ВНИИА
РОСАТОМ

Метод подвижного окна наблюдения для моделирования распространения ударных волн в различных средах

Семен Александрович Мурзов,
С.А. Дьячков, Г.В. Выскварко,
И.С. Гальцов, П.Р. Левашев

Содержание доклада

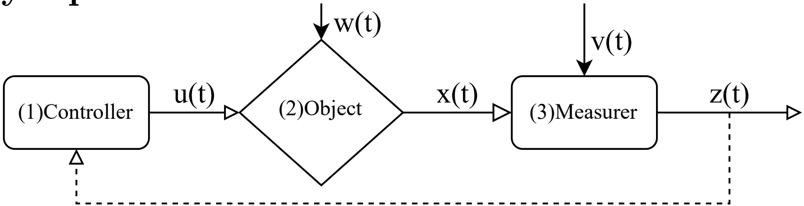
ВНИИА
РОСАТОМ

Цель работы состоит в разработке алгоритма для моделирования стационарных ударной волны в подвижной системе координат.

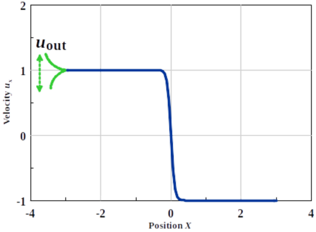
- Метод подвижного окна применительно к контактному методу SPH

- Метод подвижного окна применительно к моделированию методом молекулярной динамики

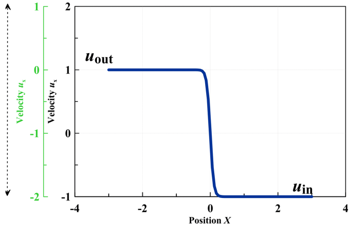
оценивание/автоматическое регулирование?



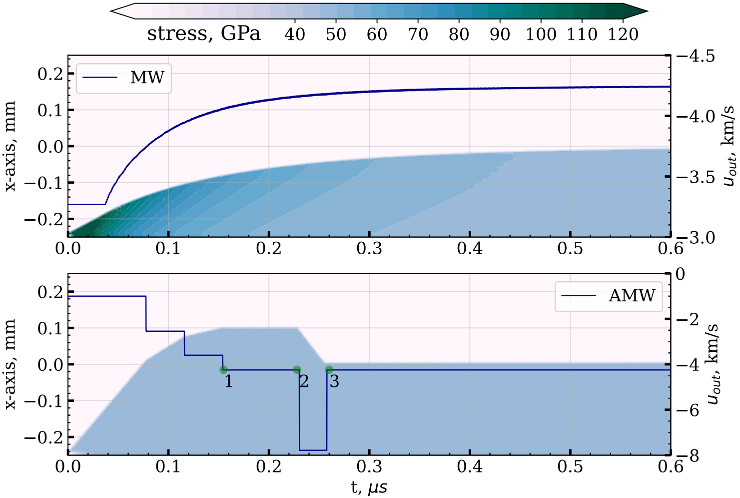
- MW регулирует скорость выхода $u_{out}(N \text{ or } \sum\sigma)$ для корректировки амплитуды УВ



- AMW статистически оценивает и использует преобразования Галилея для поиска скорости фронта УВ



Особенности сходимости алгоритмов



MW
исходно более сильная УВ снижает амплитуду для

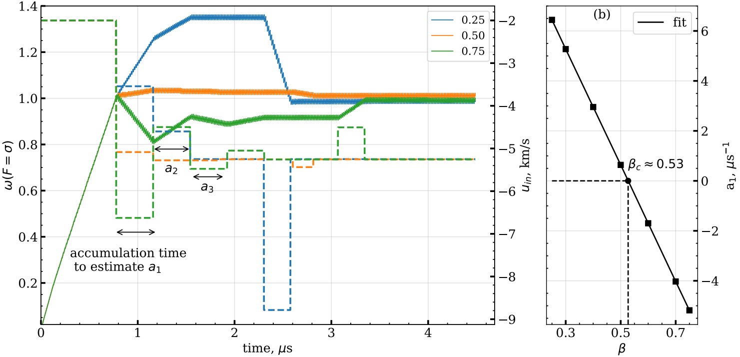
AMW
фиксированная амплитуда ударной волны, скорость

