

А.А. Хруцкий, В.С. Ощепков

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА П-110

Аннотация. Указаны существующие основные подходы к моделированию рабочих процессов пневматических и гидравлических машин. Приведены методика и результаты пространственного компьютерного моделирования рабочих процессов погружного пневмоударника на основе метода конечных объемов. Разработана специализированная методика компьютерного моделирования рабочих процессов погружного пневмоударника, позволяющая исключать режим неустановившейся работы и дает возможность определять параметры пневматической машины, работающей номинальном режиме. Поставленная задача разделена на две подзадачи: определение скорости отскока поршня после удара с помощью модели ударного взаимодействия в SolidWorks Motion и определение изменения давления сжатого воздуха в камерах рабочего и холостого хода с помощью газодинамической модели в FlowVision. При этом рассмотрен один цикл хода поршня, который начинается с момента удара поршня-ударника по коронке. В результате моделирования по разработанной методике после трех циклов приближения получены зависимости изменения давлений в камерах погружного пневмоударника и скорости перемещение поршня во времени. Подтверждена адекватность результатов компьютерного моделирования сравнением с результатами известных исследований.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, численные методы, пневматическая машина, погружной пневмоударник, междисциплинарная модель, метод конечных объемов, задачи газодинамики с подвижным телом, предупредная скорость.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-131-138

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

Одним из основных технологических процессов горнорудного производства являются буровые работы. Причем в объеме этих работ преобладает бурение скважин, которое в подземных условиях выполняется буровыми станками с погружными пневмоударниками типа П-110. Исследование и модификация этих бурильных машин является дорогостоящим и длительным мероприятием, так как требует изготовления громоздких стендов, натуральных образцов изделия, что требует существенных временных и материальных затрат.

Проектирование бурового оборудования с использованием компьютерного моделирования дает возможность сократить сроки, удешевить проведение проектно-конструкторских работ, существенно упростить процесс исследования динамических рабочих процессов пневмоударника, и получить данные, приближенные к реальным.

Анализ исследований и публикаций

На сегодняшний день существует два основных подхода к моделированию рабочих процессов пневматических и гидравлических машин:

- пространственное моделирование с применением различных численных методов [2–4, 7, 8, 12–16];

- компонентно-ориентированное моделирование сложных систем на основе графов [5, 11].

Пространственное моделирование с применением численных методов компьютерного моделирования, основано на использовании в основном метода конечных элементов [2, 4, 7], метода конечных объемов [3, 7, 8, 12, 16] и метода гидродинамики сглаженных частиц [13–15].

Системы для компонентно-ориентированного моделирования могут осуществлять некаузальное (компонентно-ориентированное) и каузальное (блочнo-ориентированное) моделирование систем, содержащих механические, электрические, электронные, гидравлические, тепловые, энергетические компоненты, а также компоненты управления и компоненты, ориентированные на отдельные процессы. Положительный результат моделирования пневмоударника на основе графов приведен в работе [11].

Следует отметить, что оба эти подхода имеют свои достоинства и не лишены недостатков.

Ранее нами было проведено моделирование пневматического вибратора [10] с помощью метода конечных объемов с подвижным телом, в ходе которого было установлено, что из-за специфики пневматических машин за первые несколько циклов расчета режим работы машин не установившийся и результаты моделирования не стабильны. Поэтому требуется разработка специализированной методики проведения исследований, которая дала бы возможность определять параметры машины, работающей сразу в номинальном режиме. А при моделировании рабочих процессов погружного пневмоударника необходимо еще учитывать и ударное взаимодейст-

вие поршня-ударника с хвостовиком коронки.

Постановка задачи

Разработать методику и провести компьютерное моделирование рабочих процессов погружного пневмоударника решающее междисциплинарную задачу и включающее в себя решение задачи газодинамики с подвижным телом и учитывало ударное взаимодействие подвижного элемента с другим твердым телом.

Изложение материала и результатов

Из двух упомянутых выше подходов к моделированию рабочих процессов пневматических машин, на первом этапе исследований применяется пространственное моделирование на основе метода конечных объемов с подвижным телом.

Для решения поставленная задача разделена на две подзадачи:

- определение скорости отскока поршня после удара;

- определение изменения давления сжатого воздуха в камерах рабочего и холостого хода, а также определение скорости и перемещения поршня-ударника во времени под действием сжатого воздуха.

