ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(5):45-53
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.692.24 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_45

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАСТВОРЕНИЯ КАМЕННОЙ СОЛИ

Д.С. Куренков[1], Г.Б. Федоров[1], О.Л. Дудченко[1]

[1] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: kurenkov@misis.ru

Аннотация: Потребность в резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов обуславливается увеличением добычи нефти. В решении этой задачи большое значение приобретают подземные хранилища, создаваемые в месторождениях каменной соли физико-химическими способами и обеспечивающие бесшахтное ведение процесса извлечения полезного ископаемого. Одним из основных недостатков, снижающих общую эффективность сооружения подземных емкостей заданных размеров и формы в месторождениях каменной соли, является длительный срок их создания, что связано с низкой скоростью процесса растворения каменной соли в воде. В связи с этим изыскание рациональных способов интенсификации подземного выщелачивания каменной соли приобретает актуальное значение. Изложены основные направления использования виброакустических колебаний при сооружении емкостей подземных нефтехранилищ выщелачиванием в соляных отложениях. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований применения упругих колебаний для интенсификации процесса растворения каменной соли. Описан физический механизм воздействия виброакустических колебаний на процесс массопереноса. Этот процесс значительно ускоряется за счет возникновения на границе жидкость-каменная соль вихревых акустических микропотоков, которые разрушают диффузионный пограничный слой и повышают скорость растворения. Представлены результаты лабораторных и полупромышленных исследований и оптимальные режимы воздействия колебаний на процесс растворения. Установлено, что скорость растворения зависит от амплитуды колебательной скорости жидкости и только при определенных значениях этой скорости наблюдается ускорение процесса растворения.

Ключевые слова: подземное выщелачивание, подземное хранилище, формообразование подземных камер, упругие колебания, амплитуда колебательной скорости, разрушение пограничного диффузионного слоя, вихревые потоки, роторный гидродинамический излучатель.

Для цитирования: *Куренков Д. С., Федоров Г. Б., Дудченко О. Л.* Физические основы применения акустических колебаний для интенсификации растворения каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 45–53. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_45.

Physics of application of acoustic vibrations in stimulation of dissolution of rock salt

D.S. Kurenkov[1], G.B. Fedorov[1], O.L. Dudchenko[1]

[1] National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: kurenkov@misis.ru

© Д.С. Куренков, Г.Б. Федоров, О.Л. Дудченко. 2021.

Abstract: Increased production of crude oil calls for more storage reservoirs. In this regard, more attention is drawn to underground storages made in rock salt deposits by physicochemical methods to allow mineral extraction without underground mining operations. One of the limitations on efficiency of underground storages of preset geometry in rock salt deposits is the long period of construction due to the low velocity of rock salt dissolution in water. In this respect, it is highly critical to find smart and expedient methods to stimulate in-situ leaching of rock salt. This article presents some guidelines on application of acoustic vibrations in construction of underground oil storages in salt deposits by leaching. The theoretical and experimental research data on elastic vibrations in stimulation of dissolution of rock salt are given. The physical mechanism of the acoustic vibration effect on the mass transfer process is described. Mass transfer is greatly accelerated due to acoustic micro whirls which appear at the liquid–rock salt interface. These whirls rupture the boundary diffusion layer and increase the rate of dissolution. The results of the laboratory and semi-commercial scale tests are reported together with the optimized mode of vibration effect on dissolution. It is found that the rate of dissolution depends on the amplitude of liquid vibration velocity, and acceleration in dissolution is only observed at certain values of the vibration velocity in liquid.

Key words: in-situ leaching, underground storage, generation of geometry of underground chambers, elastic vibrations, vibration velocity amplitude, boundary diffusion layer rupture, whirling water, hydrodynamic rotary radiator.

For citation: Kurenkov D. S., Fedorov G. B., Dudchenko O. L. Physics of application of acoustic vibrations in stimulation of dissolution of rock salt. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5):45-53. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_45.

Введение

В настоящее время месторождения каменной соли успешно используются для создания подземных хранилищ жидких и газообразных продуктов, что является прогрессивным направлением в мировом резервуаростроении. В этом плане несомненны преимущества геотехнологических способов, обеспечивающих бесшахтное ведение процесса выемки горной массы через пробуренные с поверхности скважины. Такой метод ведения горных работ позволяет вести безлюдную выемку при гидравлическом транспортировании полезного ископаемого [1, 2].

