

СТРОИТЕЛЬСТВО ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В СОЛЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Г.Б. Федоров¹, О.Л. Дудченко¹, Д.С. Куренков¹

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

Аннотация: Предложен инновационный способ строительства подземных сооружений с использованием акустических колебаний. Креативным элементом предложения является использование роторного гидродинамического излучателя, который создает в камере акустические колебания. При этом на границе раздела фаз (жидкость—каменная соль) возникают специфические эффекты, за счет которых повышается скорость растворения каменной соли. Представлена конструкция роторного гидродинамического излучателя и принцип его работы. Конструкцией предусмотрена возможность изменения частоты излучения акустических колебаний, что позволяет возбуждать колебания в резонансном режиме. Приведены результаты лабораторных исследований интенсификации выщелачивания каменной соли с использованием разработанного роторного гидродинамического излучателя. Обнаружена зависимость скорости растворения соли от амплитуды акустического давления на границе раздела фаз. Исследования показали, что при воздействии мощных звуковых колебаний в диапазоне частот 500—3000 Гц интенсифицируется процесс растворения соли в 1,5 раза и более. Проведенные исследования подтвердили целесообразность использования акустических колебаний при строительстве подземных сооружений в отложениях каменной соли.

Ключевые слова: роторная гидродинамическая сирена, ускорение процесса растворения каменной соли, резонансный режим воздействия, разрушение пограничного диффузионного слоя.

Для цитирования: 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.

Construction of underground structures in saline deposits using acoustic vibrations

G.B. Fedorov¹, O.L. Dudchenko¹, D.S. Kurenkov¹

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

Abstract: The review of the national and international experience shows that the traditional methods of rock salt leaching during construction of underground storage facilities for gas and liquid fuel fall short of the actual level of mining technology and equipment. Many research institutions strive for improving methods and means of in-situ leaching of rock salt using bore holes drilled from ground surface. An innovative method is proposed for construction of underground structures using acoustic vibrations. A creative element of the proposition is hydrodynamic rotary radiator gener

ating acoustic vibrations. In this case, at the phase interface (liquid–rock salt), specific phenomena arise and accelerate rock salt dissolution. The design and operation principle of the hydrodynamic rotary radiator are described. The design provides adjustment of acoustic vibration frequency, which enables generation of resonance oscillations. The lab-scale investigations into intensification of rock salt leaching with the developed hydrodynamic rotary radiator are reported. It is found that the salt dissolution rate depends on the acoustic pressure amplitude at the phase interface. The investigations show that high-power acoustic vibrations within a frequency band of 500–3000 Hz intensifies the process of salt dissolution by 1.5 times and more. The investigations prove efficiency of acoustic vibrations in construction of underground storage facilities in rock salt.

Key words: hydrodynamic rotary horn, rock salt dissolution speed-up, resonant mode of exposure, boundary diffusion layer breakage.

For citation: Fedorov G. B., Dudchenko O. L., Kurenkov D. S. Construction of underground structures in saline deposits using acoustic vibrations. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;5:149-155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-149-155.

Введение

Одним из основных недостатков, снижающих общую эффективность сооружения в месторождениях каменной соли подземных емкостей заданных размеров и форм, является относительно длительный срок их создания [1–3]. Наименее производительным периодом является начальный (подготовительный), составляющий до 30% общего времени сооружения подземной емкости. В первую очередь, это связано с невысокой скоростью растворения каменной соли в воде. В мировой практике наметилась тенденция по созданию оборудования для интенсификации процесса растворения соли. Однако, несмотря на определенные успехи, достигнутые в этой области, вопросы интенсификации требуют дальнейших исследований.

Постановка проблемы

В связи с вышеизложенным, наметились следующие основные направления оптимизации существующих технологических схем создания подземных емкостей:

- создание оборудования для интенсификации процесса растворения каменной соли в воде;
- разработка акустической технологии процесса сооружения подземных емкостей.

Известно применение акустических колебаний для интенсификации и повышения эффективности различных технологических процессов [4–8]. На базе этих исследований были проведены научно-технические и опытно-конструкторские работы по созданию технических средств для строительства подземных сооружений с использованием акустических технологий. В частности, разработан акустический модуль для создания акустических колебаний в подземной емкости.

