не более .....	30

Эксперименты с газовыми трубками MagLIF в NIF показали изменение характеристик распространения лазера в присутствии магнитного поля, приложенного извне. Поле питается от новой импульсной системы MagNIF, которая позволяет NIF доставлять индукцию до 30 Тл. Первоначальные измерения показали, что при поле с индукцией 12 Тл лазерный импульс мощностью 30 кДж распространяется по газовой трубе, заполненной неопентином, длиной 10 мм и давлением 1 атм на 2 нс быстрее, чем в отсутствие магнитного поля. Помимо этого происходят изменения в профиле излучения, показывая, что профиль горячего столба практически коаксиален профилю магнитного поля. Таким образом, наличие поля уменьшает теплоперенос в плазме и увеличивает температуру электронов вблизи оси газовой трубы.

OMEGA — один из самых мощных и высокоэнергетических лазеров в мире. Данный комплекс состоит из 60 лазеров с утроенной частотой на неодимовом стекле. Максимальный выход термоядерного синтеза OMEGA составляет около  $10^{14}$  нейтронов за выстрел. Помимо OMEGA существует и четырехлучевая лазерная система OMEGA EP, в которой установлена камера-мишень и вакуумная камера сжатия импульсов с решетками, имеющими большую апертуру, что позволяет комплексу выполнять короткоимпульсные лазерные выстрелы. Комбинация лазерных систем OMEGA и OMEGA EP позволяет реализовать единственную в мире полностью интегрированную криогенную экспериментальную установку с быстрым воспламенением. Параметры лазерных установок приведены в таблице.

**Параметры лазерной установки OMEGA и OMEGA EP**

Параметр	OMEGA	OMEGA EP
Энергия лазерного импульса, кДж, не более	30	5
Мощность лазерного импульса, ТВт, не менее	27	—
Длина волны лазера, мкм	0,351	1,053
Максимальная длительность лазерного импульса, нс	4,0	0,1
Размер пятна лазерного импульса, не более, мкм	40	20
Индукция магнитного поля, не более, Тл	—	50

Помимо вышеупомянутых установок существует также Z-machine в Sandia National Laboratories, в которой используется концепция МИТС с импульсным приводом, называемая MagLIF. MagLIF — первая установка МИТС, которая демонстрирует температуры, связанные с термоядерным синтезом, значительное производство нейтронов и магнитное улавливание заряженных продуктов термоядерного синтеза. Помимо этого эксперименты с численным моделированием показали, что данная установка обладает потенциалом для масштабирования до нескольких мегаджоулей энергии и создания значительного самонагрева топлива на импульсных машинах следующего поколения.

Принцип работы MagLIF можно описать следующим образом. В установке цилиндрическая трубка сантиметрового масштаба, или лайнер, заполняется термоядерным топливом, а именно газообразным дейтерием в Z экспериментах, и предварительно намагничивается в осевом направлении до 10...20 Тл с помощью катушек типа Гельмгольца. После чего топливо нагревается до средней температуры 100 эВ с помощью тормозного поглощения фотонов с длиной волны 527 нм от лазера. В конце лайнер радиально взрывается в течение примерно 100 нс с помощью силы Лоренца со скоростью 70 км/с с использованием тока от Z machine порядка 20 МА. Параметры MagLIF в Z-machine приведены ниже [11]:

Ток, МА, не более .....	20
Энергия лазерного импульса, МДж, не более .....	4
Мощность лазерного импульса, ТВт, не менее .....	500
Длина волны лазера, мкм .....	0,527
Максимальная длительность лазерного импульса, нс .....	100
Размер пятна лазерного импульса, мкм, не более .....	600
Индукция магнитного поля, Тл, не более .....	20

**Термоядерные стартапы с магнитно-инерционным удержанием плазмы.**

Множество различных компаний со всего мира проявляют интерес к малорадиоактивным или безнейтронным реакциям и альтернативным термоядерным системам. Такой интерес появился и у компаний General Fusion, TAE Technologies, HyperJet Fusion Corporation, Helion Energy (MSNW), Magneto-Inertial Fusion

Technologies Inc. (MIFTI), ZAP Energy, Sorloх и Tri Alpha Energy. Данные компании разрабатывают энергетические установки с магнитно-инерционным удержанием плазмы с различными реакциями и мощностями [12].

