

## ДОБЫЧА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СО ДНА КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА АВТОНОМНЫМ ПОДВОДНЫМ КОМПЛЕКСОМ

В. Е. Кисляков<sup>1</sup>, П. В. Катышев<sup>1</sup>, Н. А. Шкаруба<sup>1</sup>, В. С. Елизарьев<sup>1</sup>, Я. Р. Башкатова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий, Красноярск, Россия

**Аннотация:** В настоящее время в условиях истощения минеральных ресурсов на материках весьма перспективной становится добыча полезных ископаемых со дна континентального шельфа. Однако освоение минеральных ресурсов таким образом требует создания технологий и инструментов, обеспечивающих безопасную и надежную работу, исключающую возникновение аварийных и нештатных ситуаций. Создание методов добычи полезного ископаемого со дна акватории основано на принципиально новых решениях и не ограничивается рамками традиций в сравнении с разработкой природных ресурсов на суше. Выемка и транспортировка полезного ископаемого с подводного забоя на поверхность акватории требует создания надежного оборудования. Перспективным направлением в данной области является создание и применение автономных добычных комплексов, которые исключают нахождение людей при ведении добычных и транспортных работ. Автономные комплексы способны работать на больших глубинах при различных климатических условиях и плохой видимости, с минимальным расходом энергии и без привлечения дополнительных аппаратов. В свою очередь, некоторые автономные комплексы включают в себя сложное устройство подъема, к которому относится газогенератор, имеющий большую массу и требующий постоянный источник питания электроэнергией. В данной статье рассматривается оптимизация энергии поднятия автономного комплекса добычи полезного ископаемого со дна акватории за счет использования газа после химических реакций и в том числе после детонации взрывчатого вещества.

**Ключевые слова:** полезные ископаемые, подводная добыча, шельф, дно акватории, автономный комплекс, взрывчатое вещество, систематизация средств подводной добычи, подъемная сила, объем газа при детонации взрывчатых веществ.

**Для цитирования:** Кисляков В. Е., Катышев П. В., Шкаруба Н. А., Елизарьев В. С. Башкатова Я. Р. Добыча полезных ископаемых со дна континентального шельфа автономным подводным комплексом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-1. – С. 318–329. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_31\_0\_318.

### Autonomous underwater vehicles for mineral mining on continental shelf

V. E. Kislyakov<sup>1</sup>, P. V. Katyshev<sup>1</sup>, N. A. Shkaruba<sup>1</sup>, V. S. Elizariyev<sup>1</sup>, Y. R. Bashkatova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract:** In the current conditions of depleted mineral resources on mainlands, it is high time to extract minerals on the continental shelf. Marine mining requires safe and reliable technologies and equipment such that emergencies and off-normal situations are excluded. Marine mineral mining operations use cardinally new engineering solutions, beyond the limits of the conventional technologies available for the onshore extraction of mineral resources. Mineral mining on the seabed and lifting to the water surface calls for the reliable equipment meant for safe and continuous operation. A promising trend in this area is manufacture and use of autonomous underwater vehicles for unmanned mining and haulage of minerals. Autonomous underwater vehicles can operate at great depths, in various climates and at low visibility, at minimized energy consumption and without add-ons. Autonomous underwater vehicles have a complex lifting facility, including gas generators, which are heavy and need permanent energy. This article discusses optimization of energy consumption for lifting an autonomous underwater vehicle in seafloor mineral mining by means of using gas after chemical reactions, including detonation of explosives.

**Key words:** minerals, marine mining, shelf, seafloor, autonomous underwater vehicle; explosive, underwater mining equipment systematization, lifting force, gas volume in explosive detonation.

**For citation:** Kislyakov V. E., Katyshev P. V., Shkaruba N. A., Elizariyev V. S., Bashkatova Y. R. autonomous underwater vehicles for mineral mining on continental shelf. *MLAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3-1):318–329. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_31\_0\_318.

## Введение

В настоящее время многие страны прикладывают все больше усилий для освоения минеральных ресурсов мирового океана благодаря мнению экспертов о том, что материковые запасы полезных ископаемых стремительно истощаются и возникает острая необходимость использовать полезные ископаемые акватории в сфере общественного производства [1, 2, 3, 4].

Освоение россыпных месторождений морского дна началось еще с античных времен. В XI веке до н. э. финикийцы для производства пурпурной краски использовали отложения морских ракушек, на островах Полинезии в VI веке до н. э. разрабатывались коралловые рифы, в III веке до н. э. ныряльщики с острова Халка в проливе Босфор с глубины 4 м добывали медную руду. Позже освоение минеральных ресурсов морского дна практически прекратилось. Лишь в Восточной

Азии добывали золото на пляжевых россыпях. С конца XIX столетия многие начинают обращать внимание на морское дно как на источник полезных ископаемых (в 1884 г. на побережьях Бразилии началось освоение таких россыпей тяжелых металлов, как ильменита, рутила, циркона, монацита), но промышленные масштабы подводная добыча приняла лишь в XX веке.

