Недропользование. 2025. Т. 25, № 3. С.271-281. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.18

ISSN 2712-8008
Том / Volume 25 №3 2025
Домашняя страница журнала: http://vestnik.pstu.ru/geo/

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.277.3:622.363.2
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2025

Исследование газового фактора при разработке карналлитовой залежи методом подземного растворения на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей

С.С. Андрейко[1], А.В. Зайцев[1], А.В. Пугин[1], В.О. Лядов[1], Д.В. Поповичев[2]

[1]Горный институт УрО РАН (Российская Федерация, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А)
[2]ВНИИ Галургии (Российская Федерация, 190103, г. Санкт-Петербург, ул. 10-я Красноармейская, 22, лит. А)

Study of the Gas Factor during the Development of a Carnallite Deposit by the Underground Solution Method in the Territory of the Verkhnekamskoye Potassium-Magnesium Salt Deposit

Sergei S. Andreiko[1], Artem V. Zaitsev[1], Aleksei V. Pugin[1], Vladimir O. Lyadov[1], Denis V. Popovichev[2]

[1]Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaya st., Building A, Perm, 614007, Russian Federation)
[2]JSC VNII Galurgii (22-A 10th Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190103, Russian Federation)

Получена / Received: 05.03.2025. Принята / Accepted: 19.09.2025. Опубликована / Published: 24.10.2025

Ключевые слова:
рассолопромысел, подземное растворение, карналлит, рассол, подземная камера, горючие газы, фазовый состав, гидравлическая сеть, барьеры безопасности.

Технология подземного растворения позволяет отрабатывать залежи водорастворимых руд на участках со сложным геологическим строением, где разработка месторождения шахтным способом не отвечает требованиям безопасности. На территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) продуктивные пласты отличаются небольшой глубиной залегания и повышенной газоносностью. Изучен газовый фактор на этапе проектирования опытно-промышленных испытаний технологии подземного растворения карналлитовой залежи в условиях Верхнекамского месторождения солей. На данном участке планируется к испытанию технология гидровруба с использованием сдвоенной камеры растворения и ступенчатой отработкой залежи. Проведены предварительные оценки возможных газовыделений в подземную камеру растворения. Определен наиболее вероятный компонентный состав газов и их фазовых состояний на каждом этапе испытаний. Выявлено, что преимущественно газовую фракцию будут составлять метан, водород и азот, из которых опасность представляют первые два, обладающие свойством воспламенения. Исследования растворимости газов в рассоле при условиях его нахождения в подземной камере и на поверхности показали, что большей частью газы будут находиться в свободном виде, скапливаясь под кровлей подземной камеры. Значительно меньшая часть их будет растворена в рассоле. Не исключается их нахождение в рассоле и в нерастворителе (дизельное топливо) в пузырьковом виде. Выполнен анализ наиболее вероятных сценариев попадания газов из подземной камеры в гидравлическую сеть поверхностного комплекса рассолодобычи. Возможно поступление растворенных и пузырьковых газов в линию отбора рассола с аккумуляцией в приемных емкостях. Наибольшую опасность представляет собой поступление свободных газов в линию нерастворителя при его извлечении из подземной камеры во время смены эксплуатационной ступени с последующей аккумуляцией в сепарационной емкости. В результате анализа определены участки, которыми целесообразно ограничить распространение газов по трактам гидравлической сети. Разработаны технические барьеры безопасности, которые в совокупности с организационными мероприятиями позволят снизить риски негативных проявлений газового фактора и обеспечить необходимую безопасность ведения работ.

Keywords:
brine operations, underground dissolution, carnallite, brine, underground chamber, flammable gases, phase composition, hydraulic network, safety barriers

Underground dissolution technology allows for the development of water-soluble ore deposits in areas with complex geological structures, where mining does not meet safety requirements. In the area of the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit, productive layers are characterized by a shallow depth and increased gas content. This article is devoted to the study of the gas factor at the design stage of pilot industrial tests of the technology of underground dissolution of a carnallite deposit under the conditions of the Verkhnekamskoye salt deposit. At this site, it is planned to test the hydraulic cutting technology using a double dissolution chamber and stepwise development of the deposit. Preliminary assessments of potential gas emissions into the underground dissolution chamber were conducted. The most probable gas composition and phase states at each stage of testing were determined. It was found that the gas fraction will predominantly consist of methane, hydrogen and nitrogen, of which the first two are dangerous, as they have flammable properties. Studies of gas solubility in brine, both in the underground chamber and on the surface, showed that most of the gases will be free, accumulating under the roof of the underground chamber. A significantly smaller portion will be dissolved in the brine. It is possible that they are present in brine and in a blanket (diesel fuel) in a bubbly form. An analysis of the most probable scenarios for gases entering the hydraulic network of a surface brine production complex from an underground chamber was carried out. Dissolved and bubbly gases may enter the brine extraction line and accumulate in receiving tanks. The greatest danger is the entry of free gases into the diesel fuel line during its extraction from the underground chamber in the process of a changeover of the operating stage, followed by accumulation in the separation tank. Sections have been identified where it is advisable to limit the spread of gases along the hydraulic network paths. Technical safety barriers have been developed, which, in combination with organizational measures, will reduce the risk of negative gas factor manifestations and ensure the necessary safety of work.

Андрейко Сергей Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Геотехнологические процессы и рудничная газодинамика» (тел.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: ssa@mi-perm.ru). Контактное лицо для переписки.
Зайцев Артем Вячеславович – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе (e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru).
Пугин Алексей Витальевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (e-mail: dr.alexpugin@gmail.com).
Лядов Владимир Олегович – инженер (e-mail: Minevladimir1@gmail.com).
Поповичев Денис Викторович – директор проектной части (e-mail: d-popovichev@ya.ru).

Sergei S. Andreiko (Author ID in Scopus: 6506180352, ORCID: 0000-0002-3524-8650) – Doctor of Engineering, Professor, Head of Laboratory of Geotechnological Processes and Mine Gas Dynamics (tel.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: ssa@mi-perm.ru). The contact person for correspondence.
Artem V. Zaitsev (Author ID in Scopus: 57213120380, ORCID: 0000-0002-2314-0482) – Doctor in Engineering, Deputy Director for Research (e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru).
Aleksei V. Pugin (Author ID in Scopus: 15729767700, ORCID: 0000-0002-3815-5003) – PhD in Engineering, Senior Researcher (e-mail: dr.alexpugin@gmail.com).
Vladimir O. Lyadov (Author ID in Scopus: 58781901100, ORCID: 0009-0009-4728-3400) – Engineer (e-mail: Minevladimir1@gmail.com).
Denis V. Popovichev – Director of the Design Department (e-mail: d-popovichev@ya.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Исследование газового фактора при разработке карналлитовой залежи методом подземного растворения на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / С.С. Андрейко, А.В. Зайцев, А.В. Пугин, В.О. Лядов, Д.В. Поповичев // Недропользование. – 2025. – Т.25, №3. – С. 271–281. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.18

Please cite this article in English as:
Andreiko S.S., Zaitsev A.V., Pugin A.V., Lyadov V.O., Popovichev D.V. Study of the Gas Factor during the Development of a Carnallite Deposit by the Underground Solution Method in the Territory of the Verkhnekamskoye Potassium-Magnesium Salt Deposit. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol.25, no.3, pp. 271-281. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.18

Введение

Повышенная растворимость соляных пород предопределяет возможности их извлечения из земных недр в жидкой фазе. Метод подземного растворения является одним из наиболее ранних способов бесшахтной добычи водорастворимых руд и применяется в тех случаях, когда разработка залежи шахтным способом невозможна либо нерентабельна. Наиболее часто подземным растворением добываются галит, сильвинит [1], реже – карналлит и бишофит [2]. Последние отличаются существенно большей растворимостью в воде и используются в качестве сырья для получения магния.