Погружной пневмоударник П-110 (рис. 1) предназначен для бурения скважин диаметром от 85 до 160 мм при ведении буровых работ открытым и подземным способом в породах средней и высокой крепости. Он представляет собой пневматический ударный механизм, имеющий бесклапанную систему воздухораспределения с центральным подводом сжатого воздуха в камеры цилиндра и выхлопом отработанного воздуха на забой скважины через канал бурового инструмента. Техническая характеристика погружного пневмоударника П-110 приведена в таблице.

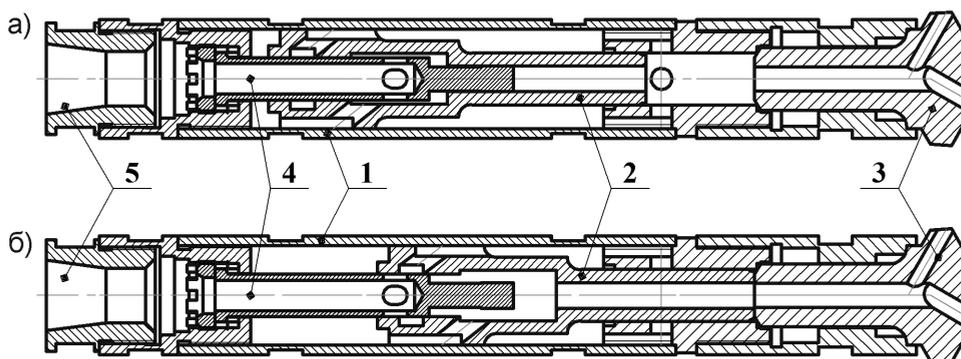


Рис. 1. Погружной пневмоударник П-110: положение поршня в конце холостого хода (а); положение поршня в конце рабочего хода в момент удара (б); 1 – цилиндр; 2 – поршень-ударник; 3 – буровой инструмент; 4 – распределительный шток; 5 – переходник

Fig. 1. DTH-hammer P-110: piston position at the end of idling (a); piston position at the end of the stroke in the impact moment (b); 1 – cylinder; 2 – piston-hammer; 3 – button bit; 4 – distributive rod; 5 – adapter

При моделировании пневмоударника рассматривается один цикл хода поршня, который начинается с момента удара поршня-ударника по коронке (рис. 1, б). Далее анализируется возвратно-поступательное движение поршня под действием сжатого воздуха до следующего удара по хвостовику коронки.

Моделирование удара поршня-ударника по хвостовику коронки проводится с помощью расчетного модуля Motion программного комплекса САПР SolidWorks, а моделирование движения поршня под действием сжатого воздуха – с помощью программного комплекса FlowVision компании ТЕСИС [3].

Таким образом, в расчете участвуют две модели: газодинамическая модель в FlowVision и модель ударного взаимодействия в SolidWorks Motion.

Методика проведения исследования следующая:

1. Построить расчетную модель ударного взаимодействия в SolidWorks Motion.
2. Построить расчетную газодинамическую модель в FlowVision.
3. Провести предварительные расчеты для ориентировочного определения начальных параметров, которые в последствие будут уточняться: предударной скорости поршня-ударника, давления в

Техническая характеристика погружного пневмоударника П-110
Technical specification of DTH-hammer P-110

Параметр	Значение
Диаметр коронки, мм	110
Давление воздуха, МПа	0,5
Ударная мощность, кВт	2,8
Частота ударов, 1/с	22
Расход воздуха, м ³ /мин	7,0
Масса поршня-ударника, кг	4,65
Активная площадь поршня-ударника, м ² : со стороны камеры рабочего хода со стороны камеры холостого хода	0,004195 0,004024

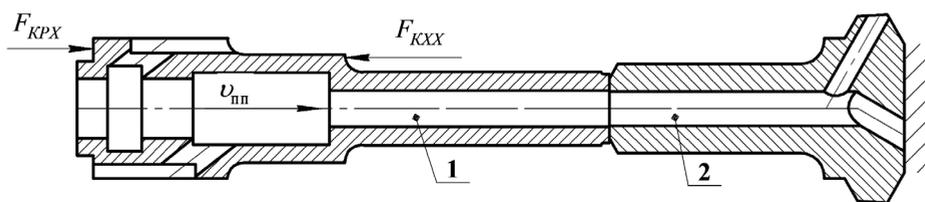


Рис. 2. Модель ударного взаимодействия: 1 — поршень-ударник; 2 — неподвижная буровая коронка; F_{KPX} — сила от давления воздуха в камере рабочего хода; F_{KXX} — сила от давления воздуха в камере холостого хода

Fig. 2. Shock interaction model: 1 — piston-hammer; 2 — immovable button bit; F_{KPX} — force from air pressure in the stroke chamber; F_{KXX} — force from air pressure in the idle chamber

камерах холостого и рабочего хода на момент удара.