Плазменный ускоритель Helion — прототип компании Helion Energy. По задумке он будет повышать температуру термоядерного топлива до 100 млн градусов Цельсия и напрямую извлекать электроэнергию с помощью высокоэффективного импульсного подхода. Дейтериевое топливо или гелий-3 нагревается до плазменных условий, а магниты ограничивают ее в обращенной магнитной конфигурации (ОМК). Затем магниты ускоряют две ОКМ до 1.6 млн км/ч от противоположных концов ускорителя. Во время столкновения ОКМ в центре системы они дополнительно сжимаются мощным магнитным полем, пока не достигнут температуры термоядерного синтеза. При этой температуре ионы дейтерия и гелия-3 движутся достаточно быстро, чтобы преодолеть силы, которые сдерживали бы их, и они синтезируются. Это высвобождает больше энергии, чем потребляется в процессе УТС. По мере создания новой энергии УТС плазма расширяется. По мере расширения плазмы она отталкивает магнитное поле. По закону Фарадея изменение в поле порождает ток, непосредственно преобразующийся в электроэнергию, которую можно использовать для питания домов и зданий.

ТАЕ Technologies — одна из самых крупных в мире частных термоядерных компаний. В технологии ТАЕ, которая называется усовершенствованной конфигурацией с управляемым лучом и обращенным полем (FRC), используется нерадиоактивный водород-бор для генерации плазмы в тщательно изолированной области. Пучок, ускоряющий частицы, нагревает молекулы до состояния плазмы, а затем конфигурация с обращенным полем удерживает все вместе. Данная система кардинально отличается от токамаков и стеллараторов. Для реализации поставленной задачи команда ТАЕ ежедневно проводит в среднем 20 экспериментов на их рабочем реакторе Norman, который постоянно достигает температуры 50 млн градусов Цельсия, необходимой для поддерживающего плазменного реактора.

HyperJet Fusion Corporation — бывшая компания HyperV, которая занимается разработкой МИТС с плазменными струями. Входит в состав команды, объединяющей несколько научных институтов мира, таких как Los Alamos National Laboratory и University of New Mexico. Концептом данной компании является создание коммерческого термоядерного реактора, который будет работать в крупном сферическом корпусе (7,6 м) и с большим количеством плазменных пушек (около 600 шт.). Ключевое отличие заключается в отсутствии исходной намагниченной плазменной мишени. Во время работы над проектом ALPHA команда PLX-а представила концепцию, в которой был сформирован лайнер с холодным топливом D-T и лайнер с аргоном с высоким содержанием Z-пинча. После того как лайнер с высоким содержанием Z-пинча полностью сформиро-

вался вокруг лайнера D-T, лазерные импульсные волны запускаются во взрывающийся лайнер D-T, чтобы вызвать магнитное поле, позволяя теперь сферическому внутреннему лайнеру функционировать в качестве мишени. МИТС с лазерными струями обладает потенциалом благодаря относительно высокой частоте повторения от 1 до 2 циклов в секунду, что приближенно напоминает непрерывный источник термоядерной энергии.

В устройстве возможно использование толстой жидкой внутренней стенки, т. е. текучего слоя жидкого металла или расплавленной соли, в качестве основного теплоносителя для отвода теплоты из камеры термоядерной реакции. Такая стенка позволяет одновременно уменьшать повреждения конструкции сосуда нейтронами и служит в качестве среды добывания трития для поддержания топливного цикла D-T в реакторе. Ученые пришли к выводу, что для разработки коммерческого реактора существует ряд ключевых проблем. Это необходимость достижения достаточной однородности и давления лайнера, формирования совместимой намагниченной плазменной мишени и разработки плазменных пушек реакторного типа [13].

ZAP Energy — американская компания, которая стремится генерировать термоядерную энергию с помощью Z-пинча, стабилизированного сдвиговым потоком. Одним из последних изобретений компании является реактор FuZE-Q, строительство которого планируется завершить в середине 2022 г. Данное устройство позволит устранить необходимость в затратах и избежать сложностей при установке магнитных катушек, заменяя их импульсами электрического тока вдоль столба высокопроводящей плазмы. Данная технология дает возможность создавать магнитное поле, которое одновременно ограничивает, сжимает и нагревает ионизированный газ.

Концепт Zap Energy как раз основан на решении данной проблемы. Он называется стабилизацией сдвигового поля и позволяет устранить нестабильности плазмы, изменяя ее поток вдоль столба. Конструкция обшивает плазму вблизи центральной оси колонны более быстрой плазмой. Такое расположение удерживает плазму в сжатом состоянии дольше, чем это было возможно в предыдущих конфигурациях Z-пинча. До сих пор эксперименты подтверждают моделирование, которое предсказывало стабильность плазмы при усилении Z-пинча. Новое устройство позволит увеличить силу импульсов с 500 до более чем 650 кА. В данной работе используется понятие научной безубыточности, основанное на коэффициенте усиления  $Q$  — отношении мощности термоядерного синтеза к мощности, необходимой для поддержания плазмы в устойчивом состоянии. Так, по мнению главы отдела исследований и разработок компании Zap Energy Бэна Левитта, данное увеличение силы импульса позволит продемонстрировать безубыточность, т. е. добиться выполнения условия  $Q = 1$ . В конечном счете, даже если FuZE-Q достигнет безубыточности, будущие устройства будут производить еще более высокие токи, необходимые для достижения тех-

нической безубыточности, т. е. когда выходная электрическая мощность будет превышать мощность, необходимую для протекания реакции синтеза [14–17].

