

**КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ
ФОРМИРОВАНИЯ ПОРОШКОВОЙ СТРУИ¹**

Ю. Г. Медведев

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Россия***E-mail:** medvedev@ssd.sccc.ru

При взрыве зарядов возникают течения, в которых происходят структурные превращения входящих в облицовку мелкодисперсных порошков. Получившиеся в результате продукты синтеза в последнее время активно изучаются. Их экспериментальное исследование достаточно дорого и требует сложных установок, тщательного подбора взрывчатого вещества и состава порошков. Поэтому численное моделирование этих процессов является актуальной задачей. Первой и самой важной частью модели является струя, несущая в себе участвующие в синтезе порошки. В работе предпринимается попытка промоделировать формирование такой струи клеточным автоматом. То, что эта модель дискретна, обуславливает эффективность ее программной реализации как в последовательном, так и в параллельном вариантах и позволяет минимизировать использование машинного времени. В работе представлена новая модель газового потока, несущего порошковые составляющие. Описаны результаты компьютерного моделирования с однокомпонентной облицовкой. Произведено сравнение со струей без порошка.

Ключевые слова: *клеточный автомат, поток газа, порошковая струя.*

Введение

В большинстве классических клеточно-автоматных моделей потоков используется один тип частиц — частицы газа [1]. Двумерная модель, ставшая основой для множества новых моделей, называется FHP (Frish, Hasslacher, Pomeau) [2]. Каждая ее клетка имеет форму шестиугольника и, в силу идемпотентности отношения соседства, имеет семь соседей. В качестве внутренних состояний клеток модели используются булевы векторы. Состояние клетки — это набор модельных частиц газа с единичной массой. Частицы дискретно перемещаются из клетки в клетку через равные интервалы времени. Каждая частица либо имеет вектор скорости с единичным модулем, направленный в сторону одной из шести нетождественных соседних клеток, либо имеет нулевую скорость. В клетке одновременно не могут находиться две или более частицы с одинаковыми скоростями. Каждый из семи разрядов вектора состояния клетки указывает на наличие или отсутствие в этой клетке частицы с соответствующей ему скоростью. Следовательно, одновременно в клетке могут находиться от нуля до семи частиц. Для расширения возможностей модели FHP была создана многочастичная модель FHP-MP (multi-particle) [3]. Она допускает одновременное присутствие в клетке более одной частицы с одинаковой скоростью. Эта модель позволяет работать в более широком диапазоне давлений, так как максимальное количество частиц в клетке ограничено только программной реализацией. Кроме того, она более пригодна для создания композиций

¹Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН № 32, 2009 г. и проекта 2.6 программы Президиума РАН, 2009 г.

с другими клеточно-автоматными моделями [4]. Построению и исследованию одной из таких композиций и посвящена эта работа. Композиция построена для моделирования газовой струи, несущей в себе порошок, путем добавления в модель FHP-MP частиц порошка и задания новых правил поведения. Новая композиционная модель с двумя типами частиц — газ и порошок — названа FHP-GP (gas-powder).

В статье описана новая клеточно-автоматная модель порошковой струи FHP-GP, приведены результаты вычислительных экспериментов по моделированию порожденной взрывом струи газа, несущей порошок, произведено сравнение с результатами моделирования струи газа без порошка, полученными в результате вычислительных экспериментов с использованием модели FHP-MP.

1. Описание модели FHP-GP

Под клеточным автоматом модели FHP-GP будем понимать тройку объектов $\langle K, N, \Theta \rangle$, где $K = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots\}$ — множество клеток, заданное их координатами в некотором дискретном пространстве. Каждая клетка $c \in K$ характеризуется состоянием $s(c)$ и координатами $x(c)$ и $y(c)$ на Декартовой плоскости. Состояние $s(c)$ зависит от дискретного времени t , а координаты остаются неизменными. Следовательно, между любыми двумя клетками $c_1 \in K$ и $c_2 \in K$ с легкостью можно подсчитать расстояние $d(c_1, c_2)$. В модели FHP-GP состояние $s(c)$ — это не один вектор, как у моделей-предшественников, а два: для газовых частиц целочисленный, как в FHP-MP, и для частиц порошка булев, как в FHP. Такая композиция является новой клеточно-автоматной моделью.

