

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ СЕТКИ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ ГАЗА

С.П. Баутин¹

д.ф.-м.н., профессор, e-mail: spbautin@mail.ru

Ю.В. Николаев¹

к.ф.-м.н., доцент, e-mail: ynikolaev@list.ru

¹Снежинский Физико-Технический Институт Национального Исследовательского
Ядерного Университета «МИФИ», Снежинск, Россия

Аннотация. В работе предложен алгоритм расчёта значений параметров газа для произвольной сетки в области одномерных течений безударного сжатия газа. Такие течения описываются решением системы уравнений газовой динамики. Алгоритм основан на комбинации одного из методов машинного обучения — методе ближайших соседей для случая регрессии и методе характеристик. В качестве оценки близости точек-соседей используется расстояние. Работа алгоритма проверена на примере расчёта сетки в области задачи сжатия из покоя в покой, когда покоящийся газ с плотностью 1 сжимается в покоящийся газ с плотностью 10^4 . Сжатие выполняется без ударных волн, эффективным с точки зрения энергозатрат способом: энергия сжатия используется только на сжатие газа, и не тратится на его разгон. Алгоритм может быть использован при численном расчёте других задач газовой динамики.

Ключевые слова: система уравнений газовой динамики, одномерные течения безударного сжатия, метод характеристик, метод ближайших соседей.

Введение

Решение задач газовой динамики находит свое применение во многих областях, например, моделирование безударного сжатия мишеней для реализации управляемого термоядерного синтеза и моделировании разрушительных атмосферных вихрей. Изучение управляемого термоядерного синтеза, который является практически неограниченным источником энергии, продолжается уже несколько десятилетий. Последние физические эксперименты в этой области, например, в Ливерморской лаборатории (США) проводятся [1] с целью получения энергии от термоядерного горения дейтериево-тритиевой мишени в результате сжатия под действием энергии, передаваемой лазерной установкой (ЛТС - лазерный термоядерный синтез). Такие же работы [2] ведутся в Шеньженьской лаборатории (Китай). В России установки ЛТС созданы в РФЯЦ-ВНИИЭФ [3].

Исследования по моделированию процесса безударного сжатия газа приведены в ряде работ, например [4–11]. Предложены различные типы мишеней, один из примеров приведён в работе [8]. Мишень является дейтериево-третиевым цилиндром, находящимся внутри бериллиевого цилиндрического слоя. В патенте [11] предложена мишень, в которой роль сжимающего поршня выполняют грани тетраэдра или треугольной призмы.

Другой областью решения задач газовой динамики является моделирование процессов разрушительных атмосферных вихрей. В качестве примеров можно привести многочисленные смерчи и торнадо, тропические циклоны. В работах [12, 13] предложена модель возникновения и устойчивого функционирования восходящих закрученных потоков газа.

1. Описание задачи

Эффективным способом описания газовых течений является численное представление решений системы уравнений газовой динамики, для этого успешно используется метод характеристик [14, 15]. Метод характеристик обладает следующим свойством: получаемая характеристическая сетка (набор точек, в которых рассчитаны значения газодинамических параметров), вообще говоря, не является равномерной. При этом возникают такие ситуации, когда исследователю для проводимого анализа рассчитанных течений удобней использовать равномерную сетку точек или вообще сетку с произвольным размещением точек. В любом случае в точках необходимо знать значения газодинамических параметров газа.

Предложение о том, как для метода характеристик построить равномерную сетку описано в работе [13]. В этой работе на каждом шаге построения сетки для каждой следующей ячейки предлагается, с помощью интерполяции по известным двум точкам, рассчитывать новые точки такие, что выпущенные из них характеристические линии пересекаются в требуемых точках равномерной сетки (рисунок 1а). На рисунке 1а показано нахождение точек на $n + 1$ шаге: линия $t = t_n$ – построенный слой равномерной сетки, в котором известны значения газодинамических параметров; линия $t = t_{n+1}$ – слой, в точках которого значения газодинамических параметров рассчитываются. Штриховой линией обозначены C^+ и C^- характеристики, выпущенные из точек с координатами (t_n, r_{i-1}) и (t_n, r_{i+1}) , которые пересекутся в точке, вообще говоря, не совпадающей с точкой (t_{n+1}, r_i) и поэтому равномерность построения сетки будет нарушаться. Для построения равномерной сетки линейной интерполяцией координат точек (t_n, r_{i-1}) , (t_n, r_{i+1}) и значений газодинамических параметров в них рассчитываются такие значения r_i^+ и r_i^- на линии $t = t_n$ и значения газодинамических параметров в них, что выпущенные из этих точек C^+ и C^- характеристики (сплошные наклонные линии) пересекутся в точке (t_{n+1}, r_i) . После этого с помощью формул метода характеристик находятся значения газодинамических параметров в этой точке.