Технология подземного растворения в последнее время рассматривается как перспективная не только для добычи полезного ископаемого, но и для формирования газовых хранилищ, например, водорода, в соляных пластах [3–7], поскольку соли обладают низкой проницаемостью и высокой пластичностью, что способствует залечиванию трещин [8]. Разрабатываются различные математические модели растворения [9, 10] и способам быстрого формирования полостей в соляных породах [11, 12]. Исследуется микробиом подземных камер в соляных породах [13] и его влияние на хранение газов [14].

Добыча соляных пород методом растворения осложняется рядом факторов, в существенной мере определяющих технологию разработки залежи:

– повышенная газоносность пород по свободным и связанным газам, в числе прочего увеличивающая риски возникновения газодинамических явлений [15–17];

– высокая гигроскопичность в совокупности с реологическими свойствами [18–21], во многом определяющие формообразование камеры и устойчивость ее сводов в процессе растворения залежи.

Несмотря на то, что технология подземного растворения солей хорошо разработана, широко освещена в литературе [22–25] и имеет многолетний опыт применения, в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС), отличающегося небольшой глубиной залегания полезного ископаемого (в среднем 200-400 м) и малой мощностью водозащитной толщи, оба фактора играют особую роль в риске возможных аварий [26].

Вопросам поддержания геомеханической устойчивости подземной камеры растворения и перекрывающего массива пород в литературе уделяется достаточно внимания [27–29]. В нормативной документации, регламентирующей ведение рассолодобычных работ [30, 31] заложены мероприятия, компенсирующие риски неконтролируемого формообразования камеры, приводящего к разрушению водозащитной толщи и оседаниям земной поверхности, такие как маркшейдерский мониторинг земной поверхности и гидролокационная съемка выработки через эксплуатационные скважины в периоды остановок.

Растворимости газов в рассолах также уделяется большое внимание в литературе [32–35]. Компенсирующие мероприятия же по газовому фактору в нормативной документации отсутствуют, возможно по той причине, что данные риски принимались незначительными в галитовых и сильвинитовых залежах, преимущественно разрабатываемых ранее способом подземного растворения.

Сильвинитовые и карналлитовые пласты ВКМКС имеют достаточно высокую газонасыщенность, что подтверждается многолетними исследованиями. Причем в составе газовой фракции преобладают горючие и взрывоопасные газы (метан и водород), поэтому данный фактор выходит на первый план при обеспечении безопасности рассолодобычных работ. В настоящей статье излагаются результаты исследования возможных газовыделений в подземную камеру при растворении карналитовой залежи на участке опытно-промышленных испытаний геотехнологии, выполненные на предпроектной стадии, а также анализа возможных путей распространения и мест аккумуляции газов в гидравлической сети поверхностного комплекса. Полученные оценки и выводы послужили основой для разработки технических и организационных барьеров безопасности.

1. Геотехнологические особенности отработки карналлитовой залежи методом подземного растворения на участке ВКМКС

В пределах ВКМКС существуют участки с аномальными особенностями водозащитной толщи [36], где добыча запасов калийных и калийно-магниевых руд шахтным способом запрещена согласно технологическому регламенту [37], однако возможна способом подземного растворения через скважины с поверхности.

Проектный геологический разрез одного из подобных участков, в пределах которого предполагается проведение опытно-промышленных испытаний технологии подземного растворения, представлен на рис. 1. Потенциально перспективными к отработке являются пласты карналлитовой породы сильвинито-карналлитовой зоны В, Г и Д, разделенные междупластьями В–Г и Г–Д каменной соли с включениями карналлита и сильвина. Средние мощности перспективных пластов составляют: пласт В – 9,5 м, Г – 21,4 м, Д – 26,0 м, междупластьев – до 1,0 м. Подстилает карналлитовые пласты сильвинитовая пачка (переслаивание пластов сильвинита Б, А и КрI с междупластьем каменной соли А-КрI).

Наиболее приемлемым для извлечения карналлита в геологических условиях ВКМКС представляется управляемое подземное выщелачивание с технологией гидровруба, впервые предложенный французом Ф. Женро [22] в 1907 г. Технология предполагает бурение двух вертикальных добычных скважин, каждая из которых оборудована системой трех рабочих колонн (см. рис. 1). Центральная и внутренняя с большей глубиной заложения используются для подачи растворителя в пласт и извлечения рассола. Третья, внешняя, используется для подачи нерастворителя под кровлю формируемой камеры и доходит лишь до кровли карналлитового пласта Д. В продуктивных карналлитовых пластах и ниже до забоя скважина имеет открытый ствол.

В качестве нерастворителя используется жидкость с меньшей плотностью относительно рассола и растворителя и несмешивающаяся с ними. Традиционно используются продукты нефтеперерабатывающей отрасли, например, дизельное топливо.

Процесс рассолодобычи подразделяется на этапы: подготовительный и эксплуатационный (рис. 2). В начале подготовительного этапа производится размыв зумпфа каждой скважины с формированием гидровруба в подстилающей пачке солей путем подачи растворителя по центральной колонне и отведением некондиционного рассола из камеры по внутренней (межтрубное пространство). Такой режим называется прямоточным. В результате в забое каждой скважины формируется конусообразная одиночная камера с широким основанием в кровле пласта. При подаче

