

УДК 532.5+519.673

НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МИШЕНЯМ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

© 2022 г. С. П. Баутин^{1,*}, Ю. В. Николаев^{1,**}, Е. И. Понькин^{1,***}

¹ Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Челябинской области, 456776, Россия

*e-mail: spbautin@mail.ru

**e-mail: ynikolaev@list.ru

***e-mail: epnk@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.04.2022 г.

После доработки 16.04.2022 г.

Принята к публикации 26.04.2022 г.

На примере рассмотрения мишеней для лазерного термоядерного синтеза, используемых на американской установке NIF, обсуждаются причины предлагаемых рекомендаций по изменениям мишеней и ожидаемые последствия этих изменений. В том числе, возможное повышение устойчивости течения сжатия, а также определенная экономия энергии внешнего воздействия. Предлагаемые изменения основаны на анализе результатов достаточно продолжительного математического моделирования газодинамических течений, возникающих при различных видах фокусировки сплошной среды в уменьшающийся объем. Главный из этих результатов — математическая теория безударного сильного сжатия идеального газа.

Ключевые слова: лазерный термоядерный синтез, мишени, сильное сжатие, неустойчивость течений, математическое моделирование

DOI: 10.56304/S2304487X22010035

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих странах (см., например [1–3]) созданы установки для реализации лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), на которых проводятся эксперименты для получения термоядерной энергии без использования для этого энергии атомного взрыва.

В данной работе на примере мишеней для американской установки NIF (National Ignition Facility) обсуждаются результаты проводимых на этой установке экспериментов и выводы, которые следуют из этих результатов. На рис. 1 приведен общий вид установки NIF, а в правом нижнем углу рисунка показаны размеры бокс-конвертора, в котором помещается DT-топливо. Специалисты по ЛТС используют следующую терминологию: бокс-конвертор называется мишенью; объем, содержащий DT-топливо, называется капсулой. Далее в работе используются именно эти названия для соответствующих объектов. На рис. 2 приведена мишень с капсулой и схема воздействия лазерного облучения на мишень и капсулу. На рис. 3 приведено состояние капсулы в один из моментов времени конкретного эксперимента.

Все проведенные эксперименты на установке NIF не дали требуемого результата. То есть на установке NIF не возникала термоядерная реак-

ция с такими характеристиками, чтобы в результате выделилась бы энергия большая, чем энергия, вложенная для получения этой реакции. Многими специалистами предполагается, что эти результаты есть следствие неустойчивости сжатия капсул на установке NIF.

Также общепринятым считается, что основной причиной отсутствия экспериментального зажигания дейтериево-тритиевой смеси в капсуле



Рис. 1. Общий вид установки NIF и бокс-конвертора.

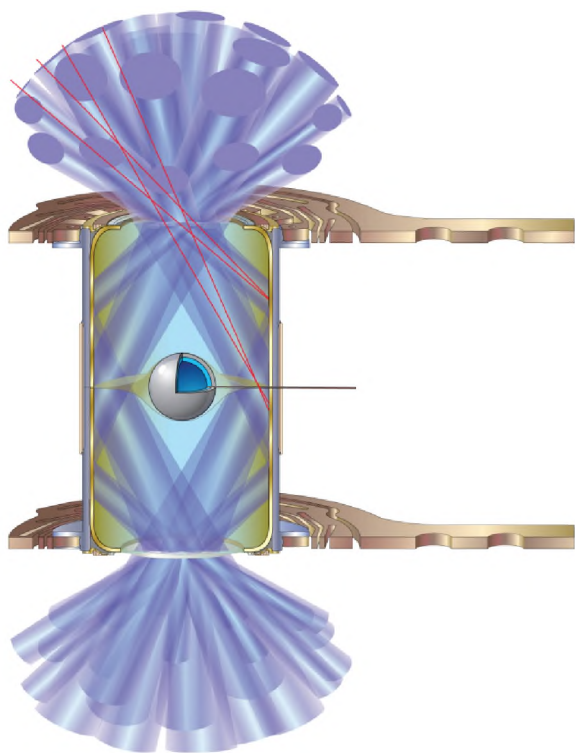


Рис. 2. Мишень с капсулой и схема воздействия лазерного излучения на мишень и капсулу.