4. Задать значение предупредной скорости поршня-ударника и определить скорость его отскока после удара о коронку в SolidWorks Motion.

5. Задать значения скорости отскока поршня, давлений в камерах рабочего и холостого хода. Провести моделирование движения поршня под действием сжатого воздуха до следующего удара по хвостовику коронки в программном комплексе FlowVision. Определить предупредную скорость поршня-ударника.

6. Задать значение уточненной предупредной скорости поршня-ударника, задать силы, действующие на поршень от давления в камерах холостого и рабочего хода, определить скорость его отскока после удара о коронку в SolidWorks Motion.

7. Повторить п. 5–6, до тех пор, пока погрешность результатов соседних итераций не будет менее 10%.

Расчетная модель ударного взаимодействия строится в SolidWorks Motion (рис. 2).

Ориентировочная предупредная скорость поршня-ударника на начальном этапе определяется исходя из паспортных значений ударной мощности и числа ударов в секунду (см. таблицу).

Исходя из выражения кинетической энергии поршня-ударника, предупредная скорость поршня, обеспечивающая паспортную энергию удара должна быть

$$v_{пп} = \sqrt{\frac{2 \cdot N}{n \cdot m_{п}}}$$

где N — ударная мощность; n — число ударов; $m_{п}$ — масса поршня.

Таким образом, предупредная скорость поршня погружного пневмоударника П-110, согласно паспортным данным, составит 7,4 м/с.

Для определения скорости поршня после удара необходимо знать, сколько энергии поглощается материалом коронки, а сколько идет на разрушение породы.

Согласно [1, 9] коэффициент восстановления энергии после удара поршня о хвостовик коронки составляет $k_{в} = 0,85$. Поглощение энергии удара породой также можно определить по зависимостям, представленным этих работах. Так, для пород средней и высокой крепости доля поглощенной энергии на разрушение составит 0,05–0,105. Отсюда, полный коэффициент восстановления для скорости поршня составит 0,76–0,8, а скорость поршня после удара будет 5,6–5,9 м/с.

Однако на скорость отскока будет влиять также баланс сил от давления сжатого воздуха в камерах холостого и рабочего хода. В начальный момент времени после удара, согласно схеме (рис. 1) в камере рабочего хода будет атмосферное давление, в камере холостого хода приблизительно магистральное давление (0,5 МПа). Таким образом,

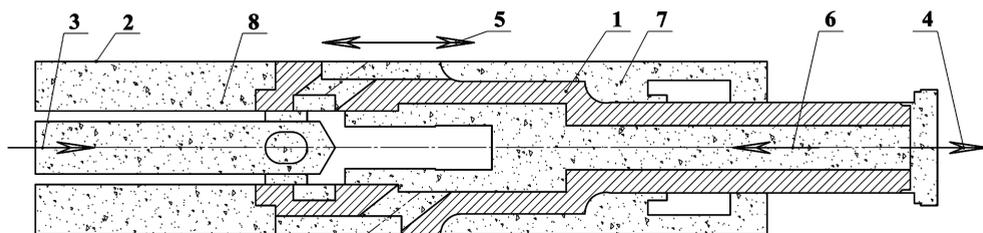


Рис. 3. Газодинамическая модель во FlowVision с начальными условиями: 1 — поршень-ударник; 2 — цилиндр; 3 — входной патрубок (давление 5 атм); 4 — выходной патрубок (атмосферное давление); 5 — направление перемещения поршня; 6 — начальная скорость поршня (5,7 м/с); 7 — камера холостого хода (давление 5 атм); 8 — камера рабочего хода (атмосферное давление)

Fig. 3. Gas-dynamic model in FlowVision with initial conditions: 1 — piston-hammer; 2 — cylinder; 3 — inlet (pressure 5 atm); 4 — outlet (atmospheric pressure); 5 — movement direction of piston-hammer; 6 — initial velocity of piston-hammer (5,7 m/s); 7 — idle chamber (pressure 5 atm); 8 — stroke chamber (atmospheric pressure)

сила на поршень от давления в камере холостого хода составит около 2012 Н, что увеличит скорость отскока. В дальнейшем, на следующих итерациях, давления будут уточняться, соответственно, изменится баланс сил на поршне и скорость отскока.

