

## ПРИМЕНЕНИЕ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРНЫХ УСТРОЙСТВ

А.А. Речкин

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,  
Новосибирск, Россия, e-mail: mailigd@misd.ru

**Аннотация:** Дан краткий критический анализ применяемых в настоящее время методов исследования и проектирования пневматических и гидравлических ударных устройств для горного дела и строительства. Обозначены ограничения, накладываемые этими методами на получение полных достоверных результатов при моделировании работы этих устройств. Представлено краткое описание метода вычислительной гидродинамики (CFD). Приведено обоснование для применения методов вычислительной гидродинамики при проектировании и исследовании пневматических и гидравлических ударных устройств как наиболее полно и точно отражающих процессы, происходящие в этих машинах. На примере тестовой двумерной нестационарной задачи, имитирующей движение бойка пневматической ударной машины, решенной в комплексе Ansys Fluent, показаны преимущества, которые дает метод в получении информации о физических процессах, происходящих при движении бойка ударной машины, по сравнению с методами физического и одномерного моделирования. Получено стационарное решение задачи, являющееся начальным для нестационарной постановки. Получены распределения основных физических параметров во времени и пространстве, графики перемещения, скорости бойка ударника. Представлены результаты распределения давления, плотности, векторов скорости, температуры, чисел Рейнольдса и Маха в определенный момент времени.

**Ключевые слова:** вычислительная гидродинамика, CFD, ударные машины, проектирование, имитационная модель, динамические сетки, сеточная модель, эластичный клапан, нестационарные процессы.

**Для цитирования:** Речкин А. А. Применение CFD-моделирования в исследовании и проектировании пневматических и гидравлических ударных устройств // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №7. – С.104–114. DOI:10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_104.

### CFD-modeling in design and research of pneumatic and hydraulic percussion tools

A.A. Rechkin

Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia, e-mail: mailigd@misd.ru

**Abstract:** The article presents a brief critical analysis of methods currently in use in design and research of pneumatic and hydraulic percussion tools for mining and construction. These me-

thods are somewhat limited in reliability of modeling data produced. The computational fluid dynamics (CFD) method is described in short. The application of CFD methods in design and research of pneumatic and hydraulic percussion tools is justified as these techniques offer the fullest and most accurate description of the processes running in these devices. The case-study of a 2D nonstationary simulation of piston travel in a pneumatic percussion tool in the environment Ansys Fluent demonstrates advantages of this method in acquisition of information about physical processes which take place when the impact piston moves in the machine in comparison with physical and one-dimensional modeling. The obtained stationary solution of the problem is an initial solution for the nonstationary formulation. The time and space distributions of physical parameters, the displacement diagrams and the velocity curves of the impact piston are obtained. The patterns of pressure, density, velocity vectors, temperature, Reynolds number and Mach number at a certain time are presented.

**Key words:** Computational Fluid Dynamics, CFD, percussion machines, design, simulation model, dynamic grids, grid model, elastic valve, nonstationary processes.

**For citation:** Rechkin A. A. CFD-modeling in design and research of pneumatic and hydraulic percussion tools. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(7):104-114. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_104.

---

## Введение

В настоящее время продолжает активно развиваться проектирование как пневматических [1 – 5], так и гидравлических [6 – 8] ударных устройств для горнодобывающей промышленности и строительства. Однако несмотря на то, что первые ударные пневматические и гидравлические устройства были разработаны в 1950-х годах, до сих пор невозможно получить полные данные о том, что действительно происходит внутри этих машин во время работы. Большинство экспериментальных данных о внутренних процессах в ударных машинах нельзя получить обычными измерительными методами. Для этого потребовалось бы установить внутри этих машин множество бесконтактных датчиков различных параметров (скорости, температуры, плотности и т.д.), которые должны были бы быть настолько миниатюрны, что не влияли бы на работу машины и не взаимодействовали бы механически с деталями ударных устройств, должны иметь автономное питание и беспровод-

ные каналы связи, и даже будучи созданы, имели бы огромную стоимость. Установка датчиков, например, давления, через отверстия в корпусе может дать информацию в динамике, но только в доступных местах и отдельных точках рабочих камер.