Однако имеется ряд технологических недостатков, исключение которых позволит резко повысить эффективность подземного выщелачивания каменной соли:

- длительный подготовительный период, составляющий 350÷500 суток для каждой скважины, а также выход больших количеств слабоминерализованных рассолов с концентрацией от 50 до 150 кг/м^3, что требует дополнительных затрат на поверхности при их утилизации.
- невысокие темпы выщелачивания требуют для получения заданного количества соли значительного расхода технической воды, что может явиться сдерживающим фактором при ограниченных водных ресурсах района.
- невозможность активного управления формообразованием камеры, что особенно важно при сооружении емкостей подземных хранилищ.

В связи с этим внедрение рациональных способов интенсификации подзем-

ного выщелачивания каменной соли приобретает актуальное значение.

Методика исследований

Процесс растворения каменной соли исследовался как отечественными авторами, так и зарубежными [3–7]. Применение упругих колебаний в различных процессах было рассмотрено в работах [8–13]. Из существующих способов интенсификации процессов горного производства наибольший интерес представляет использование акустических колебаний [10; 14–16]. Чрезвычайно важным является понимание физического механизма воздействия акустических колебаний на процесс растворения каменной соли, так как это единственная основа рационального подхода к конструированию акустической аппаратуры и выбору оптимального режима воздействия [17–20].

Исследуем воздействие виброакустических колебаний на процесс растворения каменной соли. Растворение идет по законам конвективной диффузии. Вблизи поверхности реакции существует область быстрого изменения концентрации растворяемого вещества. Этот тонкий слой называется диффузионным пограничным слоем. Если граница реакции обтекается потоком V (где V_x и V_z — компоненты скорости жидкости в соответствующих направлениях, а V_y = = 0), то уравнение конвективной диффузии в диффузионном пограничном слое имеет вид:

$$V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \qquad (1)$$

где C (x, y, z, t) — концентрация соляного раствора; D — коэффициент диффузии соли в жидкость.

Решая уравнение (1), получим выражение для диффузионного потока, фактически представляющего собой скорость всего гетерогенного процесса:

$$j_{диф} = \frac{C_0}{\delta}, \qquad (2)$$

где C_0 — концентрация соли вдали от поверхности реакции; δ — толщина диффузионного слоя.

Расчеты показали, что толщина этого слоя равна:

$$\delta \sim \left(\frac{D\nu^{\frac{1}{3}}}{V_x} \right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (3)$$

где ν — кинематическая вязкость жидкости; V_x — скорость движения жидкости.

Результаты исследований позволяют сделать вывод, что скорость растворения каменной соли в воде ограничивается процессом молекулярной диффузии в пограничном диффузионном слое. Чем меньше толщина этого слоя, тем выше скорость растворения. Поэтому интерес представляют различные физические воздействия на рассматриваемую реакцию, с помощью которых можно уменьшить толщину этого слоя или разрушить его.

Перспективным является применение виброакустических полей для ускорения процесса растворения соли. Роль ускоряющего фактора в виброакустическом поле принадлежит возникающим в нем стационарным вихревым течениям (виброакустическим течениям). Эти потоки возникают в результате неоднородности виброакустического поля на границе реакции.

Результаты исследований и обсуждение

Концептуально механизм воздействия виброакустических колебаний на процесс растворения каменной соли заключается в следующем. При виброакустических колебаниях на границе раздела фаз в пограничном гидродинамическом слое возникают специфические вихревые потоки. За счет этих потоков