**Заключение.** Сравнение различных вариантов реализации МИТС позволило увидеть широкий спектр неисследованных задач и соответственно траекторию действия на ближайшее время. В работе представлено сравнение установок, которые используются для осуществления МИТС, а именно Z-Machine (MagLIF), NIF (MagNIF) и OMEGA (OMEGA EP). В статье рассмотрены и другие установки с описанием их применения в различного рода экспериментах. Также представлены стартапы последних десяти лет в области МИТС, которые в ближайшем будущем будут реализованы.

### Литература

- [1] Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М., Физматлит, 2017.
- [2] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A. et al. Fusion modes of an axially symmetrical mirror trap with the high power injection of fast particles. *Plasma Phys. Rep.*, 2012, vol. 38, no. 13, pp. 1025–1031. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063780X12080090>
- [3] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Phys. Plasmas*, 2019, vol. 26, no. 9, art. 092704. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5109830>
- [4] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Plasma dynamics modeling of the interaction of pulsed plasma jets. *Phys. Atom. Nuclei*, 2018, vol. 81, no. 10, pp. 1460–1464. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106377881811011X>
- [5] Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency. *Phys. Plasmas*, 2014, vol. 21, no. 2, art. 022501. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4863452>
- [6] Клименко Г.К., Кузенов В.В., Ляпин А.А. и др. Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021.
- [7] Barnak D.H., Davies J.R., Betti R. et al. Laser-driven magnetized liner inertial fusion on OMEGA. *Phys. Plasmas*, 2017, vol. 24, no. 5, art. 056310. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4982692>
- [8] Thio Y.C.F., Witherspoon F.D. Coaxial plasma gun development for plasma-jet driven magneto-inertial fusion (PJMIF). *Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of American Physical Society*, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35470.82241>
- [9] Thio Y.C.F., Hsu S.C., Witherspoon F.D. et al. Plasma-jet driven magneto-inertial fusion. *Fusion Sci. Technol.*, 2019, vol. 75, no. 7, pp. 581–598. DOI: <https://doi.org/10.1080/15361055.2019.1598736>
- [10] Spaeth M.L., Manes K.R., Kalantar D.H. et al. Description of the NIF laser. *Fusion Sci. Technol.*, 2016, vol. 69, no.1, pp. 25–145. DOI: <https://doi.org/10.13182/FST15-144>
- [11] Yager-Elorriaga D.A., Gomez M.R., Ruiz D.E. et al., An overview of magneto-inertial fusion on the Z machine at Sandia National Laboratories. *Nucl. Fusion*, 2022, vol. 62, no. 4, art. 042015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2dbe>

- [12] Wurden G.A., Hsu S.C., Intrator T.P. et al. Magneto-inertial fusion. *J. Fusion Energ.*, 2016, vol. 35, no. 1, pp. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10894-015-0038-x>
- [13] Lobner P. The fork in the road to electric power from fusion. HyperJet Fusion Corporation, 2021.
- [14] Clynes T. A pinch of fusion: Zap Energy’s new Z-pinch reactor will demonstrate a simpler approach to an elusive goal. *IEEE Spectrum*, 2022, vol. 59, no. 1, pp. 54–55. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2022.9676354>
- [15] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme. *Phys. Scr.*, 2021, vol. 96, no. 12, art. 125613. DOI: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac2543>
- [16] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. The qualitative and quantitative study of radiation sources with a model configuration of the electrode system. *Symmetry*, 2021, vol. 13, no. 6, art. 927. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13060927>
- [17] Кузенов В.В., Рыжков С.В. Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами. *ТВТ*, 2021, т. 59, № 4, с. 492–501. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364421040141>

**Батрак Никита Витальевич** — студент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Копалейшвили Никита Гелаевич** — студент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Рыжков Сергей Витальевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Батрак Н.В., Копалейшвили Н.Г. Сравнительный анализ различных вариантов магнитно-инерционного термоядерного синтеза. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 06(71). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-06-807>

