

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 532.2

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_56

О ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ДВОЙНИКАХ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ПЛАЗМЫ

А.О. БликовORCID: 0000-0002-3585-7827 e-mail: mcleodjr@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Г.С. Яндубаев**ORCID: 0000-0003-4943-1410 e-mail: gsyandubaev@vniief.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.А. Мочалов**ORCID: 0000-0002-6549-8984 e-mail: mamochalov@vniief.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***С.В. Ерунов**ORCID: 0000-0002-3406-3208 e-mail: sverunov@vniief.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.А. Огородников**ORCID: 0000-0002-8301-8016 e-mail: vaogorodnikov@vniief.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Предложена расчетная схема взрывного нагружающего устройства для исследования экстремальных состояний неидеальной плазмы, реализующихся в устройствах термоядерной энергетики (гидродинамический двойник, ГДД). Она позволяет моделировать движение оболочек такого устройства с помощью задания на внешней границе камеры высокого давления граничного условия второго рода. Преимуществом подхода является удобство представления манеры счета посредством замены подбираемых входных параметров, характеризующих нагружающее устройство, диаграммой скорости наружной границы оболочки первого каскада, проверяемой экспериментально в опытах с газодинамическими макетами нагружающих устройств. Применение ГДД позволит осуществить валидацию имеющихся в России и за рубежом уравнений состояния, разработать более совершенные расчетные коды для численного моделирования устройств лазерного и газодинамического термоядерного синтеза.

Ключевые слова: термоядерный синтез, взрывные нагружающие устройства, квазиизэнтропическая сжимаемость, газодинамическое моделирование, неидеальная плазма, дейтерий, гелий.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бликов, А.О. О гидродинамических двойниках взрывных нагружающих устройств для исследования экстремальных состояний плазмы / А.О. Бликов, Г.С. Яндубаев, М.А. Мочалов, С.В. Ерунов, В.А. Огородников // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 56-65. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_56

ON HYDRODYNAMIC TWINS OF EXPLOSIVE LOADING DEVICES FOR INVESTIGATING THE EXTREME STATES OF PLASMAS

A.O. Blikov

ORCID: **0000-0002-3585-7827** e-mail: **mcleodjr@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

G.S. Yandubaev

ORCID: **0000-0003-4943-1410** e-mail: **gsyandubaev@vniief.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Mochalov

ORCID: **0000-0002-6549-8984** e-mail: **mamochalov@vniief.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

S.V. Erunov

ORCID: **0000-0002-3406-3208** e-mail: **sverunov@vniief.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.A. Ogorodnikov

ORCID: **0000-0002-8301-8016** e-mail: **vaogorodnikov@vniief.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A simplified calculated scheme of an explosive loading device for researching the extreme states of non-ideal plasma realized in thermonuclear energy devices (hydrodynamic twin, HDT) is proposed. It allows simulating the motion of the shells of such device by specifying a second-type boundary condition on the external boundary of the high-pressure chamber. The advantage of this approach is convenience of representing the manner of counting by replacing the selected input parameters characterizing the loading device with the velocity diagram of the external boundary of the shell of the first cascade, which is verified experimentally in experiments with gas-dynamic models of loading devices. The application of HDT will make it possible to validate the equations of state available in Russia and abroad, to develop more advanced calculation codes for numerical simulation of laser and gas-dynamic fusion devices.

Key words: thermonuclear fusion, explosive loading devices, quasi-isentropic compressibility, gas-dynamic computation, non-ideal plasma, deuterium, helium.

FOR CITATION: A.O. Blikov, G.S. Yandubaev, M.A. Mochalov, S.V. Erunov, V.A. Ogorodnikov. On hydrodynamic twins of explosive loading devices for investigating the extreme states of plasmas. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 56-65. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_56

Введение

Исследование свойств водорода, гелия, их смеси в области мегабарных давлений обусловлено их применением в объектах перспективной энергетики, включая устройства лазерного, газодинамического и комбинированного термоядерного синтеза [1]. Работа указанных устройств основана на иницировании ядерных реакций в сильно сжатом и разогретом ядерном топливе. Высокая концентрация энергии в таких объектах вызывает процессы термической ионизации и/или ионизацию давлением. При этом возникает плазма, физическое описание которой чрезвычайно затруднено в силу крайней сложности происходящих процессов. В мишенях управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы харак-

терные термодинамические параметры составляют [1]: $P = 2 \cdot 10^7$ ГПа, $\rho = 150\text{-}200$ г/см³, $T = 10^{12}$ К. Данные экстремальные параметры вещества, исходя из современного уровня науки и техники, не могут быть достигнуты и экспериментально изучены в лабораторных условиях, следовательно, основным источником информации о физике работы перспективных термоядерных устройств является расчетно-теоретическое моделирование.