Расчетная газодинамическая модель строится в программном комплексе FlowVision (рис. 3).

Моделирование проводилось на компьютере со следующей конфигурацией: процессор — Intel Core I3 3.07 GHz (2 ядра), объем ОЗУ — 4 Гб, видеокарта —

GTX 430 1 Гб. Моделирование одного цикла во FlowVision заняло около 10,5 ч при количестве ячеек сетки 22789.

В результате моделирования по разработанной методике после трех циклов приближения получены зависимости изменение давлений в камерах погружного пневмоударника и скорости перемещение поршня во времени.

Адекватность полученных результатов моделирования подтверждается сравнением с результатами известных исследований [6], приведенным на рис. 4. Из графика видно, что формы кривых изме-

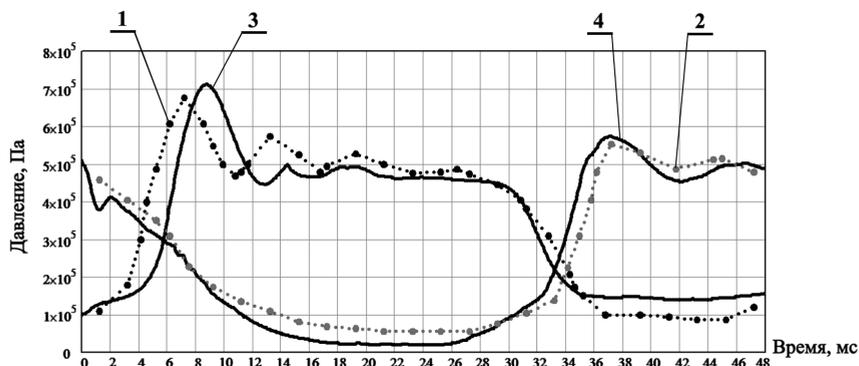


Рис. 4. Зависимость давлений в камерах рабочего и холостого хода погружного пневмоударника П-105С [6]: 1 — экспериментальное давление в камере рабочего хода [6]; 2 — экспериментальное давление в камере холостого хода [6]; 3 — расчетное давление в камере рабочего хода; 4 — расчетное давление в камере холостого хода

Fig. 4. Dependence of pressure in the idle and the stroke chambers of DTH-hammer P-110 [6]: 1 — experimental pressure in the stroke chamber [6]; 2 — experimental pressure in the idle chamber [6]; 3 — calculated pressure in the stroke chamber; 4 — calculated pressure in the idle chamber

нения давлений совпадают, то есть можно говорить о том, что результаты моделирования достаточно адекватны.

Согласно приведенному графику частота ударов составила 1234 уд/мин.

Следует отметить, что в камерах пневмоударника наблюдается высокое остаточное давление: в камере рабочего хода — порядка 25%, в камере холостого хода — около 10%. Это снижает эффективность работы пневмоударника вследствие снижения усилий действующих на поршень из-за разностей давлений в камерах. Поскольку выхлоп из камер неудовлетворителен, необходимо расширить выхлопные каналы из обеих камер, а также снизить местные гидравлические сопротивления в них.

Сделанный вывод полностью подтверждается результатами работы [6].

Выводы и направления дальнейших исследований

1. Установлена возможность использования пространственного компьютерного моделирования на основе метода конечных объемов при проектировании пневмоударного бурового оборудования.

2. Разработана методика и проведено компьютерное моделирование рабо-

чих процессов погружного пневмоударника, включающее в себя газодинамическую модель в FlowVision и модель ударного взаимодействия в SolidWorks Motion. Подтверждена адекватность результатов компьютерного моделирования сравнением с результатами известных исследований.

3. Поставленная задача разделена на две подзадачи: определение скорости отскока поршня после удара и определение изменения давления сжатого воздуха в камерах рабочего и холостого хода. При этом рассматривается один цикл хода поршня, который начинается с момента удара поршня-ударника по коронке, что дает возможность определять параметры машины, работающей сразу в номинальном режиме.