В настоящее время существует большое количество технологического оборудования для добычи полезного ископаемого со дна акватории [5, 6, 7,8,9]. В ходе обзора данного оборудования была создана систематизация средств подводной добычи по принципу подъема полезного ископаемого от подводного забоя до склада (рис. 1).

Поскольку методы разработки минерального сырья в океане полностью основываются на новых принципах добычи, они могут быть с самого начала автоматизированы, иными сло-



Рис. 1 Систематизация средств подводной добычи по принципу подъема полезного ископаемого

Fig. 1 Systematization of underwater mining facilities based on the principle of mineral recovery

вами, создание нового оборудования не будет ограничено рамками традиций [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

В качестве системы подъема горной массы со дна континентального шельфа весьма перспективными являются автономные модули, описание которых приведено в литературе [17,18]. Данные комплексы позволяют добывать полезное ископаемое со дна континентального шельфа без какой-либо связи с судном.

Технология отработки месторождений континентального шельфа с применением автономных комплексов выглядит следующим образом: открытая емкость, выполненная в виде грейферного ковша, опускается на место добычи полезного ископаемого. При полном опускании емкости на дно континентального шельфа срабатывает механизм полного закрытия ковша. В контейнере срабатывает автоматический датчик, оповещающий судно о местонахождении устройства,

и включает газогенератор, который, в свою очередь, заполняет эластичную полость, расплюснутую в контейнере, газом. Возникает выталкивающая сила, под действием которой контейнер начинает подниматься, и посредством механизма полного закрытия ковша происходит закрытие емкости и внедрение зубьев грейферного ковша в породу. При полном закрытии емкости под действием выталкивающей силы устройство поднимается на поверхность, и с помощью петель производится погрузка на судно [19].

Однако приведенные автономные комплексы имеют недостаток, затрудняющий их эксплуатацию при добыче полезного ископаемого: применение газогенератора и других приспособлений, повышающих металлоёмкость.

В данной статье предлагается техническое решение подъема автономного комплекса на поверхность за счет выделения газа химическими реагентами или при детонации взрывчатых

веществ. Принципиальная схема установки представлена на рис. 2.

### Методы

Предложенное устройство работает следующим образом. Комплекс опускают в водную среду с открытым ковшом. При опускании устройства на дно акватории, посредством внедрения механического датчика в породу, включается механизм полного закры-

тия ковша, тем самым происходит зачерпывание. Также при включении механического датчика срабатывает электродетонатор, инициирующий взрывчатое вещество. Во время детонации взрывчатого вещества выделяется газ. Газ, перемещаясь по патрубкам, заполняет гибкую полость. После заполнения гибкой полости возникает выталкивающая сила  $F_v$ , которая начинает выталкивать комплекс. После

