

## Введение

При численном моделировании гидродинамических процессов, связанных с перемещением исследуемого объекта на значительное расстояние (например, в задаче обтекания тела, движущегося в газе, или распространение импульса сжатия в гетерогенной среде), зачастую представляют интерес лишь процессы в ограниченной области пространства, окружающей исследуемое явление или объект. В таком случае моделирование всей расчётной области в каждый момент времени трудоёмко с вычислительной точки зрения и нецелесообразно из физических соображений, так как влияние дальних участков расчётной области на исследуемое явление обычно несущественно. Воздействие дальних участков может быть заменено корректной постановкой граничных условий на сторонах прямоугольной области гораздо меньшего размера, содержащей исследуемое явление.

В настоящей работе представлен новый подход к моделированию стационарных ударных волн в сжимаемых средах с помощью разработанного метода адаптивного подвижного окна наблюдения.

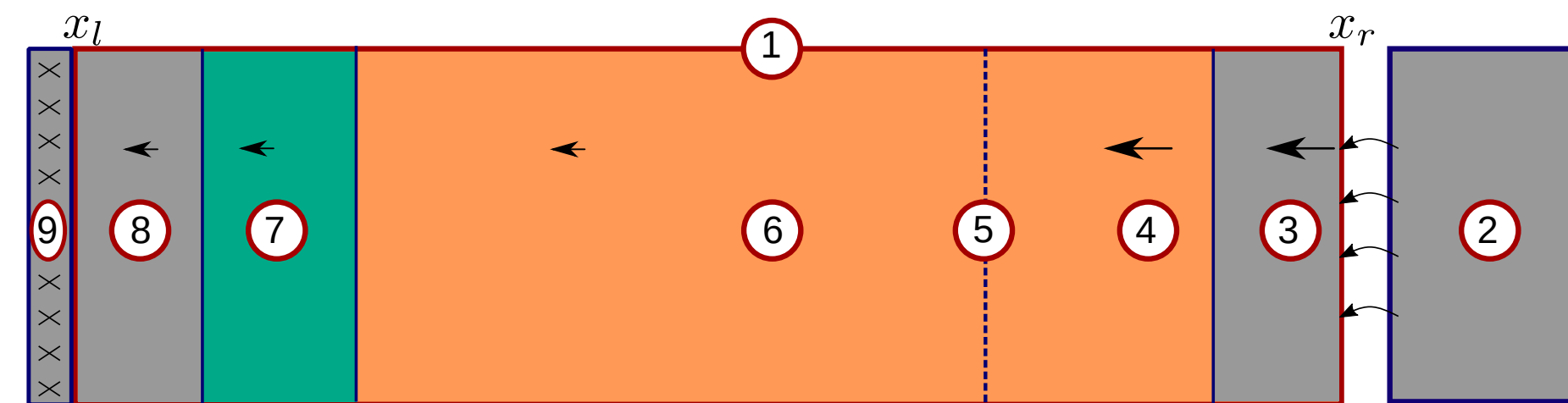


Рис. 1: Схема расчётной области

- 1 подвижное окно наблюдения
- 2 образец среды подготовленной для входа частиц в окно наблюдения
- 3 подобласть входа частиц
- 4 зона течения через фронт ударной волны
- 5 зона релаксации
- 6 зона релаксации
- 7 – 8 подобласть выхода частиц
- 9 удаление частиц из окна наблюдения

Впервые метод применялся с методом молекулярной динамики [3] и направлен на решение проблемы обуславливаемой тем, что при движении ударной волны в упруго-пластической гетерогенной среде, зона релаксации напряжений за фронтом ударной волны занимает значительное время. Так в случае хаотического расположения пор случайных размеров в материале опять-таки потребует проводить исследование на образцах большой протяжённости с большими вычислительными затратами. Однако отличительной особенностью таких задач является, помимо стационарного течения среды в окне наблюдения, локальные нестационарные явления, что осложняет постановку граничных условий и саму организацию вычислений внутри окна наблюдения. Задачу активно исследуют, в том числе методом молекулярной динамики для случая пор нанометрового размера.

## Метод

Пористая медь описывается в рамках CSPH-аппроксимации [1] законов сохранения деформируемого твердого тела с уравнением состояния основанном на ударной адиабате сплошной меди  $u_s = c_a + s_a u_p$  для шаровой части, модели изотропной упругости по закону Гука с модулем сдвига  $G$  и идеальной пластичностью с постоянным пределом текучести  $Y$  для девиаторной.