Экспериментальные методы исследования и проектирования ударной машины также требуют при каждом внесении изменений в конструкцию ее переделки, что увеличивает материальные затраты. С другой стороны, анализ давлений, скоростей потока, параметров турбулентности и других данных может помочь в оптимизации существующих и проектировании новых машин. Существующие аналитические и полуаналитические методы [9 – 11], которые наряду с экспериментальными [12 – 16] применяются сегодня при проектировании ударных устройств, не могут учитывать сложную геометрию и такие явления, как турбулентность и трансзвуковой поток, и не дают картину распределения параметров в пространстве. Что касается машин

с эластичными элементами из резины, полиуретана и т.п., которые разрабатываются в том числе и в ИГД СО РАН [17–20], то в таком случае необходимо моделировать процесс деформации этих элементов, что в принципе невозможно сделать указанными методами.

Сложность проектирования пневматических и гидравлических ударных механизмов обусловлена также недостаточным исследованием нестационарных процессов, протекающих в рабочих камерах машин, связанных с резким изменением параметров потока рабочей жидкости или газа (давления, объема камер, скоростей потока, турбулентности), особенно в момент удара, во время изменения направления движения бойка (отскока), закрытия и открытия управляющих элементов камер. При использовании эластичных клапанов это касается также и их деформации. Особенно важно спроектировать машину так, чтобы избежать возникновения лишних сил, препятствующих оптимальной работе, а именно формирования пневматических и гидравлических подушек, противодавлений, излишнего трения в деталях машины и др.

### Методы

Применение метода CFD в исследовании работы ударных машин является относительно новым подходом, и область применения метода ограничена в силу значительных компьютерных затрат, несовершенства технологии динамических сеток и сложности моделирования нестационарных процессов. Тем не менее, в последнее время появляются работы [21–25], в которых вычислительная гидродинамика применяется для исследования и проектирования подобных машин.

Программы вычислительной гидродинамики, использующие современные численные методы, позволяют решать задачи в динамике и в трехмерной по-

становке, что дает полную картину о всех интересующих исследователя параметрах во времени и пространстве. Кроме того, они позволяют строить связанные системы расчета, когда при сопряжении, например, гидродинамического и механического расчетов силы, действующие на деформируемое тело, передаются из гидродинамического в механический расчет, а обратно передаются значения перемещений. Такая технология позволяет решать задачи деформирования эластичных элементов в рабочих циклах пневматических и гидравлических ударных машин.

Метод вычислительной гидродинамики состоит в дискретизации основных дифференциальных уравнений гидродинамики и замене системы дифференциальных уравнений системой алгебраических уравнений, и наряду с теорией и экспериментом является третьим методом гидродинамики [26]. Основные уравнения гидродинамики описывают динамическое поведение текучих сред и определяются законами сохранения. В интегральной форме они записываются в следующем виде [27]:

Уравнение неразрывности (сохранения массы):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \bar{v} d\Omega + \oint_S \rho (\bar{v} \cdot \bar{n}) dS = 0. \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульсов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \bar{v} d\Omega + \oint_S \rho \bar{v} (\bar{v} \cdot \bar{n}) dS = \\ = \int_{\Omega} \rho \bar{f} d\Omega - \oint_S \rho \bar{n} dS + \oint_S (\tau \cdot \bar{n}) dS \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega + \oint_S \rho H (\bar{v} \cdot \bar{n}) dS = \\ = \oint_S k (\nabla T \cdot \bar{n}) dS + \int_{\Omega} (\rho \bar{f} \cdot \bar{v} + \dot{q}_n) d\Omega + \\ + \oint_S (\tau \cdot \bar{v}) \cdot \bar{n} dS \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  — статическое давление, Па;  $E$  — энергия единицы массы, Дж;  $H$  — общая энтальпия, Дж;  $\vec{v}$  — вектор скорости, м/с;  $k$  — коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $T$  — температура, К;  $\vec{f}$  — вектор внешних сил, Н;  $q_h$  — тепловой поток, Вт.

Компоненты тензора вязких напряжений:

$$\tau_{ij} = \delta_{ij} \lambda \nabla \vec{v} + \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (4)$$

где  $\lambda$  — вторая вязкость, Па·с;  $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с.

Кинематическая вязкость  $\nu = \mu/\rho$  и, согласно гипотезе Стокса, объемная вязкость  $\lambda + (2/3)\mu = 0$ .

