

ДВУМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ЛАЗЕРНОМ СЖАТИИ СТЕКЛЯННЫХ ОБОЛОЧЕК *

П.П. Волосевич, Е.Г. Гамалий, А.В. Гулин, В.Б. Розанов,
А.А. Самарский, Н.Н. Тюрина, А.П. Фаворский

Приводятся результаты двумерных расчетов сжатия лазерным излучением стеклянных оболочек, изучаемых на эксперименте. Обсуждается влияние разных типов начальных возмущений на динамику сжатия и плазменные параметры мишени.

1. В настоящее время сжатие тонкостенных стеклянных оболочек с газом внутри и без него интенсивно изучается как теоретически [1], так и экспериментально [2]. Весьма важным в общей проблеме лазерного синтеза является вопрос о гидродинамической устойчивости процесса сжатия, в частности о возможности ее изучения на современном экспериментальном уровне. Имеется ряд теоретико-расчетных работ, в которых проблема устойчивости рассматривается для больших энергий лазера (10^6 Дж) и при высоких степенях сжатия, необходимых для достижения значительного термоядерного выхода [3].

В предлагаемой работе обсуждаются результаты двумерных расчетов по определению влияния различных типов возмущений в начальных условиях на устойчивость сжатия стеклянных оболочечных мишеней с параметрами, соответствующими эксперименту [2].

2. Решается система уравнений, описывающих осесимметричные гидродинамические течения с электронной теплопроводностью. Предусмотрена возможность введения уравнения состояния вещества с учетом "холодного" сжатия, эффектов вырождения электронов, неравномерной ионизации, учета электронно-ионной релаксации и некоторых других физических эффектов.

В основу методики численного решения положены дивергентные разностные схемы, позволяющие перенести основные законы сохранения, справедливые для систем дифференциальных уравнений, на их дискретные аналоги [4]. Применение криволинейных сеток с сохранением одного из семейств лагранжевых линий позволяет проследить развитие неустойчивости границ вплоть до нелинейной стадии течения.

*Письма в ЖЭТФ, 1976, т. 24, в. 5, с. 283-286.

3. Основная цель расчетов – выяснить влияние начальных возмущений разного типа на плазменные параметры мишени в конечной стадии сжатия для двумерного случая. Рассматривались возмущения двух типов: отклонения от однородности потока в виде

$$q(t, \theta) = q_0(t)(1 + a \sin n\theta) \quad (1)$$

и вариации формы оболочки в начальный момент времени

$$R(\theta) = R_0 \left(1 + \frac{\Delta_0}{R_0} \sin n\theta\right). \quad (2)$$

Здесь θ – азимутальный угол, отсчитываемый от оси симметрии, $q_0(t)$ – невозмущенный поток излучения, a – относительная амплитуда возмущения потока, R_0 – начальный радиус оболочки, Δ_0 – амплитуда возмущения формы, n – номер гармоники.

В качестве исходных параметров мишени и лазерного импульса были взяты параметры экспериментально изучаемых мишеней (масса мишени $\approx 10^{-7}$ г, энергия лазера ≤ 100 Дж) [2] (см. рис. 1). Варьировались номер гармоники ($n = 2, 6, 10$) и амплитуда возмущения (от долей процента до нескольких процентов).