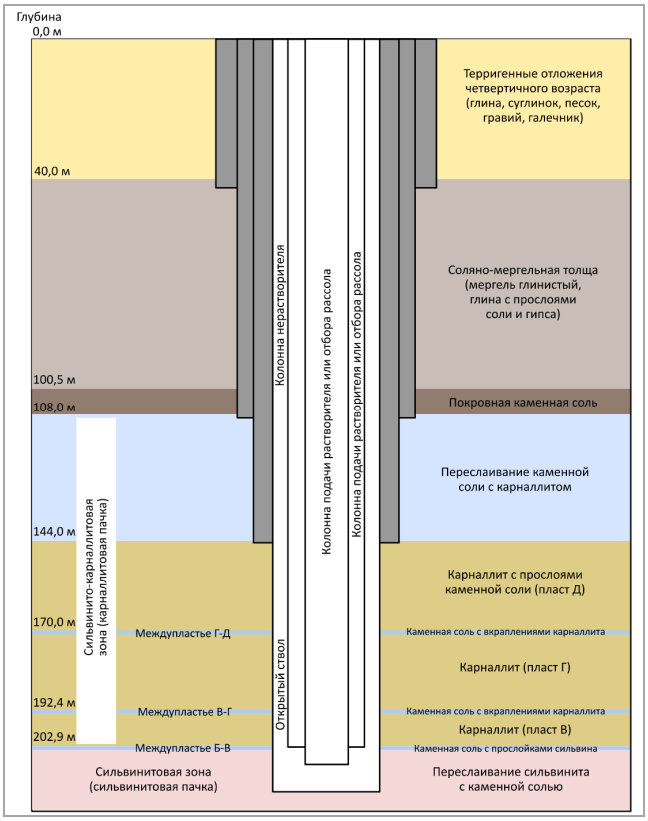


Рис. 1. Проектный геологический разрез
с конструкцией добычной скважины

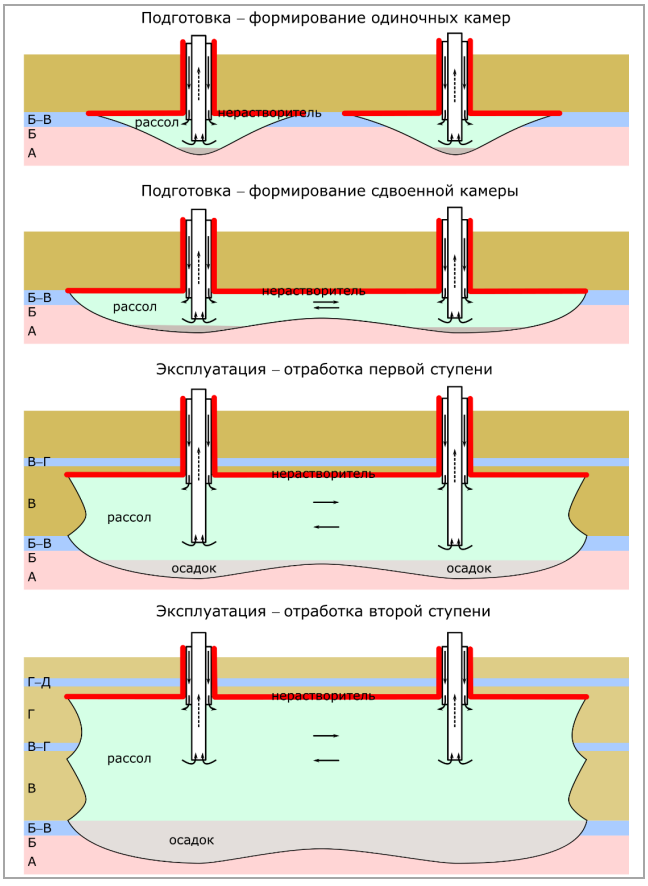


Рис. 2. Этапы процесса рассолодобычи

нерастворителя последний «всплывает» под кровлю выработки, предотвращая интенсивное растворение вышележащей породы.

Спустя некоторое время производится переключение режима на противоточный: подача растворителя производится через внутреннюю колонну (межтрубное пространство) с отбором рассола через центральную. Формообразование камеры в таком случае будет происходить преимущественно в латеральном направлении [37]. В дальнейшем две камеры собьются, формируя единую подземную камеру растворения, по достижении проектных размеров которой начнется эксплуатационный этап растворения.

Размыв канала сбойки двух камер при слиянии их в одну производится с использование обеих скважин, путем подачи растворителя по внутренней колонне одной скважины и отбору рассола через центральную колонну второй. Равномерность размыва обеспечивается периодическим реверсированием потоков: часть времени для отбора рассола используется одна скважина, а для подачи растворителя другая, в следующий период – наоборот.

Технология размыва подразумевает ступенчатую отработку карналлитовой залежи. По достижении проектных размеров потолочины подземной камеры рабочие колонны труб в скважинах поднимаются на высоту первой эксплуатационной ступени и вновь производится латеральный размыв с формированием камеры уже по пласту В полезного ископаемого. Скважины работают в режиме противотока с периодическим реверсированием.

Управление кровлей выработки проводится путем поддержания необходимого уровня нерастворителя, в качестве которого предполагается применение дизельного топлива. После отработки первой ступени производится повторный подъем труб на уровень второй эксплуатационной ступени и операции растворения повторяются в пределах пласта Г.

Поскольку технология подземного растворения в условиях ВКМКС используется впервые, при проведении опытно-промышленных испытаний апробируются различные технологические режимы. Так, подготовительный размыв предполагается производить с использованием в качестве растворителя пресной холодной воды, а эксплуатацию в начальный период формирования первой эксплуатационной ступени – на горячей пресной воде с температурой до +95 °С, после – специально приготовленным горячим (с температурой до +95 °С) маточным рассолом, насыщенным по $MgCl_2$. На последней стадии эксплуатационного этапа предполагается повторно использовать часть отобранного из подземной камеры кондиционного рассола для изготовления растворителя. При таком составе маточного рассола каменная соль, сильвинит и нерастворимые примеси выпадут в осадок, выстилающий подошву камеры [38]. Вывоз извлеченного из недр рассола с площадки рассолопромысла на обогатительную фабрику предполагается выполнять автоцистернами.

Принципиальные схемы технологического процесса подземного растворения на различных этапах ОПИ представлены на рис. 3, 4. В поверхностной гидравлической сети существует три линии движения флюидов: (а) подготовки и подачи растворителя в скважины; (б) отбора рассола из скважин; (в) подачи и извлечения нерастворителя. При переходе с подготовки на первую эксплуатационную ступень и с первой ступени на вторую, то есть при каждом подъеме труб давление на скважинах сбрасывается до гидростатического и нерастворитель извлекается из подземной камеры в специальную сепарационную емкость, позволяющую отделить его от случайно заброшенного вместе с ним рассола (см. рис. 4).