Для связи давления и плотности в сжимаемых средах должно выполняться также уравнение состояния. В большинстве пневматических приложений воздух может рассматриваться как идеальный газ без учета межмолекулярного взаимодействия, имеющий постоянную теплоемкость, и в этом случае для него будет справедливо уравнение состояния идеального газа:

$$p = \rho RT \quad (5)$$

и термодинамические параметры:

$$h = c_p T; \quad R = c_p - c_v; \quad \gamma = c_p / c_v.$$

Здесь  $R$  — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $h$  — энтальпия, Дж/кг;  $c_p$  — теплоемкость при  $p = \text{const}$ , Дж/(кг·К);  $c_v$  — теплоемкость при  $V = \text{const}$ , Дж/(кг·К);  $\gamma$  — показатель адиабаты.

Зависимость динамической вязкости от температуры выражается законом Сазерленда для воздуха [28]:

$$\mu = \frac{1,457^{3/2}}{T + 110} \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

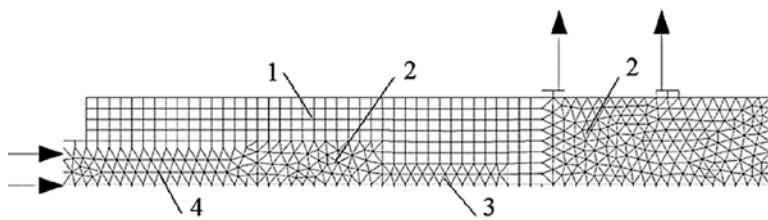
где  $T$  — температура, К.

Турбулентное течение — форма течения жидкости или газа, при которой их элементы совершают неупорядоченные, неустановившиеся движения по слож-

ным траекториям, что приводит к интенсивному перемешиванию между слоями движущихся жидкости или газа. Вследствие повышенного обмена импульсами и энергией между молекулами и твердыми стенками турбулентность приводит при прочих равных условиях к увеличению трения и нагрева по сравнению с ламинарным потоком. Следует сказать, что до сих пор явление турбулентности далеко от окончательного изучения, и несмотря на множество разработанных моделей имеет часто только экспериментальное подтверждение и дает грубую инженерную оценку [27]. Для данного класса задач применимы модели  $k$ - $\varepsilon$ ,  $k$ - $\omega$  и Спаларта-Аллмараса. В частности,  $k$ - $\varepsilon$  модель является наиболее используемой двухпараметрической моделью турбулентности, основанной на решении уравнений кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости турбулентной диссипации  $\varepsilon$  [29].

### Постановка задачи

Пробная задача для тестирования возможности применения CFD к расчету ударных машин решалась в Ansys Fluent в двумерной постановке. Суть задачи сводится к моделированию движения плоского твердого тела, имитирующего боек ударника с дросселем, под действием сил воздуха. Между бойком и верхней стенкой имеется зазор 0,0001 м. При этом возникают расчетные области, занятые воздухом, которые движутся или деформируются. Для моделирования движения жесткого тела в Ansys Fluent используется 6DOF решатель или пользовательские функции. Для нестационарного расчета необходимо задать динамические сеточные зоны типа Rigid или Deformed и параметры перестроения сетки. В данном расчете использовались методы перестроения Smoothing и Remeshing. Сеточная модель задачи приведена на рис. 1.



1 – твердотельная движущаяся зона, имитирующая боек ударника,  
 2 – деформируемые воздушные зоны, 3 – движущаяся воздушная зона,  
 4 – стационарная воздушная зона

Рис. 1. Сеточная модель задачи  
 Fig. 1. Grid model of the problem

На входе и выходе заданы граничные условия типа Pressure Inlet 0,2 МПа и Pressure Outlet 0,0 МПа соответственно. Масса бойка принята 1 кг.

Прежде чем искать решение нестационарной задачи, необходимо найти стационарное решение, которое затем будет использовано как начальное в нестационарном решении.

Поле статического давления для стационарного решения после 40 итераций представлено на рис. 2 (см. Приложение, с. 113).

## Результаты

Моделирование проводилось с постоянным шагом по времени 0,0001 с. В момент времени 0,008 с граничное условие для переднего выходного канала менялось с Pressure Outlet на Wall (канал закрывался). На рис. 3 представлена перестроенная сетка и положение бойка в момент времени  $t = 0,01$  с.