---

## COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT VARIANTS OF MAGNETO-INERTIAL FUSION

N.V. Batrak

nik.nikita02@mail.ru

N.G. Kopaleyshvili

nikitakopaleyshvili@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

*A comparative analysis of different variants of magneto-inertial fusion is performed. Some of the experiments carried out at facilities used in magneto-inertial confinement of plasma are described. Information is presented on such facilities as NIF, OMEGA, OMEGA EP and Z-Machine. The basic thermophysical parameters of facilities equipped with high-pulse energy lasers and high-speed plasma jets are determined. It is shown that modern thermonuclear facilities, as well as those under development, could be used for a wide range of research and applications. Information on the latest concepts of thermonuclear facilities designed for magneto-inertial fusion is presented.*

### Keywords

*Magneto-inertial fusion, thermonuclear facility, liner, driver, target, power plant, laser driver, plasma jets*

Received 07.06.2022

© Bauman Moscow State Technical  
University, 2022

---

### References

- [1] Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu. Sistemy alternativnoy termoyadernoy energetiki [Systems of alternative fusion energy industry]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2017 (in Russ.).
- [2] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A. et al. Fusion modes of an axially symmetrical mirror trap with the high power injection of fast particles. *Plasma Phys. Rep.*, 2012, vol. 38, no. 13, pp. 1025–1031. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063780X12080090>
- [3] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Phys. Plasmas*, 2019, vol. 26, no. 9, art. 092704. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5109830>
- [4] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Plasma dynamics modeling of the interaction of pulsed plasma jets. *Phys. Atom. Nuclei*, 2018, vol. 81, no. 10, pp. 1460–1464. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106377881811011X>
- [5] Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency. *Phys. Plasmas*, 2014, vol. 21, no. 2, art. 022501. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4863452>
- [6] Klimenko G.K., Kuzenov V.V., Lyapin A.A. et al. Raschet, modelirovanie i proektirovanie generatorov nizkotemperaturnoy plazmy [Calculation, modeling and design of low-temperature plasma generators]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021 (in Russ.).
- [7] Barnak D.H., Davies J.R., Betti R. et al. Laser-driven magnetized liner inertial fusion on OMEGA. *Phys. Plasmas*, 2017, vol. 24, no. 5, art. 056310. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4982692>

- [8] Thio Y.C.F., Witherspoon F.D. Coaxial plasma gun development for plasma-jet driven magneto-inertial fusion (PJMIF). *Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of American Physical Society*, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35470.82241>
- [9] Thio Y.C.F., Hsu S.C., Witherspoon F.D. et al. Plasma-jet driven magneto-inertial fusion. *Fusion Sci. Technol.*, 2019, vol. 75, no. 7, pp. 581–598. DOI: <https://doi.org/10.1080/15361055.2019.1598736>
- [10] Spaeth M.L., Manes K.R., Kalantar D.H. et al. Description of the NIF laser. *Fusion Sci. Technol.*, 2016, vol. 69, no.1, pp. 25–145. DOI: <https://doi.org/10.13182/FST15-144>
- [11] Yager-Elorriaga D.A., Gomez M.R., Ruiz D.E. et al., An overview of magneto-inertial fusion on the Z machine at Sandia National Laboratories. *Nucl. Fusion*, 2022, vol. 62, no. 4, art. 042015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2dbe>
- [12] Wurden G.A., Hsu S.C., Intrator T.P. et al. Magneto-inertial fusion. *J. Fusion Energ.*, 2016, vol. 35, no. 1, pp. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10894-015-0038-x>
- [13] Lobner P. The fork in the road to electric power from fusion. HyperJet Fusion Corporation, 2021.
- [14] Clynes T. A pinch of fusion: Zap Energy’s new Z-pinch reactor will demonstrate a simpler approach to an elusive goal. *IEEE Spectrum*, 2022, vol. 59, no. 1, pp. 54–55. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2022.9676354>
- [15] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme. *Phys. Scr.*, 2021, vol. 96, no. 12, art. 125613. DOI: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac2543>
- [16] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. The qualitative and quantitative study of radiation sources with a model configuration of the electrode system. *Symmetry*, 2021, vol. 13, no. 6, art. 927. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13060927>
- [17] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical modeling of interaction between thermonuclear fusion target and plasma and laser drivers. *TVT*, 2021, vol. 59, no. 4 pp. 492–501. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364421040141> (in Russ.).

**Batrak N.V.** — Student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Kopaleishvili N.G.** — Student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Ryzhkov S.V., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Batrak N.V., Kopaleishvili N.G. Comparative analysis of different variants of magneto-inertial fusion. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 06(71). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-06-807.html> (in Russ.).