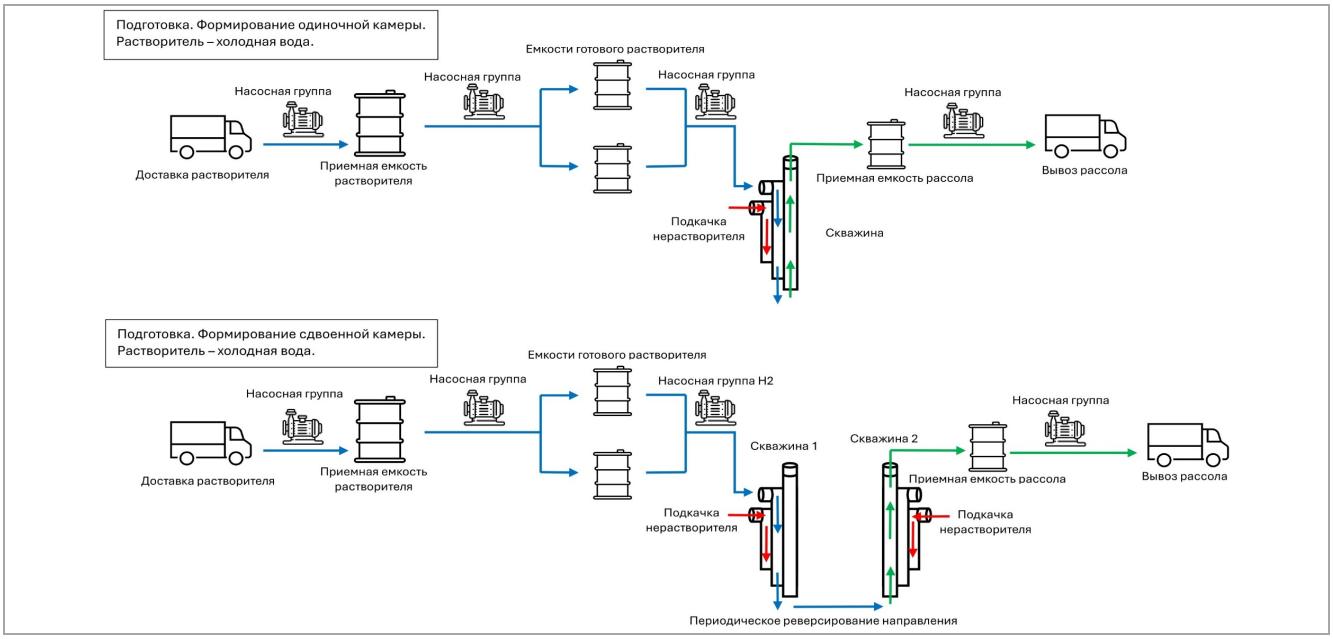


Рис. 3. Принципиальные схемы технологического процесса при формировании одиночных камер (вверху) и сдвоенной камеры (внизу)

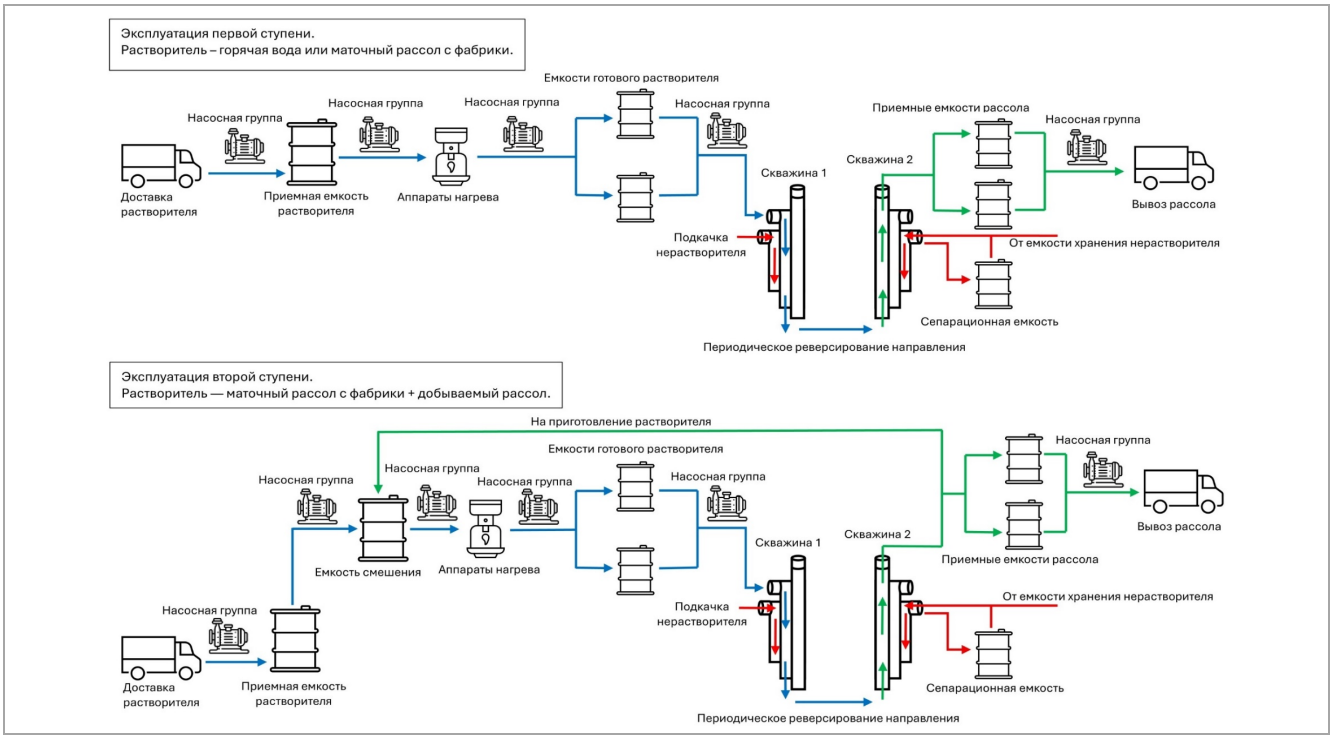


Рис. 4. Принципиальные схемы технологического процесса при эксплуатации первой ступени (вверху) и второй ступени (внизу)

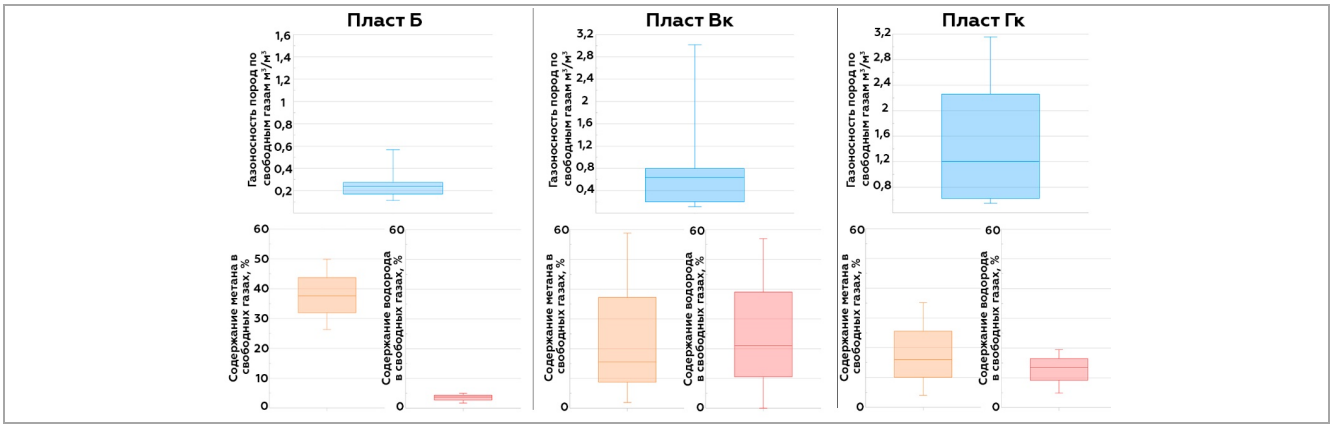


Рис. 5. Сводные данные показателей газоносности по свободным газам и содержания в них горючих газов рассматриваемых пластов

После каждого подъема труб согласно [31] должна производиться гидролокационная съемка подземного пространства камеры растворения для оценки ее формообразования. В последующем нерастворитель из сепарационной емкости направляется в скважины для повторного использования, где по мере необходимости дополняется из емкости хранения, также расположенной на площадке рассолопромысла.