При моделировании физической схемы импульсного термоядерного реактора наиболее трудным является описание состояния неидеальной плазмы, когда энергия кулоновского взаимодействия частиц сравнима или превосходит кинетическую энергию их движения, а эффекты вырождения электронов существенны для расчета уравнений состояния (УРС) и степени ионизации такой плазмы. В данных состояниях теория предсказывает ряд качественно новых физических эффектов, таких как металлизация, плазменные фазовые переходы, диэлектризация и т. д., которые необходимо учитывать при построении УРС сильносжатой плазмы. Эти обстоятельства являются постоянно действующим стимулирующим фактором по экспериментальному изучению свойств неидеальной плазмы мощными ударными волнами, для возбуждения которых используются взрывные плоские, цилиндрические, полусферические и сферические устройства, легкогазовые пушки, мощные лазеры, электродинамические ускорители и взрывомагнитные генераторы.

Особое значение имеет экспериментальная техника мощных ударных волн, которая сегодня является важным источником информации о поведении плазмы в области рекордно высоких температур и давлений мегабарно-гигабарного диапазона, характерных для начального этапа термоядерных реакций. Впервые экспериментальные исследования свойств неидеальной плазмы в указанном диапазоне давлений проведены в 1970-х гг. во ВНИИЭФ, С.Б. Кормером с сотрудниками [2], с использованием взрывных устройств, в которых исходно газообразный водород сжимался серией падающих и отраженных ударных волн возрастающей амплитуды и медленно сходящейся к центру оболочкой. В эксперименте посредством безжелезных бетатронов на рентгеновскую пленку фиксировали форму и размер сжимаемой полости с газом на заданный момент времени. По серии опытов определяли состояние, соответствующее максимальному сжатию плазмы, из которого с использованием закона сохранения массы вычисляли ее среднюю плотность.

Применение такого метода, названного квазиизэнтропическим, позволяет значительно снизить нагрев плазмы, а значит и многократно превзойти диапазон термодинамических состояний однократного ударно-волнового сжатия. В опытах по исследованию квазиизэнтропической сжимаемости газов [2-5], проводимых в РФЯЦ-ВНИИЭФ, давление, реализующееся в газовой полости в момент максимального сжатия, определяется из «сквозного» газодинамического моделирования нагружающего устройства на фирменных комплексах [6-8] РФЯЦ-ВНИИЭФ. «Сквозным» этот газодинамический расчет называется, поскольку содержит исчерпывающую информацию о взрывном нагружающем устройстве, описывает все этапы его работы и все его компоненты с помощью УРС, верифицированных по результатам других экспериментов. Исходный код расчетного комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ, а также полная информация о задании подобного расчета не может быть раскрыта в открытой печати по соображениям защиты информации. Это делает невозможным прямое воспроизведение газодинамических расчетов, на основании согласия которых с результатами экспериментов обосновывается правильность расчетного давления в газовой полости.

В связи с этим перед исследователями встает задача нахождения представления экспериментальных результатов в форме, доступной для моделирования без применения указанных расчетных комплексов для газодинамических расчетов и без предоставления исчерпывающей информации о взрывном нагружающем устройстве. Такое представление позволит любому исследователю проводить перекрестные расчеты разработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ устройств для квазиизэнтропического сжатия газов и осуществлять валидацию различных уравнений состояния и расчетных комплексов.

В настоящей работе предложено представить нагружающее устройство с помощью его упрощенной схемы – гидродинамического двойника (ГДД) – позволяющего моделировать движение оболочек первого и второго каскадов с помощью задания на внешней границе камеры высокого давления граничного условия второго рода (зависимости от времени скорости наружной границы оболочки первого каскада).