На рис. 4 (см. Приложение, с. 114) дается распределение основных физических параметров в этот момент. Так же с помощью пользовательской функ-

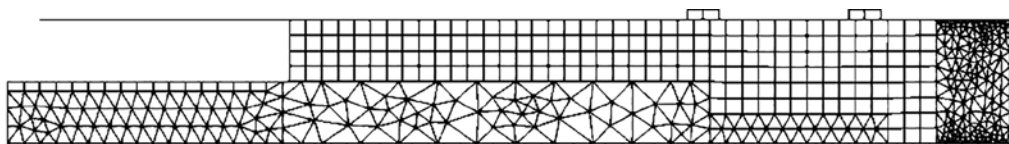


Рис. 3. Положение бойка ударника и перестроенная сетка в момент времени 0,01 с  
 Fig. 3. Piston position and re-constructed grid at time 0.01 s

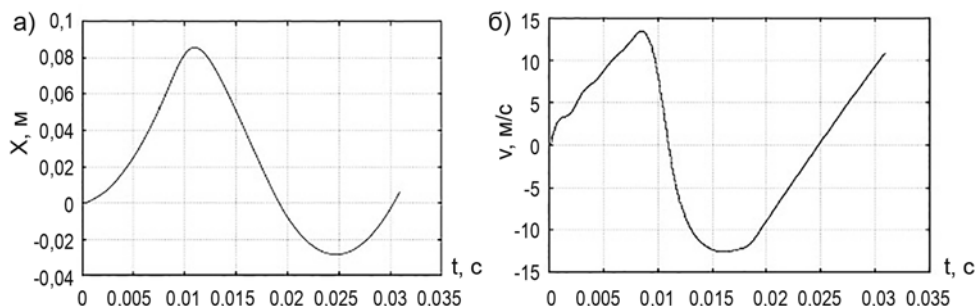


Рис. 5. Графики перемещения (а) и скорости (б) бойка ударника  
 Fig. 5. Displacement diagram (a) and velocity curves (b) of impact piston

ции получены графики перемещения  $X$  и скорости  $v$  бойка ударника (рис. 5).

Как видно из полученных распределений и графиков, результаты моделирования соответствуют физическим представлениям о движении бойка ударной машины под действием сжатого воздуха с последующим закрытием переднего выпускного канала, приводящим к росту давления в передней камере, останову при выравнивании сил и движению назад за счет большего сечения передней камеры до падения давления в ней. Результаты моделирования получены для модели идеального сжимаемого газа.

### Выводы

Таким образом, решенная задача позволяет сделать вывод о том, что применение CFD-моделирования при исследовании и проектировании ударных устройств для горного дела и строительства является актуальным и перспективным. Данные, полученные при моделировании, которые невозможно получить другими методами, представлены распределением во времени и пространстве с учетом

всех особенностей геометрии, что обеспечивает исследователя и конструктора всей необходимой информацией. Возможность изменения параметров компьютерной модели и сравнения различных вариантов также является большим преимуществом и позволяет снизить затраты на изготовление физических макетов.

Несмотря на сложности настройки динамических и деформируемых зон сетки и значительное время, затрачиваемое на расчет, особенно в трехмерных задачах, преимущества применения CFD-моделирования перекрывают эти недостатки.

В дальнейшем, используя полученные результаты, планируется перейти к решению задач трехмерного моделирования, которые будут описывать рабочие циклы реальных полноразмерных устройств ударного действия, в том числе с упругими запорными элементами.

Автор благодарен за помощь в работе над статьей д.т.н. Б.Б. Данилову (ИГД СО РАН).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сысоев Н. И., Гринько А. А., Гринько Д. А. Обоснование структуры и рациональных конструктивных параметров перфоратора с винтовым рабочим ходом бурового инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 7. — С. 113–124. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_7\_0\_113.
2. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Чанышев А. И., Чежин Д. О. Определение усилий для изменения траектории движения пневмопробойника в грунте // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — № 4 — С. 69–79. DOI: 10.1134/S1062739117042667.
3. Тищенко И. В., Червов В. В. Основы создания пневмомолота с разделенным ударником для погружения стержней в грунтовый массив // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 6. — С. 75–86. DOI: 10.15372/FTRPI20180608.
4. Юнгмейстер Д. А., Бричкин В. Н., Исаев А. И. Конструктивные и технологические параметры пневмоударника для разделки негабарита // Обогащение руд. — 2019. — № 2. — С. 3–7. DOI: 10.17580/or.2019.02.01.
5. Liu R., Yao C., Zhou X., Wang H., Ba Y., Sun Z. Dynamic frequency response model for gas turbine considering air hammer effect / Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). 2020, pp.247–252. DOI: 10.1109/AEEES48850.2020.9121550.