4. Установлено, что выхлоп из камер недостаточен, поэтому необходимо расширить выхлопные каналы из обеих камер, а также снизить местные гидравлические сопротивления в них.

5. В дальнейшем планируется решение подобной задачи с помощью компонентно-ориентированной компьютерной модели на основе графов и сравнение полученных результатов моделирования двух разных подходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Е. В., Соколинский В. Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. Монография. — М.: Наука, 1969. — 201 с.

2. Галагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 428 с.

3. Документация FlowVision. [Электронный ресурс] URL: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8-dokumentatsiya-flowvision>.

4. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986. — 309 с.

5. Колесов Ю. Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. — 240 с.

6. Липин А. А. Улучшение технико-эксплуатационных показателей пневмоударников П-105 (П-125) / Повышение эффективности пневмоударных буровых машин. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1987. — С. 10–18;

7. Марчук Г. И., Агошков В. И. Введение в проекционно-сеточные методы. — М.: Наука, 1981. — 210 с.

8. Никитин К. Д. Нелинейный метод конечных объемов для задач многофазной фильтрации // Математическое моделирование. — 2010. — Т. 22. — № 11. — С. 131–147;

9. Соколинский В. Б. Машины ударного разрушения. — М.: Машиностроение, 1982. — 185 с.

10. Хруцкий А. А., Ощепков В. С. Компьютерное моделирование рабочего цикла пневматического вибратора безударного действия / Международная научно-техническая интернет-конференция «Современные вибрационные технологии, машины, оборудование и динамические процессы в них», Винница, 28–30 ноября 2016 г., URL: http://vibrokonf.vntu.edu.ua/Articles%202016/KR_GR.pdf

11. Шахторин И. О., Тимонин В. В. Доводка машин ударного действия при помощи современного программного обеспечения / Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых», 17–19 ноября 2015 г. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2015/gd/gd2015/pages/Articles/1/Shaxtorin.pdf>.

12. Anderson W. K., Thomas J. L., van Leer B. Comparison of Finite Volume Flux Vector Splittings for the Euler Equations // AIAA J. — 1986. — Vol. 24, No9. — Pp. 1453–1460

13. Liu G. R., Liu M. B. Smoothed Particle Hydrodynamics. A Meshfree Particle Method, 2003. — 472 p.

14. Möller M., Charypar D., Gross M. Particle-based fluid simulation for interactive applications / Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH. Eurographics symposium on Computer animation. — Aire-la-Ville, 2003. — Pp. 154–159

15. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics / Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — Clayton, 1992. — Pp. 543–574.

16. Weiss J. M., Maruszewski J. P., Smith W. A. Implicit Solution of Preconditioned Navier-Stokes Equations Using Algebraic Multigrid // AIAA J. — 1999. — Vol 37, No. 1. — Pp. 29–36. **PLAB**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Хруцкий Андрей Александрович¹ — кандидат технических наук, доцент, e-mail: acaxa@outlook.com,

Ощепков Вячеслав Сергеевич¹ — магистрант, e-mail: antapka02@ukr.net,

¹ Криворожский национальный университет, Украина.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 7, pp. 131–138.

Computer modeling of DTH hammer P-110 operation

Khrutskiy A.A.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: acaxa@outlook.com,

Oshchepkov V.S.¹, Master's Degree Student, e-mail: antapka02@ukr.net,

¹ Kriviy Rih National University, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine.

Abstract. The principal current approaches to modeling operation of pneumatic and hydraulic machines are specified: 3D modeling using various numerical methods and component-based modeling of complex system using graphs. The procedure and results of 3D finite-volume modeling of DTH hammer operation are presented. The specialized procedure of computer modeling of DTH hammer operation makes it possible to eliminate the transient behavior and to determine parameters of the pneumatic machine in the nominal mode operation. The set problem is divided into two subproblems: determination of recoil velocity of the hammering unit after percussion using the percussive interaction model in Solid-WorksMotion and determination of compressed-air pressure variation in the power and idle stroke chambers using the gas-dynamic model in FlowVision. The analysis includes one cycle of the hammering unit travel starting from the moment of the hammer head hit on the anvil. After modeling using the developed procedure and three cycles of approximation, time dependences of pressures in the chambers of the DTH hammer and the hammering unit velocity are obtained. It is found that high residual pressure occurs in the DTH hammer chambers: 25% in the power stroke chamber and round 10% in the idle stroke chamber. This worsens the performance of the DTH hammer as a result of reduction in forces affecting the hammering unit due to the pressure difference in the chambers. Exhaust from the chambers is unsatisfactory; for this

reason, it is required to expand the exhaust lines in the chambers and to decrease local hydraulic resistances in them. The adequacy of the computer modeling results is confirmed by comparing them with the findings of the known researches.

