

А. А. Речкин¹, Е. П. Русин¹✉

Прерывисто-срывная кавитация: моделирование методом вычислительной гидродинамики применительно к погружному бурению

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: gmmlab@misd.ru

Аннотация. Рассмотрены опыт использования и преимущества кавитационного гидровибратора, работающего на принципе прерывисто-срывной кавитации, для бурения скважин в горных породах и в технологии извлечения метана из угольного пласта. Предложено применение метода вычислительной гидродинамики, реализованного в программном комплексе Ansys Fluent, для исследования рабочего процесса кавитационных гидровибраторов. Построена расчетная схема такого устройства с использованием конструктивных и физических параметров, определенных из опыта погружного бурения. Получены зависимости пульсаций давления в рабочей полости устройства, вызванных кавитационным эффектом, от времени. Определены средние значения амплитуды и частоты пульсаций. Установлено влияние давления на выходе кавитационного гидровибратора на амплитуду и частоту пульсаций.

Ключевые слова: бурение, дегазация, прерывисто-срывная кавитация, кавитационный гидровибратор, вычислительная гидродинамика

A. A. Rechkin¹, E. P. Rusin¹✉

Intermittent-stall cavitation: computational fluid dynamics modeling applied to downhole drilling

¹ Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: gmmlab@misd.ru

Abstract. The article considers the experience of using and advantages of a cavitation hydrovibrator operating on the principle of intermittent-stall cavitation for drilling holes in rock and in the technology of extracting methane from a coal seam. It is proposed to use the computational fluid dynamics method implemented in the Ansys Fluent software package to study the working process of cavitation hydrovibrators. A calculation scheme of such a device is constructed using the design and physical parameters determined from the experience of downhole drilling. The dependences of pressure pulsations in the working cavity of the device, caused by the cavitation effect on time are obtained. Average values of the amplitude and frequency of pulsations are determined. The effect of pressure at the outlet of the cavitation hydrovibrator on the amplitude and frequency of pulsations is established.

Keywords: drilling, degassing, intermittent-stall cavitation, cavitation hydrovibrator, computational fluid dynamics

Введение

Безопасность добычи угля и экологическая безопасность на шахтах опасных по метану в значительной мере определяются эффективностью дегазационных

мероприятий. Помимо этого, в случае сверхнормативного выделения метана производственники вынуждены сдерживать темпы добычи. В этой связи выполняются большие объемы дегазационных работ. В частности, только на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» опасных по метану, где годовая добыча угля составляет ~20 млн. тонн [1], в год под землей проходится более 280 км дегазационных скважин [2]. Поэтому весьма остро стоит проблема повышения производительности дегазационного бурения. В подземных условиях эта операция в большинстве случаев производится вращательным способом с гидравлической очисткой забоя скважины. Наиболее эффективный вариант интенсификации процесса вращательного бурения – использование удара. Таким образом, в данном случае целесообразно применение гидроударников, причем, в связи с большой протяженностью скважин, речь идет о гидроударниках погружного типа [3].

Таким устройствам свойственен ряд недостатков, связанных с конструктивной сложностью, необходимостью высокой точности изготовления подвижных соединений, подверженностью элементов гидроударника, бурового става, насоса разрушительному воздействию гидроудара и др. [4]. Это приводит к низким надежности и долговечности и высокой стоимости оборудования и его эксплуатации.

Однако в недавнем прошлом появилась технология, позволяющая избежать указанных осложнений, основана она на эффекте гидродинамической кавитации. Это физическое явление представляет собой образование заполненных паром пузырьков в движущейся жидкости вследствие понижения в ней давления при увеличении ее скорости. С движением потока в область с более высоким давлением кавитационный пузырек схлопывается, излучая при этом ударную волну [5]. Гидродинамическая кавитация используется для повышения интенсивности технологических процессов в ряде отраслей промышленности [6]. В частности, в последние годы стала появляться информация об интенсификации процесса бурения горных пород путем наложения на породоразрушающий инструмент вибронагрузки, генерируемой гидродинамическим кавитационным вибратором [7, 8]. Такое устройство, кавитационный гидровибратор (КГВ), представляет собой вариант трубки Вентури. Будучи встроено в центральный канал бурового става, оно использует энергию движущейся с высокой скоростью промывочной жидкости. В генераторе возникает прерывисто-срывная кавитация, преобразующая стационарный поток в дискретно-импульсный. Отличительной особенностью такого течения является стабильность частоты отрыва каверн большого объема и их схлопывание в потоке, а не на стенке канала. Благодаря этому эффекту в промывочной жидкости генерируются высокоамплитудные импульсы колебаний давления с частотой в диапазоне 200 – 2000 Гц, а породоразрушающий инструмент подвергается высокочастотным продольным виброускорениям [8].