$\rho_0$ [г/см <sup>3</sup> ]	$c_a$ [км/с]	$s_a$	$G_0$ [ГПа]	$Y$ [ГПа]
8.96	4.148	1.4205	43	0.35

Параллельный программный комплекс [2] с использованием контактного метода сглаженных частиц (CSPH) позволяет рассматривать мезомеханическую модель с явной структурой материала для изучения многоматериальных сред, в том числе пористых металлов при произвольном размере пор.

Метод адаптивного окна наблюдения основан на подборе скорости системы отсчёта таким образом, чтобы зафиксировать ударную волну внутри окна наблюдения в желаемом положении.

Основная идея метода. Пусть в расчётную область вещество втекает с некоторой скоростью  $u_{in}$  — справа. За-

дадим разницу между скоростями втекания и вытекания  $\Delta u$ , которая тормозит вещество при протекании через расчётную область. В результате образуется ударная волна, обладающая неизвестной нам скоростью  $u_s$ . Если  $u_{in} > u_s$ , то фронт ударной волны будет сноситься к границе вытекания. Если  $u_{in} < u_s$ , то фронт ударной волны будет сноситься к границе втекания.

Первостепенная задача состоит в том, чтобы определить скорость движения ударной волны на основе наблюдаемых интегральных/средних характеристик всей расчётной области во времени.

В качестве такой наблюдаемой величины используется, например, средняя плотность вещества или среднее от величины продольных напряжений, давайте обозначим её  $\omega$ . Параметры линейной модели движения оцениваются на основе последовательности наблюдаемых значений  $\omega$  в моменты времени  $t_i$  методом наименьших квадратов

$$\omega(t_i) = at_i + b + n(t_i),$$

где  $a, b$  — параметры,  $n(t)$  — случайная величина. Применяя метод деления отрезка пополам найдем скорость движения УВ. Отметим, что изменение скорости в соответствии с оценками параметров модели движения связаны коэффициентом равным координате фронта ударной волны с обратным знаком  $\Delta u^k = -x_f a_k$ .

## Результаты

Методика описывает экспериментальные данные при расчете сильных ударных волн и прошла валидацию с использованием ранее опубликованного метода. Моделирование стационарных ударных волн при разных амплитудах воздействия позволяет, например, рассчитать ударную адиабату пористой меди в отсутствие экспериментальных данных. Отсутствие влияния метода на изменение амплитуды ударной волны при получении стационарной ударной волны позволяет исследовать ее структуру в процессе пластического компактирования пористой меди в режиме частичного закрытия пор.