6. Gorodilov L. V., Pershin A. I. Simulation model of a hydro-impact system with two limiters of striker movement // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2022, vol. 991, no. 1, article 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012037.

7. Redelin R. A., Kamanin Y. N., Panichkin A. V. Designing hydraulic impact devices for low-temperature operation // Journal of Physics. Conference Series. 2021, vol. 2096, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012005.

8. Galdin N. S., Semenova I. A., Galdin V. N. Analysis of the striker stroke impact on the hydropneumatic impact devices energy performance // Journal of Physics. Conference Series. 2019, vol. 1260, no. 11, article 112010. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/11/112010.

9. Slidenko A. M., Slidenko V. M. Numerical research method of an impact device model // Journal of Physics. Conference Series. 2019, vol. 1203, no. 1, article 012086. DOI: 10.1088/1742-6596/1203/1/012086.

10. Slidenko A. M., Slidenko V. M. The research of discrete and continuous models of impact devices by numerical methods // Journal of Physics. Conference Series. 2021, vol. 1902, no. 1, article 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012024.

11. Slidenko A. M., Slidenko V. M., Valyukhov S. G. Discrete-continuous three-element model of impact device // Journal of Physics. Conference Series. 2021, vol. 2131, no. 3, article 032091. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032091.

12. Болобов В. И., Плащинский В. А. Влияние продолжительности удара на эффективность разрушения горных пород и пластического деформирования металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 3. — С. 78–96. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_78.

13. Юнгмейстер Д. А., Исаев А. И., Ячейкин А. И., Соболева П. Д. Экспериментальные исследования погружного пневмоударника бурового станка // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 3. — С. 28–36. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-28-36.

14. Gorodilov L. V., Efimov V. P., Sazhin P. V., Kudryavtsev V. G., Pershin A. I. Method of studying the movement of the impact device case in the well taking into account the reaction of the rock massif // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2022, vol. 991, no. 1, article 012048. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012048.

15. Tambovtsev P. N. Experimental studies of pneumatic impact device with a reduced specific consumption air // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2022, vol. 991, no. 1, article 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012032.

16. Vanag Y. V. Experimental study of pneumatic impact mechanism with three pneumatic chambers // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2022, vol. 991, no. 1, article 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012017.

17. Данилов Б. Б., Речкин А. А., Смоляницкий Б. Н. Исследование динамики пневмоударного механизма с эластичным клапаном при работе с противодавлением в выхлопном тракте // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2018. — Т. 6. — С. 3–11. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-6-3-11.

18. Данилов Б. Б., Речкин А. А. Обоснование принципиальной схемы и определение энергетических и конструктивных параметров гидромолота объемного типа для проходки скважин в грунте методом виброударного продавливания // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 5. — № 2. — С. 234–237.

19. Плохих В. В., Данилов Б. Б., Чежин Д. О. Исследование динамических параметров и рабочего цикла виброударных систем, участвующих в реализации адаптивных технологических процессов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2021. — Т. 2. — № 4. — С. 67–77. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-4-67-77.

20. Данилов Б. Б., Речкин А. А. Оценка применимости в пневмоударных машинах и оптимизация формы стационарно установленного упругого клапана // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2021. — Т. 2. — № 3. — С. 189–194. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-3-189-194.