Адаптивное подвижное окно

ВНИИА РОСАТОМ

Линейная модель движения фронта $\omega(t) = a_k t + b_k$

где $\omega \propto N$ or $\sum_i \sigma$



$$\Delta u_k = -\beta L a_k,$$

а L — длина расчетной области , $\beta \in (0{,}1)$

a_k — текущая оценка наклона зависимости $\omega(t)$

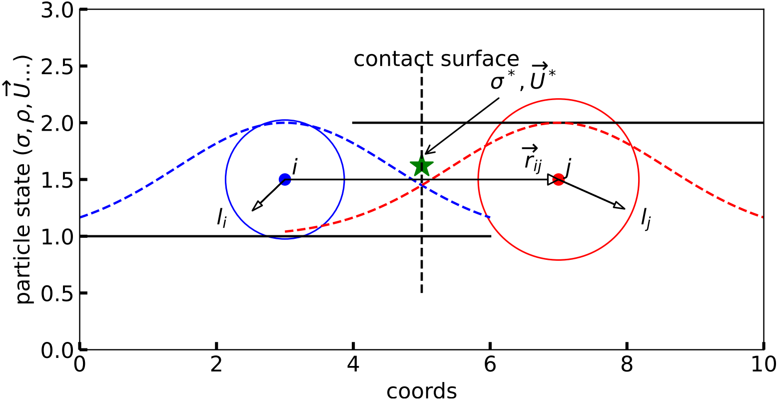
Упрощенный алгоритм поиска скорости ударной волны, дихотомия

ВНИИА РОСАТОМ

1. Задается скорость нагружения u_p. Запускается моделирование прохождения ударной волны по образцу.
2. При достижении фронтом волны целевого положения расчёт останавливается, а полученное состояние сохраняется.
3. Расчет продолжается из точки сохранения с разными u_{out}: u_{out}^{min} и u_{out}^{max} такими, чтобы знаки $\left\langle \frac{d\omega}{dt} \right\rangle 0$ измеренные в этих системах отличались.После этого производится поиск корня уравнения $\left\langle \frac{d\omega}{dt} \right\rangle (u_{out}) = 0$ методом дихотомии.
4. В конце снова запускается алгоритм дихотомии для более точного определения скорости u_{out}, соответствующей стационарному состоянию.

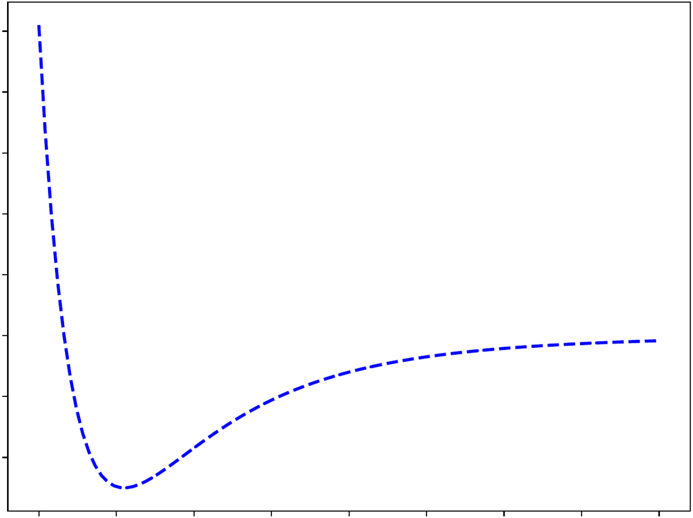
ВАНТ, Сер. Математическое моделирование физических процессов 2025 вып. 1.