В данной работе описан другой подход к построению сетки. Предлагается не интерполировать точки при построении каждой ячейки рассчитываемой сетки,

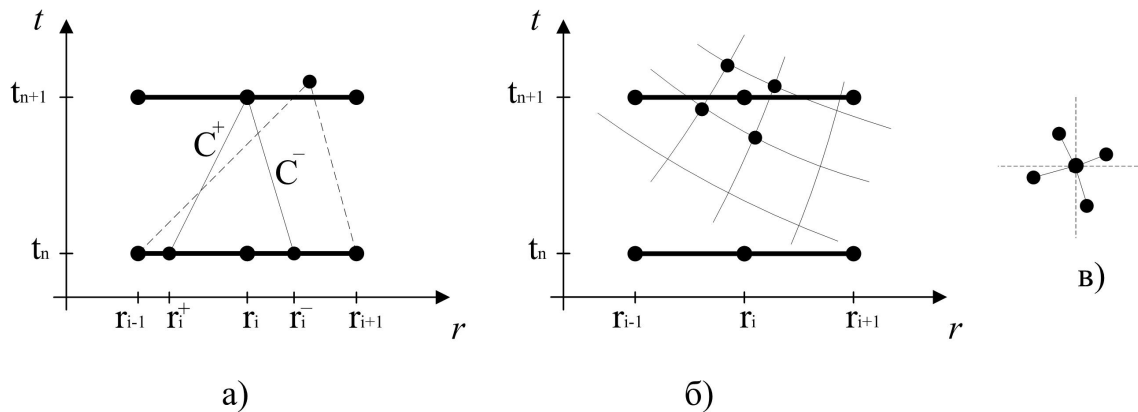


Рис. 1. Построение равномерной сетки

а рассчитать характеристическую сетку в целом по всей области. А затем, интерполируя по известным значениям точек рассчитанной характеристической сетки, получить значения в требуемых точках равномерной сетки (рисунок 1б). За основу использованного подхода к интерполяции взяты формулы метода ближайших соседей из машинного обучения [16]. В качестве метрики близости точек-соседей берётся расстояние между точками. Приведён алгоритм расчёта, реализация которого проверена на полученном ранее [4] численном решении системы уравнений газовой динамики при одномерном безударном сжатии газа из покоя в покой.

Задача о сжатии из покоя в покой ставится следующим образом. Имеется плоский ($\nu = 0$), цилиндрический ($\nu = 1$) или сферический ($\nu = 2$) слой однородного политропного газа с уравнением состояния $p = \rho^\gamma / \gamma$, в котором p — давление, ρ — плотность, γ — показатель адиабаты (политропы). Считается, что все течения возникающие в газе являются одномерными и изэнтропическими. Термином «безударные» называются такие течения газа, в которых искомые течения могут отделяться как друг от друга, так и от известных течений только слабыми разрывами, но не ударными волнами.

Рассматривается следующая конфигурация газовых течений: в начальный момент времени t_0 газ однороден с плотностью ρ_0 , а скорость газа равна 0. Это состояние 1 газа. Состояние газа в момент времени $t_* > t_0$ такое: газ однороден, его плотность равна некоторому $\rho_* > \rho_0$; при этом газ покоится. Это состояние 2. Требуется найти течения газа, возникающие при безударном переходе (сжатии) одномерного газового слоя из состояния 1 в состояние 2 под действием двух непроницаемых поршней, один из которых неподвижен. При этом, газ находится левее неподвижного поршня, а поршень производящий сжатие движется вправо, производя сжатие цилиндрического или сферического слоя изнутри, когда радиус поршня растёт.