21. Thang V. T., Duc T. M., Dat N. T., Trung N. T. Tung V. T. Simulation in design air spindle with orifice and distribution grooves // *International Journal of Modern Physics*. 2020, vol. 34, nos. 22 – 24, article 20401323. DOI: 10.1142/S0217979220401323.
22. Autio E. Dynamic overset CFD simulation of a pneumatic impact device. Master of Science Thesis. Tampere University of Technology, 2018. 55 p.
23. Nilsson T. 2-way FSI simulations on a shock absorber check valve. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, 2015. 68 p.
24. Zhang X., Luo Y., Fan L., Peng J., Yin K. Investigation of RC-DTH air hammer performance using CFD approach with dynamic mesh method // *Journal of Advanced Research*. 2019, vol. 18, pp. 127 – 135. DOI: 10.1016/j.jare.2019.02.001.
25. Zhang X., Luo Y., Gan X., Yin K. Design and numerical analysis of a large-diameter air reverse circulation drill bit for reverse circulation down-the-hole air hammer drilling // *Energy Science and Engineering*. 2019, vol. 7, no. 3, pp. 921 – 929. DOI: 10.1002/ese3.321.
26. White F. M. Fluid mechanics. New York: McGraw-Hill Education, 2016. 864 p.
27. Blazek J. Computational fluid dynamics: principles and applications. Elsevier Science, 2005. 496 p.
28. Sutherland W. The viscosity of gases and molecular force // *Philosophical Magazine*. 1993, S. 5, no. 36, pp. 507 – 531.
29. Chou P. Y. On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuations // *Quarterly of Applied Mathematics*. 1945, no. 3, pp. 38 – 54. **MIAB**

## REFERENCES

1. Sysoev N. I., Grinko A. A., Grinko D. A. Justification of structure and rational design for hammer drills for helical milling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 7, pp. 113 – 124. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_7\_0\_113.
2. Danilov B. B., Smolyanitsky B. N., Chanyshv A. I., Cheshchin D. O. Finding forces required to change air hammer path in soil. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2017, no. 4 – C. 69 – 79. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739117042667.
3. Tishchenko I. V., Chervov V. V. Principles of designing air-driven hammer with decoupled piston for driving rods in soil. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2018, no. 6, pp. 75 – 86. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRP120180608.
4. Yungmeister D. A., Brichkin V. N., Isaev A. I. Design and process parameters of an air hammer for oversize reduction. *Obogashchenie Rud*. 2019, no. 2, pp. 3 – 7. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2019.02.01.
5. Liu R., Yao C., Zhou X., Wang H., Ba Y., Sun Z. Dynamic frequency response model for gas turbine considering air hammer effect. *Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*. 2020, pp.247 – 252. DOI: 10.1109/AEEES48850.2020.9121550.
6. Gorodilov L. V., Pershin A. I. Simulation model of a hydro-impact system with two limiters of striker movement. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 991, no. 1, article 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012037.
7. Redelin R. A., Kamanin Y. N., Panichkin A. V. Designing hydraulic impact devices for low-temperature operation. *Journal of Physics. Conference Series*. 2021, vol. 2096, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012005.
8. Galdin N. S., Semenova I. A., Galdin V. N. Analysis of the striker stroke impact on the dropneumatic impact devices energy performance. *Journal of Physics. Conference Series*. 2019, vol. 1260, no. 11, article 112010. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/11/112010.
9. Slidenko A. M., Slidenko V. M. Numerical research method of an impact device model. *Journal of Physics. Conference Series*. 2019, vol. 1203, no. 1, article 012086. DOI: 10.1088/1742-6596/1203/1/012086.