Для каждой клетки $c \in K$ определено упорядоченное множество из семи элементов $N(c) = \{n_i(c) : n_0(c) = c, n_i(c) \in K \text{ \& } d(c, n_i(c)) = 1, i = 1, 2, \dots, 6\}$. Входящие в него клетки $n_i(c)$ находятся в отношении соседства с клеткой c и называются ее соседними клетками или соседями. Таким образом, структура множества клеток K клеточного автомата представляется неориентированным графом, в котором вершинами являются клетки, а ребрами — отношение соседства. Этот граф имеет регулярную структуру и степени вершин, равные семи.

Состояние s клетки $c \in K$ есть множество $s(c) = \{s^G(c), s^P(c)\}$, состоящее из двух векторов. Первый из них $s^G(c)$ имеет целочисленные компоненты $s_i^G(c), i = 0, 1, \dots, 6$, указывающие на количество частиц газа в клетке c с единичной массой и единичным вектором скорости $e_i(c)$, направленным в сторону соседа $n_i(c)$. Эти частицы несут импульс $p_i^G(c) = s_i^G(c) e_i(c)$. Второй вектор $s^P(c) = (s_0^P(c), s_1^P(c), \dots, s_6^P(c))$ является булевым, его компоненты определяют наличие или отсутствие в клетке c частиц порошка с вектором скорости $e_i(c)$ и импульсом $p_i^P(c) = M_P s_i^P(c) e_i(c)$, где $i = 0, 1, \dots, 6$, а M_P — масса одной частицы порошка. В направлении каждого из соседей $n_i(c)$ может быть ориентировано не более одного вектора скорости. Множество состояний $s(c)$ всех клеток $c \in K$ в один и тот же момент времени t называется глобальным состоянием $\Omega(t) = \{s(c_1), s(c_2), \dots, s(c_i), \dots\}$ клеточного автомата.

На рис. 1 изображена клетка c , единичные векторы $e_i(c)$ находящихся в ней частиц газа и порошка и ее соседи $n_i(c), i = 0, 1, \dots, 6$. Вектор скорости $e_i(c)$ либо направлен в сторону одной из соседних клеток $n_i(c)$ (при $i = 1, \dots, 6$), либо равен нулю (при $i = 0$). Масса частиц, движущихся в направлении $e_i(c)$, равна $m_i(c) = s_i^G(c) + M_P s_i^P(c)$.

Компоненты $s_0^G(c), s_1^G(c), \dots, s_6^G(c)$ газовой составляющей вектора состояния s^G клетки c принимают целочисленные значения. Суммарная масса частиц газа в клетке c

равна

$$m^G(c) = \sum_{i=0}^6 s_i^G(c), \quad (1)$$

где s_i^G — i -й компонент вектора состояний s^G . Масса частицы порошка равна M_P , поэтому масса всех частиц порошка в клетке c равна

$$m^P(c) = M_P \sum_{i=0}^6 s_i^P(c). \quad (2)$$

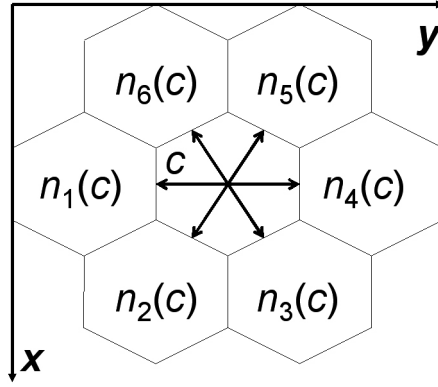


Рис. 1. Векторы скорости частиц, нумерация соседей

Общая масса частиц газа и порошка в клетке c равна

$$m(c) = m^G(c) + m^P(c). \quad (3)$$

Импульс частиц, направленных к соседу $n_i(c)$, $\mathbf{p}_i(c) = \mathbf{p}_i^G(c) + \mathbf{p}_i^P(c)$ в клетке $c \in K$, есть сумма импульсов газа $\mathbf{p}_i^G(c)$ и порошка $\mathbf{p}_i^P(c)$. Суммарный по всем направлениям импульс равен