Одномерные изэнтропические течения газа определяются двумя функциями $u = u(t, r)$ и $c = c(t, r)$, являющимися решениями системы уравнений газовой динамики, которая после выполнения преобразований принимает следующий

вид:

$$\begin{cases} c_t + uc_r + \frac{(\gamma-1)}{2}c(u_r + \frac{\nu u}{r}) = 0, \\ u_t + \frac{2}{(\gamma-1)}cc_r + uu_r = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $u = u(t, r)$ скорость газа, а $c = c(t, r)$ связана с плотностью газа ρ соотношением $c = \rho^{(\gamma-1)/2}$ и является скоростью звука в газе; t — переменная времени, r — пространственная переменная, выражающая расстояние до начала ($\nu = 0$), оси ($\nu = 1$) или центра ($\nu = 2$) симметрии.

В работе [7] доказано существование решения задачи о сжатии из покоя в покой в случае, когда газ сжимается двумя поршнями, однако не получены конкретные значения для массы газа и значения плотности газа до которой возможно сжатие безударным способом. Поставленная задача сведена к трём начально-краевым задачам для системы уравнений газовой динамики и доказано существование локально-аналитических решений. Установлено, что в решении в финальный момент сжатия возникнет особенность на сжимающем поршне. Решение описывается обобщением центрированной волны Римана для случая цилиндрических и сферических течений в некоторой окрестности точки с особенностью. А в самой особой точке (t_*, r_*) описывается формулами центрированной волны Римана для плоских течений:

$$\begin{cases} c = c_0 - \frac{\gamma-1}{2}u, \\ u = \frac{2}{\gamma+1} \frac{(r-r_*)}{(t-t_*)} + \frac{2}{\gamma+1}c_0, \quad c_0 = \rho_0^{(\gamma-1)/2}. \end{cases} \quad (2)$$

В расчётах измерения газодинамических параметров выполняются для соответствующим образом введённых безразмерных величин. И, не ограничивая общности, принимаются плотность газа в первоначальном покое ρ_0 равной единице и координата $r = r_p(t)$ сжимающего поршня в начальный момент также равной единице. Введение этих величин позволяет масштабировать остальные физические величины u, ρ, t . Расстояние r от центра симметрии до второго поршня (неподвижной стенки r_w) является расчётной величиной и определяется при задании массы m сжимаемого газа.

2. Расчет методом характеристик

В работе [4] выше поставленная задача решена численно с помощью модификации метода характеристик [14, 15]. Рассчитывается характеристическая сетка, узлами которой являются точки пересечения характеристик C^+ и C^- семейств, а также рассчитываются значения искомых функций в этих узлах. Характеристики определяются при аппроксимации решений обыкновенных дифференциальных уравнений

$$C^- : \frac{dr}{dt} = u(t, r) - c(t, r), \quad C^+ : \frac{dr}{dt} = u(t, r) + c(t, r)$$

с соответствующими начальными условиями.

Вводятся инварианты Римана R, L вычисляемые по формулам:

$$R = u + \frac{2}{\gamma - 1}c, \quad L = u - \frac{2}{\gamma - 1}c.$$

На рисунке 2 показаны исследованные области построения течений в конфигурации сжатия из покоя в покой. Характеристическая сетка строится в обратном направлении изменения времени из точки $A(t_f, r_f)$. Для этого на C^- характеристике AB , отделяющей покоящийся сжатый газ в области 0 от течений сжатия, выбираются n_0 точек (в них известны параметры газа), из которых выпускаются C^+ характеристики. Из точки A (в этой точке особенность) выпускаются C^- характеристики в количестве n_1 штук и, используя метод характеристик, строится сетка в области 1. Затем полученные C^- характеристики продолжают до пересечения с линией $r = r_w$, так достраивается сетка в области 2 до тех пор пока в точке пересечения очередной C^- характеристики не будет достигнута плотность $\rho = 1$. С этого момента (точка D) выпускается C^+ характеристика DE и на ней выбираются n_2 точек из которых выпускаются C^- характеристики до пересечения с продолжением C^+ характеристик из областей 1 и 2 в прямом направлении изменения времени. Так строится сетка в области 3. Течения области 3 гладко примыкают к области 4 (здесь газ находится в покоящемся несжатом состоянии). Одновременно с построением характеристической сетки, из точки A , в обратном направлении изменения времени, строится траектория сжимающего поршня AE .