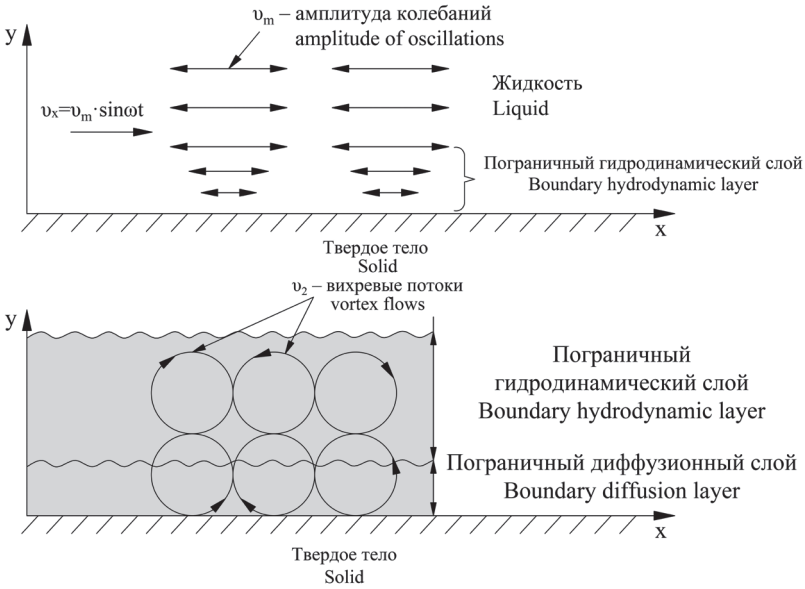

Рис. 1. Образование вихревых стационарных потоков
Fig. 1. Formation of vortex stationary flow

толщина диффузионного пограничного слоя либо уменьшается, либо происходит полное разрушение слоя. Это приводит к увеличению скорости массопереноса, причем степень воздействия зависит от скорости акустических течений.

Рассмотрим случай распространения виброакустических колебаний вдоль поверхности твердого тела (рис. 1). Скорость колебаний жидкости равна:

$$V = V_m \cdot \sin\omega t \qquad (4)$$

где V_m — амплитуда колебаний; ω — циклическая частота; t — время.

При решении совместно уравнения Навье-Стокса и уравнения непрерывности методом последовательного приближения были получены выражения для скорости акустических течений. После подстановки полученных выражений в уравнение (1) был рассчитан дополнительный поток вещества при растворении:

$$j_{доп} = 0{,}3\Delta C\left(\frac{D^3}{\nu C_{зв}^2}\right)^{\frac{1}{4}} V_m^{\frac{1}{2}} \qquad (5)$$

где ΔC — перепад концентрации соли около поверхности реакции; $C_{зв}$ — скорость упругих волн в воде.

Из этого уравнения следует, что под действием виброакустических колебаний появляется дополнительный поток вещества с поверхности реакции, т.е. скорость растворения возрастает.

Лабораторные исследования

Были проведены исследования скорости массопереноса при растворении каменной соли в зависимости от параметров виброакустических колебаний (амплитуды скорости и частоты). Эксперименты проводились на установке, представленной на рис. 2.

Ванна *1* заполнялась водой, и в ней размещался исследуемый образец *2*. С помощью вибростенда *3* в колебательное движение приводился поршень *6*, установленный на гибких мембранах *7*. Частота и амплитуда колебательной скорости поршня задавалась вибростендом. С помощью акселерометра *4* измерялись параметры виброакустических ко-

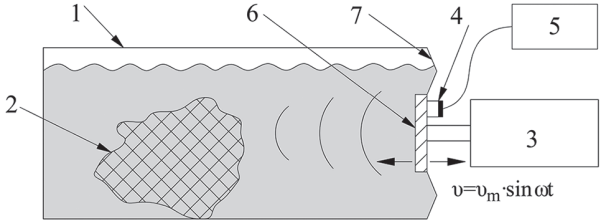

Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — ванна; 2 — образец каменной соли; 3 — вибростенд; 4 — акселерометр; 5 — блок измерения; 6 — поршень; 7 — гибкая мембрана

Fig. 2. Flowchart of the experimental setup: 1 — bath; 2 — sample of rock salt; 3 — vibration stand; 4 — accelerometer; 5 — measurement unit; 6 — piston; 7 — flexible membrane

лебаний. Сигнал с акселерометра фиксировался блоком измерения *5*.

Эксперименты проводились следующим образом. Исследуемый образец с боковой поверхностью S и весом p_1 помещался в жидкость, в которой создавались виброакустические колебания. Через определенный промежуток t он извлекался из ванны и вновь взвешивался (p_2). Средний диффузионный поток вещества определяется по формуле

$$j_{cp} = \frac{p_1 - p_2}{S \cdot t} \qquad (6)$$

где S — площадь поверхности реакции; t — длительность эксперимента.

Измерения проводились в динамическом диапазоне от 10 м/с^2 до 100 м/с^2 и частотном от 10 Гц до 150 Гц. Результаты проведенных экспериментов представлены графиками на рис. 3.