Повышенная газоносность растворяемых пластов карналлита может приводить к попаданию газовой фракции в поверхностную гидравлическую сеть добычного комплекса. В случае, если в составе подземных газов имеются горючие и взрывоопасные компоненты, необходима разработка специальных компенсирующих мероприятий для обеспечения безопасности рассолодобычи, не обозначенных регламентирующими документами.

Данный вопрос может быть разрешен путем разделения на две подзадачи: I) необходимо произвести оценку возможных газовыделений и фазового состава газов, выделяющихся в подземную камеру растворения на всех этапах процесса подземного растворения; II) на основании полученных выводов при решении подзадачи I следует выполнить анализ гидравлической сети поверхностного комплекса с целью выявления возможных угроз при попадании в нее газов и разработки комплекса компенсирующих мероприятий по обеспечению необходимой безопасности работ.

2. Оценка возможных газовыделений в подземную камеру растворения

Многолетние исследования газоносности в пределах шахтных полей Верхнекамского месторождения позволяют привести достаточно точные средние значения показателей газоносности пород рассматриваемых пластов, а также и представительные данные по компонентному составу свободных газов [15].

Однако, ввиду отсутствия достаточного количества экспериментальных данных о компонентном составе связанных газов рассматриваемых пород, концентрации газов в дальнейшем расчете приняты идентичными концентрациям в свободных газах. Сводные данные по показателям газоносности и среднему содержанию горючих газов в свободных газах представлены на рис. 5.

Из имеющихся данных можно судить о значительных различиях пород размываемых пластов по газодинамическим характеристикам. Наибольшей средней газоносностью по свободным газам обладают карналлитовые породы пласта Г со значением в 1,2 м^3/м^3 против показателей в 0,64 и 0,24 м^3/м^3 у пород пластов В и Б соответственно. Однако свободные газы пород пласта В характерны наибольшим содержанием в них водорода, а свободные газы пород пласта Б, в свою очередь, уже обладают наибольшим содержанием метана. Ниже приводится методика расчета фазовых состояний среды, позволяющая оценить и проанализировать компонентный состав и объемы свободных и растворенных газов в подземной камере.

2.1. Методика расчета фазовых состояний среды в подземной камере растворения

Количественная оценка изменения фазовых равновесий растворов при изменении термобарических условий выполнялась на основе представленных выше усредненных значений состава газовых смесей и газоносности соответствующих пластов. Расчет выполнялся по трем преобладающим (их суммарная доля в среднем составляет 97 %) в компонентном составе газам: водород (H_2), метан (CH_4) и азот (N_2), к которому также были отнесены и прочие компоненты газа. При расчетах в соответствии с исходными данными также предполагается, что давление в камерах размыва на всех этапах составляет 3,26 МПа, температура рассола в камере размыва составляет 95 °С (368 К). Поверхностными термобарическими условиями среды были приняты условия с давлением 1 атм (101 325 Па) и температурой 25 °С (298 К), по которым также производился расчет с целью оценки проявления дополнительных газовыделений из рассола при его подъеме на поверхность из камеры размыва.

Первым шагом расчета находились константы равновесия газовых компонентов, растворяющихся в неминерализованной воде при исходных температуре и давлении. Константа фазового равновесия есть отношение мольной доли компонента в газовой фазе (N_i'') к его мольной доле в жидкой фазе (N_i'):

$$K_i = \frac{N_i''}{N_i'}. \quad (1)$$

Для численного определения константы равновесия газовых компонентов, с учетом сравнительно небольшого давления согласно законам Рауля и Дальтона использовалась формула Вильсона, являющаяся модификацией уравнения состояния Пенга – Робинсона [39–42]:

$$K_i = \frac{p_{ci}}{p} \cdot \exp\left(5{,}31(1+\omega_i)\cdot\left(1-\frac{T_{ci}}{T}\right)\right), \quad (2)$$

где p_{ci} – критическое давление, T_{ci} – критическая температура, ω_i – ацентрический фактор Питцера *i*-го компонента.

Известно, что растворенные соли снижают растворимость газов в воде. Зависимость растворимости газов от концентрации растворенных в воде солей описывается уравнением Сеченова, которое имеет вид:

$$N_i'^{*} = N_i' \cdot 10^{-k_i \cdot n} \quad (3)$$

или

$$b_i^{*} = b_i \cdot 10^{-k_i \cdot n}, \quad (4)$$

где b_i – объем газового компонента, растворенного в единице массы воды, k_i – коэффициент Сеченова, характеризующий влияние данной соли на растворимость газового компонента *i*, *n* – концентрация растворенной в воде соли.

Значения коэффициента Сеченова для водорода и метана определяются по справочным данным [43]. Затем определялись константы фазового равновесия для рассола по формуле

$$K_i^{*} = K_i \cdot 10^{k_i \cdot n}. \quad (5)$$

Содержание растворенных в рассоле компонентов газа в мольных долях определялось из выражения:

$$N_i'^{*} = N_i' \cdot K_i^{*}. \quad (6)$$

Следом определяются константы равновесия данного газонасыщенного раствора при конечных показателях давления и температур, а также значения коэффициентов Сеченова при конечной температуре (нормальных условиях).

Доля растворившихся в рассоле компонентов газа в м^3 на 1 м^3 раствора находилось из уравнения

$$C_i^* = \frac{b_i^*}{(1-0{,}01*g)*d^*}, \quad (7)$$

где g – содержание солей в водном растворе, %; d^* – плотность водного раствора солей.

Величина g может быть найдена по весу солей (Q), содержащихся в 1 л водного раствора:

$$g = \frac{0{,}1 \cdot Q}{d^*}. \quad (8)$$

Объемы свободных газов в обеих фазах определялись, исходя из объемов камеры размыва ($V_{\text{кам}}$), средней полной газоносности соответствующих пород ($q_{\text{полн}}$), коэффициента редукции объема газа в пластовых условиях ($k_{\text{ред}}$) и средних объемных содержаний соответствующего компонента (Q_i):

$$V_i^{жид} = C_i^* \cdot Q_i \cdot k_{\text{ред}} \cdot V_{\text{кам}} \cdot q_{\text{полн}}; \quad (9)$$

$$V_i^{\text{газ}} = V_i^{\text{газ}} - Q_i \cdot k_{\text{ред}} \cdot V_{\text{кам}} \cdot q_{\text{полн}}. \quad (10)$$

При одной и той же величине давления в камере размыва коэффициент редукции объема газа в пластовых условиях является константой и может быть определен как отношение давления в камере размыва к давлению в нормальных условиях:

$$k_{ред} = \frac{P_{кам}}{P_{н.у.}} = \frac{3260000}{101325} = 32{,}1737\,. \quad (11)$$

Газы, находящиеся в свободной фазе в пластовых условиях, формируют «газовую шапку» в верхней части камеры размыва. Мощность «газовой шапки», исходя из площади сечения камеры размыва в плане ($S_{\text{кам}}$) и суммарного объема газов ($\sum V_i^{\text{газ}}$), может быть определена следующим образом:

$$h_{г.ш.} = \frac{\sum V_i^{газ}}{S_{кам}}. \quad (12)$$

Площадь сечения камеры размыва в плане на всех этапах эксплуатации остается постоянной, в свою очередь форма камеры размыва представляет собой эллиптический цилиндр, площадь сечения которого вычисляется, исходя из длины малой (a) и большой (b) полуосей сечения камеры размыва в плане:

$$S_{кам} = \pi \cdot a \cdot b = 3{,}14 \cdot 17{,}5 \cdot 52{,}5 = 2884{,}875\ \text{м}^2. \quad (13)$$

Учитывая, что технология размыва эксплуатационных ступеней не предусматривала отдельной процедурой сброс «газовой шапки», конечная её мощность была рассчитана как сумма мощностей, полученных в результате размыва пластов на всех этапах, включая предшествующие.