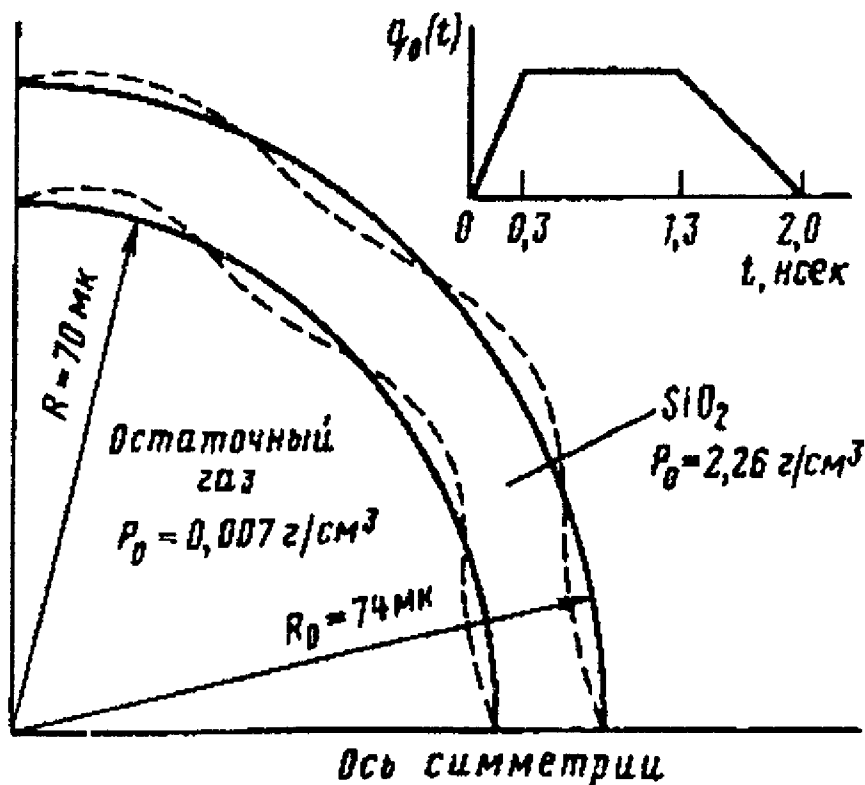


Рис. 1

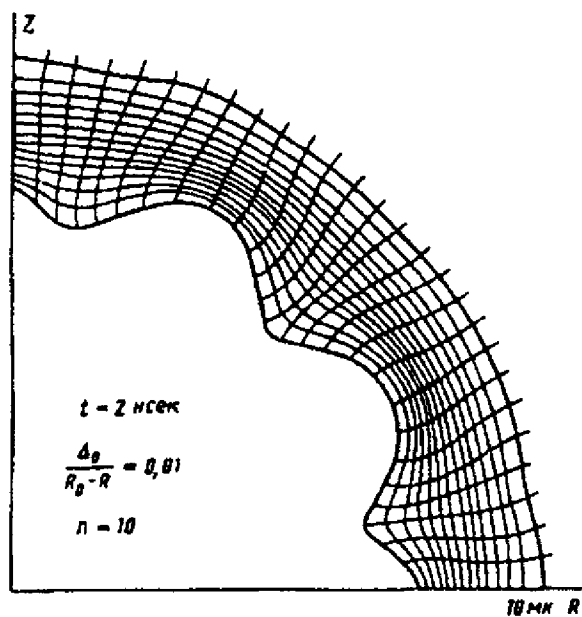


Рис. 2. Возмущение формы

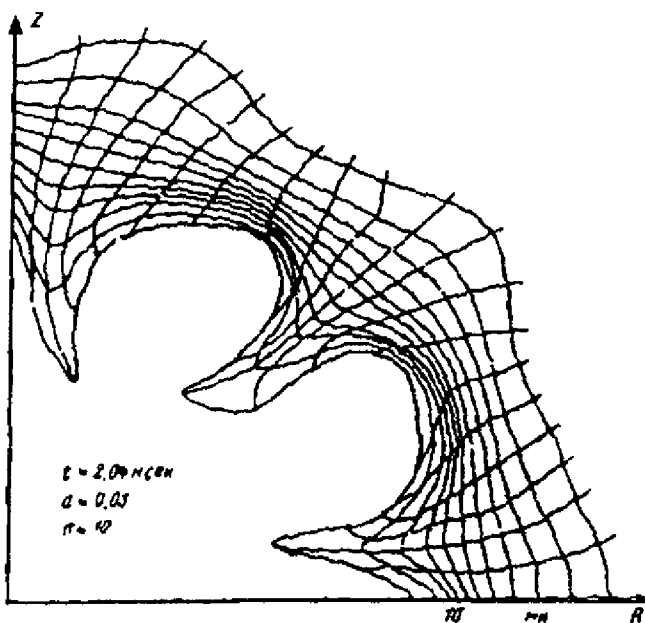
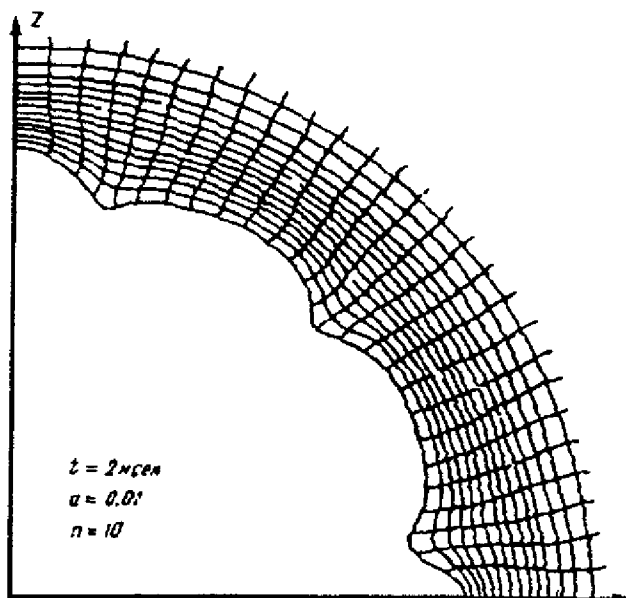