10. Slidenko A. M., Slidenko V. M. The research of discrete and continuous models of impact devices by numerical methods. *Journal of Physics. Conference Series*. 2021, vol. 1902, no. 1, article 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012024.
11. Slidenko A. M., Slidenko V. M., Valyukhov S. G. Discrete-continuous three-element model of impact device. *Journal of Physics. Conference Series*. 2021, vol. 2131, no. 3, article 032091. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032091.
12. Bolobov V. I., Plashchinsky V. A. Influence of impact duration on fracture efficiency in rocks and on plastic deformation of metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 78–96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_78.
13. Yungmeister D. A., Isaev A. I., Yacheikin A. I., Soboleva P. D. Field study of DTH hammer operation with rock drilling machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 3, pp. 28–36. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-28-36.
14. Gorodilov L. V., Efimov V. P., Sazhin P. V., Kudryavtsev V. G., Pershin A. I. Method of studying the movement of the impact device case in the well taking into account the reaction of the rock massif. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 991, no. 1, article 012048. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012048.
15. Tambovtsev P. N. Experimental studies of pneumatic impact device with a reduced specific consumption air. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 991, no. 1, article 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012032.
16. Vanag Y. V. Experimental study of pneumatic impact mechanism with three pneumatic chambers. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 991, no. 1, article 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012017.
17. Danilov B. B., Rechkin A. A., Smolianitskiy B. N. Investigation of the dynamics of pneumatic elastic valve mechanism when operating with the exhaust back pressure. *Interexpo GEO-Siberia*. 2018, vol. 6, pp. 3–11. [In Russ]. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-6-3-11.
18. Danilov B. B., Rechkin A. A. Substantiation of the principle scheme and the determination of energetic and constructive parameters of the volumetric hydrohammer for driving of wells in the ground by the method of vibroimpact pressing. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2018, vol. 5, no. 2, pp. 234–237. [In Russ].
19. Plokhikh V. V., Danilov B. B., Cheshchin D. O. Dynamics and operating cycles of vibratory-percussive systems involved in implementation of adaptive technologies. *Interexpo GEO-Siberia*. 2021, vol. 2, no. 4, pp. 67–77. [In Russ]. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-4-67-77.
20. Danilov B. B., Rechkin A. A. Applicability evaluation and shape optimization of the elastic valve stationarily installed in pneumatic impact machines. *Interexpo GEO-Siberia*. 2021, vol. 2, no. 3, pp. 189–194. [In Russ]. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-3-189-194.
21. Thang V. T., Duc T. M., Dat N. T., Trung N. T., Tung V. T. Simulation in design air spindle with orifice and distribution grooves. *International Journal of Modern Physics*. 2020, vol. 34, nos. 22–24, article 20401323. DOI: 10.1142/S0217979220401323.
22. Autio E. *Dynamic overset CFD simulation of a pneumatic impact device*. Master of Science Thesis. Tampere University of Technology, 2018. 55 p.
23. Nilsson T. *2-way FSI simulations on a shock absorber check valve*. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, 2015. 68 p.
24. Zhang X., Luo Y., Fan L., Peng J., Yin K. Investigation of RC-DTH air hammer performance using CFD approach with dynamic mesh method. *Journal of Advanced Research*. 2019, vol. 18, pp. 127–135. DOI: 10.1016/j.jare.2019.02.001.
25. Zhang X., Luo Y., Gan X., Yin K. Design and numerical analysis of a large-diameter air reverse circulation drill bit for reverse circulation down-the-hole air hammer drilling. *Energy Science and Engineering*. 2019, vol. 7, no. 3, pp. 921–929. DOI: 10.1002/ese3.321.
26. White F. M. *Fluid mechanics*. New York: McGraw-Hill Education, 2016. 864 p.
27. Blazek J. *Computational fluid dynamics: principles and applications*. Elsevier Science, 2005. 496 p.

28. Sutherland W. The viscosity of gases and molecular force. *Philosophical Magazine*. 1993, S. 5, no. 36, pp. 507 – 531.

29. Chou P. Y. On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuations. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1945, no. 3, pp. 38 – 54.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Речкин Александр Аркадьевич – аспирант,  
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала  
Сибирского отделения РАН, e-mail: lexher68@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0002-0102-3824.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

A.A. Rechkin, Graduate Student,  
Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch  
of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia,  
e-mail: lexher68@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0002-0102-3824.

Получена редакцией 02.03.2022; получена после рецензии 11.05.2022; принята к печати 10.06.2022.  
Received by the editors 02.03.2022; received after the review 11.05.2022; accepted for printing 10.06.2022.

## Приложение

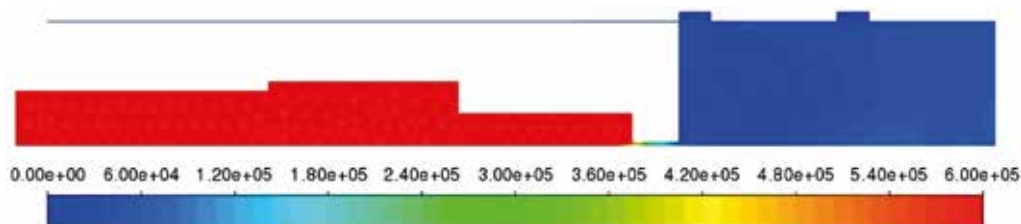


Рис. 2. Распределение статического давления для стационарного решения и начального решения нестационарной задачи, Па

Fig. 2. Static pressure distribution for stationary solution and for initial solution of nonstationary problem (Pa)