2.2. Результаты расчета фазовых состояний среды в подземной камере растворения

Проведенный по изложенной выше методике расчет в условиях, соответствующих завершению подготовительного этапа (размыва подготовительной выработки в пласте Б и междупластье Б–В), из размытых горных пород выделится 98,1 м^3 свободных и связанных газов. В растворенном состоянии при данных термобарических условиях и концентрации солей в рассоле будет способна находиться лишь незначительная часть от общего объема – 1,6 %, остальной объем, находясь в свободной фазе, сформирует маломощную «газовую шапку» со значительной концентрацией в ней горючих газов. Сводная информация по состоянию среды камеры размыва на конец размыва пласта Б и междупластья Б-В представлена на рис. 6.

Следующим расчетным состоянием является конец размыва пласта В. В данном случае в пространство камеры размыва выделится 497,3 м^3 свободных и связанных газов размытых пород. В растворенном состоянии будет способна находиться уже чуть большая часть объема, составляющая 3,24 %. Выделившиеся из размытых пород пласта В газы несколько снизят концентрации метана в «газовой шапке», мощность которой значительно вырастет, но также концентрация водорода в ней вырастет в 4 раза. Сводная информация по состоянию среды камеры размыва на конец растворения пород пласта В представлена на рис. 7.

Конечным расчетным состоянием является завершение размыва второй эксплуатационной ступени – междупластья В–Г и пласта Г. Становится ярко виден вклад наиболее газоносных пород пласта, поскольку объем выделившихся связанных и свободных газов в пространство камеры размыва составит 1680,6 м^3.

В данном случае в растворенном состоянии будет находиться 3,76 % от общего объема. Мощность «газовой шапки» вырастет почти в 4 раза за счет большого объема выделившихся при растворении пород газов. Однако из-за высокой концентрации азота и прочих негорючих газов в компонентном составе свободных и связанных газов пород пласта Г и междупластья В–Г концентрация горючих газов в «газовой шапке» несколько снизится. Сводная информация по состоянию среды камеры размыва на конец растворения пород пласта Г и междупластья В–Г представлена на рис. 8.

Проведенный расчет для нормальных (поверхностных) условий показал, что в поверхностных условиях рассол обладает даже большим потенциалом к растворению в нем газов, что может быть в первую очередь связано с высокой температурой и сравнительно небольшим давлением в самой камере размыва. Исходя из этого, можно сделать вывод об отсутствии дополнительных газовыделений из рассола при его подъеме на поверхность на всех стадиях отработки камеры. Значения рассчитанных долей растворившихся в рассоле компонентов газа в соответствии с формулой (7) представлены в таблице.

Полученный характер распределения фаз в камере размыва также указывает на риск попадания скапливающихся под кровлей камеры газов в рассолоотводящие колонны в результате «подхвата» циркулирующим рассолом в пузырьковой форме. Ситуацию может усугубить чрезмерная депрессия на скважинах при авариях или вскрытии полости, содержащей газовые скопления.

Расчетные значения долей растворившихся в рассоле компонентов газа

Расчетные условия	Доля растворившихся в рассоле компонентов газа, м^3/м^3		
	Водород	Метан	Азот и пр. газы
Поверхностные условия	0,097	0,29	0,95
Конец подготовительного размыва (пласт Б и междупластье Б–В)	0,003	0,009	0,03
Конец первой эксплуатационной ступени (пласт В)	0,009	0,007	0,04
Конец второй эксплуатационной ступени (междупластье В–Г и пласт Г)	0,009	0,006	0,05

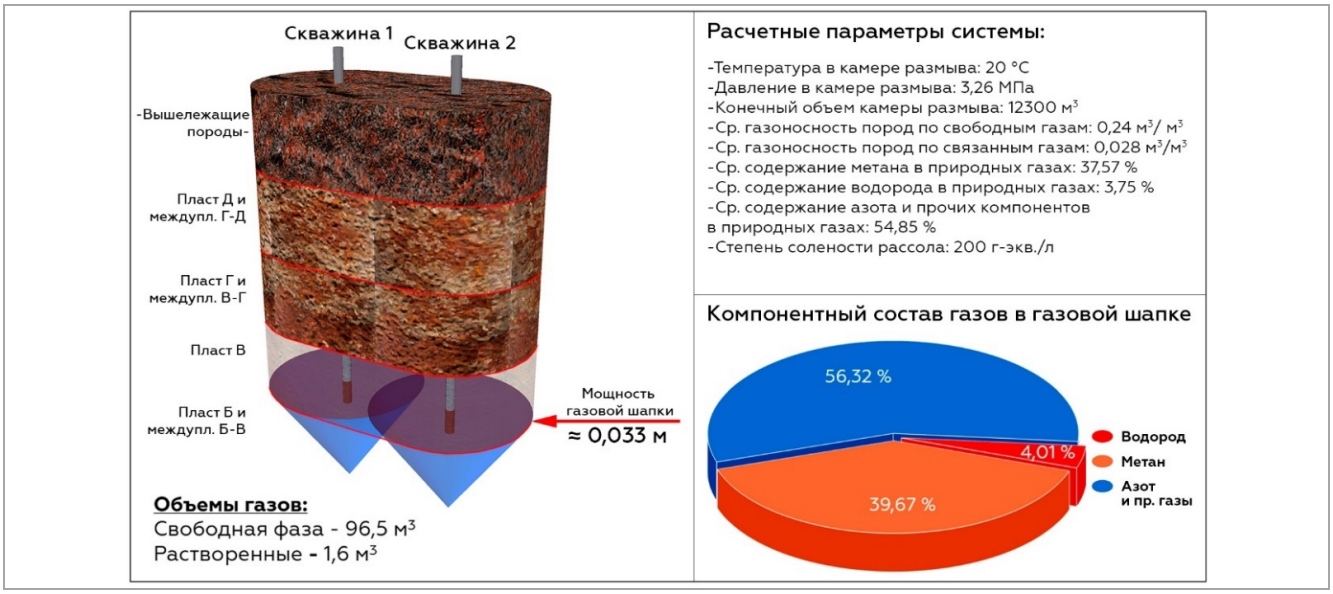


Рис. 6. Состояние среды в камере размыва на конец размыва пласта Б и междупластья Б–В