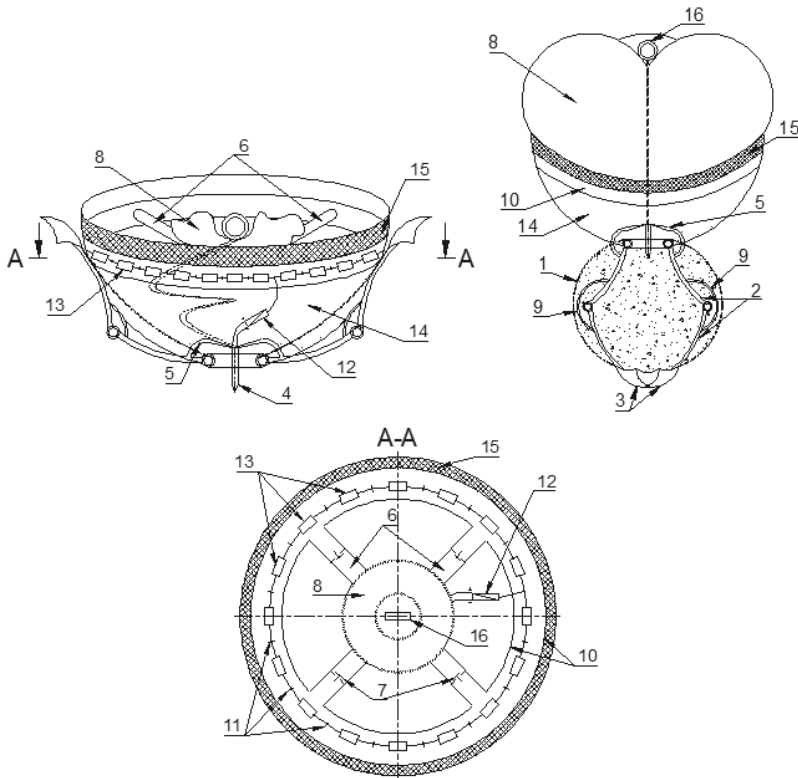


Рис. 2. Автономное устройство для подводной добычи со дна акватории: 1 – емкость, выполненная в виде грейферного ковша; 2 – стальные спицы; 3 – зубья; 4 – механический датчик; 5 – механизм полного закрытия ковша; 6 – патрубки; 7 – обратные клапаны; 8 – гибкая полость; 9 – гибкие тяги; 10 – защитный корпус; 11 – пиротехническое реле; 12 – электродетонатор; 13 – патронированный взрывчатый материал; 14 – подъемная секция; 15 – пористый материал; 16 – петля для подъема устройства на судно

Fig. 2. Autonomous device for underwater mining from the bottom of the water area: 1 – container made in the form of a grab bucket; 2 – steel spokes; 3 – teeth; 4 – mechanical sensor; 5 – bucket full closure mechanism; 6 – pipes; 7 – check valves; 8 – flexible cavity; 9 – flexible rods; 10 – protective housing; 11 – pyrotechnic relay; 12 – electric detonator; 13 – chambered explosive material; 14 – lifting section; 15 – porous material; 16 – loop for lifting the device to the ship

всплывания на поверхность комплекс загружается на судно.

Для оценки подъема устройства со дна акватории было проведено сравнение двух вариантов:

- подъем комплекса на поверхность с помощью выталкивающей силы, образующейся при наполнении гибкой полости, за счет выделения газа после детонации взрывчатого вещества;

- подъем комплекса на поверхность с помощью выталкивающей силы, образующейся при наполнении гибкой полости, за счет выделения газа, возникающего за счет химической реакции.

На основании закона Авогадро определяется количество газов для взрывчатых веществ и химических реагентов [20]. Согласно закону газы имеют одинаковый молярный объем 22,4 л/моль при приведении условий к нормальным (давление 101325 Па, температура 273 К°):

$$V = \frac{22,4 \cdot S_n}{M_{\text{вв}}}, \text{ л/г}, \quad (1)$$

где  $S_n$  — суммарное количество газов после химической реакции, моль;  $M_{\text{вв}}$  — молярная масса исходного вещества, г/моль.

Детонация взрывчатого вещества обладает рядом преимуществ: высокой скоростью реакции, относительно дешевой исходных продуктов. Однако остается главный недостаток: влияние ударной волны на корпус автономного устройства.

Рассматривается несколько реакций взрыва: аммонита 6ЖВ, тротила, аммиачной селитры и гексогена и др. (рис. 3).

Также было рассмотрено несколько вариантов химических веществ, выделяющих максимальный объем газа с единицы массы химического реагента и др. (рис. 4):

- азид натрия;
- гидрид лития;
- гидразин;
- карбонат аммония.

К недостаткам можно отнести значительную стоимость некоторых веществ, химические реагенты могут выделять токсичные и огнеопасные газы.

Большее количество газа выделяют гидрид лития и гидразин, например, при реакции 1 грамма гидрида лития с водой выделяется 2,8 л газа. Но они выделяют огнеопасный водород.

Рациональным вариантом наполнения гибкой полости газом является выделение газа с помощью химической реакции гидрида лития, даже несмотря на его огнеопасный газ — водород, т.к. водород не горит без доступа кислорода, что удовлетворяет условиям подводной добычи.

С учетом Архимедовой силы  $P_A$ , противоположно которой направлены сила тяжести  $G_T$  и сила сопротивления  $R_C$ , подъемная сила комплекса определяется из следующей зависимости:

$$F_{\text{п1}} = P_A - G_T - R_C, \text{ Н}, \quad (2)$$

где  $F_{\text{п1}}$  — подъемная сила, Н;  $P_A$  — выталкивающая сила, Н;  $G_T$  — сила тяжести, Н;  $R_C$  — сила сопротивления, Н.

Раскрывая формулу (2), получим:

$$F_{\text{п}} = \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot V_{\text{г}} - \rho_{\text{г}} \cdot V_{\text{г}} \cdot g = \rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}, \text{ Н/м}^3, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, Н/кг;  $V_{\text{г}}$  — объем газа, м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{г}}$  — плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Сила сопротивления жидкости движению комплекса прямо пропорциональна форме, размерам, положению по отношению к потоку, скорости движения и шероховатости поверхности.