При бурении скважин в породах средней и высокой крепости гидродинамическим кавитационным буровым инструментом, работающим в режиме прерывисто-срывной кавитации с частотой колебаний давления жидкости более 200 Гц, увеличение скорости проходки скважин диаметром 76 мм составило 30–50 %, а для скважин диаметром 190 мм – до 70 % [7].

Перед другими известными вибрационными и ударными буровыми устройствами установка с КГВ имеет такие преимущества как простота конструкции и изготовления, отсутствие подвижных частей и исключение передачи колебаний жидкости на насос и ряд других элементов буровой системы, что увеличивает срок их службы. По сравнению с технологией, использующей традиционный гидроударник, ресурс бурильной колонны увеличивается в 5 раз, наработка до отказа в 40 раз. Стоимость одного комплекта гидровибратора не превышает одной трети стоимости комплекта гидроударника. КГВ органично вписывается в технологию вращательного бурения, не требует модификации оборудования и по сравнению с традиционными технологиями бурения позволяет интенсифицировать процессы бурения при меньших удельных энергозатратах [7, 8].

Привлекательно также то, что один и тот же инструмент – КГВ – может использоваться как для бурения, так и для последующего дискретно-импульсного нагнетания жидкости в угольный массив в технологии извлечения метана из угольного пласта. Как показал промышленный эксперимент, эффективность гидрорыхления при этом повышается, зоны увлажнения и разгрузки пласта увеличиваются, извлечение метана растет, уровень пылеобразования и сопротивление угля резанию уменьшаются. Достигается значительное увеличение проницаемости угля, снижение его гидравлического сопротивления и увеличение приемистости [9].

Постановка задачи и выбор методов исследования

Применительно к рассматриваемой технологии в настоящее время существует три варианта математического описания колебаний жидкости в системе «КГВ – выходной трубопровод» [10].

1. Метод конечных элементов – для определения параметров продольных колебаний буровых снарядов: виброускорений, размахов колебаний давлений бурового раствора.
2. Линейная математическая модель для определения параметров колебаний давления жидкости в генераторе.
3. Уточненная линейная математическая модель генератора для обоснования гидродинамических параметров устройства гидроимпульсного рыхления угольных пластов.

В настоящей работе моделирование рабочего процесса КГВ проводилось на основе метода вычислительной гидродинамики жидкости с привлечением программного комплекса Ansys Fluent [11] с целью изучения возможности исследования и проектирования КГВ расчетным путем. Была рассмотрена расчетная схема, представленная на рис.1. Конструктивные параметры схемы, характеристики рабочей среды и параметры потока выбирались, исходя из опыта буровых работ [12, 13] и возможностей имеющегося в наличии гидравлического оборудования.

Значения геометрических параметров: $l_1 = 0.15$ м, $l_2 = 0.006$ м, $l_3 = 0.4$ м, $d_1 = 0.015$ м, $d_2 = 0.004$ м, $d_3 = 0.017$ м, $\alpha = 10^\circ$. l_E – расстояние до точки, где проводился мониторинг давления, составляло 0.05 м.

Задача решалась в трехмерной нестационарной постановке. Жидкая среда – вода. Использовалась двухфазная модель смеси (Mixture). В качестве механизма массопереноса была задана кавитационная модель Шнерра-Зауэра (Schnerr-Sauer).