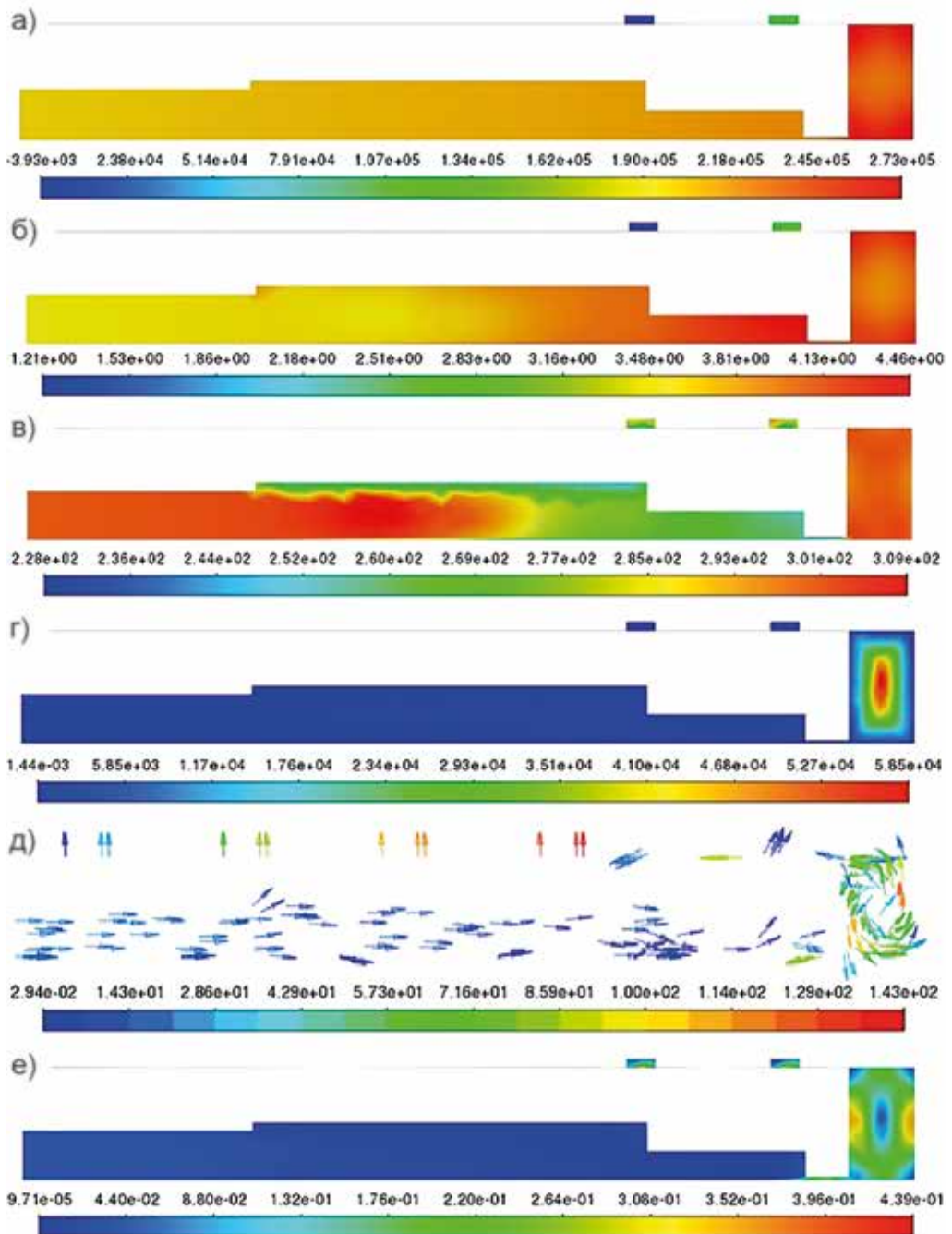


Рис. 4. Распределение основных физических параметров воздуха в момент времени 0,01 с с начала моделирования: статическое давление, Па (а); плотность,  $kg/m^3$  (б); температура, К (в); число Рейнольдса (г); векторы скорости, м/с (д); число Маха (е)

Fig. 4. Distribution of basic physical parameters of air at time 0.01 s since beginning of modeling: static pressure (Pa) (a); density ( $kg/m^3$ ) (b); temperature (K) (v); Reynolds number (g); velocity vectors (m/s) (d); Mach number (e)