Также на силу тяжести не влияют внешние факторы, поэтому используем удельную подъемную силу  $f$  [21]:

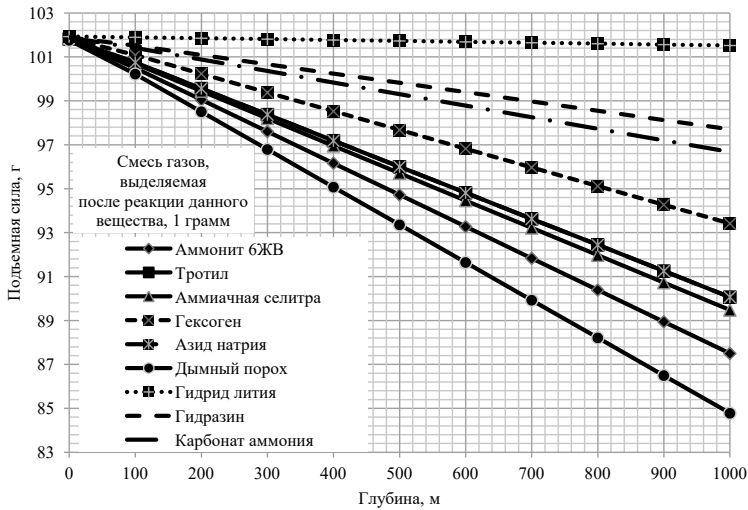


Рис. 3. Объем газов, выделяющихся после детонации взрывчатого вещества  
 Fig. 3. Volume of gases released after detonation of an explosive

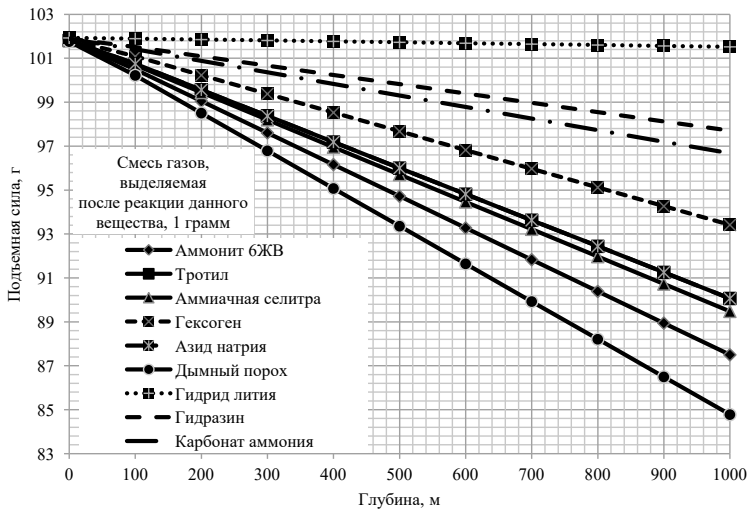


Рис. 4. Подъемная сила одного грамма газа, выделяемого после реакции вещества  
 Fig. 4. Lifting force of one gram of gas released after the reaction of the substance

$$f = \frac{F_{\text{п}}}{V_{\text{г}}}, \text{ Н/М}^3. \quad (4)$$

Из формул (3, 4) находим минимальный необходимый объем газа для поднятия груза:

$$V_{\text{г}} = \frac{F_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}}, \text{ М}^3. \quad (5)$$

Известно, что с увеличением глубины давление внешней среды на газ повышается, тем самым влияя на плотность газов.

Для заданных параметров температуры и давления при помощи уравнения Менделеева – Клапейрона может быть вычислена плотность газа [19]:

$$\rho_{\text{г}} = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}, \text{ кг/М}^3, \quad (6)$$

где  $P$  — абсолютное давление газа, Па;  $M$  — молярная масса, г/моль;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура газа в Кельвинах.

При детонации взрывчатых веществ или реакции химических реагентов выделяемые газы в большинстве случаев являются смесью различных газов.

Газовые смеси характеризуются концентрациями компонентов (молярными или массовыми). По закону Авогадро при равных условиях (при 0°C и 760 мм рт. ст.) объемный состав смеси газов приблизительно равен молярному, так как объем 1 моля идеального газа равен 22,41 м<sup>3</sup> [22].

Молекулярная масса смеси газов  $M_{см}$  при известном молярном составе смеси составит:

$$M_{см} = \frac{y_1 \cdot M_1 + y_2 \cdot M_2 + \dots + y_n \cdot M_n}{100}, \text{ г/моль}, \quad (7)$$

где  $y_1, y_2, \dots, y_n$  — молярные (объемные) доли компонентов, %;  $M_1, M_2, \dots, M_n$  — молекулярные массы компонентов, г/моль.