Метод сглаженных частиц (SPH) с решением задачи распада разрыва (CSPH, A Паршиков JCP 180 (1) doi:10.1006/jcph.2002.7099)



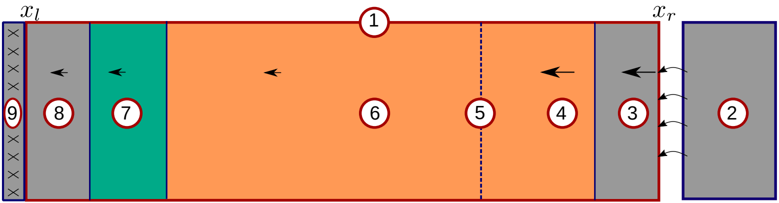
Wendland C_2 ядро с $h_{ij} = \theta(l_i + l_j)$

Метод молекулярной динамики

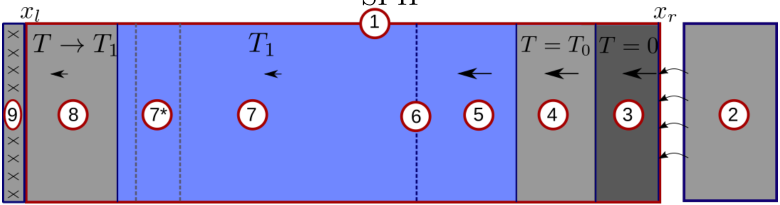


$$U_i = U(\overrightarrow{r}_i, \{\overrightarrow{r}_k\}),\ \text{где } k \text{ проходит по соседям.}$$

Схемы расчетной области



SPH



MD

2.
Результаты моделирования

CSPH аппроксимация уравнений движения с прочностью

используя ij-пару и базис RST, с тройкой
$M : \{\overrightarrow{e}_x, \overrightarrow{e}_y, \overrightarrow{e}_z\} \to \{\overrightarrow{e}_{ij}, [\overrightarrow{e}_T, \overrightarrow{e}_{ij}], [\overrightarrow{e}_z, \overrightarrow{e}_{ij}]\}$

$$\dot{\varepsilon}_i = -2 \sum_j \frac{m_j}{\rho_j h_{ij}} \left(U_i^R - U_{ij}^{*R}\right) \tilde{W}'_{ij}$$

$$\dot{\overrightarrow{U}}_i = -2 \sum_j M_{RST}^{-1} \frac{m_j \overrightarrow{\sigma}^*_{ij}}{\rho_j \rho_i} \tilde{W}'_{ij}$$

$$\dot{E}_i = -2 \sum_j \frac{m_j \overrightarrow{\sigma}^*_{ij} \cdot \overrightarrow{U}^*_{ij}}{\rho_j \rho_i} \tilde{W}'_{ij}$$

$$\dot{S}_i^{kl} = G_i \sum_j \frac{m_j \tilde{W}'_{ij}}{\rho_j} \left\{ \begin{array}{ll} \frac{4}{3}\left(3u_i^{*k} e_{ij}^k - \left(U_{ij}^{*R} - U_i^R\right)\right) & \text{if } k = l \\ 2\left(u_i^{*k} e_{ij}^l + u_i^{*l} e_{ij}^k\right) & \text{if } k \neq l \end{array} \right\}$$

где $\tilde{W}'_{ij} = (\mathrm{d}W(r_{ij}/h_{ij})/\mathrm{d}r)/h_{ij}$.

Интегрируем уравнение с малым шагом по времени

ВНИИА РОСАТОМ

$$\Delta t = C \min_{\forall particles} l/\sqrt{c_l^2 + [\max\{\mathrm{sign}(-\dot{\varepsilon}), 16\}\dot{\varepsilon} l]^2}$$

$$\rho_i(t+\Delta t) = \rho_i(t)\exp(-\dot{\mu}_i \Delta t)$$

$$\overrightarrow{U}_i(t+\Delta t) = \overrightarrow{U}_i(t) + \dot{\overrightarrow{U}}_i \Delta t$$

$$E_i(t+\Delta t) = E_i(t) + \dot{E}_i \Delta t - 0.5(\overrightarrow{U}_i^2(t+\Delta t) - \overrightarrow{U}_i^2(t))$$

$$\mathbf{S}_i(t+\Delta t) = \mathbf{\Omega}_i(\mathbf{S}_i(t) + \dot{\mathbf{S}}_i \Delta t)\mathbf{\Omega}_i^T$$

где $\Omega_i^{kl} = \delta^{kl} + \varepsilon^{klm}\omega_i^m \Delta t$, $\overrightarrow{\omega_i} = \sum_j \frac{m_j \tilde{W}'_{ij}}{\rho_j}[\overrightarrow{U}_i, \overrightarrow{e}_{ij}]$