Результаты и обсуждение

Разработанный роторный гидродинамический излучатель является принципиально новым видом оборудования для интенсификации процесса растворения каменной соли при строительстве подземных сооружений. Излучатель устанавливается на колонне, по которой подается жидкость в камеру (рис. 1). Он содержит цилиндрические статор и ротор, на боковых поверхностях которых выполнено одинаковое количество отверстий. Двигатель, находящийся в кожухе, приводит во вращение ротор. Частота акустических колебаний зависит от количества отверстий в статоре и роторе и скорости вращения ротора. С помощью двигателя постоянного тока можно

изменять скорость вращения ротора и, соответственно, частоту акустических колебаний. Для согласования роторного гидродинамического излучателя с объемом камеры и получения на границе жидкость—твердое тело максимума акустической энергии, изменением частоты излучения добиваются работы излучателя в резонансном режиме.

Роторный гидродинамический излучатель представляет собой устройство, при помощи которого энергия движущейся жидкости преобразуется в акустическую. Жидкость, находящаяся в трубе и используемая в дальнейшем как растворитель, под давлением через отверстия переменного во времени сечения поступает в камеру, создавая в ней возмущения среды, воспринимаемые как звук. Изменение сечения выходных отверстий излучателя обеспечивается золотниковым устройством от максимума, когда отверстия статора совпадают с отверстиями ротора до минимума, и отверстия статора перекрыты. Чрезвычайно важным является понимание физического механизма воздействия акустических колебаний на процесс растворения каменной соли, так как это единственная основа для рационального использования акустической энергии и выбора оптимального режима воздействия упругих колебаний.

Процесс растворения каменной соли протекает по диффузионной кинетике и его скорость определяется толщиной диффузионного пограничного слоя, образующегося на границе раздела фаз. Чем меньше толщина этого слоя, тем быстрее протекает реакция. При воздействии акустических колебаний на границе каменная соль—вода возникают акустические турбулентные микропотоки, которые либо уменьшают толщину диффузионного слоя, либо полностью его разрушают [9–12]. Это приводит к увеличению диффузионного потока каменной соли $j_{ак}$. Экспериментально была установлена

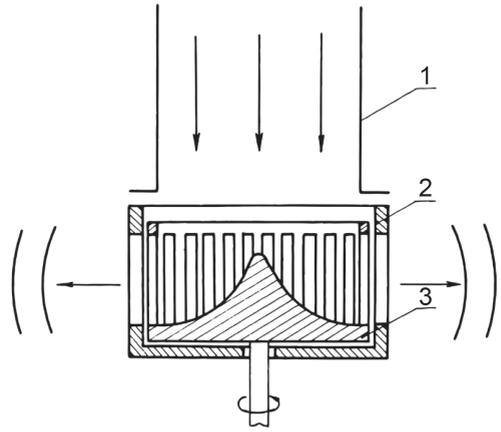


Рис. 1. Роторный гидродинамический излучатель: 1 — водоподающая колонка; 2 — статор; 3 — ротор

Fig. 1. Rotary hydrodynamic emitter: 1 — water feed-line; 2 — stator; 3 — rotor

зависимость диффузионного потока от звукового давления на границе раздела фаз. Эта эмпирическая зависимость имеет вид:

$$j_{ак} = 7,3 \cdot 10^{-3} - 20,5 \cdot 10^{-3} e^{(-8 \cdot 10^{-4} P)},$$

где $j_{ак}$ — диффузионный поток вещества в акустическом поле, кг/м²с; P — звуковое давление на границе фаз, Па.

В дальнейшем рассчитывалось давление на границе фаз. В результате было получено следующее выражение:

$$\frac{P(R)}{P(a)} = \frac{a}{R} \frac{d}{\sqrt{d^2 \cos^2 kR + \sin^2 kR}},$$

где R — радиус подземной камеры; a — радиус излучателя; $k = \omega/C$ — волновое число в жидкости; $d = (\rho_1 c_1)/\rho c$ — отношение импедансов массива и жидкости; ρ , c и ρ_1 , c_1 — соответственно плотность и скорость звука в жидкости и соли.