Преимуществом такого подхода является бóльшая прозрачность и удобство представления манеры счета посредством замены подбираемых входных параметров, характеризующих нагружающее устройство, диаграммой скорости наружной границы оболочки первого каскада, проверяемой экспериментально в опытах с газодинамическими макетами нагружающих устройств цилиндрической [3-4] и сферической [2, 4, 5] геометрии. Схема экспериментов неоднократно приводилась в предыдущих работах [4-5], концепция численного моделирования изложена в [9].

Общие свойства гидродинамических двойников

Гидродинамический двойник включает в себя:

- 1) данные о начальной геометрии каскадов экспериментального устройства;
- 2) данные о начальных условиях в газовых полостях;
- 3) расчетную диаграмму скорости наружной границы оболочки первого каскада (в качестве граничного условия), полученную из верифицированного в эксперименте сквозного расчета;
- 4) экспериментальные результаты, отражающие динамику движения оболочек вблизи максимального сжатия газовой полости.
- 5) данные по использованным УРС, кроме непосредственно исследуемого газа.

На рис. 1-2 представлены одномерные срезы сквозного расчета и гидродинамического двойника для опыта по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия до давления $P = 18500$ ГПа [5] и правое граничное условие для гидродинамического двойника.

В табл. 1 приведено сравнение расчетных термодинамических параметров, реализующихся в газовой полости на момент максимального сжатия, полученных в сквозном расчете и гидродинамическом двойнике с точностью до шестой значащей цифры. Графа «относительное отклонение расчетов» дает представление о величине относительной ошибки, вызываемой переходом от сквозного расчета к гидродинамическому двойнику. Расчеты проводились с помощью комплекса [6]. Здесь и далее времена отсчитываются от подрыва ВВ (без учета работы системы инициирования).

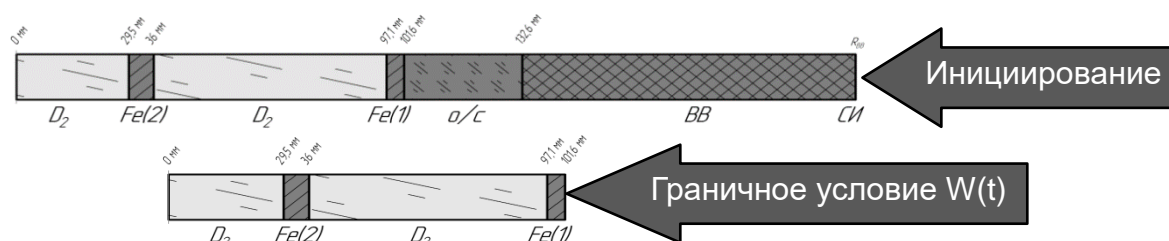


Рис. 1. Одномерные срезы сквозного расчета и гидродинамического двойника

Fig. 1. One-dimensional cuts of an end-to-end calculation and its hydrodynamic twin

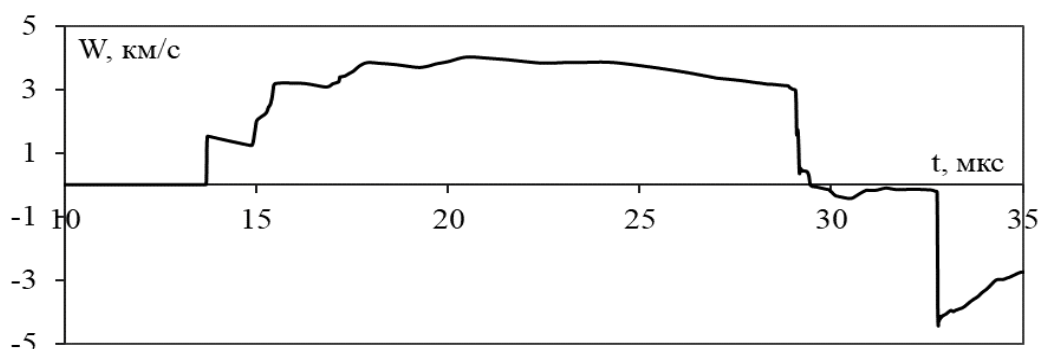


Рис. 2. Диаграмма скорости, задаваемая как «правое» граничное условие в ГДД

Fig. 2. Velocity diagram as «right» boundary condition in HDT

Таблица 1.