$$\mathbf{p} = \sum_{i=1}^6 \mathbf{p}_i. \quad (4)$$

Из (4), учитывая рис. 1, легко подсчитать проекции p_x и p_y импульса $\mathbf{p}(c)$ на Декартовы оси Ox и Oy :

$$p_x = \frac{\sqrt{3}}{2} (|\mathbf{p}_2| + |\mathbf{p}_3| - |\mathbf{p}_5| - |\mathbf{p}_6|), \quad (5)$$

$$p_y = |\mathbf{p}_4| - |\mathbf{p}_1| + \frac{1}{2} (|\mathbf{p}_3| + |\mathbf{p}_5| - |\mathbf{p}_2| - |\mathbf{p}_6|). \quad (6)$$

Определено разбиение клеток $c \in K$ на типы. Клетками среды $c_{\text{ср}} \in K_{\text{ср}}$ называются клетки, в которых выполняются законы сохранения массы и импульса. Клетки стенок $c_{\text{ст}} \in K_{\text{ст}}$ — это клетки, в которых выполняется закон сохранения массы, но может нарушаться закон сохранения импульса. И наконец, источники $c_{\text{ист}} \in K_{\text{ист}}$ — клетки, в которых могут нарушаться как закон сохранения массы, так и закон сохранения импульса. Множества клеток среды $K_{\text{ср}}$, стенок $K_{\text{ст}}$ и источников $K_{\text{ист}}$ попарно

не пересекаются ($K_{\text{ср}} \cap K_{\text{ст}} = \emptyset$, $K_{\text{ср}} \cap K_{\text{ист}} = \emptyset$, $K_{\text{ст}} \cap K_{\text{ист}} = \emptyset$). Объединение этих множеств совпадает с множеством всех клеток автомата ($K_{\text{ср}} \cup K_{\text{ст}} \cup K_{\text{ист}} = K$). Поведение стенок и источников задает граничные условия клеточного автомата.

В модели FHP-GP используется клеточный автомат с синхронным режимом функционирования. На каждой итерации происходит смена состояний $s(t)$ всех клеток $c \in K$ на состояния $s(t+1) = \theta(s(t))$, где $\theta(s(t)) \in \Theta$ — соответствующая функция переходов клетки c . Клеточный автомат при этом переходит из глобального состояния $\Omega(t)$ в новое глобальное состояние $\Omega(t+1)$. Для того чтобы модель адекватно отображала физический процесс, функция θ в клетках среды $c_{\text{ср}} \in K_{\text{ср}}$ должна удовлетворять законам сохранения массы газа

$$\sum_{c \in K} \sum_{i=0}^6 \theta(s_i^G(c_{\text{ср}})) = \sum_{c \in K} \sum_{i=0}^6 s_i^G(c_{\text{ср}}), \quad (7)$$

массы порошка

$$\sum_{c \in K} \sum_{i=0}^6 \theta(s_i^P(c_{\text{ср}})) = \sum_{c \in K} \sum_{i=0}^6 s_i^P(c_{\text{ср}}) \quad (8)$$

и общего импульса

$$\sum_{c \in K} \sum_{i=1}^6 \theta(\mathbf{p}_i(c_{\text{ср}})) = \sum_{c \in K} \sum_{i=1}^6 \mathbf{p}_i(c_{\text{ср}}). \quad (9)$$