Изменение давления на стенке камеры показано на рис. 2. Из рисунка видно, что давление на стенке осциллирует в зависимости от R . Максимум давления соответствует резонансам сферической полости. Таким образом, выгоднее всего

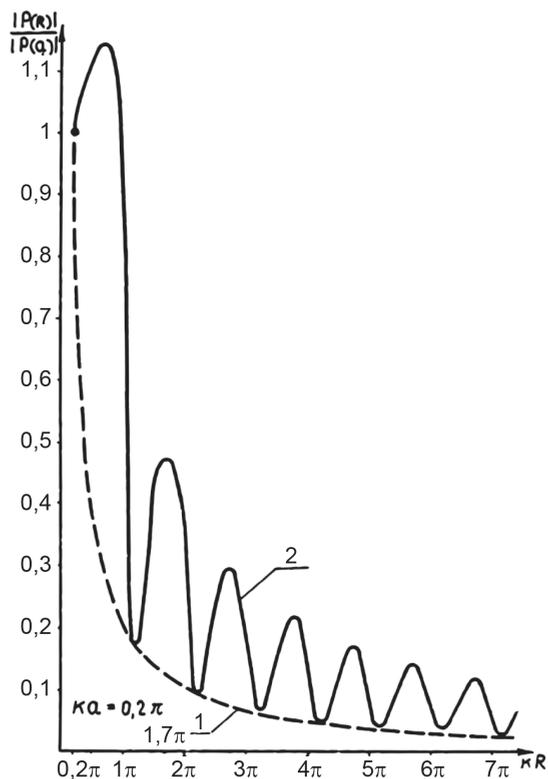


Рис. 2. Изменение звукового давления на стенке камеры: 1 — нормальный (сферический) закон; 2 — относительное давление на стенке камеры
 Fig. 2. Sound pressure changes on the chamber wall: 1 — normal (spherical) law; 2 — relative pressure on the chamber wall

работать в резонансном режиме, достигаемом перестройкой частоты излучателя.

Лабораторные испытания

Основными задачами лабораторных исследований являлись: оценка эффективности акустического воздействия на процесс выщелачивания камер-моделей; исследование влияния технологических и акустических факторов на динамику извлечения каменной соли и характер массообменных процессов в озвученной камере выщелачивания; выявление закономерностей формообразования камер-моделей в поле упругих колебаний; определение радиуса зоны эффективного действия акустического излучателя и сравнение полученных данных с рас-

четными. Исследование намеченного круга вопросов на физических моделях преследовало цель получить исходные данные для выбора оптимальных параметров выщелачивания подземных емкостей с акустическим излучателем.

Лабораторные эксперименты выполнены на специальной установке, состоящей из следующих узлов: монолита каменной соли 700×700×700 мм, в котором производилось выщелачивание камеры, измерительной аппаратуры.

С целью сравнительного анализа результатов экспериментальных исследований предусматривалось выщелачивание камер-моделей с акустическим воздействием и без воздействия (контрольный опыт). В процессе проведения опытов