Сравнение расчетных средневзвешенных термодинамических параметров в газовой полости на момент максимального сжатия по сквозному расчету и ГДД до шестой значащей цифры

Table 1.

Comparison of calculated weighted average thermodynamic parameters in the gas cavity at the time of maximum compression by end-to-end calculation and HDT up to the sixth significant digit

		Р, ГПа	Т, К	ρ , г/см ³
Сквозной расчет	средневзвешенное	18550,64	56803,34	13,81451
	средневзвешенное отклонение	625,1535	34683,22	1,294620
Гидродинамический двойник	средневзвешенное	18551,55	56803,08	13,81447
	средневзвешенное отклонение	627,4126	34673,97	1,297090
Относительное отклонение расчетов	средневзвешенное	0,0049 %	0,00046 %	0,00029 %
	средневзвешенное отклонение	0,36 %	0,027 %	0,19 %

В расчетном комплексе [6] РФЯЦ-ВНИИЭФ для представления вещественных чисел используется двойная точность, что соответствует 15-значимым числам. Соответственно, полученная из сквозного расчета зависимости от времени скорость наружной границы оболочки первого каскада, используемая для задания граничного условия, может быть определена с такой же точностью. Однако для гидродинамического двойника задавать таким образом граничное условие не требуется. На рис. 3 проиллюстрированы зависимости относительного отклонения расчетных средневзвешенных термодинамических параметров в газовой полости на момент максимального сжатия, полученных из гидродинамических двойников с граничными условиями, заданными с различной длиной мантииссы. Эти отклонения рассчитаны относительно гидродинамического двойника, для которого в граничном условии заданы 15 значащих цифр, и сквозного расчета.

Таким образом, профиль скорости в гидродинамическом двойнике достаточно указывать с точностью до пятого знака после запятой. Это не приводит к отклонению газодинамических параметров на момент максимального сжатия свыше отклонения гидродинамического двойника от сквозного расчета. Также для граничного условия гидродинамического двойника не обязательно указывать всю зависимость скорости наружной оболочки первого каскада (НГО-1) от времени вплоть до разворота внутренней границы оболочки второго каскада (ВГО-2). Например, отсутствие участка торможения первого каскада на втором в зависимости скорости НГО-1 от времени не оказывает влияния на параметры максимального сжатия. На рис. 4 гидродинамический двойник построен на основе зависимости скорости НГО-1 от времени, полученной из сквозного расчета без второго каскада (присутствовали только первый каскад и газ во внешней полости), при этом непосредственно в двойнике были заданы оба каскада.