является неоднородность внешнего воздействия на поверхность капсулы. Такая неоднородность приводит к развитию возмущений на внешней границе капсулы, что нарушает симметрию сжатия к моменту времени возможной работы капсулы. На неоднородность сжатия также влияет подвес, который удерживает капсулу в мишени. Обстоятельствами, которые также препятствуют успеху в этом направлении, можно считать вопросы технологии изготовления капсул и временные характеристики лазерного облучения.

Приводимые далее в работе рекомендации по изменению мишени и капсулы являются результатом разностороннего и достаточно продолжительного по времени математического моделирования сильного сжатия идеального газа [4–13]. В том числе, в работе существенно учтены результаты недавних исследований [9–13].

Повышение однородности внешнего воздействия

Представляется, что замена цилиндрической мишени для капсулы на мишень сферической формы улучшит однородность внешнего воздействия.

Возможно, что наличие внешней золотой обложки на капсуле, как это предлагается в работе [14] для цилиндрически симметричной мишени, будет выступать в роли некоторого бампера (об-

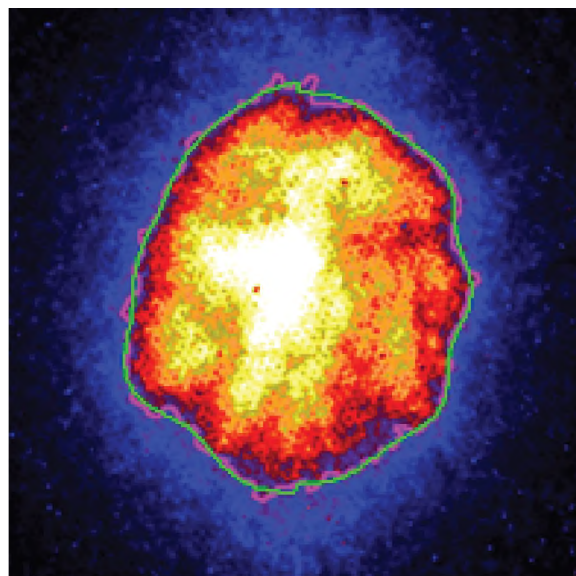


Рис. 3. Состояние капсулы в промежуточный момент времени конкретного эксперимента.

щей рессоры), делающим более однородным внешнее воздействие на границу капсулы.

Естественно, что высказывание каких-либо рекомендаций по формированию пучков лазерного излучения лежит за пределами компетентности авторов этой статьи, хотя увеличение на мишени числа мест вхождения лазерных лучей возможно тоже повысит однородность внешнего воздействия на капсулу.

Изменения геометрии капсул

Капсула в виде шара эффективна, только когда внешнее воздействие имеет свойство самосимметризации. Именно это свойство имеет место при схождении к центру или к оси симметрии детонационных волн. Но если нет самосимметризации внешнего воздействия, то амплитуды неоднородностей, имеющих на границе капсулы, не убывают в процессе сжатия, но при этом размеры капсулы уменьшаются. Следовательно, отношение этих величин растет. Это и есть простейшее проявление неустойчивости фокусирующихся течений сжатия. Математическое моделирование процессов сферического и цилиндрического сжатия сплошной среды подтверждает это как в случае фокусировки ударной волны [15], так и при фокусировке течений со слабыми разрывами [4–6].

Решение этой проблемы возможно состоит в том, чтобы использовать такие конфигурации капсул, у которых при уменьшении их размеров не стремились бы к нулю радиусы кривизны поверхностей, разделяющих капсулу и область внешнего воздействия. Такими капсулами являются, например, тетраэдр или треугольная приз-

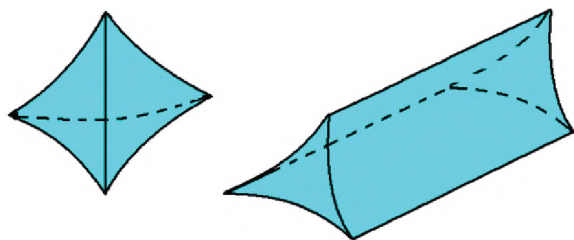


Рис. 4. Возможные конфигурации капсул.

ма [7, 8], у которых внешние грани вогнуты к центру тетраэдра или к оси симметрии призмы (см. рис. 4).