Рис. 3. Возмущение потока

4. Как известно [5], в процессе ускорения и сжатия оболочки возникает, по крайней мере, две стадии релей-тейлоровской неустойчивости [6]: во время ускорения неиспаренной части оболочки малоплотной горячей "корона" и при торможении нагретым в процессе сжатия центром холодных "остатков" оболочки. Как уже отмечалось в [3], существенную роль может играть выравнивание возмущений теплопроводностью на всех стадиях сжатия, если конечно, температуры достаточно велики. Усредненные плазменные параметры мишени следующие: электронная температура в "короне" $0,6 \div 1 \text{кэВ}$, плотности в сжатом ядре $\approx 5 \text{г/см}^3$, а в холодной части оболочки $\leq 200 \text{г/см}^3$, температура ионов в центре мишени $\approx 0,5 \text{кэВ}$.

Анализ результатов показал следующее. Развитие возмущений на стадии ускорения идет более медленно, чем на стадии торможения вещества вблизи центра для всех рассмотренных амплитуд возмущения (до 5%). Характерно, что возмущения потока приводят к меньшим амплитудам на конечной стадии, чем возмущения формы той же относительной величины, что свидетельствует о теплопроводном выравнивании (см.рис.2 и рис.3). Однако это выравнивание гораздо слабее, чем отмечено в работе [3], так что возмущения потока даже небольшой амплитуды (1 — 5%) приводят к искажению формы оболочки. Точно так же можно заметить и уменьшение теплопроводного выравнивания на конечной стадии. Эти факты связаны с тем, что температура плазмы в рассматриваемых задачах как в "короне", так и в сжатом ядре существенно меньше, чем в [3].

Отметим, что рост возмущений на стадии свободного полета оболочки (после ускорения, но до торможения) из-за релей-тейлоровской неустойчивости должен отсутствовать, так как движение устойчиво, однако относительная амплитуда возмущения все же растет. Для объяснения этого эффекта можно считать, что соседние участки сферической поверхности не взаимодействуют друг с другом, т.е. двигаются так, как это следует из одномерного расчета. Тогда увеличение амплитуды возмущения поверхности можно вычислить, исходя из начальных условий (разница в скоростях или массах соседних участков) и результатов одномерного расчета. Оценка, сделанная по этому рецепту, и результаты двумерного расчета хорошо согласуются.

Наиболее сильно возмущения развиваются на конечной стадии торможения (см.рис.3). Заметно, что линейная фаза роста возмущений переходит в нелинейную; можно говорить о начале образования струй

(см.рис.2 и рис.3). Это обстоятельство видно как для возмущений потока, так и для возмущений формы большой амплитуды (5%). Однако, в рассмотренном диапазоне амплитуд и номеров гармоник возмущений отклонение усредненных по объему плазменных параметров от полученных в одномерных расчетах остается незначительным. Таким образом, обнаружить по интегральным измерениям, например, по фотографиям при помощи камеры-обскуры, влияние возмущений с амплитудой менее 5%, видимо, нельзя. Возмущения величиной более 10% могут привести к существенному отклонению конечной формы мишени от сферической. В этом случае результаты двумерного расчета могут быть использованы для предсказания интегральной картины свечения в рентгеновских лучах и сравнения последней с соответствующим экспериментом.

Литература

1. Ю.В. Афанасьев, П.П. Волосевич, Е.Г. Гамалий, О.Н. Крохин, С.П. Курдюмов, Е.И. Леванов, В.Б. Розанов. Письма в ЖЭТФ, 23, 470, 1976.
2. Н.Г. Басов, А.А. Кологривов, О.Н. Крохин, А.А. Рупасов, Г.В. Склизков, А.С. Шиканов. Письма в ЖЭТФ, 23, 474, 1976.
3. А.А. Бунатян, В.Е. Неуважаев, Л.П. Стропцева, В.Л. Фролов. Препринт ИПМ АН СССР N 71, 1975 г.
4. А.А. Самарский. Введение в теорию разностных схем. М., изд. Наука, 1971 г.
5. Ю.В. Афанасьев, Н.Г. Басов, Е.Г. Гамалий, О.Н. Крохин, В.Б. Розанов. Письма в ЖЭТФ, 23, 617, 1976.
6. S. Chandrasekhar. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. Clarendon Press. Oxford, 1961.