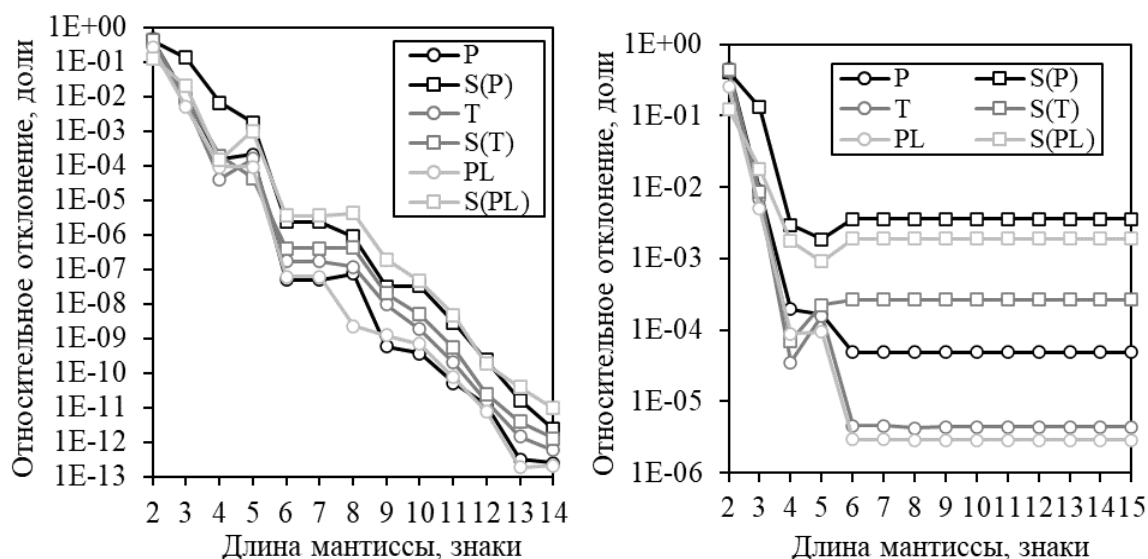


Рис. 3. Относительное отклонение средневзвешенных расчетных параметров в газовой полости на момент максимального сжатия при уменьшении мантиссы в граничном условии: относительно двойника с граничным условием, заданным 15 значащими цифрами (слева) и относительно сквозного расчета (справа)

Fig. 3. The relative deviation of the weighted average calculated parameters in the gas cavity at the time of maximum compression with a decrease in the mantissa in the boundary condition: relative to the HDT with the boundary condition given by 15 significant digits (left) and to the end-to-end calculation (right)

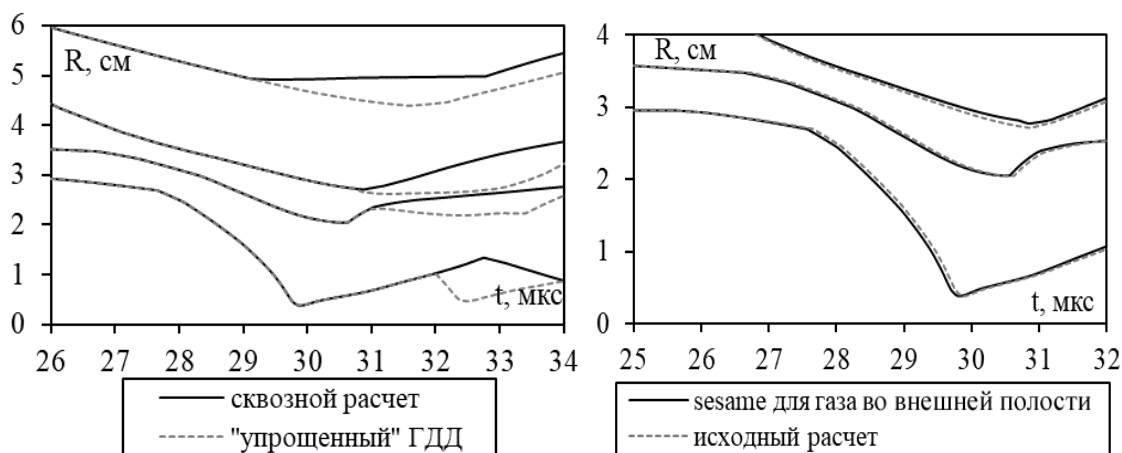


Рис. 4. Сравнение сквозного расчета и ГДД, построенного на основе расчета без второго каскада (слева) и сравнение сквозного расчета с УРС Копышева-Хрусталева [10] и ГДД, построенного на основе этого сквозного расчета, с SESAME [11-12] в качестве УРС газа во внешней полости (справа)

Fig. 4. Comparison of end-to-end calculation and HDT based on calculation without second cascade (left) and comparison of end-to-end calculation with Kopyshv-Khrustalev EOS [10] and HDT based on this end-to-end calculation with EOS SESAME [11-12] for gas in the external cavity (right)

Такое упрощение допустимо, поскольку вызывает возмущение, проявляющееся позже максимального сжатия. Можно сказать, что участок зависимости скорости НГО-1 от времени, на котором проявляется торможение первого каскада на втором, не влияет на термодинамические параметры в газовой полости при максимальном сжатии и может быть исключен в целях оптимизации представляемых данных. Для повторного анализа результатов экспери-

мента независимому исследователю потребуется провести серию газодинамических расчетов с указанным граничным условием и собственным УРС газа, с целью подбора его параметров, позволяющих описать экспериментальные результаты. Однако если использовать другое УРС газа во внешней полости, например, SESAME, мы будем наблюдать отклонения как по радиусу разворота ВГО-2, так и по времени максимального сжатия. Сравнение этих расчетов приведено на рис. 4 и табл. 2. Отклонения термодинамических параметров при использовании SESAME в качестве УРС газа во внешнем каскаде вместо УРС Копышева-Хрусталева составляют 0,1-2,0 %. Отклонение по времени составляет 0,07 мкс. Эти отклонения не превосходят экспериментальной погрешности, однако демонстрируют важность широкодиапазонности тестируемого УРС.