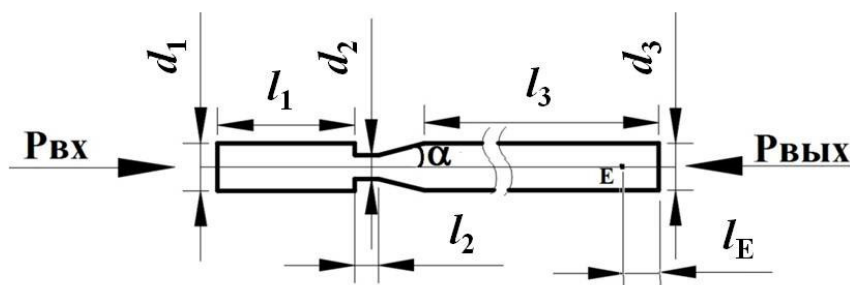


Рис.1. Геометрические параметры жидкостной модели и расчетная схема задачи.

Результаты моделирования

В результате расчетов для выбранной расчетной схемы получены показанные на рис. 2 графики пульсаций полного давления в заданной точке E на центральной оси модели при одном и том же значении давления на входе в модель $P_{\text{вх}} = 2 \cdot 10^7$ Па и двух значениях давления на выходе: $P_{\text{вых}} = 4 \cdot 10^6$ Па (рис. 2а) и $P_{\text{вых}} = 5 \cdot 10^6$ Па (рис. 2б).

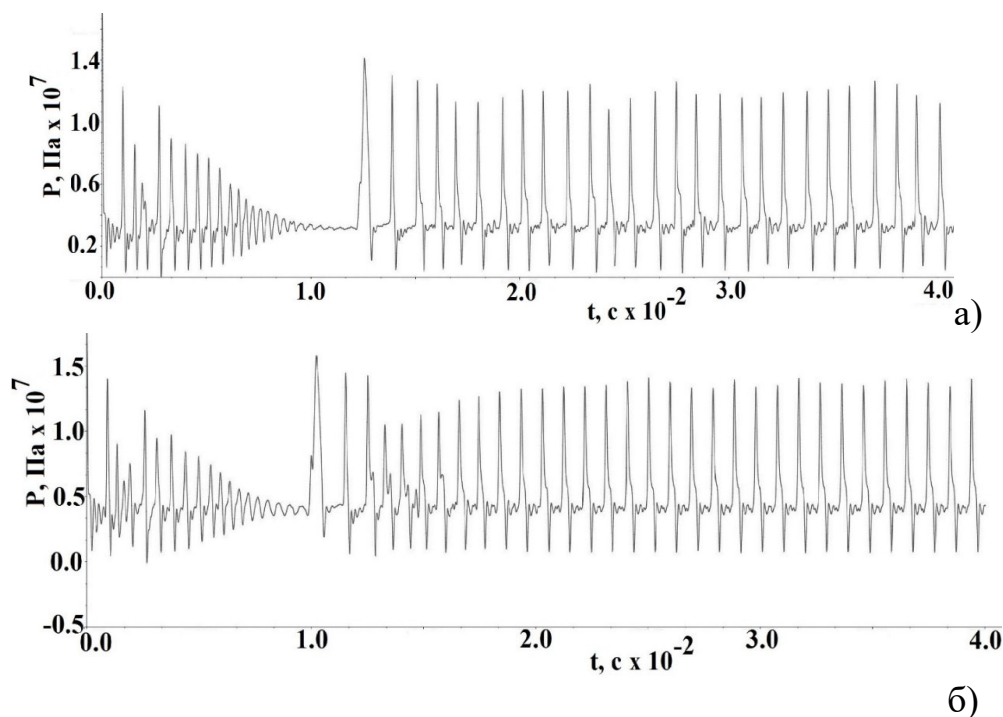


Рис. 2. Графики пульсации полного давления в точке E при $P_{\text{вх}} = 2 \cdot 10^7$ Па: а) $P_{\text{вых}} = 4 \cdot 10^6$ Па; б) $P_{\text{вых}} = 5 \cdot 10^6$ Па.