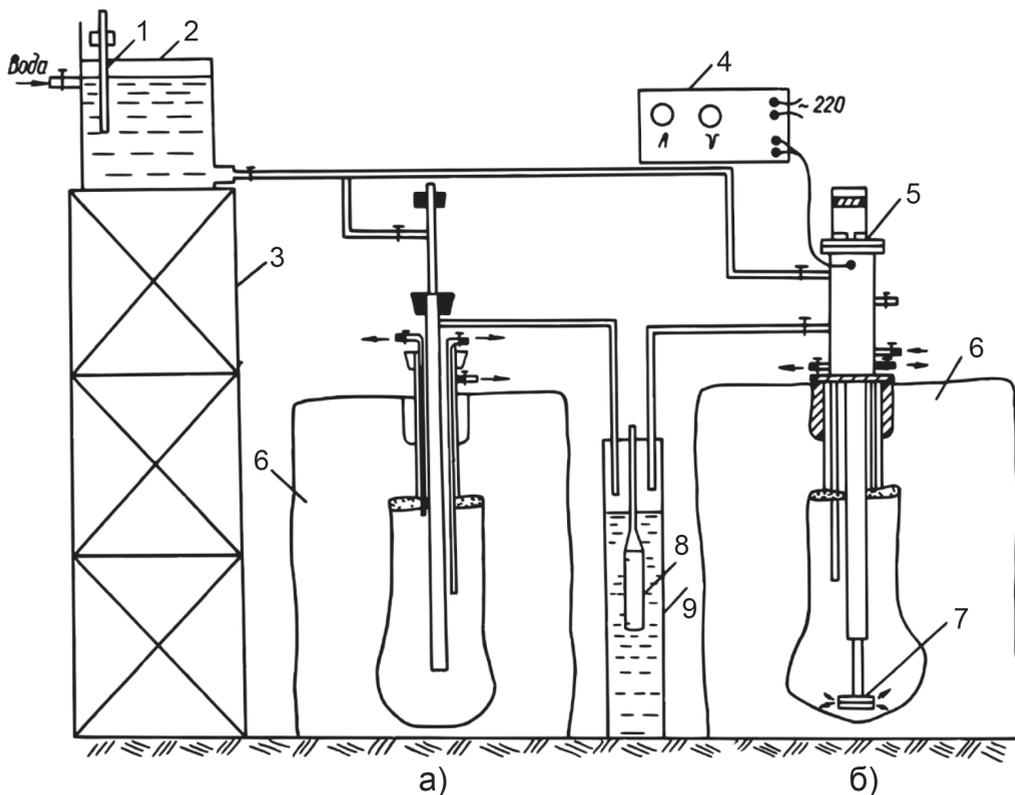


Рис. 3. Схема лабораторной установки: камера естественного растворения (а); камера при акустическом воздействии (б); 1 – термометр; 2 – сосуд с пресной водой; 3 – стеллаж; 4 – выпрямитель; 5 – двигатель постоянного тока; 6 – монолит каменной соли; 7 – роторный гидродинамический излучатель; 8 – ареометр; 9 – мерная емкость

Fig. 3. Laboratory setup diagram: chamber of natural dissolution (a); – chamber under acoustic exposure (b); 1 – thermometer; 2 – vessel with fresh water; 3 – rack; 4 – rectifier; 5 – DC motor; 6 – monolith of rock salt; 7 – rotary hydrodynamic radiator; 8 – hydrometer; 9 – measuring tank

Сравнительные данные образования подземных камер Comparative data on the formation of underground chambers

Технологические и акустические параметры	Акустическая интенсификация	Обычная технология
Объем камеры, м ³	0,15	0,15
Время выщелачивания, ч	31	71
Концентрация рассола в конечной стадии выщелачивания, кг/м ³	181,68	132,46
Линейная скорость растворения, м/ч	0,0138	0,0053
Частота колебаний, Гц	1500	–
Звуковое давление, Па	0,25 · 10 ⁴	–
Затраты электроэнергии, кВт·ч	876	1140

замерялись следующие параметры: температура растворителя и рассола, концентрация в разных точках по высоте и на выходе из камеры, расход растворителя, промежуточные и конечные размеры камеры, величина звукового давления и некоторые другие. Схема лабораторной установки представлена на рис. 3, в таблице приведены экспериментальные данные.

Из полученных результатов видно, что при акустическом воздействии увеличивается скорость растворения каменной соли и, соответственно, повышается концентрация выдавливаемого из камеры рассола. Это позволяет сократить время создания подземной емкости на 35–40% и значительно уменьшить количест-

во воды, израсходованной на выщелачивание.

Заключение

Разработана и рекомендуется к применению новая технология сооружения подземных емкостей выщелачиванием через буровые скважины в месторождениях каменной соли с применением роторного гидродинамического излучателя, устанавливаемого в нижней части водоподающей трубы. Предлагаемый способ обеспечивает интенсификацию процесса и сокращение времени образования подземной емкости на треть. Предложение позволяет управлять формообразованием подземной емкости и создавать емкость заданной конфигурации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аренс В. Ж., Гридин О. М., Крейнин Е. В., Небера В. П., Фазлуллин М. И., Хрулёв А. С., Хчегян Г. Х. Физико-химическая геотехнология: Учебник для вузов. — М.: Изд-во МГУ, 2010. — 575 с.
2. Козлов В. А. Методика расчета влаги осадка угольного шлама в фильтрующих центрифугах // Уголь. — 2016. — № 6. — С. 12–15. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-6-12-15.
3. Козлов В. А. Процесс обезвоживания мелкого угля и угольного шлама в фильтрующих центрифугах // Уголь. — 2016. — № 5. — С. 91–93. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-5-91-93.
4. Дудченко О. Л., Федоров Г. Б., Андреев А. А. Инновационный способ выброакустической классификации угольных пульп // Уголь. — 2018. — № 6. — С. 67–71. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-6-67-71.
5. Анушенков А. Н., Ростовцев В. И., Фризоргер В. К. Модификация пека в гидроударно-кавитационном поле // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2009. — № 5. — С. 110–118.
6. Антипенко Л. А. К вопросу о современных технологиях переработки и обогащения угля // Уголь. — 2015. — № 12. — С. 68–72. DOI: 10.18796/0041-5790-2015-12-68-71.
7. 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.
8. Fedorov G. B., Dudchenko O. L., Kurenkov D. S. Vibroacoustic module for waste-water treatment of mining enterprises // Scientific Reports on Resource Issues: Conference Proceedings. — Vol. 1, Freiberg, 2018. — pp. 339–344.
9. Ksenofontov B. S., Ivanov M. V. Case study: Use of flotation for industrial stormwater treatment // Water Practice and Technology, 2014, 9 (3), pp. 392–397. DOI: 10.2166/wpt.2014.043.
10. Ksenofontov B. S., Ivanov M. V. Intensification of flotation treatment by exposure to vibration // Water Science and Technology, 2014, 69 (7), pp. 1434–1439. DOI: 10.2166/wst.2014.046.
11. Ksenofontov B. S., Ivanov M. V. A novel multistage kinetic modeling of flotation for waste-water treatment // Water Science and Technology, 2013, 68 (4), pp. 807–812. DOI: 10.2166/wst.2013.303.
12. 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, 10 (4), pp. 814–822. DOI: 10.2166/wpt.2015.101. 