Таблица 2.

Сравнение расчетных средневзвешенных термодинамических параметров в газовой полости на момент максимального сжатия по сквозному расчету и ГДД, использующему SESAME в качестве УРС газа во внешнем каскаде

Table 2.

Comparison of calculated weighted average thermodynamic parameters in the gas cavity at the time of maximum compression by end-to-end calculation and HDT using EOS SESAME for the external cascade gas

		Р, ГПа	Т, К	ρ , г/см ³
Сквозной расчет	средневзвешенное	18550,64	56803,34	13,81451
	средневзвешенное отклонение	625,1535	34683,22	1,294620
Гидродинамический двойник с SESAME	средневзвешенное	18433,26	55690,68	13,80180
	средневзвешенное отклонение	588,4958	35136,60	1,280616
Относительное отклонение расчетов	средневзвешенное	0,63 %	2,0 %	0,092 %
	средневзвешенное отклонение	5,9 %	1,3 %	1,1 %

ГДД для опыта с дейтерием в диапазоне давлений до 18000 ГПа

Приведем пример построения гидродинамического двойника на основе эксперимента по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия давлением ≈ 18000 ГПа с двухкаскадным нагружающим устройством (устройство № 1 из [5]). Начальные условия в газовой полости на момент подрыва устройства приведены в табл. 3. Геометрия камеры высокого давления приведена на рис. 5.

Таблица 3.

Начальные параметры газа в эксперименте

Table 3.

Initial parameters of gas in the experiment

Газ	P_0 , ГПа	t , °C	ρ_0 , г/см ³	R_0 , мм
Дейтерий	0,01831392	9,2	0,035985	29,5

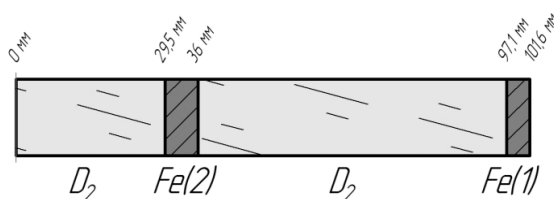


Рис. 5. Начальная геометрия камеры высокого давления

Fig. 5. Initial geometry of the high-pressure chamber

В табл. 4 приведены данные, полученные методом импульсной рентгенографии.

Таблица 4.

Данные рентгенографирования, полученные в опыте

Table 4.

Radiography data obtained in the experiment

Время, мкс	Радиус ВГО-2, см	Радиус НГО-2, см	Время, мкс	Радиус ВГО-2, см	Радиус НГО-2, см
28,37	2,248	–	29,78	0,459	2,203
28,75	1,841	–	29,97	0,460	2,160
29,34	1,199	2,442	30,16	0,706	1,989
29,61	0,717	–			

Совокупность экспериментальных данных, полученных в опыте устройством №1 и его полусферическим макетом, представлена на рис. 6 вместе с расчетными R(t)- и W(t)-диаграммами.