Key words: computer modeling, numerical methods, pneumatic machine, down-the-hole hammer, interdisciplinary model, finite volume method, gas-dynamic problems with mobile body, pre-blow velocity.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-131-138

REFERENCES

1. Aleksandrov E. V., Sokolinskiy V. B. *Prikladnaya teoriya i raschety udarnykh sistem*. Monografiya [Applied theory and calculations of shock systems. Monograph], Moscow, Nauka, 1969, 201 p.
2. Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy*. Per. s angl. [The finite element method. Bases. English–Russian translation], Moscow, Mir, 1984, 428 p.
3. *FlowVision documentation*. URL: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8-dokumentatsiya-flowvision>.
4. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnye elementy i approksimatsiya*: Per. s angl. [Finite elements and approximation. English–Russian translation], Moscow, Mir, 1986, 309 p.
5. Kolesov Yu. B. *Ob"ektno-orientirovannoe modelirovanie slozhnykh dinamicheskikh sistem* [Object-oriented modeling of complex dynamic systems], Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGPU, 2004, 240 p.
6. Lipin A. A. Uluchshenie tekhniko-ekspluatatsionnykh pokazateley pnevmoudarnikov P-105 (P-125) [Improvement of technical and operational indicators of airstrikes P-105 (P-125)] *Povyshenie effektivnosti pnevmoudarnykh burovykh mashin*. Novosibirsk: IGD SO AN SSSR, 1987, pp. 10–18. [In Russ].
7. Marchuk G. I., Agoshkov V. I. *Vvedenie v proektsionno-setochnye metody* [(Introduction to the projection-grid methods], Moscow, Nauka, 1981, 210 p.
8. Nikitin K. D. Nelineynyy metod konechnykh ob'emov dlya zadach mnogofaznoy fil'tratsii [Nonlinear finite volume method for multiphase filtration problems]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2010, vol. 22, no 11, pp. 131–147. [In Russ].
9. Sokolinskiy V. B. *Mashiny udarnogo razrusheniya* [Machines of impact destruction], Moscow, Mashinostroyeniye, 1982, 185 p.
10. Khrutskiy A. A., Oshchepkov V. S. Komp'yuternoe modelirovanie rabocheho tsikla pnevmaticheskogo vibratora bezudarnogo deystviya [Computer simulation of the working cycle of a pneumatic impact-free vibrator]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya internet-konferentsiya «Sovremennyye vibratsionnyye tekhnologii, mashiny, oborudovanie i dinamicheskie protsessy v nikh»*, Vinnitsa, 28–30 November 2016, URL: http://vibrokonf.vntu.edu.ua/Articles%202016/KR_GR.pdf. [In Russ].
11. Shakhatorin I. O., Timonin V. V. Dovodka mashin udarnogo deystviya pri pomoshchi sovremennogo programmnoogo obespecheniya [Fine-tuning of percussion machines with the help of modern software]. *Materialy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennyye problemy v gornom dele i metody modelirovaniya gorno-geologicheskikh usloviy pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh»*, November 17–19, 2015 Kuzbass State technical University named after T.F. Gorbachev. URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2015/gd/gd2015/pages/Articles/1/Shakhatorin.pdf>. [In Russ].
12. Anderson W. K., Thomas J. L., van Leer B. Comparison of Finite Volume Flux Vector Splittings for the Euler Equations. *AIAA J*. 1986. Vol. 24, No9. Pp. 1453–1460
13. Liu G. R., Liu M. B. *Smoothed Particle Hydrodynamics. A Meshfree Particle Method*, 2003. 472 p.
14. Möller M., Charypar D., Gross M. Particle-based fluid simulation for interactive applications. *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH. Eurographics symposium on Computer animation*. Aire-la-Ville, 2003. Pp. 154–159.
15. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. Clayton, 1992. Pp. 543–574.
16. Weiss J. M., Maruszewski J. P., Smith W. A. Implicit Solution of Preconditioned Navier-Stokes Equations Using Algebraic Multigrid. *AIAA J*. 1999. Vol 37, No. 1. Pp. 29–36.