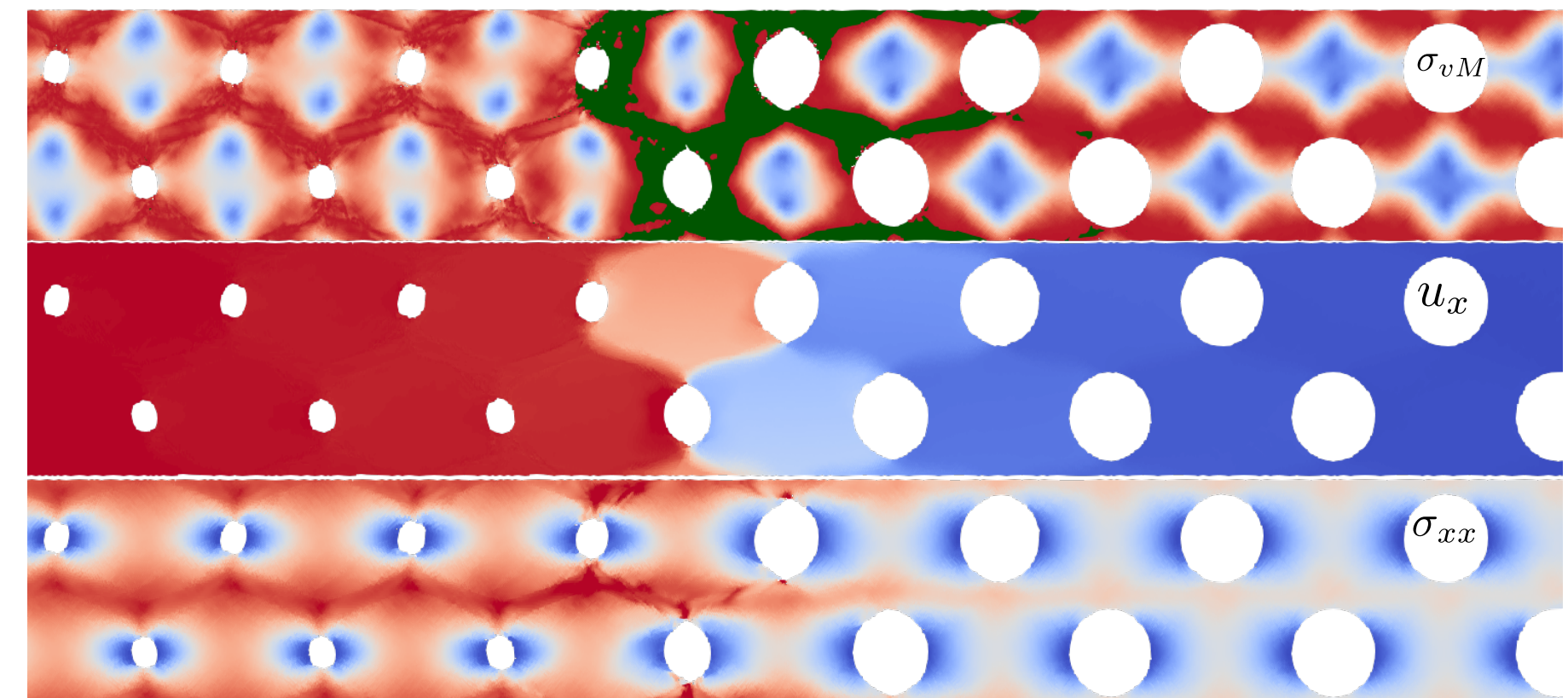


Рис. 2: Распределения интенсивности напряжений  $\sigma_{yt} \in [0, 0.35]$  ГПа, продольного напряжения  $\sigma_{xx} \in [-8.4, 800]$  МПа и скорости  $u_x \in [-420, 330]$  м/с в соответствии с палитрой справа. Частичное закрытие пор наблюдается для  $u_p = 100$  м/с. Зеленым цветом показаны частицы, которые находятся на цилиндре Мизеса в пластическом состоянии. Распределение скорости демонстрирует полосы сдвига вдоль плоскостей пластичности со скачком тангенциальной компоненты  $\approx 30$  м/с.