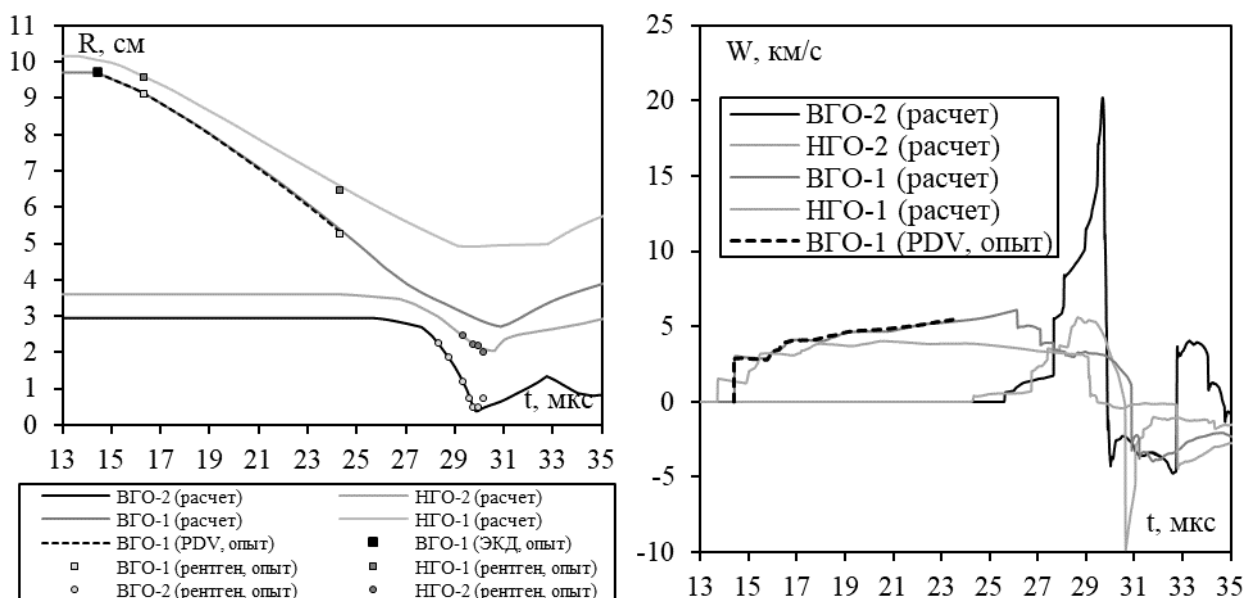


Рис. 6. Совокупность расчетных R(t)-диаграмм (слева) и W(t)-диаграмм (справа) с экспериментальными данными, полученными в опытах с устройством № 1 и его полусферическим макетом

ЭКД – электроконтактные датчики, PDV – гетеродин-интерферометр [13]

Fig. 6. Set of calculated R(t) diagrams (left) and W(t) diagrams (right) with experimental data obtained in experiments with device No. 1 and its hemispherical model

ЭКД – electric contact sensors, PDV – heterodyne interferometer [13]

Совокупность данных, необходимых для расчета гидродинамического двойника устройства №1, включает: начальную геометрию устройства (рис. 5), начальные термодинамические параметры дейтерия в газовой полости (табл. 3), результаты рентгенографирования, приведенные к расчетному времени (табл. 4) и непосредственно данные по скорости НГО-1 для формирования граничного условия (рис. 6). Для подбора параметров УРС дейтерия независимому исследователю потребуется провести расчет с указанной начальной геометрией, параметрами, граничным условием, а затем сравнить с результатами рентгенографирования.

Заключение

Разработано новое представление нагружающих устройств для проведения газодинамических расчетов – гидродинамические двойники, обоснована точность представления их параметров. Показана возможность использования гидродинамических двойников нагружающих устройств для перекрестных расчетов в диапазоне термодинамических величин, характерных для начального этапа термоядерных реакций.

В дальнейшем предполагается разработка гидродинамических двойников для всей совокупности экспериментов по квазиизэнтропическому сжатию с целью создания российской базы данных и валидации уравнений состояния дейтерия, гелия, инертных и благородных газов и программных комплексов, применяющихся для моделирования импульсных термоядерных реакторов в Госкорпорации «Росатом» и институтах Российской Академии Наук.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках программы по созданию молодежных лабораторий (научная тема № FSWE-2021-0010 «Газодинамика и физика взрыва»).