Интегрирование с малым шагом по времени

$$\Delta t = C \min_{\forall particles} l / \sqrt{c_l^2 + [\max\{\mathrm{sign}(-\dot{\varepsilon}), 16\}\dot{\varepsilon} l]^2}$$

$$\rho_i(t+\Delta t) = \rho_i(t)\exp(-\dot{\mu}_i \Delta t)$$

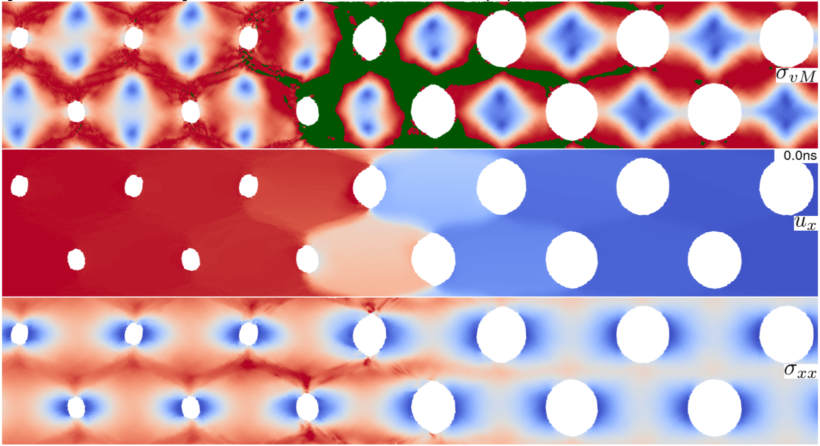
$$\overrightarrow{U}_i(t+\Delta t) = \overrightarrow{U}_i(t) + \dot{\overrightarrow{U}}_i \Delta t$$

$$E_i(t+\Delta t) = E_i(t) + \dot{E}_i \Delta t - 0.5(\overrightarrow{U}_i^2(t+\Delta t) - \overrightarrow{U}_i^2(t))$$

$$\mathbf{S}_i(t+\Delta t) = \mathbf{\Omega}_i(\mathbf{S}_i(t) + \dot{\mathbf{S}}_i \Delta t)\mathbf{\Omega}_i^T$$

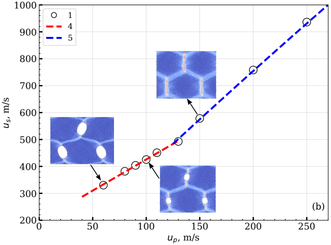
где $\Omega_i^{kl} = \delta^{kl} + \varepsilon^{klm}\omega_i^m \Delta t$, $\overrightarrow{\omega_i} = \sum_j \frac{m_j \tilde{W}'_{ij}}{\rho_j}[\overrightarrow{U}_i, \overrightarrow{e}_{ij}]$

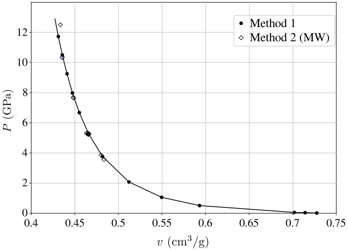
Частичное закрытие пор в пористой меди

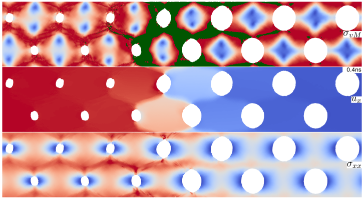


пористость $\rho_0/\rho = 1.35$, $u_p = 100$ м/с.
Зеленое – пластически деформируемые частицы.

Ударные адиабаты







- Состояния на $P - V$ диаграмме хорошо согласуются с ударной адиабатой в системе с потенциалом Леннарда–Джонса

- Метод может быть применен к моделированию относительно слабых УВ

Заключение:

ВНИИА
РОСАТОМ

- получена стационарная волна движущейся с постоянной средней скоростью, что промоделировано в мезомеханических моделях с использованием разработанного алгоритма
- сравнение с предыдущим методом показало возможность моделирования слабых ударных волн и более быструю сходимость алгоритма
- рассчитана ударная адиабата в системе с потенциалом Леннарда–Джонса