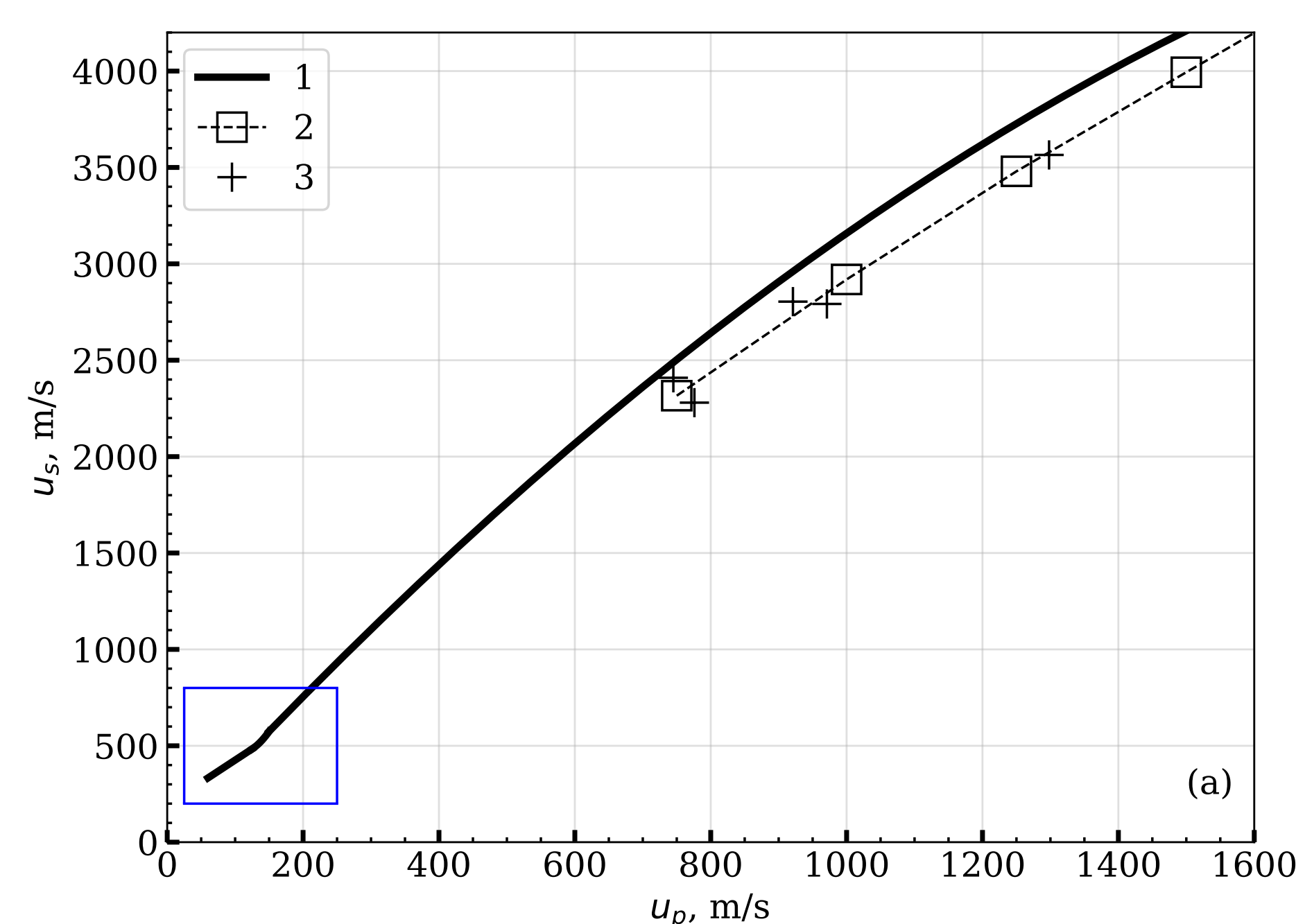


Рис. 3: 1 — ударная адиабата меди с начальной плотностью  $\rho_{00} = 6.637$  г/см<sup>3</sup>,  $m = 1.35$  получена в моделировании в подвижном окне. Сравнение расчётной адиабаты при начальной плотности  $\rho_{00} = 6.3$  г/см<sup>3</sup>: 2 — расчёт, 3 — экспериментальные данные. Синим прямоугольником выделена область, увеличенная на рисунке ниже.

При скоростях удара менее 250 м/с соотношение между скоростью ударной волны  $u_s$  и скоростью за фронтом ударной волны  $u_p$  было аппроксимировано кусочной зависимостью. Возникновение излома на ударной адиабате связано с приближением к пределу текучести в амплитуде волны компактирования и закрытием пор.