Средняя амплитуда полного давления для участка установившегося режима регулярных пульсаций при $P_{\text{вых}}=4 \cdot 10^6$ Па составила $1.195 \cdot 10^7$ Па при частоте 991.61 Гц. При $P_{\text{вых}}=5 \cdot 10^6$ Па средняя амплитуда составила $1.321 \cdot 10^7$ Па при частоте 1111.9 Гц. Таким образом, можно сделать вывод о том, что выбранные конструктивные параметры схемы, характеристики рабочей среды и параметры потока обеспечивают стабильное функционирование устройства в режиме прерывисто-срывной кавитации и что увеличение давления на выходе КГВ в рассмотренном диапазоне увеличивает амплитуду и частоту пульсаций давления в полости устройства.

Заключение

Методом вычислительной гидродинамики многофазных потоков выполнено моделирование рабочего процесса КГВ при заданных конструктивных и физических параметрах. Полученные зависимости амплитуды и частоты пульсаций давления в рабочей полости КГВ от времени позволяют заключить, что метод может быть использован при исследовании и создании эффективных гидрокавитационных устройств для бурения горных пород. Используемые в расчетах геометрические параметры модели и физические параметры среды могут быть использованы для построения физической модели КГВ.

Работа выполнена в рамках проекта НИР № 121052600390-5.

Авторы благодарят Б.Б. Данилова за полезное обсуждение результатов работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Забурдяев В.С. Проблемы метанообильных угольных шахт, оснащенных современной угледобывающей техникой // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №1. – С. 334-343.
2. Артемьев В.Б. АО «СУЭК». Подземные горные работы, динамика развития // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11 (специальный выпуск 48). – С. 13-22.
3. Ясов В.Г. Теория и расчет рабочих процессов гидроударных буровых машин. – М.: Недра, 1977 – 153 с.
4. Spinneker, M., Boulakhrif, F., Oppelt, J., Holzmann, J. The water hammer effect in hammer drilling // Oil Gas European Magazine. – 2018. – V. 44. – Pp. 88-90.
5. Biryukov, D., Gerasimov, D., Yurin, E. Cavitation and Associated Phenomena (1st ed.). – CRC Press. – 2024. – 392 p.
6. Pilipenko, V.V., Man'ko, I.K., Zadontsev, V.A. Cavitation self-oscillations intensify technological processes. – Report AGARD-R-827. Proceedings of a Fluid Dynamics Panel Workshop, 1-3 Sept. 1997, Kiev, Ukraine. – Kiev, Ukraine: National Academy of Sciences. – 1998. – P. 321-324.
7. Дзоз Н.А., Жулай Ю.А. Интенсификация процессов бурения с использованием гидродинамической кавитации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2008. – № 4. – С.290-296.
8. Zhulay, Y., Nikolayev, O. Sonic drilling with use of a cavitation hydraulic vibrator. In: Hammond, A., Donnelly, B., Ashwath, N., eds. Mining technology. – IntechOpen, 2022. – <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.100336> (5.10.2022).

9. Zhulay, Y., Nikolayev, O. Advanced technology of drilling and hydraulic loosening in coal bed methane using a cavitation hydrovibrator – experience and prospects. In: Zoveidavianpoor, M., ed. *Drilling Engineering and Technology – Recent Advances, New Perspectives and Applications*. – IntechOpen, 2022. – <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.105812> (23.11.2023).
10. Жулай Ю.А., Кваша Ю.А., Николаев А.Д. Сравнительный анализ методов расчёта амплитуд колебаний давления, создаваемых кавитационным генератором // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – Т. 147. – № 3. – С. 58-68.
11. Левицкий И.А. Применение современных программно-вычислительных комплексов для решения задач теплообмена в промышленных агрегатах. Модели физических процессов в Ansys Fluent: учебник – М.: Издательский Дом МИСиС, 2022. – 500 с.
12. Лупий М.Г., Галсанов Н.Л., Ледаев Н.В. et al. Опыт применения технологии вращательно-ударного бурения при сооружении дегазационных скважин на установке БУГ-200. // *Уголь*. – 2024. – 10 (1185). – С. 68-73.
13. Manko, I.K., Pilipenko, V.V., Zapols'ky, L.G. Use hydrodynamic cavitation for increase of efficiency of process of well drilling. – Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003), Osaka, Japan, November 1-4, 2003.

© А. А. Речкин, Е. П. Русин, 2025