Каждая итерация выполняется в две фазы: сдвиг и столкновение. Функция переходов θ состоит, таким образом, из суперпозиции функций θ_1 (сдвиг) и θ_2 (столкновение):

$$\theta(s) = \theta_2(\theta_1(s)). \quad (10)$$

В фазе сдвига в каждой клетке $c \in K$ каждая частица, учтенная в компонентах $s_i^G(c)$ и $s_i^P(c)$, $i = 1, \dots, 6$, векторов состояния $\mathbf{s}^G(c)$ и $\mathbf{s}^P(c)$ перемещается в соседнюю клетку $n_i(c)$, соответствующую ее вектору скорости $\mathbf{e}_i(c)$. Частицы, соответствующие компонентам $s_0^G(c)$ и $s_0^P(c)$, остаются в клетке c . Таким образом, i -е компоненты $s_i^G(c)$ и $s_i^P(c)$ векторов состояния $\mathbf{s}^G(c)$ и $\mathbf{s}^P(c)$ клетки c после сдвига принимают значения

$$\theta_1(s_i^G(c)) = \begin{cases} s_i^G(N_{((i+2) \bmod 6)+1}(c)) & \text{для } i = 1, 2, \dots, 6, \\ s_i^G(c) & \text{для } i = 0; \end{cases} \quad (11)$$

$$\theta_1(s_i^P(c)) = \begin{cases} s_i^P(N_{((i+2) \bmod 6)+1}(c)) & \text{для } i = 1, 2, \dots, 6, \\ s_i^P(c) & \text{для } i = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Несмотря на то, что при сдвиге масса и импульс частиц в клетке изменяются, в пределах всего клеточного автомата они сохраняются, т.е. условия (7), (8) и (9) выполняются.

В фазе столкновения θ_2 происходит изменение направления движения частиц согласно некоторым правилам столкновения, не зависящим от состояний соседних клеток. В модели FHP-GP функция θ_2 вероятностная. Ниже описаны правила столкновения для клеток разных типов: среды, стенок и источников.

В клетках среды $c_{\text{ср}} \in K_{\text{ср}}$ результатом функции θ_2 равновероятно выбирается одно из возможных значений, при которых сохраняются массы газа и порошка и общий импульс:

$$\sum_{i=0}^6 \theta_2(s_i^G(c_{cp})) = \sum_{i=0}^6 s_i^G(c_{cp}), \quad c_{cp} \in K; \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^6 \theta_2(s_i^P(c_{cp})) = \sum_{i=0}^6 s_i^P(c_{cp}), \quad c_{cp} \in K; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^6 \theta_2(\mathbf{p}_i(c_{cp})) = \sum_{i=1}^6 \mathbf{p}_i(c_{cp}), \quad c_{cp} \in K. \quad (15)$$

При выполнении условий (13), (14) и (15) условия (7), (8) и (9) тем более выполняются.

В клетках $c_{ст} \in K_{ст}$, являющихся стенками, частицы «отражаются» в обратном направлении, нарушая при этом закон сохранения импульса:

$$\theta_2(s_i^P(c_{ст})) = \begin{cases} s_{((i+2) \bmod 6)+1}^P(c_{ст}) & \text{для } i = 1, 2, \dots, 6, \\ s_i^P(c_{ст}) & \text{для } i = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Из-за того, что количество частиц в клетке не меняется, условия (13), (14), а следовательно, и (7), (8) выполняются. Условие (15) может нарушаться, так как меняются направления векторов скорости частиц, что соответствует изменению импульса частиц в газовой среде при столкновении с твердыми стенками. Такое поведение частиц в клетках-стенках моделирует условие нулевой скорости потока на границах препятствий.

Каждая клетка-источник $c_{ист} \in K_{ист}$ по алгоритму, определяемому граничными условиями, генерирует частицы со всевозможными направлениями вектора скорости. Из клеток-источников можно создавать разные объекты, задавая различные способы введения газа в моделируемый объем. Например, установив такие клетки в пространстве в одну линию (как правило, у границы клеточного массива), можно получить источник равномерного потока частиц заданной плотности. Отдельно установленный источник будет моделировать форсунку. Естественно, при генерации новых частиц ни масса $m^G(c_{ист})$, ни импульс $\mathbf{p}^G(c_{ист})$ частиц газа не сохраняются.