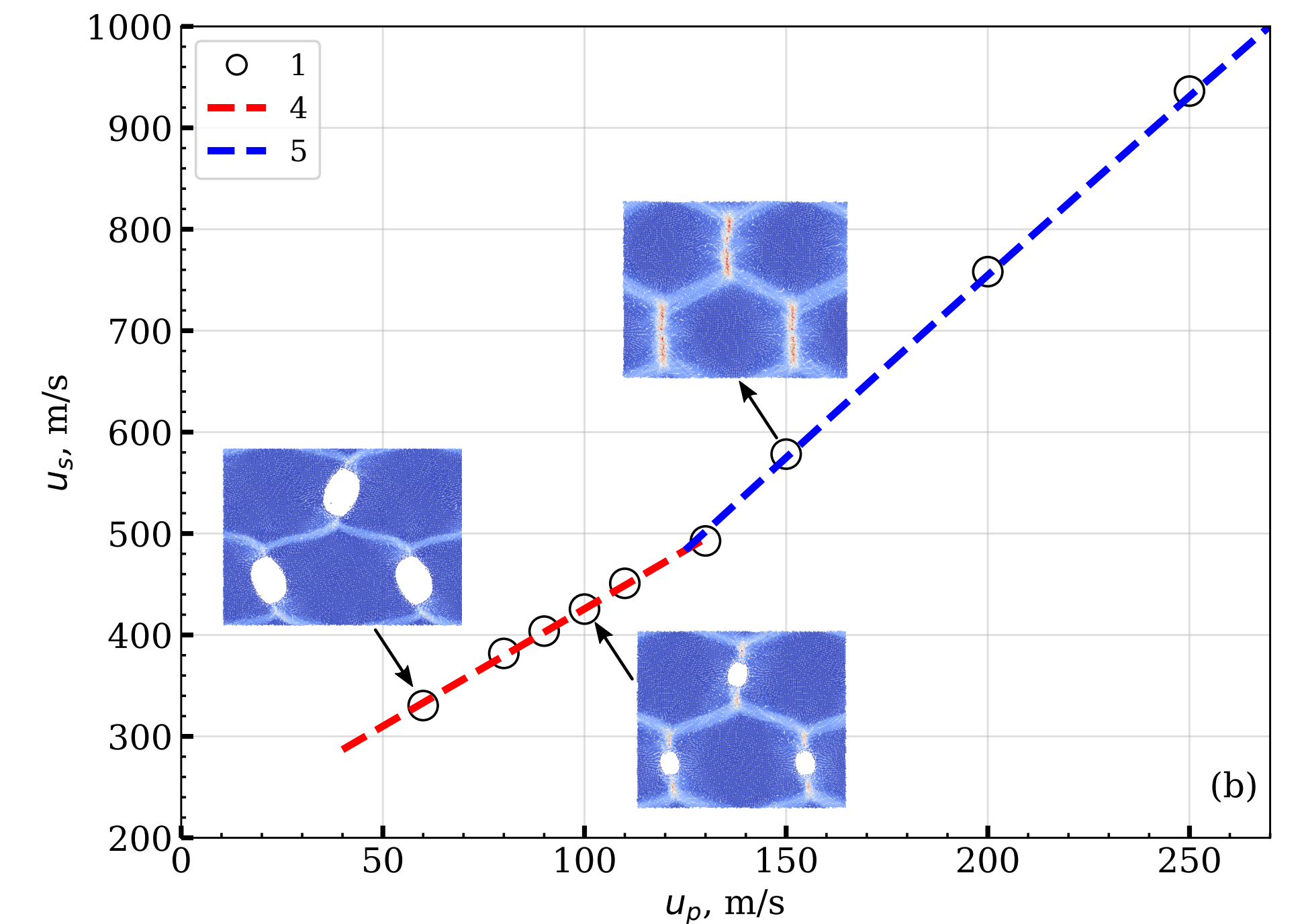


Рис. 4: 1 — Ударная адиабата  $m = 1.35$  аппроксимируется двумя зависимостями: 4 — линейная зависимость по точкам  $u_p \leq 130$  м/с и 5 — квадратичная зависимость по точкам  $u_p \geq 150$  м/с.

На рис. 5 показан расчет ударной адиабаты методом молекулярной динамики. В первом случае использовалась небольшая система (6750 атомов), для которой проводилась серия расчетов с различными объемом и температурой, удовлетворяющих уравнению Гюгоню. Во втором случае использовалось подвижное окно моделирования (одно моделирование — одна точка на ударной адиабате). Как видно, результаты хорошо согласуются.