Плотность смеси определяется в соответствии со значением молекулярной массы [23]  $M_{см}$ :

$$\rho_{см} = \frac{M_{см}}{22,41}, \text{ кг/м}^3. \quad (8)$$

На основании формул (1, 3, 8) была построена зависимость подъемной силы, выраженной в граммах для большей наглядности, от вида и массы взрывчатого вещества (рис. 4, 5).

## Результаты

На диаграмме (рис. 3) видно, что наибольшее количество газа при детонации самостоятельного взрывчатого вещества выделяет тротил. При детонации 1 грамма тротила выделяется 1,09 л газа. Также у тротила есть ряд преимуществ, полезных при добыче ископаемых со дна акватории: данное взрывчатое вещество относительно неприхотливо в хранении по сравнению с другими ВВ, и оно абсолютно водонепроницаемое.

Главное достоинство выделения газа с помощью химической реакции — это отсутствие ударной волны.

На графике (рис. 4) видно, что при увеличении глубины подъемная сила газов уменьшается, например, у 1 грамма газа дымного пороха при глубине 200 м подъемная сила составляет 98,6 г, а при 800 м уменьшается до 88,3. Наиболее независимая от глубины подъемная сила присутствует у водорода, исходным веществом которого является гидрид лития.

Текущая формула подъемной силы газа будет иметь вид:

$$f_T = Q_B \cdot \frac{22,4 \cdot S_n}{M_B} \cdot \left[ \left( \frac{\rho_{ож}}{1 - \frac{(\rho_{ож} \cdot g \cdot H_B) - P_A}{E}} \right) - \left( \frac{(\rho_{ож} \cdot g \cdot H_B) \cdot M_{см}}{R \cdot T} \right) \right], \text{ Н}, \quad (9)$$

где  $Q_B$  — масса исходного реагента для инициирования газов, г;  $\rho_{ож}$  — плотность воды при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $H_B$  — глубина нахождения газа, м;  $P_A$  —

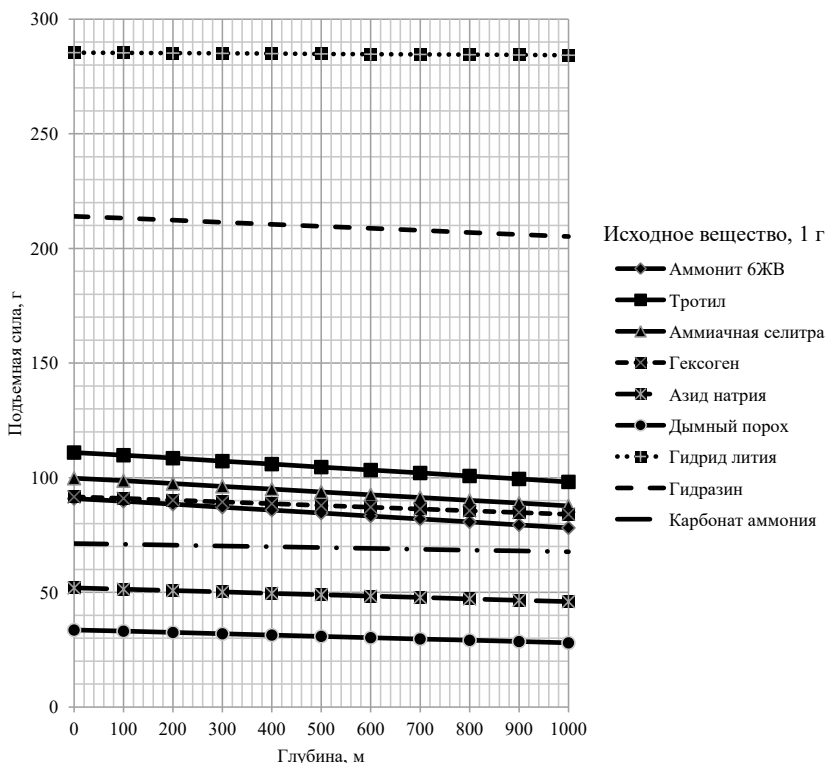


Рис. 5 Подъемная сила газов, выделяемых с одного грамма вещества  
 Fig. 5 Lifting force of gases released from one gram of the substance

давление окружающей среды (атмосферное), Па;  $E$  — объемный модуль упругости воды, Па;  $E = 2,15 \cdot 10^9$  Па;  $R$  — универсальная газовая постоянная,

$$R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}; T — \text{температура}$$

газа, К.