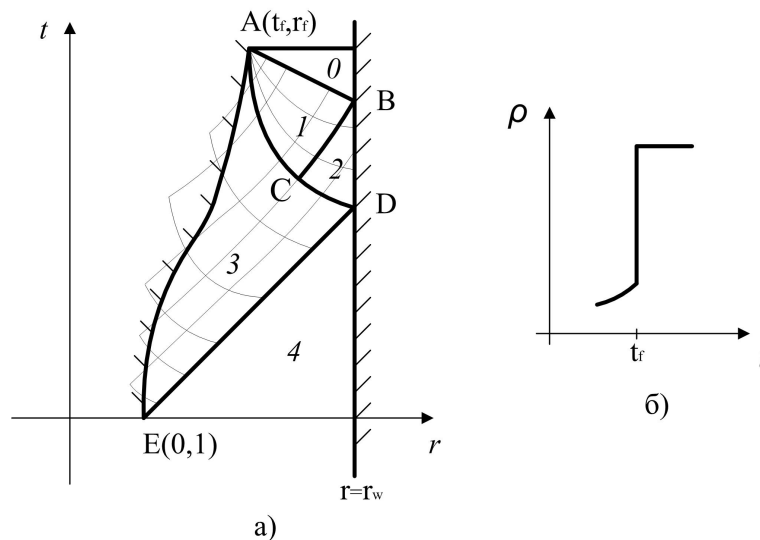


Рис. 2. Конфигурация течений сжатия из покоя в покой

В точке $A(t_f, r_f)$, согласно установленному в [7] свойству решения, имеет место скачок плотности (рисунок 2б). В этой точке скорость газа и скорость звука в газе связаны следующим соотношением:

$$u_i = 2 \frac{c_* - c_i}{\gamma - 1},$$

здесь $\{c_i\}$ – разбиение отрезка от $c_* = \rho_*^{(\gamma-1)/2}$ до 0 на n_1 равных частей. Что и определяет число C^- характеристик, выпущенных из точки A .

Точность результатов вычислений зависит от входных параметров счета (разбиение расчётной области на ячейки – параметры n_0, n_1, n_2). В расчётах методом характеристик входные данные подбираются для каждого варианта расчётов отдельно опытным путём, так, чтобы относительная погрешность масс δm была менее 1%, где

$$\delta m = \frac{|m_* - m_0|}{m_*} \cdot 100\%,$$

m_0, m_* – массы газа до и после сжатия.

Так как сжатие производится непроницаемым поршнем, то массы газа до сжатия и после сжатия должны совпадать. Но из-за погрешностей численного расчёта наблюдается различие масс, поэтому, чем меньше значение δm , тем точнее выполнены расчёты траектории сжимающего поршня и всего течения в целом.

3. Алгоритм счета по формулам метода ближайших соседей

Для расчёта методом ближайших соседей требуется набор-сетка точек, в которых значения газодинамических параметров и инвариантов R, L известны. Такая сетка получена с помощью модификации метода характеристик [4] с учётом математически доказанного [7] свойства решения. Этот набор точек будем называть обучающей сеткой (или сеткой соседей). Для каждой точки рассчитываемой сетки в обучающей сетке находятся 4 соседа — ближайшие точки. Для этого в качестве критерия близости точек принимается расстояние между ними и рассчитываемой точкой (рис. 1в). По значениям инвариантов R, L в найденных ближайших точках взвешенным способом рассчитываются значения инвариантов в рассчитываемой точке. Определяется оценка близости: чем ближе точка-сосед, тем больше её вклад в значения инвариантов в рассчитываемой точке. Формула для взвешенного значения инварианта R_{new} в точке с рассчитываемым инвариантом имеет следующий вид (для инварианта L_{new} формула выглядят аналогично):

$$R_{new} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{R_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{d_i}}$$

здесь d_i – расстояние между точками (t_i, r_i) и (t_{new}, r_{new}) ; R_i – значение инварианта R в точке (t_i, r_i) ; $t_{new}, r_{new}, R_{new}$ – координаты точки и рассчитываемого значения инварианта R в ней соответственно.