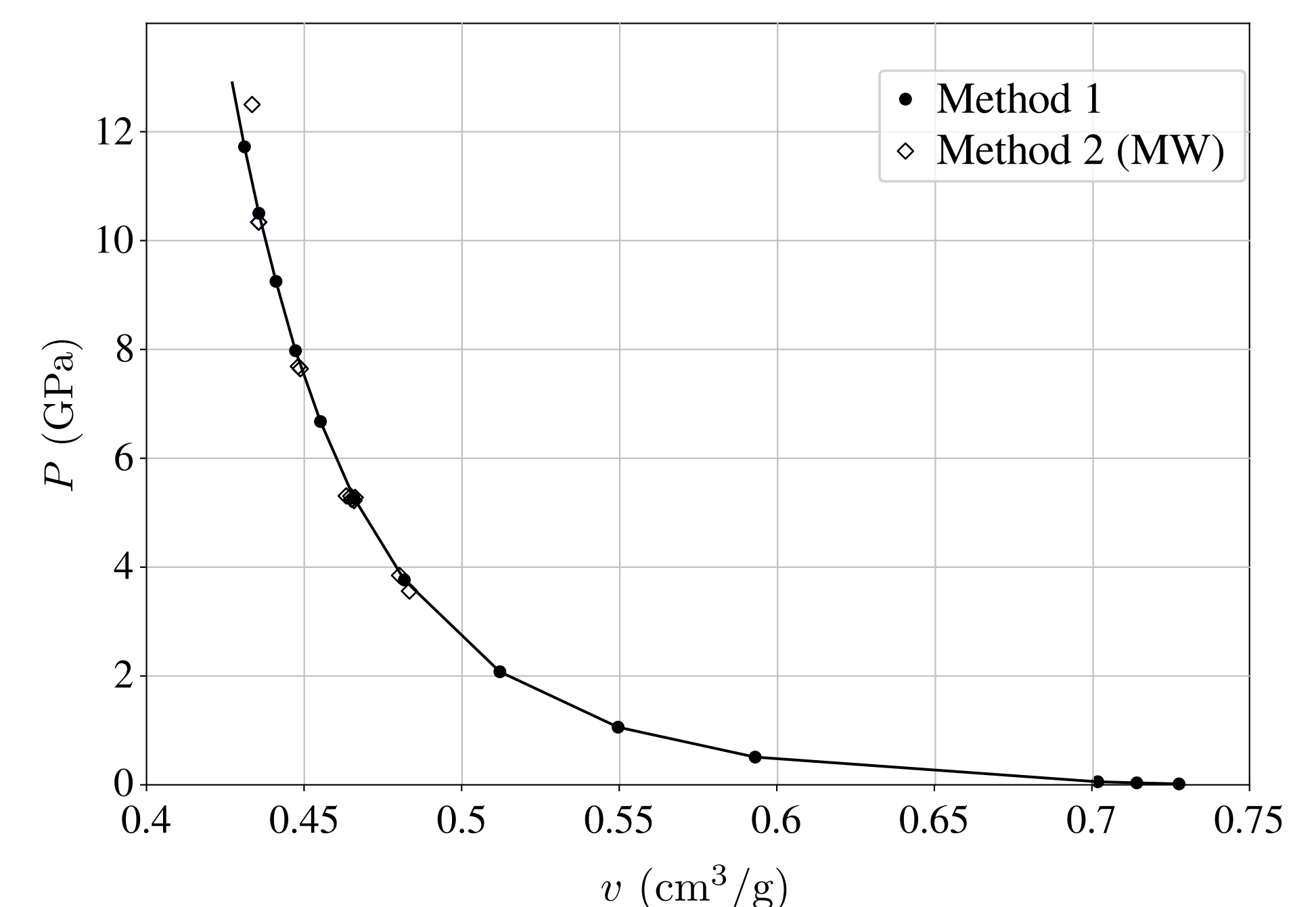


Рис. 5: Моделирование ударной адиабаты аргона методом молекулярной динамики двумя способами. Method 1: решение уравнения Гюгоню на основе уравнения состояния из МД-моделирования. Method 2: моделирование в подвижном окне.

## Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 24-19-00746.

## Библиография

- [1] A. N. Parshikov, S. A. Medin, Smoothed particle hydrodynamics using interparticle contact algorithms. Journal of Computational Physics 180 (1) (2002) 358–382. doi:10.1006/jcph.2002.7099.
- [2] M. S. Egorova, S. A. Dyachkov, A. N. Parshikov, V. V. Zhakhovsky, Parallel SPH modeling using dynamic domain decomposition and load balancing displacement of voronoi subdomains, Comput. Phys. Commun. 234 (2019) 112–125. doi:10.1016/j.cpc.2018.07.019.
- [3] Zhakhovsky V, Budzevich M, Inogamov N, Oleynik I and White C 2011 Phys. Rev. Lett..
- [4] S. Murzov, A. Parshikov, S. D'yachkov, M. Egorova, S. Medin, V. Zhakhovskii, Simulation of stationary shock waves in porous copper with smoothed particle hydrodynamics, High Temperature 59 (2) (2021) 230–239. doi:10.1134/S0018151X21020097.
- [5] S. Murzov, S. Dyachkov, V. Zhakhovsky, Adaptive moving window technique for sph simulation of stationary shock waves, Computer Physics Communications 298 (2024). doi:10.1016/j.cpc.2024.109116.