Подъемная сила газов, выделяемых от одного грамма гидразина при глубине 200 метров, равна 212,34 г, а при глубине 1000 м — 205,17. Наиболее оптимальным вариантом является использование гидрида лития в качестве газогенерирующего вещества.

### Обсуждение результатов

В представленной статье рассмотрены два основных процесса образования газа для заполнения гибкой

полости автономного добычного комплекса грейферного типа, необходимого при всплывании его на поверхность от подводного забоя, а именно:

- газ, образующийся в результате детонации взрывчатого вещества;
- газ, образующийся в результате химической реакции.

Сравнивая представленные взрывчатые вещества, можно сделать вывод, что наибольшее количество газа выделяется в результате детонации тротила (1 грамм выделяет 1,09 л газа), однако у данного способа выделения газов есть недостаток — присутствие ударной волны. Для использования взрывчатых веществ необходимо укреплять добычное оборудование, что приведет к увеличению металлоёмкости.



Наиболее безопасным в плане производства добычных работ является процесс образования газа в результате химической реакции, к достоинству которого можно отнести отсутствие ударной волны.

В свою очередь, при сравнении вариантов образования газа учитывалась подъемная сила, которая зависит от глубины разрабатываемого месторождения, так у газов дымного пороха подъемная сила 1 грамма газа при глубине 200 м равна 98,6 г, а при 800 м — 88,3 г.

Наибольшая подъемная сила, образующаяся в результате химической реакции вне зависимости от глубины, присутствует у водорода, исходным

веществом которого является гидрид лития.

### **Заключение**

В результате исследования был показан новый способ поднятия автономного комплекса со дна акватории, было проведено сравнение двух вариантов выделения газа. После подробного изучения и построения графиков зависимостей выявлено, что оптимальным вариантом является химическая реакция. Было выбрано более эффективное газогенерирующее химическое вещество в качестве гидрида лития, так как оно выделяет наибольшее количество газов при химической реакции.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Добрецов В. Б.* Освоение минеральных ресурсов шельфа. — Л.: Недра, 1980. — 272 с.
2. *Бондаренко А. А.* Подводная добыча полезных ископаемых [Электронный ресурс] // Стройка : [сайт]. [2000]. URL: <http://library.stroit.ru/articles/podvod/index.html> (дата обращения: 12. 10. 2015).
3. *Hein JR, Mizell K, Koschinsky A, Conrad TA* (2013) Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews* 51: 1–14.
4. *Volkman SE, Lehnen F* (2017) Production key figures for planning the mining of manganese nodules. *Marine Georesources & Geotechnology* 36: 360–375.
5. *Bashir M. B., Kim S. H., Kiosidou E., Wolgamot H., Zhang W.*, (2012). A Concept for seabed Rare Earth Mining in the Eastern South Pacific. The LRET Collegium, 2012, Series 1. Available online at: [https://www.southampton.ac.uk/assets/imported/transforms/content-block/UsefulDownloads\\_Download/7C8750BCBB64FBAAF2A13C4B8A7D1FD/LRET%20Collegium%202012%20Volume%201.pdf](https://www.southampton.ac.uk/assets/imported/transforms/content-block/UsefulDownloads_Download/7C8750BCBB64FBAAF2A13C4B8A7D1FD/LRET%20Collegium%202012%20Volume%201.pdf).
6. *Birney K.* (2006). Potential Deep-Sea Mining of Seafloor Massive Sulphides: A Case Study in Papua New Guinea. Master's thesis, University in Isla Vista, Isla Vista, CA.
7. *Boschen R. E., Rowden A. A., Clark M. R., Gardner J. P. A.* Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: a review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies // *Ocean & Coast. Manage*, 2013 No. 84, pp. 54–67. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2013.07.005.
8. *Petersen S and 5 coauthors* (2016) News from the seabed — geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Marine Policy* 70: 175–187
9. *Wynn RB and 13 coauthors* (2014) Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Marine Geology* 352: 451–468
10. *Давидович А. П., Капустин А. А., Михайлов В. И.* Подводная добыча песка и гравия за рубежом. — М.: ВНИИЭСМ, 1975. — 254 с.

11. Козлов М. Ю., Луконина О. А., Насонов Д. А. Технические средства для освоения глубоководных месторождений дна Мирового океана. Материалы XII международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». Москва, 2015.

12. Вильмис А. Л. Методическое обоснование параметров глубоководного подъема. Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва : РГГРУ, 5–7 апреля, 2017 г.): в 2 т.: доклады / — Т. 1. — М.: МГРИ-РГГРУ, 2017. — 516 с. С.384–385

13. Тарасов Ю. Д. Комплексы для добычи железомарганцевых конкреций с морского дна / Ю. Д. Тарасов // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 2. — С. 17–25.