Приведение выражения под знаком суммы к общему знаменателю

$$\frac{\sum_{i=1}^k (\prod_{j \neq i} R_j d_j)}{\prod_{i=1}^k d_i} : \frac{\sum_{i=1}^k \prod_{j \neq i} d_j}{\prod_{i=1}^k d_i} = \frac{\sum_{i=1}^k (R_i \prod_{j \neq i} d_j)}{\sum_{i=1}^k \prod_{j \neq i} d_j}$$

и последующие преобразования приводят к следующей формуле:

$$R_{new} = \sum_{i=1}^k \left(R_i \frac{\prod_{j \neq i} d_j}{\sum_{i=1}^k \prod_{j \neq i} d_j} \right) \quad (3)$$

Предлагаемый в данной работе алгоритм основан на следующем. Площадь ячейки характеристической сетки, содержащая точку (t_{new}, r_{new}) , является функцией параметров расчёта обучающей сетки n_0, n_1, n_2 . Чем больше значения этих параметров, тем меньше площадь ячейки и более точное значение R_{new}, L_{new} в точке (t_{new}, r_{new}) , так как ячейка построена на точках обучающей сетки точек-соседей. Тогда, увеличение значений параметров расчёта обучающей сетки будет приводить к увеличению точности рассчитанных с помощью формул (3) значений инвариантов R_{new}, L_{new} .

Необходимо отметить, что идея взвешенного интерполирования не нова и давно используется при численном моделировании решений различных задач, в том числе и в вычислительной газодинамике, для нахождения значений искомых переменных в точках, не совпадающих с точками расчётной сетки. Это один из традиционных, широко используемых подходов, как при разработках схем расчёта газодинамических течений (см., например, [15]), так и для переинтерполяции значений переменных с сетки на сетку при расчётах течений с применением накладываемых сеток (см., например, [17]). Таким же образом, в силу своей традиционности и естественности, подход попал в машинное обучение, в котором данный подход упоминается как Метод ближайших соседей.

Работа алгоритма, для произвольного заданного набора точек (t, r) , реализуется следующим набором шагов:

Шаг 1. В точках выполняется расчёт R_{new}, L_{new} с помощью формул (3) метода ближайших соседей. Точки-соседи выбираются из точек обучающей характеристической сетки, построенной при параметрах n_0^i, n_1^i, n_2^i (верхний индекс указывает на номер итерации алгоритма). Расчёт ведётся по 4-м соседям, которые отбираются для каждой расчётной точки следующим образом: в каждом из квадрантов 1-4 (на рисунке 1в отделены друг от друга штриховой линией) среди точек обучающей сетки отбирается одна наиболее близкая точка. После нахождения 4х ближайших точек производится расчёт по формулам (3).

Шаг 2. Перед выполнением первой итерации алгоритма инициализируются значения величин относительных отклонений δR и δL в каждой рассчитываемой точке произвольным большим значением (в приведённой далее проверке на тестовой сетке отклонения были инициализированы значением 100). На каждой следующей i -ой итерации (для $i > 0$) значения относительных отклонений пересчитываются:

$$\delta R = \frac{|R_{new}^i(t, r) - R_{new}^{i-1}(t, r)|}{R_{new}^i(t, r)} \cdot 100\%, \quad \delta L = \frac{|L_{new}^i(t, r) - L_{new}^{i-1}(t, r)|}{L_{new}^i(t, r)} \cdot 100\%.$$

Точки (t, r) , для которых $\delta R(t, r)$ и $\delta L(t, r)$ меньше некоторого наперёд заданного параметра алгоритма α , считаются рассчитанными с достаточной точностью и в дальнейших итерациях алгоритма не участвуют — необходимости

пересчёта значений R_{new}, L_{new} в них нет (такой подход уменьшает общее время вычислений). Уменьшение значения α повышает точность расчётов алгоритма.