Из представленного графика видно, что теоретическая и экспериментальная кривые удовлетворительно совпадают.

Из сравнения экспериментальных кривых (f_1 = 10 Гц и f_2 = 30 Гц) можно сделать вывод, что скорость растворения каменной соли не зависит от частоты виброакустических колебаний (в исследуемом диапазоне от 10 Гц до 150 Гц).

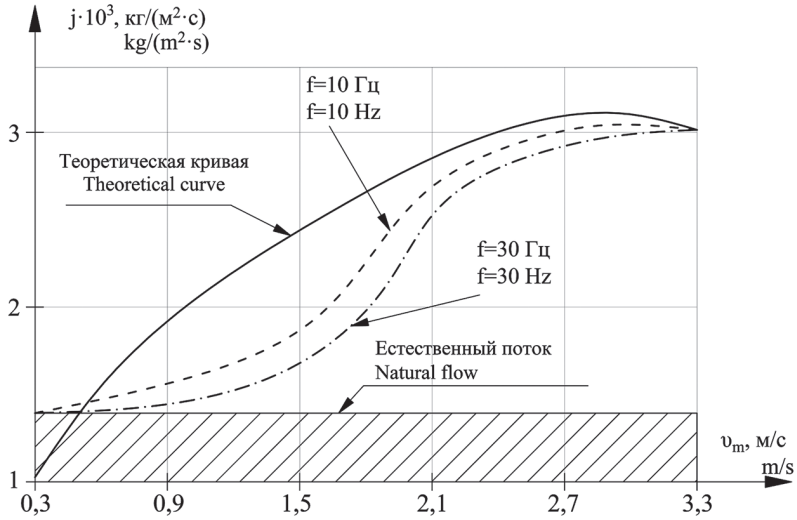

Рис. 3. Зависимость скорости растворения каменной соли от амплитуды колебательной скорости и частоты

Fig. 3. Rock salt dissolution rate as a function of vibrational rate amplitude

По экспериментальным кривым видно, что на первоначальном отрезке (до 0,7 м/с) скорость массопереноса не зависит от амплитуды колебательной скорости, т.е. существует пороговый (критический) уровень воздействия виброакустических колебаний, ниже которого интенсифицирующее воздействие не происходит. Это можно объяснить тем, что при данных значениях колебательной скорости еще не возникают виброакустические вихревые потоки, а некоторое увеличение скорости массопереноса зависит от действия других факторов, возникающих в виброакустическом поле.

При V_m > 2,5÷2,7 м/с экспериментальные и теоретические кривые начинают выполаживаться, т.е. скорость реакции увеличивается незначительно при возрастании амплитуды скорости колебания.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что для эффективного применения виброакустических колебаний с целью ускорения процесса растворения каменной соли нужно создавать в рабочем объеме виброакустические колебания с амплитудой скорости более 0,7 м/с. При этом скорость массопереноса увеличивается в 2÷2,5 раза.

Натурные испытания

Эксперименты в натурных условиях проводились на полигоне. Выщелачивание проводилось в шурфе, выработанном в пласте каменной соли из штольни, пройденной по этому же пласту. В шурф были опущены рассолозаборная и водоподающая трубы. Опыты проводились в два этапа: естественное выщелачивание и выщелачивание в поле упругих колебаний, возбуждаемых в шурфе с помощью роторного гидродинамического излучателя, принцип работы которого основан на прерывании проходящего потока воды золотниковым устройством. Вода под напором поступает в излучатель от промышленного артезианского насоса ЭЦВ-8, соединенного с излучателем. По вертикальной оси шурфа была установлена штанга с пробниками, позволяющими измерять плотность рассола по высоте камеры на отметках 0 м; 1 м; 2 м; 3 м; 4 м.

В результате проведенных экспериментов изучена динамика насыщения рассола в шурфе при расходе растворителя 2 м^3/ч. За 5 ч выщелачивания концентрация в камере при акустическом воздействии и при естественном растворении в среднем достигла значений 184 и 125 кг/м^3. Определено, что скорость насыщения раствора возросла (концентрация, близкая к насыщению 312 кг/м^3, получена при акустическом воздействии за 27 ч, а в контрольном опыте за 70 ч). Кроме того, нужно отметить, что при работе в камере выщелачивания роторного гидродинамического излучателя наблюдается выравнивание концентрации рассола по высоте (начальная разность концентраций проб рассола, взятых на отметках 0 и 4 м, составила 14 кг/м^3, а в конце опыта после 5 ч работы излучателя — 4 кг/м^3, тогда как в контрольном опыте разность концентраций возросла до 25 кг/м^3).