Помимо большей устойчивости течений сжатия для таких капсул особой спецификой является то, что в угловых областях течений имеет место большое увеличение давления. Ранее это было подтверждено как установлением асимптотик процесса такого сжатия [16], так и доказательством существования составных изэнтропических течений для соответствующих начально-краевых задач [5, 6]. В работах [11, 13] определены количественные характеристики сжатия газа, первоначально заполняющего призматические объемы. На рис. 5 приведено распределение давления в одном таком течении сжатия. Здесь: AB , BD , FA — линии симметрии течения; DEF — составная поверхность сжимающего поршня; в области $ABCG$ однородный покоящийся газ; в области $CDEG$ плоская центрированная волна сжатия; в области EFG автомодельная двумерная волна Сучкова, которая в окрестности вершины угла $\angle EFG$ имеет область повышенного давления; CG и EG — звуковые характеристики, которые разделяют соответственно покой и плоскую центрированную волны, эту волну и двумерную волну Сучкова.

Капсулы с такими конфигурациями также можно покрывать слоем золота для снижения неоднородности внешнего воздействия. При этом в случае, когда радиус золотой оболочки будет убывать в процессе сжатия (как, например, в конфигурации, предложенной в [14]), то это приведет к нарушению симметрии оболочки: поскольку одна и та же масса оболочки должна будет входить во все меньший объем. А в случае, когда поверхность оболочки вогнута к центру или к оси симметрии капсулы, то в процессе сжатия капсулы “лишние” объемы оболочки будут складываться вне капсулы (см. рис. 6).

Капсулы с сердечниками

Еще одна рекомендация по капсулам с ДТ-топливом для ЛТС: помещать в центр тетраэдрной капсулы (см. рис. 4) или на ось симметрии

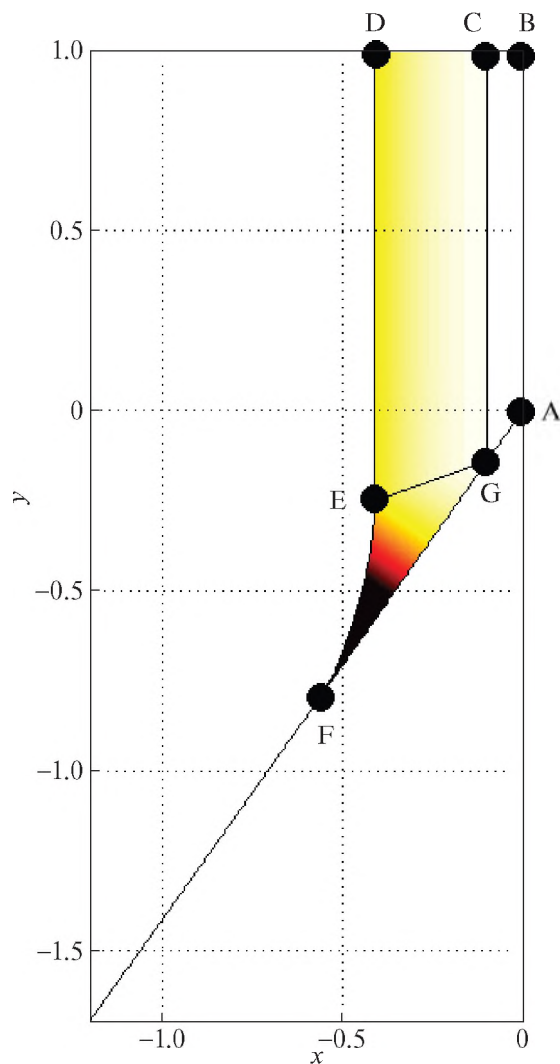


Рис. 5. Распределение давления при сжатии призматического объема газа.

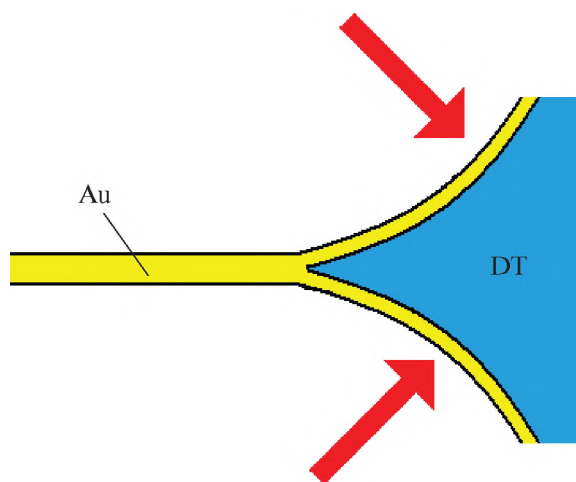


Рис. 6. Поведение оболочки в процессе сжатия капсулы.