При моделировании практический интерес представляют осредненные значения скорости $\langle \mathbf{u} \rangle$ и плотности газа $\langle \rho^G \rangle$ и порошка $\langle \rho^P \rangle$ по некоторой окрестности $Av(c_0)$, которая включает все клетки $c \in K$, удаленные от клетки c_0 не больше чем на некоторую величину r , называемую радиусом осреднения. Осредненная скорость газа вычисляется как сумма скоростей всех частиц в клетках c , попадающих в окрестность осреднения $Av(c_0)$, деленная на количество этих частиц, или, что то же самое, суммарный импульс, деленный на суммарную массу:

$$\langle \mathbf{u} \rangle(c_0) = \frac{\sum_{c \in Av(c_0)} \sum_{i=0}^6 \mathbf{p}_i(c)}{\sum_{c \in Av(c_0)} \sum_{i=0}^6 m_i(c)}. \quad (17)$$

Осредненная плотность частиц $\langle \rho^G \rangle$ и $\langle \rho^P \rangle$ подсчитывается в той же окрестности $Av(c_0)$ следующим образом:

$$\langle \rho^G \rangle (c_0) = \frac{1}{|Av(c_0)|} \sum_{c \in Av(c_0)} \sum_{i=0}^6 s_i^G(c); \quad (18)$$

$$\langle \rho^P \rangle (c_0) = \frac{1}{|Av(c_0)|} \sum_{c \in Av(c_0)} \sum_{i=0}^6 s_i^P(c), \quad (19)$$

где $|Av(c_0)|$ — количество клеток, попадающих в окрестность осреднения $Av(c_0)$.

Осредненные значения скорости $\langle \mathbf{u} \rangle$ являются модельными значениями скорости газового потока, осредненные значения плотности $\langle \rho^P \rangle$ являются модельными значениями плотности порошка, а осредненные значения плотности $\langle \rho^G \rangle$ являются модельными значениями давления газа.

Следует отметить, что осредненные значения модельных скорости, плотности и давления соответствуют их физическим аналогам только в том случае, когда окрестность осреднения $Av(c_0)$ состоит исключительно из клеток среды $c \in K$. В противном случае, для предотвращения искажения результата осреднения значения $\langle \mathbf{u} \rangle$, $\langle \rho^G \rangle$ и $\langle \rho^P \rangle$ полагают неопределенными для заданного радиуса осреднения r . Это условие не позволяет определять осредненные значения на расстоянии ближе, чем радиус осреднения r от границ (стенок и источников), в том числе и находящихся внутри моделируемого объекта. Чем ближе к стенке нужно подсчитать осредненные значения, тем меньше нужно выбирать радиус осреднения r , но это приводит к увеличению автоматного шума.

2. Результаты тестовых исследований модели

Для проверки свойств предложенной модели была создана ее программная реализация, позволяющая проводить вычислительные эксперименты, задавая различные начальные условия и параметры эксперимента. Код программ написан на языке Си.

Хранение состояния автомата осуществляется в двумерном массиве. Из-за синхронного режима функционирования приходится использовать два таких массива. Функция сдвига θ_1 использует в качестве аргумента значения из одного из них, а результат помещает в другой. Для записи результата массивы используются поочередно: один на четных, а другой на нечетных итерациях. Функция столкновения θ_2 записывает свой результат в тот же массив, в котором находятся ее аргументы, и применяется к каждому из двух массивов поочередно после того, как функция θ_1 запишет в него свой результат.

Программным ограничением является максимальное количество частиц в одной клетке, имеющих одинаковый вектор скорости $\mathbf{e}_i(c)$, равное 255. Это означает, что каждый из семи компонентов $s_i^G(c)$ вектора состояния хранится в одном байте памяти. Вектор состояния порошкового компонента $\mathbf{s}^P(c)$ целиком занимает один байт, интерпретируемый как булев вектор, семь из восьми разрядов которого отвечают за шесть направлений и одну частицу покоя, а восьмой разряд не используется. Еще один байт занимает информация о типе клетки. Таким образом, состояние каждой клетки занимает 18 байт памяти с учетом дублирования во втором массиве. К примеру, клеточный автомат, эксперименты с которым описаны ниже, имеющий размер 200×400 клеток, требует около полутора мегабайт памяти.