Анализ результатов экспериментальных исследований в натурных условиях показал, что при применении роторного гидродинамического излучателя, работающего на частотах звукового диапазона, значительно интенсифицируется подземное выщелачивание каменной соли и улучшается формообразование емкости за счет выравнивания концентрации рассола по высоте камеры.

Заключение

На основании проведенных исследований предложен акустический метод ускорения выщелачивания каменной соли при строительстве подземных

емкостей, основанный на воздействии мощных звуковых колебаний в диапазоне частот от 10 до 150 Гц, позволяющий интенсифицировать процесс в 1,5 раза и более. Определены основные факторы звукового поля, приводящие к интенсификации выщелачивания каменой соли, связанные с возникновением на границе раздела фаз «жидкость–твердое тело» акустических микропотоков, разрушающих пограничный диффузионный слой. Установлено, что максимальное ускорение выщелачивания возникает только при достижении амплитуды колебательной скорости 2,5÷2,7 м/с и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аренс В. Ж.*, *Гридин О. М.*, *Крейнин Е. В.*, *Небера В. П.*, *Фазлуллин М. И.*, *Хрулев А. С.*, *Хчеян Г. Х.* Физико-химическая геотехнология: Учебник для вузов. — М.: Изд-во МГГУ. 2010. — 575 с.

2. *Oparin V. N.*, *Potapov V. P.*, *Logov A. B.*, *Schastlivtsev E. L.*, *Yukina N. I.* Identification of pollutant clusters in trade effluents in Kuzbass // Journal of Mining Science. 2016, vol. 52, no. 5, pp. 1011–1019. DOI: 10.1134/S1062739116041538.

3. *Weisbrod N.*, *Alon-Mordish C.*, *Konen E.*, *Yechieli Y.* Dynamic dissolution of halite rock during flow of diluted saline solutions // Geophysical Research Letters. 2012, vol. 39, no. 9, L09404. DOI:10.1029/2012GL051306

4. *Liu X.*, *Yang X.*, *Wang J.*, *Li D.*, *Li P.*, *Yang Z.* A dynamic dissolution model of rock salt under gravity for different flow rates // Arabian Journal of Geosciences. 2016, vol. 9, no. 3, pp. 1–8. DOI:10.1007/s12517-015-2254-0.

5. *Yang X.*, *Liu X.*, *Zang W.*, *Lin Z.*, *Wang Q.* A Study of analytical solution for the special dissolution rate model of rock salt // Advances in Materials Science and Engineering. 2017, vol. 4, pp. 1–8. DOI: 10.1155/2017/4967913.

6. *Yang X.*, *Liu X.*, *Wang J.*, *Zhao Z.*, *Lei H.* Analytical solution of a mathematical model for rock salt dissolution in still water // Arabian Journal of Geosciences. 2018, vol. 11, no. 23. DOI: 10.1007/s12517-018-4122-1.

7. *Федоров Г. Б.*, *Дудченко О. Л.*, *Куренков Д. С.* Строительство подземных сооружений в соляных отложениях с использованием акустических колебаний // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 149–155. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-149-155.

8. *Стоев С.* Виброакустическая техника при переработке минерального сырья. — София: Техника, 1989. — 370 с.

9. *Jameson G. J.*, *Davidson J. F.* The motion of bubble in vertically oscillating liquid: theory for an inviscid liquid, and experimental results // Chemical Engineering Science, 1966, vol. 21, no. 1, pp. 29–34. DOI: 10.1016/0009-2509(66)80004-0.

10. *Шульгин А. И.*, *Назарова Л. И.*, *Рехтман В. И. и др.* Акустическая технология в обогащении полезных ископаемых. — М.: Недра, 1987. — 232 с.

11. *Budzyński P.*, *Gwiazda A.*, *Dziubiński M.* Intensification of mass transfer in a pulsed bubble column // Chemical Engineering and Processing — Process Intensification. 2017, vol. 112, pp. 18–30. DOI: 10.1016/j.cep.2016.12.004.