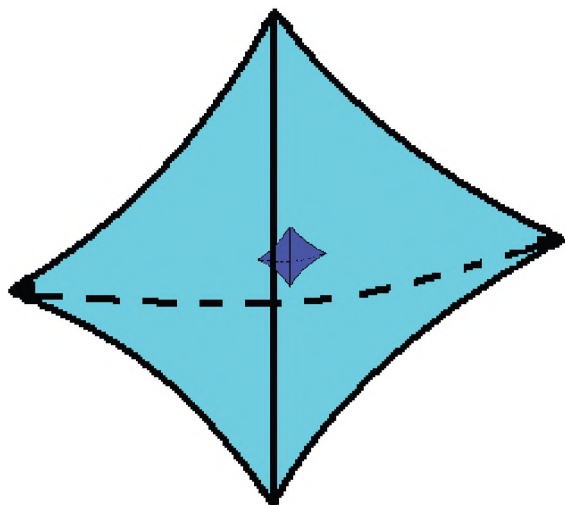


Рис. 7. Капсула с сердечником.

призматической капсулы твердый сердечник, повторяющий геометрию капсулы и имеющий соответствующий размер. Главный смысл этой рекомендации: возникающее отражение сжимаемой среды от сердечника будет, во-первых, повышать плотность среды, а, во-вторых, для получения соответствующих степеней сжатия потребуется меньший внешний энергетический вклад.

Эти выводы следуют из результатов работ [9, 10, 12], в которых численно смоделирован без-

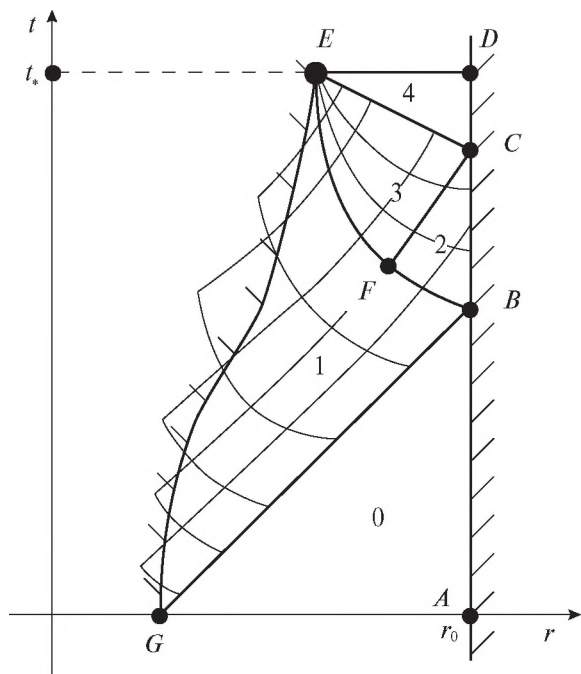


Рис. 8. Область построения течений в задаче сжатия “из покоя в покой”.

ударный переход однородного покоящегося газа под действием сжимающего поршня также в однородное покоящееся состояние, но с большим значением плотности — переход “из покоя в покой”. В частности в этих работах установлено, что при данном способе сжатия газа значение энергии, затраченной движущимся поршнем на сжатие газа, меньше, чем при других способах сжатия. И при этом время воздействия чуть больше.

На рис. 8 показана область определения составного течения при переходе газа “из покоя в покой”. Здесь: прямая AD — неподвижная стенка, выполняющая роль сердечника, отражающего течение, порожденное движением сжимающегося поршня; линия GE — траектория движения сжимающегося поршня; линии GB, BFE, FC, EC — звуковые характеристики непрерывного составного течения сжатия; цифрами 0–4 помечены разные области составного течения, причем в областях с номерами ноль и четыре находится однородный покоящийся газ с начальной и итоговой плотностями соответственно; в точке E имеется особенность течения, аналогичная особенностям в плоской централизованной волне.

На рис. 9 приведено поведение с течением времени плотности газа на сжимающем поршне, а также распределение плотности сжатого газа в финальный момент сжатия $t = t_*$ в четвертой области течения (см. рис. 8). Особенность течения в точке E передает разрыв плотности газа в этой точке: на поршне плотность строго меньше, чем плотность сжатого газа.