REFERENCES

1. Arens V.Zh., Gridin O.M., Kreynin E.V., Nebera V.P., Fazlullin M.I., Khrulev A.S., Khche-yan G.Kh. *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya: Uchebnik dlya vuzov* [Physical and chemical geotechnology: Textbook for high schools], Moscow, IZD-VO MGGU, 2010, 575 p.
2. Kozlov V.A. The method of calculating the moisture of coal sludge sediment in filter centri-fuges. *Ugol'*. 2016, no 6, pp. 12–15. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-6-12-15. [In Russ].
3. Kozlov V.A. The process of dewatering fine coal and coal sludge in filter centrifuges. *Ugol'*. 2016, no 5, pp. 91–93. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-5-91-93. [In Russ].
4. Dudchenko O.L., Fedorov G.B., Andreev A.A. Innovative method for classification of coal slurries. *Ugol'*. 2018, no 6, pp. 67–71. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-6-67-71. [In Russ].
5. Anushenkov A.N., Rostovtsev V.I., Frizorger V.K. Modification of coal tar pitch in hydrop-ercussion-cavitation field. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2009, no 5, pp. 110–118. [In Russ].
6. Antipenko L.A. On the issue of advanced coal processing and beneficiation technologies. *Ugol'*. 2015, no 12, pp. 68–72. DOI: 10.18796/0041-5790-2015-12-68-71. [In Russ].
7. 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.
8. Fedorov G.B., Dudchenko O.L., Kurenkov D.S. Vibroacoustic module for waste-water treat-ment of mining enterprises. *Scientific Reports on Resource Issues: Conference Proceedings*. Vol. 1, Freiberg, 2018. pp. 339–344.
9. Ksenofontov B.S., Ivanov M.V. Case study: Use of flotation for industrial stormwater treat-ment. *Water Practice and Technology*, 2014, 9 (3), pp. 392–397. DOI: 10.2166/wpt.2014.043.
10. Ksenofontov B.S., Ivanov M.V. Intensification of flotation treatment by exposure to vibration. *Water Science and Technology*, 2014, 69 (7), pp. 1434–1439. DOI:10.2166/wst.2014.046.
11. Ksenofontov B.S., Ivanov M.V. A novel multistage kinetic modeling of flotation for waste-water treatment. *Water Science and Technology*, 2013, 68 (4), pp. 807–812. DOI: 10.2166/wst.2013.303.
12. 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, 10 (4), pp. 814–822. DOI: 10.2166/wpt.2015.101.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоров Геннадий Борисович¹ — кандидат технических наук,

доцент, e-mail: gbfedorov1947@gmail.com,

Дудченко Олег Львович¹ — кандидат технических наук,

доцент, e-mail: dionis_4444@mail.ru,

Куренков Дмитрий Сергеевич¹ — аспирант, e-mail: kurenkov@misis.ru,

¹ НИТУ «МИСиС»,

Для контактов: Куренков Д.С., e-mail: kurenkov@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.B. Fedorov¹, Candidate of Technical Sciences,

Assistant Professor, e-mail: gbfedorov1947@gmail.com,

O.L. Dudchenko¹, Candidate of Technical Sciences,

Assistant Professor, e-mail: dionis_4444@mail.ru,

D.S. Kurenkov¹, Graduate Student, e-mail: kurenkov@misis.ru,

¹ National University of Science and Technology «MISIS»,

119049, Moscow, Russia

Corresponding author: D.S. Kurenkov, e-mail: kurenkov@misis.ru.