12. *Golubina E.*, *Kizim N.*, *Alekseeva N.* Intensification of the extraction of rare earth elements at the local mechanical vibration in the interfacial layer // Chemical Engineering and Processing — Process Intensification. 2018, vol. 132, pp. 98–104. DOI: 10.1016/j.cep.2018.08.019.

13. *Chakravorty A.* Process intensification by pulsation and vibration in miscible and immiscible two component systems // Chemical Engineering and Processing — Process Intensification. 2018, vol. 133, pp. 90–105. DOI: 10.1016/j.cep.2018.09.017.

14. *Anushenkov A. N.*, *Rostovtsev V. I.*, *Frizorger V. K.* Modification of coal tar pitch in hydropercussion-cavitation field // Journal of Mining Science. 2009, vol. 45, no. 5, pp. 509–516. DOI: 10.1007/s10913-009-0064-z.

15. *Федоров Г. Б.*, *Агафонов Ю. Г.*, *Артемьев В. Б.*, *Опанасенко П. И.* Виброакустические методы и средства интенсификации процессов горного производства. — М.: Горное дело ООО «Киммерийский центр», 2016. — 255 с.

16. *Fedorov G. B.*, *Dudchenko O. L.*, *Kurenkov D. S.* Development of vibroacoustic module for fine filtration of drilling muds // Journal of Mining Institute. 2018, vol. 234, pp. 647–651. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.647.

17. *Ksenofontov B. S.*, *Ivanov M. V.* Case study: use of flotation for industrial stormwater treatment // Water Practice and Technology. 2014, vol. 9, no. 3, pp. 392–397. DOI: 10.2166/wpt.2014.043.

18. *Ksenofontov B. S.*, *Ivanov M. V.* Intensification of flotation treatment by exposure to vibration // Water Science and Technology. 2014, vol. 69, no. 7, pp. 1434–1439. DOI:10.2166/wst.2014.046.

19. *Ksenofontov B. S.*, *Ivanov M. V.* A Novel multistage kinetic modeling of flotation for waste-water treatment // Water Science and Technology. 2013, vol. 68, no. 4, pp. 807–812. DOI: 10.2166/wst.2013.303.

20. *Ksenofontov B. S.*, *Antonova E. S.*, *Ivanov M. V.*, *Kozodaev A. S.*, *Taranov R. A.* The influence of oil contaminated soil on the quality of surface waste water // Water Practice and Technology. 2015, vol. 10, no. 4, pp. 814–822. DOI: 10.2166/wpt.2015.101. ГИАБ

REFERENCES

1. Arens V. Zh., Gridin O. M., Kreynin E. V., Nebera V. P., Fazlullin M. I., Khrulev A. S., Khcheyan G. Kh. *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya*: Uchebnik dlya vuzov [Physical and chemical geotechnology: textbook for high schools], Moscow, Izd-vo MGGU. 2010, 575 p.

2. Oparin V. N., Potapov V. P., Logov A. B., Schastlivtsev E. L., Yukina N. I. Identification of pollutant clusters in trade effluents in Kuzbass. *Journal of Mining Science*. 2016, vol. 52, no. 5, pp. 1011–1019. DOI: 10.1134/S1062739116041538.

3. Weisbrod N., Alon-Mordish C., Konen E., Yechieli Y. Dynamic dissolution of halite rock during flow of diluted saline solutions. *Geophysical Research Letters*. 2012, vol. 39, no. 9, L09404. DOI:10.1029/2012GL051306

4. Liu X., Yang X., Wang J., Li D., Li P., Yang Z. A dynamic dissolution model of rock salt under gravity for different flow rates. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016, vol. 9, no. 3, pp. 1–8. DOI:10.1007/s12517-015-2254-0.

5. Yang X., Liu X., Zang W., Lin Z., Wang Q. A Study of analytical solution for the special dissolution rate model of rock salt. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 4, pp. 1–8. DOI: 10.1155/2017/4967913.

6. Yang X., Liu X., Wang J., Zhao Z., Lei H. Analytical solution of a mathematical model for rock salt dissolution in still water. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018, vol. 11, no. 23. DOI: 10.1007/s12517-018-4122-1.