14. Дробаденко В. П., Малухин Н. Г., Луконина О. А., Козлов М. Ю. Обоснование технологических параметров эжекторной добычи магнетитовых песков в шельфовой зоне. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 11. Гидромеханизация, 2015.

15. Кириченко Е. А. Моделирование динамических процессов в глубоководных пневмогидротранспортных системах: моногр./ Е. А. Кириченко, О. Г. Гоман, В. Е. Кириченко, А. В. Романюков. -Д.: Национальный горный университет, 2012. — 268 с.

16. Андреев С. И., Бабаева С. Ф. Минеральные ресурсы Мирового океана — прагматическая реальность обозримого будущего или призрак геополитического миража. ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И. С. Грамберга, Санкт-Петербург, 2014 г.

17. Патент РФ № 2539508, 21.11.2013. Кисляков В. Е., Маликова К. В., Катышев П. В. Автономное устройство для подъема полезных ископаемых со дна акватории. 2015, Бюл. № 2.


18. Kislyakov V. E. Modern Technologies of mineral resources development. Collection of articles. Saarbrucken, Germany: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2012. 148 p.

19. Кисляков В. Е., Катышев П. В., Баранова И. А. Основы новой технологии разработки грунтов шельфа на больших глубинах // Горная промышленность. — 2013. — № 109. — С. 96–99.

20. Глинка Н. Л. Общая химия. 22-я ред. — Л.: Химия, 1977. с. 18–19.

21. Таланов А. В. Все о воздушных шарах — М.: Астрель, 2002. — 271 с.

22. Гиматудинов Ш. К., Ширковский А. И. Физика нефтяного и газового пласта. — М.: Недра, 1982. — 311 с.

23. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики. — Санкт-Петербург: Лань, 2006. — 518 с. 

## REFERENCES

1. Dobrecov V. B. *Osvoenie mineral'nyh resursov shel'fa* [Development of shelf mineral resources]. Leningrad: Nedra, 1980. 272 p. [In Russ]

2. Bondarenko A. A. *Podvodnaya dobycha poleznyh iskopaemykh* [Underwater extraction of minerals] [Elektronnyj resurs]. Strojka : [sajt]. [2000]. URL: <http://library.stroit.ru/articles/podvod/index.html> (data obrashcheniya: 12. 10. 2015). [In Russ]

3. Hein JR, Mizell K, Koschinsky A, Conrad TA (2013) Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews* 51: 1–14.

4. Volkmann SE, Lehnen F (2017) Production key figures for planning the mining of manganese nodules. *Marine Georesources & Geotechnology* 36: 360–375.

5. Bashir M. B., Kim S. H., Kiosidou E., Wolgamot H., Zhang W., (2012). A Concept for seabed Rare Earth Mining in the Eastern South Pacific. The LRET Collegium, 2012, Series 1. Available online at: <https://www.southampton.ac.uk/assets/imported/transforms/>

content-block/UsefulDownloads\_Download/ 7C8750BCBBB64FBAAF2A13C4B8A7D1FD/LRET%20Collegium%202012 %20Volume%201.pdf. [In Russ]

6. Birney K. (2006). Potential Deep-Sea Mining of Seafloor Massive Sulphides: A Case Study in Papua New Guinea. Master's thesis, University in Isla Vista, Isla Vista, CA.

7. Boschen R. E., Rowden A. A., Clark M. R., Gardner J. P. A. Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: a review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies. *Ocean & Coast. Manage*, 2013 no. 84, pp. 54–67. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2013.07.005.

8. Petersen S and 5 coauthors (2016) News from the seabed geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Marine Policy* 70: 175–187.

9. Wynn RB and 13 coauthors (2014) Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Marine Geology* 352: 451–468.

10. Davidovich A. P., Kapustin A. A., Mihajlov V. I. *Podvodnaya dobycha peska i graviya za rubezhom* [Underwater extraction of sand and gravel abroad]. Moscow: VNIIESM, 1975. 254 p. [In Russ]

11. Kozlov M. Yu., Lukonina O. A., Nasonov D. A. *Tekhnicheskie sredstva dlya osvoeniya glubokovodnyh mestorozhdenij dna Mirovogo okeana* [Technical means for the development of deep-water deposits of the bottom of the World Ocean]. *Materialy XII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Novye idei v naukah o Zemle»*. Moscow, 2015. [In Russ]