На рис. 10 приведена зависимость от времени работы, произведенной сжимающим поршнем при переходе “из покоя в покой”. Представляется, что реализовать в эксперименте такой характер вложения внешней энергии в процесс сжатия

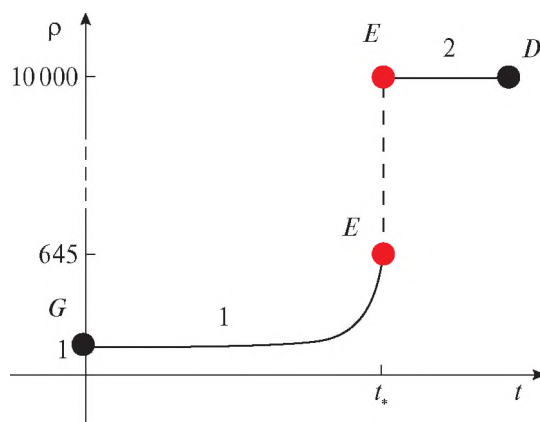


Рис. 9. Поведение плотности на сжимающем поршне и распределение плотности в финальный момент сжатия “из покоя в покой”.

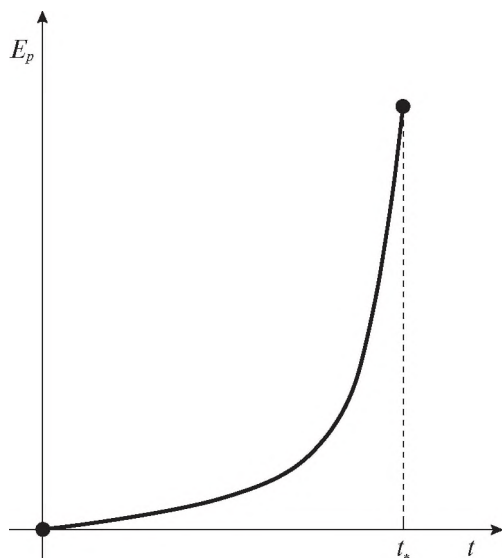


Рис. 10. Зависимость от времени работы, производимой сжимающим поршнем.

капсулы является достаточно сложной задачей для физиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение еще раз перечислим предложенные рекомендации по мишеням и капсулам для ЛТС: контейнер для капсулы делать сферическим и увеличить на нем число мест вхождения лазерных лучей; в качестве капсулы брать не шар, а тетраэдр, у которого внешние грани должны быть вогнутыми к центру капсулы; в геометрический центр капсулы помещать твердый сердечник, повторяющий общую геометрию капсулы; возможно покрывать капсулу слоем золота.

Поскольку затраты на изготовление капсулы намного меньше затрат на создание всей физической установки для реализации ЛТС и на проведение экспериментов, то можно предположить, что учет сделанных в данной работе рекомендаций не потребует очень больших инженерных и финансовых вложений.

В конце отметим, что предлагаемые конструктивные изменения мишеней и капсул окажут влияние скорее всего только на газодинамические аспекты сжатия термоядерного топлива для реализации ЛТС. Естественно, что выводы об эффективности любых мишеней и капсул, включая предложенные в этой статье, можно будет сделать только по результатам физических экспериментов. И которым, конечно же, должно предшествовать надежное математическое моделирование с помощью трехмерных нестационарных расчетов соответствующих течений сжатия.