Шаг 3. Увеличение параметров счета обучающей сетки (множитель 2 подобран опытным путём):

$$n_j^i = 2 \cdot n_j^{i-1}, \quad j = 0, 1, 2.$$

После этого алгоритм возвращается к шагу 1 и начинается следующая итерация. Работа алгоритма завершается в тот момент, когда на шаге 2 в расчётной сетке не останется точек, нуждающихся в пересчёте значений инвариантов R_{new}, L_{new} .

4. Проверка работы алгоритма на тестовой сетке

Работа алгоритма проверена расчётом значений инвариантов R, L и их сравнением с значениями из сетки точек ранее полученного численного решения. Это численное решение получено в работе [4] с помощью модификации метода характеристик. Взят вариант численного решения задачи о сжатии одномерного политропного газа с показателем политропы $\gamma = 5/3$ и массой $m = 10$ из покоя с плотностью 1 в покой с плотностью 10^4 . Точки характеристической сетки были получены при следующих параметрах счета $n_0 = 7900, n_1 = 10000; n_2 = 7900$. Из полученной сетки случайным образом взято 1800 точек. Последний набор точек и был взят в качестве тестовой сетки.

В качестве точек обучающей сетки берутся точки (t, r) и значения инвариантов в них, которые получаются из расчётов методом характеристик при следующих указанных ниже в таблицах 1 и 2 итерациях с номерами i и значениями параметров счёта n_0, n_1, n_2 . В колонке N_{new} — количество точек в которых ещё нужен пересчёт значений инвариантов, в этих точках относительные отклонения инвариантов $\delta R > \alpha$ или $\delta L > \alpha$. В колонках N_{test}^1, N_{test}^2 и N_{test}^5 — количество точек в которых относительное отличие инвариантов в точках тестовой сетки и тех же точках, но уже расчётной сетки отличаются не более чем на 1%, 2% и 5% соответственно.

Таблица 1. счет по алгоритму при $\alpha = 0,05\%$

номер итерации i	n_0	n_1	n_2	N_{new}	N_{test}^1	N_{test}^2	N_{test}^5
1	250	500	250	1800	257	126	46
2	500	1000	500	1370	134	60	16
3	1000	2000	1000	939	59	23	4
4	2000	4000	2000	577	17	2	1
5	4000	8000	4000	359	6	1	0
6	8000	16000	8000	194	5	0	0

Таблица 2. счет по алгоритму при $\alpha = 0,01\%$

номер итерации i	n_0	n_1	n_2	N_{new}	N_{test}^1	N_{test}^2	N_{test}^5
1	250	500	250	1800	257	126	46
2	500	1000	500	1670	134	60	16
3	1000	2000	1000	1486	59	23	4
4	2000	4000	2000	1277	14	1	1
5	4000	8000	4000	1022	3	0	0

В таблицах приведены результаты первых итераций работы алгоритма. Счёт остановлен при получении близких (относительные отклонения менее 2%) значений R, L в расчётах на тестовой сетке с помощью метода характеристик и с помощью формул ближайших соседей.

Выводы и замечания

1. Использование метода характеристик совместно с методом ближайших соседей позволяет реализовать алгоритм расчета значений газодинамических параметров в точках произвольных сеток в области задач нахождения безударных течений, являющихся решениями системы уравнений газовой динамики.

2. Выполненные численные расчёты показали, что алгоритм хорошо повторяет расчёты значений инвариантов, найденных методом характеристик.

3. Скорость работы предложенного алгоритма можно увеличить использованием системы управления базами данных для хранения и быстрого доступа к данным обучающей сетки. Также для увеличения скорости счета поиск ближайших соседей можно выполнять параллельно, распределяя рассчитываемые точки на несколько процессоров (в случае мультипроцессорных систем) или несколько узлов (в случае многоузлового кластера).

4. В качестве оценки близости точек можно использовать не только расстояние, а принадлежность рассчитываемой точки четырёхвершинной ячейке обучающей характеристической сетки. Для поиска такой ячейки удобно использовать формулу псевдоскалярного произведения векторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Craxton R.S., Anderson K.S., Boehly T.R., Goncharov V.N., Harding D.R., Knauer J.P., McCrory R.L., McKenty P.W., Meyerhofer D.D., Myatt J.F., Schmitt A.J., Sethian J.D., Short R.W., Skupsky S., Theobald W., Kruer W.L., Tanaka K., Betti R., Collins T.J.B., Delettres J.A., Hu S.X., Marozas J.A., Maximov A.V., Michel D.T., Radha P.B., Regan S.P., Sangster T.C., Seka W., Solodov A.A., Soures J.M., Stoeckl C., Zuegel J.D. Direct-drive inertial confinement fusion: A review // Physics of Plasmas. 2015. No. 22(110501). URL: <https://doi.org/10.1063/1.4934714> (дата обращения: 01.12.2020).