Реализация функции сдвига θ_1 тривиальна. Она использует второй массив для записи своих значений, поэтому при последовательном обходе клеток автомата исходные значения, хранящиеся в первом массиве, не портятся. После того как эта функ-

ция отработала, указатели на массивы обмениваются своими значениями, выполняется функция θ_2 , а затем следующая итерация.

Функция θ_2 последовательно перебирает все клетки автомата по следующим правилам. Если клетка имеет тип «стенка», то векторы скорости всех частиц в ней меняются на антипараллельные. Клетки-источники генерируют новые частицы газа с заданной вероятностью. Клетки среды производят столкновение по следующему алгоритму. Вначале вычисляются концентрация частиц в клетке и проекции их импульсов на декартовы оси. Затем полным перебором подсчитывается количество состояний, сохраняющих массу газа, массу порошка и общий импульс, обусловленные выражениями (13), (14) и (15). После этого при помощи генератора случайных чисел, описанного в [5], равновероятно выбирается одно из этих состояний; его и полагают результатом функции θ_2 . Из-за полного перебора столкновение является самой затратной вычислительной функцией, несмотря на ряд оптимизаций, дающих выигрыш в скорости на несколько десятичных порядков.

Ниже описаны вычислительные эксперименты, проведенные с моделью FHP-GP. В первом из них используется только газовая составляющая модели и не используются частицы порошка. Такие начальные условия редуцируют модель до FHP-MP. Во втором эксперименте используются частицы как газа, так и порошка. Размеры автомата, топология стенок и другие параметры в обоих экспериментах одинаковы, что дает возможность сравнить их результаты.

Клеточный автомат, использующийся в этих вычислительных экспериментах, имеет размеры 200×400 клеток (вдоль декартовых осей Ox и Oy соответственно). Периметр с координатами в интервалах $[(1, 1), (1, 200)]$, $[(1, 1), (400, 1)]$, $[(1, 200), (400, 200)]$ и $[(400, 1), (400, 200)]$ выстроен из клеток-стенок. Также из стенок с координатами $[(100, 1), (100, 80)]$ и $[(100, 121), (100, 200)]$ построено сопло. Остальные — клетки среды. Так как моделируемый объем замкнут, клетки-источники не используются.

Результаты моделирования приведены на рис. 2. В первом эксперименте это поля давления газа и скорости потока, а во втором — поля давления газа и концентрации порошка. Начальное состояние автомата дано в верхней строке, в последующих строках — после некоторого количества итераций. Стенки изображены черными линиями. Так как клетки шестиугольные, вертикальные стенки имеют форму прямых линий, а горизонтальные — зигзагообразных ломаных. Для получения полей давления и концентрации произведено осреднение плотности газа $\langle \rho^G \rangle$ и порошка $\langle \rho^P \rangle$ с радиусом $r = 1$. Более темным цветом изображены участки с большими давлением газа и концентрацией частиц. Для получения поля скорости произведено осреднение скорости потока $\langle \mathbf{u} \rangle$ с радиусом $r = 3$. Длина векторов пропорциональна скорости, а их направление совпадает с направлением потока.

В начале обоих экспериментов в клетках среды находятся частицы газа со средней плотностью $\langle \rho_i^G \rangle = 3$ частицы на каждое направление, или 21 частица в клетке. Для моделирования взрыва в левой части камеры расположены две области газа с плотностью $\langle \rho_0^G \rangle = 60$ частиц покоя в клетке. Они имеют форму наклонных полос толщиной по 40 клеток и изображены в столбцах «Давление газа» черным цветом. Кроме того, во втором эксперименте внутри полос газа высокого давления в столбце «Концентрация порошка» имеются две наклонные полосы порошка с плотностью $\langle \rho_0^P \rangle = 1$ частица покоя в клетке. Эти полосы имеют толщину по 10 клеток. Масса частицы порошка $M_P = 20$.