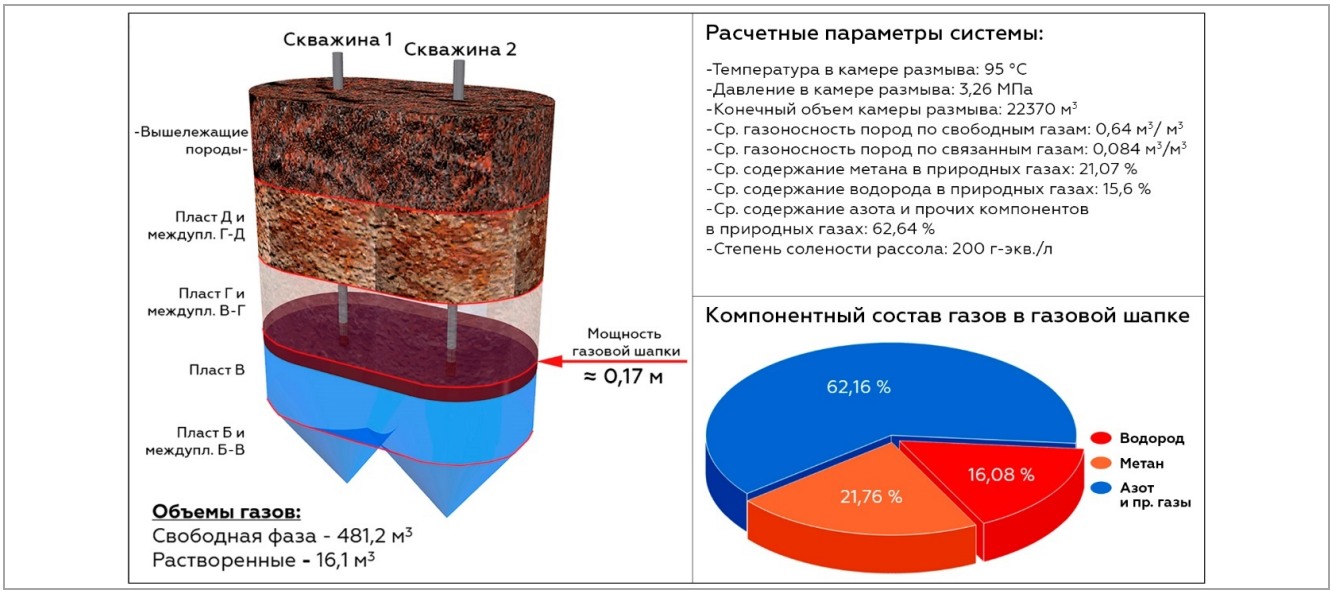


Рис. 7. Состояние среды в камере размыва на конец размыва пласта В

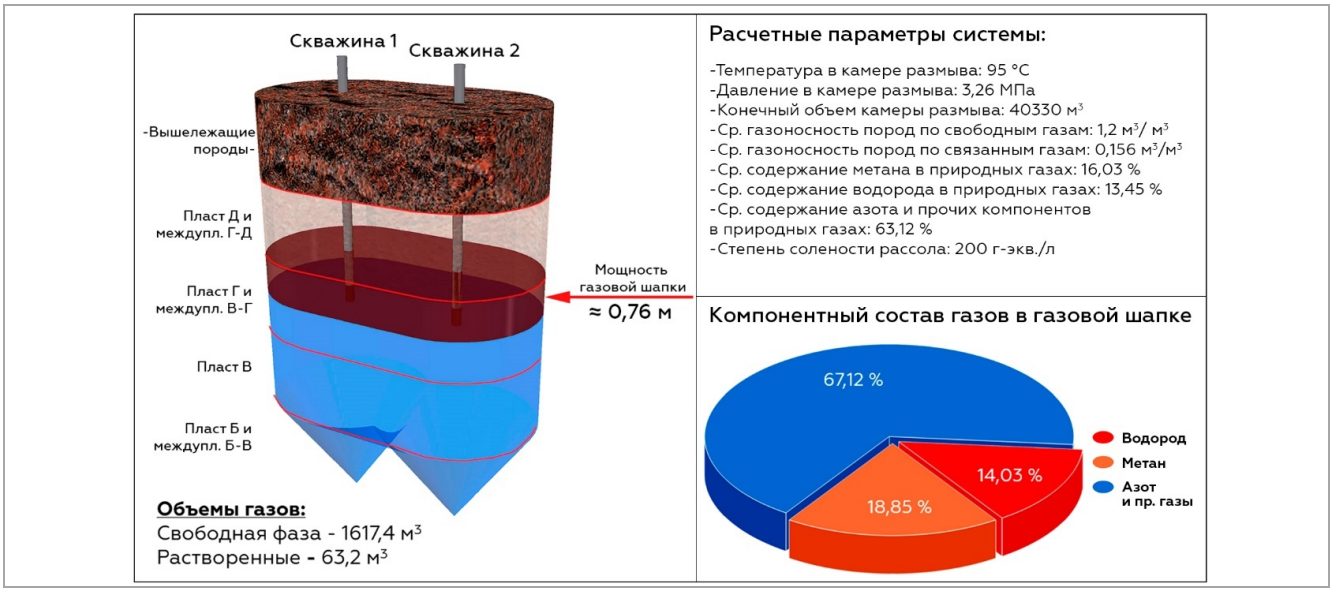


Рис. 8. Состояние среды в камере размыва на конец размыва пласта Г

3. Анализ гидравлической сети и разработка барьеров безопасности

Выполненные оценки показали низкую растворимость выделившихся из пород газов в рассоле на всех этапах растворения. Преимущественно они будут находиться в свободной форме и накапливаться в подкровельном пространстве камеры. Не исключаются риски захвата свободных газов в пузырьковой форме рассолом при его турбулентном движении в камере и поглощении рассолоотводящими колоннами.

Анализ технологических схем и гидравлической сети поверхностного комплекса с целью определения возможных путей движения растворенных в рассоле и пузырьковых газов показал, что для формирования необходимых барьеров безопасности их распространение целесообразно ограничить приемными емкостями рассола (рис. 9). На данном участке не предусмотрено насосное оборудование. Извлечение рассола производится самоизливом при поддержании избыточного давления в подземной камере. Согласно гидравлическому расчету [44], на имеющейся схеме сети избыточное давление рассола при его продвижении по трубопроводам от скважин до приемных емкостей снижается в два раза, а при наличии связи емкостей с атмосферой — до атмосферного, что создает условия для дегазации рассола [45]

В качестве барьеров безопасности на данном участке рекомендуется оборудовать приемные емкости рассола:

– системой дегазации — отведения свободных газов (особенно метана и водорода) из емкости;

– датчиками концентрации CH_4 (метана) и H_2 (водорода) и устройствами, обеспечивающими возможность периодического отбора газовых проб;

– рассеивателями, увеличивающими площадь свободной поверхности рассола при его подаче для интенсификации извлечения газов в свободную форму;

– системой перемешивания рассола;

а также включить в перечень работ следующие организационные мероприятия:

– при заполнении емкости на 95 % от объема прекратить подачу в нее рассола и продолжать его перемешивание до полной дегазации;

– выдачу рассола из приемной емкости далее по тракту гидравлической сети производить только после выполнения процедуры дегазации;

– обеспечить постоянное проветривание помещения отбора проб, расположенного на участке гидравлической сети между скважинами и приемными емкостями рассола;

– ввести для сотрудников требования к пожарной и взрывобезопасности при нахождении в помещении отбора проб и рядом с ним, особенно в процессе отбора проб (отсутствие источников огня, искр и пр.).