2. Ren G., Liu J., Huo W., Lan K. Analysis of hohlraum energetics of the SG series and the NIF experiments with energy balance model // *Matter and Radiation at Extremes*. 2017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mre.2016.11.002> (дата обращения: 01.12.2020).
3. Физика плазмы и инерциальный термоядерный синтез. URL: <http://www.vniief.ru/researchdirections/Research/plasmaphysics> (дата обращения: 01.12.2020).
4. 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.
5. Новаковский Н.С. Комбинированный метод расчёта безударного сильного сжатия одномерных слоёв газа в конфигурации Р. Мизеса // *Математические структуры и моделирование*. 2017. № 1(41). С. 92–101.
6. Рощупкин А.В. Один подход к численному моделированию безударного сильного сжатия специальных объёмов газа // *Вычислительные технологии*. 2012. Т. 17, № 2. С. 61–69.
7. Баутин С.П. Математическое моделирование сильного сжатия газа. Новосибирск : Наука, 2007. 312 с.
8. Долголева Г.В., Забродин А.В. Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия. Москва : Физматлит, 2004. 72 с.
9. Крайко А.Н. Вариационная задача об одномерном изэнтропическом сжатии идеального газа // *Прикладная математика и механика*. 1993. Т. 57, вып. 5. С. 35–51.
10. Сидоров А.Ф. Безударное сжатие баротропного газа // *Прикладная математика и механика*. 1991. Т. 55, вып. 5. С. 769–779.
11. Баутин С.П. Мишень для получения термоядерных реакций. Патент 2432627 Российская федерация, МПК G21B 1/19(2006.01); заявка 2010113417/07 от 06.04.2010; опубликовано 27.10.2011. Бюллетень № 30.
12. Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск : Наука, 2008. 96 с.
13. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. Екатеринбург : УрГУПС. 2020. 400 с.
14. Рождественский Б.Л., Яненко Н.К. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. Москва : Наука. 1978. 687 с.
15. Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., Козелков А.С., Тетерина И.В. Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках. Москва : Физматлит, 2015. 415 с.
16. Nearest Neighbors. URL: <https://scikit-learn.org/0.21/modules/neighbors.html> (дата обращения: 1.12.2020).
17. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в VP2/3 по аэротермодинамике. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 324 с.

CONSTRUCTING ALGORITHM AN ARBITRARY GRID FOR SHOCKLESS GAS COMPRESSION NUMERICAL SOLUTION

S.P. Bautin¹

Professor, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Professor, e-mail: spbautin@mail.ru

Iu.V. Nikolaev¹

Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, e-mail: ynikolaev@list.ru

¹Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University
MEPhI, Snezhinsk, Russia

Abstract. In this paper, proposed an algorithm for calculating the values of the gas parameters for an arbitrary grid in the region of one-dimensional flows of shockless gas compression. Such flows are described by solving a system of gas dynamics equations. The algorithm uses one of the machine learning methods – the nearest neighbors method for the regression case. Distance is used as an estimate of the proximity of neighboring points. The algorithm is tested using the example of calculating the grid in the area of the rest-to-rest compression problem, when a resting gas with a density of 1 is compressed into a resting gas with a density of 10^4 . Compression is performed without shock waves, in an efficient way from the point of view of energy input: compression energy is used only to compress the gas, and is not spent on its acceleration. The algorithm can be used for numerical calculations for other gas dynamics problems.

Keywords: system of equations of gas dynamics, one-dimensional shockless compression flows, method of characteristics, nearest neighbor.