12. Vil'mis A. L. *Metodicheskoe obosnovanie parametrov glubokovodnogo pod'ema* [Methodological substantiation of the parameters of deep-water ascent]. *Materialy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Novye idei v naukah o Zemle»* (Moskva : RGGRU, 5–7 aprelya, 2017 g.): v 2 t.: doklady. T. 1. Moscow: MGRI-RGGRU, 2017. 516 s. S.384–385 [In Russ]

13. Tarasov Yu. D. Complexes for the extraction of ferromanganese nodules from the seabed. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2011. no. 2. pp. 17–25. [In Russ]

14. Drobadenko V. P., Maluhin N. G., Lukonina O. A., Kozlov M. Yu. Substantiation of technological parameters of ejector extraction of magnetite sands in the shelf zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* Otdel'nyy vypusk no. 11. Gidromekhanizaciya, 2015. [In Russ]

15. Kirichenko E. A., Goman O. G., Kirichenko V. E., Romanyukov A. V. *Modelirovanie dinamicheskikh processov v glubokovodnyh pnevmogidrotransportnyh sistemah* [Modeling of dynamic processes in deep-water pneumatic hydrotransport systems]: monogr. D.: Nacional'nyy gornyy universitet, 2012. 268 p. [In Russ]

16. Andreev S. I., Babaeva S. F. *Mineral'nye resursy Mirovogo okeana pragmaticheskaya real'nost' obozrimogo budushchego ili prizrachnyy geopoliticheskij mirazh* [Mineral resources of the World Ocean are a pragmatic reality of the foreseeable future or an illusory geopolitical mirage]. FGUP «VNIIOkeangeologiya im. I. S. Gramberga, Sankt-Peterburg, 2014. [In Russ]

17. *Patent RF no. 2539508, 21.11.2013*. Kislyakov V. E., Malikova K. V., Katyshev P. V. Avtonomnoe ustrojstvo dlya pod'ema poleznyh iskopaemyh so dna akvatorii. 2015, Byul. no. 2. [In Russ]

18. Kislyakov V. E. *Modern Technologies of mineral resources development. Sollecion of articles*. Saarbrucken, Germany: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2012. 148 p.

19. Kislyakov V. E., Katyshev P. V., Baranova I. A. Foundations of a new technology for the development of shelf soils at great depths. *Gornaya promyshlennost'*. 2013. no. 109. pp. 96–99. [In Russ]

20. Glinka N. L. *Obshchaya himiya* [General chemistry]. 22–ya red. Leningrad: Himiya, 1977. pp. 18–19. [In Russ]

21. Talanov A. V. *Vse o vozduzhnyh sharah* [All about balloons]. Moscow: Astrel', 2002. 271 s. [In Russ]
22. Gimatudinov Sh. K., Shirkovskij A. I. *Fizika neftyanogo i gazovogo plasta* [Physics of oil and gas reservoir]. Moscow: Nedra, 1982. 311 p. [In Russ]
23. Frish S. E., Timoreva A. V. *Kurs obshchej fiziki* [Course of General Physics]. Sankt-Peterburg: Lan', 2006. 518 p. [In Russ]

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Кисляков Виктор Евгеньевич* — докт. техн. наук, проф., кафедры «Открытые горные работы», vkislyakov@sfu-kras.ru;  
*Катышев Павел Викторович* — канд. техн. наук, доцент кафедры «Открытые горные работы». BestPavel1989@mail.ru;  
*Шкаруба Наталья Александровна* — аспирантка кафедры «Открытые горные работы». nshkaruba@sfu-kras.ru;  
*Елизарьев Владимир Сергеевич* — студент кафедры «Открытые горные работы». vladimir16elizarev@mail.ru;  
*Башкатова Яна Руслановна* — аспирантка кафедры «Открытые горные работы». bashkatova.yana@yandex.ru;  
Сибирский федеральный университет, Институт горного дела, геологии и геотехнологий, Красноярск, Москва.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kislyakov V. E.*, Dr. Sci. (Eng.), professor of the Department "Open pit mining", vkislyakov@sfu-kras.ru;  
*Katyshev P. V.*, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Department "Open pit mining", BestPavel1989@mail.ru;  
*Shkaruba N. A.*, postgraduate student of the Department "Open pit mining". nshkaruba@sfu-kras.ru;  
*Elizariiev V. S.*, student of the Department "Open pit mining". vladimir16elizarev@mail.ru;  
*Bashkatova Y. R.*, postgraduate student of the Department "Open pit mining". bashkatova.yana@yandex.ru;  
Siberian Federal University, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Krasnoyarsk, Russia.

Получена редакцией 08.10.2020; получена после рецензии 01.03.2021; принята к печати 10.02.2021.  
Received by the editors 08.10.2020; received after the review 01.03.2021; accepted for printing 10.02.2021.