Библиографический список

1. **Фортов, В.Е.** Экстремальные состояния вещества / В.Е. Фортов. – М.: Физматлит, 2009. – 304 с.
2. **Григорьев, Ф.В.** Экспериментальное определение сжимаемости водорода при плотностях 0.5–2 г/см³ / Ф.В. Григорьев, С.Б. Кормер, О.Л. Михайлова, А.П. Толочко, В.Д. Урлин // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1972. Т. 16. Вып. 5. С. 286-290.
3. **Fortov, V.E.** Phase Transition in a Strongly Nonideal Deuterium Plasma Generated by Quasi-Isentropic Compression at Megabar Pressures / V.E. Fortov, R.I. Il'kaev, V.A. Arinin, V.V. Burtzev, V.A. Golubev, I.L. Iosilevskiy, V.V. Khrustalev, A.L. Mikhailov, M.A. Mochalov, V.Ya. Ternovoi, and M.V. Zhernokletov // Physical Review Letters, 2007, vol. 99, 185001.
4. **Мочалов, М.А.** Квазиизэнтропическая сжимаемость сильнонеидеальной плазмы дейтерия при давлениях до 5500 ГПа: эффекты неидеальности и вырождения / М.А. Мочалов, Р.И. Илькаев, В.Е. Фортов, А.Л. Михайлов, А.О. Бликов, В.А. Огородников, В.К. Грязнов, И.Л. Иосилевский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2017. Т. 151. № 3. С. 592-620.
5. **Мочалов, М.А.** Сжимаемость неидеальной плазмы дейтерия и гелия до 20 ТПа / М.А. Мочалов, Р.И. Илькаев, В.Е. Фортов, С.В. Ерунов, В.А. Аринин, А.О. Бликов, В.А. Комраков, И.П. Максимкин, В.А. Огородников, А.В. Рыжков, В.К. Грязнов, И.Л. Иосилевский, П.Р. Левашов, Я.С. Лавриненко, И.В. Морозов, Д.В. Минаков, М.А. Парамонов, А.В. Шутов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2021. Т. 160. № 5 (11). С. 735-756.
6. **Гаврилов, Н.Ф.** Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе / Н.Ф. Гаврилов, Г.Г. Иванова, В.И. Селин, В.Н. Софронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1982. Вып. 3. С. 11-14.
7. **Авдеев, П.А.** Комплекс программ ЛЭГАК для расчета нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы реализации комплекса на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью / П.А. Авдеев, М.В. Артамонов, С.М. Бахрах, С.В. Величко, Н.А. Володина, Н.М. Воробьева, С.П. Егоршин, Е.Н. Есаева, А.Д. Ковалева, М.В. Лучинин, С.Н. Проневич, В.Ф. Спиридонов, И.Ю. Тарадай, А.Н. Тарасова, Е.В. Шувалова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 3. С. 14-18.
8. **Бахрах, С.М.** Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью / С.М. Бахрах, С.В. Величко, В.Ф. Спиридонов, П.А. Авдеев, М.В. Артамонов, Е.А. Бакулина, И.Ю. Безрукова, В.В. Борляев, Н.А. Володина, А.О. Наумов, Н.Э. Огнева, Т.В. Резвова, А.А. Резяпов, С.В. Стародубов, И.Ю. Тарадай, А.П. Тихонова, К.В. Циберев, А.А. Шанин, М.О. Ширшова, Е.В. Шувалова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 41-50.

9. **Бликов, А.О.** Доопытное численное моделирование квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия в области высоких давлений по методике «ЛЭГАК» / А.О. Бликов, М.А. Мочалов, Е.В. Шувалова, Е.А. Бакулина, Е.А. Пронин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2022. Вып. 2, С. 40-52.
10. **Копышев, В.П.** Уравнение состояния водорода до 10 Мбар / В.П. Копышев, В.В. Хрусталеv // Прикладная механика и техническая физика. 1980. Т. 21. № 1. С. 122-128.
11. **Kerley, G.I.** Equation of State and Phase Diagram of Dense Hydrogen // Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1972, vol. 6, pp. 78-82.
12. **Kerley, G.I.** Theoretical Equation of State for Deuterium. Scientific Report. LA-4776 / G.I. Kerley. – LANL. 1972. – 28 p.
13. **Strand, O.T.** Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques / O.T. Strand, D.R. Goosman, C. Martinez, T.L. Whitworth, and W.W. Kuhlow // Review of Scientific Instruments, 2006, vol. 77, 083108.

*Дата поступления
в редакцию: 01.09.2022*

*Дата принятия
к публикации: 21.11.2022*