Авторы с благодарностью вспоминают участие профессора Долголевой Галины Владимировны в обсуждениях возможных конфигураций мишеней и капсул для ЛТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильяев Р.И., Гаранин С.Г. Исследование проблем термоядерного синтеза на мощных лазерных установках // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 6. С. 503–513.
2. Bernstein L.A. Reactions on Excited States Using the National Ignition Facility. Nuclear Astrophysics Using NIF. Preprint № UCRL PRES-233342. Lawrence Livermore Nat. Lab., Livermore, 2007.
3. Wanguo Zheng, Xiaofeng Wei, Qihua Zhu, Feng Jing, Dongxia Hu, Xiaodong Yuan, Wanjun Dai, Wei Zhou, Fang Wang, Dangpeng Xu, Xudong Xie, Bin Feng, Zhitao Peng, Liangfu Guo, Yuanbin Chen, Xiongjun Zhang, Lanqin Liu, Donghui Lin, Zhao Dang, Yong Xiang, Rui Zhang, Fang Wang, Huaiting Jia, and Xuwei Deng. Laser performance upgrade for precise ICF experiment in SG-III laser facility. Matter and Radiation at Extremes, 2017. V. 2. P. 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.mre.2017.07.004>
4. Баутин С.П. Математическая теория безударного сильного сжатия идеального газа. Новосибирск: Наука, 1997. 160 с.
5. Баутин С.П. Математическое исследование безударного сжатия газа // Успехи механики. 2002. Т. 1. № 2. С. 3–36.
6. Баутин С.П. Математическое моделирование сильного сжатия газа. Новосибирск: Наука, 2007. 312 с.
7. Баутин С.П. Об одной конструкции мишеней для управляемого термоядерного синтеза. Забавихинские научные чтения: сборник материалов X Международной конференции. Снежинск: издательство РФЯЦ–ВНИИ ТФ, 2010. С. 30–31.
8. Баутин С.П. Мишень для получения термоядерных реакций // Патент РФ 2432627, МПК G21B 1/19(2006.01), 2011.
9. Баутин С.П., Николаев Ю.В. Численное решение задачи о сжатии газа из покоя в покой // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 5. С. 55–65.
10. Баутин С.П., Николаев Ю.В. Численное решение задачи о сжатии газа при заданном законе воздействия // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26. № 6. С. 20–32.
11. Баутин С.П., Понькин Е.И. Автомодельные решения задачи об истечении политропного газа в вакуум с косой стенки // Прикладная механика и техническая физика. 2021. Т. 62. № 1. С. 32–42.
12. Баутин С.П., Николаев Ю.В. Алгоритм построения произвольной сетки численного решения задачи безударного сжатия газа // Математические структуры и моделирование. 2021. Т. 58. № 2. С. 53–64.
13. Понькин Е.И. Математическое описание двух способов газодинамического воздействия на мишень с использованием решения Сучкова // Вопросы атомной науки и техники, серия “Математическое

- моделирование физических процессов”. 2022 (в печати).
14. Долголева Г.В., Забродин А.В. Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2004, 72 с.
 15. Брушлинский К.В. Неустойчивость сходящейся сферической ударной волны // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1982. Т. 2. № 6. С. 1468–1479.
 16. Сидоров А.Ф. Некоторые оценки степени кумуляции энергии при плоском и пространственном сжатии газа // Доклады АН. 1991. Т. 318. № 3. С. 548–552.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta “MIFI”, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 44–50

Some Recommendations on Targets for Laser Fusion

S. P. Bautin^{a, #}, Yu. V. Nikolaev^{a, ##}, and E. I. Ponkin^{a, ###}

^a Snezhinsk Institute of Physics and Technology, National Research Nuclear University MEPhI,
Snezhinsk, Chelyabinsk region, 456776 Russia

[#]e-mail: spbautin@mail.ru

^{##}e-mail: ynikolaev@list.ru

^{###}e-mail: epnk@rambler.ru

Received April 15, 2022; revised April 16, 2022; accepted April 26, 2022

Abstract—Proposed recommendations for target changes and the expected consequences of these changes, in particular, a possible increase in the stability of the compression flow, as well as a certain energy saving of external influence, are discussed in application to laser fusion targets used at the American NIF facility. The proposed changes are based on the analysis of the results of a quite long-term mathematical simulation of gas-dynamic flows arising from various types of focusing of a continuous medium into a decreasing volume. The mathematical theory of shockless strong compression of an ideal gas is the main result of this work.

Keywords: laser fusion, targets, strong compression, flow instability, mathematical simulation