REFERENCES

1. Craxton R.S., Anderson K.S., Boehly T.R., Goncharov V.N., Harding D.R., Knauer J.P., McCrory R.L., McKenty P.W., Meyerhofer D.D., Myatt J.F., Schmitt A.J., Sethian J.D., Short R.W., Skupsky S., Theobald W., Kruer W.L., Tanaka K., Betti R., Collins T.J.B., Delettrez J.A., Hu S.X., Marozas J.A., Maximov A.V., Michel D.T., Radha P.B., Regan S.P., Sangster T.C., Seka W., Solodov A.A., Soures J.M., Stoeckl C., and Zuegel J.D. Direct-drive inertial confinement fusion: A review. *Physics of Plasmas*, 2015, no. 22(110501). URL: <https://doi.org/10.1063/1.4934714> (01.12.2020).
2. Ren G., Liu J., Huo W., and Lan K. Analysis of hohlraum energetics of the SG series and the NIF experiments with energy balance model. *Matter and Radiation at Extremes*, 2017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mre.2016.11.002> (01.12.2020).
3. Физика плазмы и инертсiал'nyi термоядерный синтез. URL: <http://www.vniief.ru/researchdirections/Research/plasmaphysics> (01.12.2020). (in Russian)
4. Bautin S.P. and Nikolaev Yu.V. Численное решение задачи о сжатии газа из покоя в покои. *Вычислительные технологии*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 55–65. (in Russian)
5. Novakovskii N.S. Комбинированный метод расчета безударного сил'ного сжатия одномоментных слоев газа в конфигурации R. Мизеса. *Математические структуры и моделирование*, 2017, no. 1(41), pp. 92–101. (in Russian)

6. Roshchupkin A.V. Odin podkhod k chislenному modelirovaniyu bezudarnogo sil'nogo szhatiya spetsial'nykh ob"emov gaza. Vychislitel'nye tekhnologii, 2012, vol. 17, no. 2, pp. 61–69. (in Russian)
7. Bautin S.P. Matematicheskoe modelirovanie sil'nogo szhatiya gaza. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007, 312 p. (in Russian)
8. Dolgoleva G.V. and Zabrodin A.V. Kumulyatsiya energii v sloistyykh sistemakh i realizatsiya bezudarnogo szhatiya. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 72 p. (in Russian)
9. Kraiko A.N. Variatsionnaya zadacha ob odnomernom izentropicheskom szhatii ideal'nogo gaza. Prikladnaya matematika i mekhanika, 1993, vol. 57, iss. 5, pp. 35–51. (in Russian)
10. Sidorov A.F. Bezudarnoe szhatie barotropnogo gaza. Prikladnaya matematika i mekhanika, 1991, vol. 55, iss. 5, pp. 769–779. (in Russian)
11. Bautin S.P. Mishen' dlya polucheniya termoyadernykh reaktsii. Patent 2432627 Rossiyskaya federatsiya, MPK G21B 1/19(2006.01); zayavka 2010113417/07 ot 06.04.2010; opublikovano 27.10.2011. Byulleten' no. 30. (in Russian)
12. Bautin S.P. Tornado i sila Koriolisa. Novosibirsk, Nauka Publ., 2008, 96 p. (in Russian)
13. Bautin S.P., Krutova I.Yu., and Obukhov A.G. Gazodinamicheskaya teoriya voskhodyashchikh zakruchennykh potokov. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 2020, 400 p. (in Russian)
14. Rozhdestvenskii B.L. and Yanenko N.K. Sistemy kvazilineinykh uravnenii i ikh prilozheniya k gazovoi dinamike. Moscow, Nauka Publ., 1978, 687 p. (in Russian)
15. Volkov K.N., Deryugin Yu.N., Emel'yanov V.N., Kozelkov A.S., and Teterina I.V. Raznostnye skhemy v zadachakh gazovoi dinamiki na nestrukturirovannykh setkakh. Moscow, Fizmatlit Publ., 2015, 415 p. (in Russian)
16. Nearest Neighbors. URL: <https://scikit-learn.org/0.21/modules/neighbors.html> (1.12.2020).
17. Isaev S.A., Baranov P.A., and Usachov A.E. Mnogoblochnye vychislitel'nye tekhnologii v VP2/3 po aerotermodinamike. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 324 p. (in Russian)

Дата поступления в редакцию: 13.03.2021