Результаты первого эксперимента после 70, 220 и 390 итераций показывают, что в левой части камеры от участков высокого давления навстречу друг другу идут

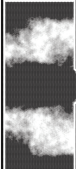
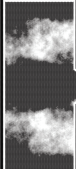
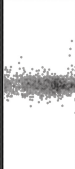
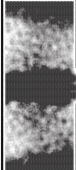
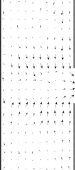
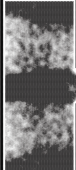
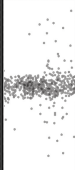
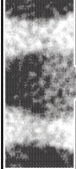
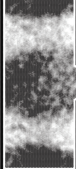
	Эксперимент 1 (газ без порошка)			Эксперимент 2 (композиция газа и порошка)		
	Давление газа		Скорость потока	Давление газа		Концентрация порошка
Исходное состояние						
70 итераций						
220 итераций						
390 итераций						

Рис. 2. Формирование струи. Результаты вычислительных экспериментов

ударные волны, которые сталкиваются, и газовый поток со сферическим фронтом распространяется от сопла в правую часть камеры. После того как в левой части камеры другие два фронта, удалившиеся друг от друга, отразились от верхней и нижней стенок и столкнулись, из сопла вправо вылетел еще один фронт, который смешался с отраженным от верхней и нижней стенок первым фронтом. Далее происходит отражение первого фронта от правой стенки и перемешивание газа, что не представляет интереса и не отражено на рисунке.

Во втором эксперименте поведение газа качественно не отличается от первого, так как импульс частиц газа в полосах высокого давления на порядок превосходит импульс частиц порошка. В исходном состоянии порошок покоится. Затем он, вытолкнутый взрывом, летит вправо, образуя облако со сферическим фронтом. В модели реализовано отталкивание частиц порошка от стенок, которые в проведенном эксперименте располагались довольно близко от формирующейся струи, поэтому в конце процесса наблюдается перемешивание порошка. Но, несмотря на это, форма струи качественно совпадает с зафиксированной в натурном эксперименте при определенных условиях [6].

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что новая клеточно-автоматная модель FHP-GP способна описать процессы формирования порошковой струи. Конечно же, в статье показан только принцип применения модели. Для ее практического использования следует производить привязку модельных величин к физическим. Это необходимо делать каждый раз при настройке модели на новые размеры камеры, плот-

ность и степень намола порошка, температуру газа, мощность взрывчатки и другие параметры. Кроме того, в модели не учитывается гравитация и ряд других физических явлений, но при необходимости их довольно легко учесть. Также легко перейти к трехмерному варианту предложенной модели, используя клеточный автомат с пространственной структурой в форме ромбического додекаэдра, подобно тому, как был осуществлен переход от двумерной модели FHP к трехмерной RD [7]. Конечно, получившаяся модель RD-GP будет требовать очень много вычислительных ресурсов, но если закон Мура будет продолжать работать, то в скором будущем суперкомпьютеры смогут покрыть эти потребности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бандман О. Л. Клеточно-автоматные модели пространственной динамики // Системная информатика. 2006. № 10. С. 59–113.
2. Frisch U., Hasslacher B., and Pomeau Y. Lattice-Gas automata for Navier-Stokes equations // Phys. Rev. Lett. 1986. No. 56. P. 1505.
3. Медведев Ю. Г. Расширение клеточно-автоматной модели потока FHP-I до многочастичного варианта FHP-MP // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур. Томск, 2008. С. 73.
4. Bandman O. L. Cellular Automata composition techniques for spatial dynamics simulation // Bull. Nov. Comp. Center, Comp. Science. 2008. V. 27. P. 1–39.
5. Kalgin K. V. Acceleration of linear congruential generators // Bull. Nov. Comp. Center, Comp. Science. 2008. V. 27. P. 51–53.
6. Кабулашвили В. Г., Тришин Ю. А. Струйные течения при взрывном обжати пористых облицовок и их применение // Взрыв, удар, защита: Сб. научных трудов. Новосибирск, 1988. № 18. С. 149.
7. Медведев Ю. Г. Трехмерная клеточно-автоматная модель потока вязкой жидкости // Автоматрия. 2003. Т. 39. № 3. С. 43–50.