DOI: 10.56304/S2304487X22010035

REFERENCE

1. Ilkaev R.I., Garanin S.G. Issledovanie problem termoajdernogo sinteza na moshnykh lazernykh ustanovkakh [Investigation of the problems of thermonuclear fusion on high-power laser facilities]. *Vestnik RAN*. 2006, vol. 76, no. 6, pp. 503–513. (in Russian)
2. Bernstein L.A., Reactions on Excited States Using the National Ignition Facility. Nuclear Astrophysics Using NIF. Preprint no. UCRL PRES-233342. Lawrence Livermore Nat. Lab., Livermore, 2007.
3. Wanguo Zheng, Xiaofeng Wei, Qihua Zhu, Feng Jing, Dongxia Hu, Xiaodong Yuan, Wanjuan Dai, Wei Zhou, Fang Wang, Dangpeng Xu, Xudong Xie, Bin Feng, Zhitao Peng, Liangfu Guo, Yuanbin Chen, Xiongjun Zhang, Lanqin Liu, Donghui Lin, Zhao Dang, Yong Xiang, Rui Zhang, Fang Wang, Huaiting Jia, and Xuewei Deng, Laser performance upgrade for precise ICF experiment in SG-III laser facility. *Matter and Radiation at Extremes*, 2017, vol. 2, pp. 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.mre.2017.07.004>.
4. Bautin S.P. *Matematicheskaya teoriya bezudarnogo silnogo szatija idealnogo gaza* [Mathematical theory of shockless strong compression of an ideal gas]. Novosibirsk. Nauka. Publ., 1997, 160 p.
5. Bautin S.P. Matematicheskoe issledovanie bezudarnogo szatija gaza [Mathematical study of shockless gas compression]. *Uspehi mehaniki*. 2002, vol. 1, no. 2, pp. 3–36. (in Russian)
6. Bautin S.P. *Matematicheskoe modelirovanie silnogo szatija gaza* [Mathematical modeling of strong gas compression]. Novosibirsk, Nauka, 2007, 312 p.
7. Bautin S.P. Ob odnoi konstrukcii mishenei dlja upravljajemogo termoajdernogo sinteza [On one design of targets for controlled thermonuclear fusion]. *Zababashskie scientific readings. Collection of materials of the X International Conference*. Snezhinsk. RFNC-VSRI TP, 2010, pp. 30–31. (in Russian)
8. Bautin S.P. *Misen dlja polucheniya termoajdernih reakcii* [Target for obtaining thermonuclear reactions]. Patent RF 2432627, MPK G21B 1/19(2006.01), 2011.
9. Bautin S.P., Nikolaev Yu.V. Chislennoe reshenie zadachi o szatii gaza iz pokoja v pokoi [Numerical solution of the problem of gas compression from rest to rest]. *Vychislitelnye tehnologii*. 2020, vol. 25, no. 5, pp. 55–65. (in Russian)
10. Bautin S.P., Nikolaev Yu.V. Chislennoe reshenie zadachi o szatii gaza pri zadannom zakone vozdeistviya [Numerical solution of the problem of gas compression for

- a given action law]. *Vychislitelnye tehnologii*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 20–32. (in Russian)
11. Bautin S.P., Ponkin E.I. Avtomodelnye resheniaj zadachi ob istechtnii politropnogo gaza v vfkuum s kosoi stenki [Self-similar solutions to the problem of outflow of a polytropic gas into vacuum from an oblique wall]. *Pricladnaja mehanika i tehničeskaja fizika*, 2021, vol. 62, no. 1, pp. 32–42. (in Russian)
 12. Bautin S.P., Nikolaev Yu.V. Algoritm postroeniaj proizvolinoi setki hislennogo resheniaj zadachi bezudarnogo szftiaj gaza [An algorithm for constructing an arbitrary grid for the numerical solution of the problem of shockless gas compression]. *Matematicheskie struktury i modelirovanie*, 2021, vol. 58, no. 2, pp. 53–64. (in Russian)
 13. Ponkin E.I. Matematicheskoe opisanie dvuh sposobov gazo dinamicheskogo vozdeisnviaj na mishaen s ispolzovaniem resheniaj Suchkova [Mathematical description of two methods of gas-dynamic impact on the target using the Suchkov solution]. *Voprosy atomnoi nauki i tehniki. Seriaj "Matematicheskoe modelirovanie"* (in the press). (in Russian)
 14. Dolgoleva G.V., Zabrodin A.V. *Kumulajcyaj energii v sloistyh sistemah i realizacyaj bezudarnogo szatiaj* [Energy accumulation in layered systems and implementation of shockless compression]. Moskva, Fizmatlit. Publ. 2004, 72 p. (in Russian)
 15. Brushlinskii K.V. Neustoichivost shodajshesaj sfericheskoi udarnoi volny [Instability of a converging spherical shock wave]. *Zurnal vychislitelnoi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 1982, vol. 2, no. 6, pp. 1468–1497. (in Russian)
 16. Sidorov A.F. Nekotorye ocenki stepeni kumulajcyi energii pri ploakom i prostranstvennom szatii gaza [Some Estimates of the Degree of Energy Cumulation in Planar and Spatial Gas Compression]. *Doklady AN*, 1991, vol. 318, no. 3, pp. 548–552. (in Russian)