7. Fedorov G. B., Dudchenko O. L., Kurenkov D. S. Construction of underground structures in saline deposits using acoustic vibrations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 149–155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-149-155.

8. Stoev S. *Vibroakusticheskaya tekhnika pri pererabotke mineral'nogo syr'ya* [Vibroacoustic technology for the processing of mineral raw materials], Sofiya, Tekhnika, 1989, 370 p.

9. Jameson G. J., Davidson J. F. The motion of bubble in vertically oscillating liquid: theory for an inviscid liquid, and experimental results. *Chemical Engineering Science*, 1966, vol. 21, no. 1, pp. 29–34. DOI: 10.1016/0009-2509(66)80004-0.

10. Shul'gin A. I., Nazarova L. I., Rekhtman V. I. *Akusticheskaya tekhnologiya v obogashchenii poleznykh iskopaemykh* [Acoustic technology in mineral processing], Moscow, Nedra, 1987, 232 p.

11. Budzyński P., Gwiazda A., Dziubiński M. Intensification of mass transfer in a pulsed bubble column. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*. 2017, vol. 112, pp. 18–30. DOI: 10.1016/j.cep.2016.12.004.

12. Golubina E., Kizim N., Alekseeva N. Intensification of the extraction of rare earth elements at the local mechanical vibration in the interfacial layer. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*. 2018, vol. 132, pp. 98–104. DOI: 10.1016/j.cep.2018.08.019.

13. Chakravorty A. Process intensification by pulsation and vibration in miscible and immiscible two component systems. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*. 2018, vol. 133, pp. 90–105. DOI: 10.1016/j.cep.2018.09.017.

14. Anushenkov A. N., Rostovtsev V. I., Frizorger V. K. Modification of coal tar pitch in hydropercussion-cavitation field. *Journal of Mining Science*. 2009, vol. 45, no. 5, pp. 509–516. DOI: 10.1007/s10913-009-0064-z.

15. Fedorov G. B., Agafonov Yu. G., Artem'ev V. B., Opanasenko P. I. *Vibroakusticheskie metody i sredstva intensifikatsii protsessov gornogo proizvodstva* [Vibroacoustic methods and means of mining processes intensification], Moscow, Gornoe delo OOO «Kimmeriyskiy tsentr», 2016, 255 p.

16. Fedorov G. B., Dudchenko O. L., Kurenkov D. S. Development of vibroacoustic module for fine filtration of drilling muds. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 234, pp. 647–651. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.647.

17. Ksenofontov B. S., Ivanov M. V. Case study: use of flotation for industrial stormwater treatment. *Water Practice and Technology*. 2014, vol. 9, no. 3, pp. 392–397. DOI: 10.2166/wpt.2014.043.

18. Ksenofontov B. S., Ivanov M. V. Intensification of flotation treatment by exposure to vibration. *Water Science and Technology*. 2014, vol. 69, no. 7, pp. 1434–1439. DOI:10.2166/wst.2014.046.

19. Ksenofontov B. S., Ivanov M. V. A Novel multistage kinetic modeling of flotation for waste-water treatment. *Water Science and Technology*. 2013, vol. 68, no. 4, pp. 807–812. DOI: 10.2166/wst.2013.303.

20. Ksenofontov B. S., Antonova E. S., Ivanov M. V., Kozodaev A. S., Taranov R. A. The influence of oil contaminated soil on the quality of surface waste water. *Water Practice and Technology*. 2015, vol. 10, no. 4, pp. 814–822. DOI: 10.2166/wpt.2015.101.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Куренков Дмитрий Сергеевич[1] — старший преподаватель,
e-mail: kurenkov@misis.ru,
Федоров Геннадий Борисович[1] — канд. техн. наук, доцент,
Дудченко Олег Львович[1] — канд. техн. наук, доцент,
[1] НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Куренков Д.С., e-mail: kurenkov@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.S. Kurenkov[1], Senior Lecturer, e-mail: kurenkov@misis.ru,
G.B. Fedorov[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
O.L. Dudchenko[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
[1] National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: D.S. Kurenkov, e-mail: kurenkov@misis.ru.

Получена редакцией 04.12.2020; получена после рецензии 22.01.2021; принята к печати 10.04.2021.
Received by the editors 04.12.2020; received after the review 22.01.2021; accepted for printing 10.04.2021.