Свободные газы, находясь в пространстве камеры и не контактируя с окислителем, не представляют угрозы. Но занимая место в подкровельном пространстве выше нерастворителя, обладающего большей плотностью, и вперемешку с ним в пузырьковой форме ввиду его повышенной вязкости, свободные газы будут подниматься первыми либо, турбулизируясь, вместе с нерастворителем при его извлечении по внешней колонне труб и накапливаться в сепарационной емкости (рис. 10).

Такие риски возникают дважды перед каждым подъемом труб, при переходе с подготовки к эксплуатации и при смене эксплуатационной ступени. Исходя из этого, распространение газов в линии нерастворителя необходимо ограничить сепарационной емкостью, которую рекомендуется оборудовать:

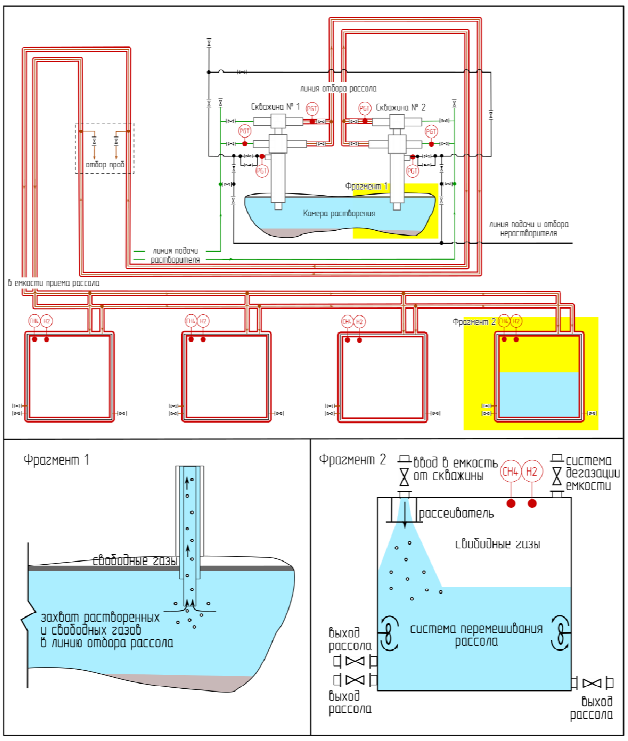


Рис. 9. Фрагмент гидравлической сети – участок с размещением барьеров безопасности в линии отбора рассола

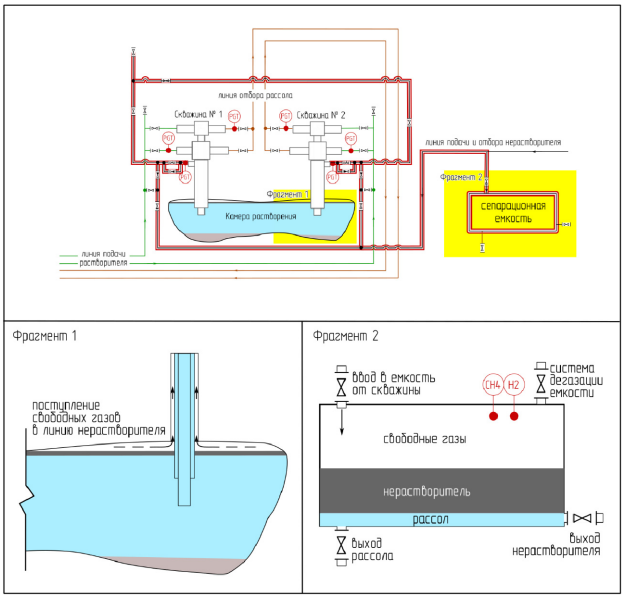


Рис. 10. Фрагмент гидравлической сети – участок с размещением барьеров безопасности в линии нерастворителя

– системой дегазации – отведения свободных газов;

– датчиками концентрации CH_4 (метана) и H_2 (водорода) и устройствами, обеспечивающими возможность периодического отбора газовых проб;

– организационно – извлеченный нерастворитель использовать только для повторной закачки в подземную камеру растворения, не допуская его использования в качестве топлива.

Дополнительным мероприятием, позволяющим контролировать поступление газов из камеры подземного растворения в поверхностную гидравлическую сеть, является организация газового мониторинга с размещением датчиков концентрации метана и водорода, и оборудования устройств для отбора проб на оголовке рассолодобычных скважин либо на подходящих к нему трубопроводах линий отведения рассола и нерастворителя.

Указанный комплекс технических решений и организационных мероприятий позволяет обеспечить необходимую безопасность ведения работ по газовому фактору на протяжении всего периода опытно-промышленных испытаний.

Заключение

Технология подземного растворения может послужить перспективным способом отработки карналлитовых залежей на участках ВКМКС со сложным геологическим строением, недопускающим применения шахтного способа добычи. Сильвинитовые и карналлитовые пласты ВКМКС отличаются повышенной газоносностью. В то же время в нормативной документации, регламентирующей ведение рассолодобычных работ, отсутствуют барьеры безопасности по газовому фактору.

Данное исследование выполнено на предпроектной стадии опытно-промышленных испытаний технологии подземного растворения и имеет целью исследование возможных газовыделений в подземную камеру растворения и ассоциированных с ними путей распространения и мест аккумуляции газов в гидравлической сети поверностного комплекса.

Использованная методика расчета фазовых равновесий среды камеры размыва показала, что при проектных термобарических условиях внутри камеры и соответствующей концентрации солей в растворе лишь незначительная часть содержащихся в породах газов может находиться в растворенном состоянии после размыва рассматриваемых пород – 1,6 % в конце размыва пород пласта Б и междупластья Б–В, 3,2 % в конце размыва пород пласта В и 3,8 % в конце размыва пород пласта Г и междупластья Г–Д. Также при переходе рассола из пластовых термобарических условий внутри камеры размыва в поверхностные (нормальные) условия дополнительных газовыделений не прогнозируется. Однако полученный характер распределения фаз указывает на присутствие рисков прорыва горючих газов в трубы скважин в случае аварийного скачка депрессии, вскрытии полости, содержащей газовые скопления или при установке труб прямо на интервале с газовой шапкой, что способно нарушить нормальное течение технологического процесса.

С точки зрения распространения газов в гидравлической сети поверхностного комплекса опасность представляет возможное накопление метана и водорода в приемных емкостях рассола. Основной риск связан с поступлением горючих газов из «газовой шапки» в линию нерастворителя и накоплением их в сепарационной емкости. Анализ технологических процессов и гидравлической сети показал, что распространение газов целесообразно ограничить данными емкостями и расположить на этих участках основные технические барьеры безопасности.

В качестве технических решений приняты обеспечение газового мониторинга на участках скважин, в приемных емкостях рассола и сепарационной емкости нерастворителя, и внедрение системы дегазации указанных емкостей. В совокупности с организационными мероприятиями комплекс позволит снизить риски негативных последствий, ассоциированных с газовым фактором, и обеспечить необходимую безопасность ведения работ.

Библиографический список

1. Поиск эффективных технологий разработки маломощных калийных пластов способом подземного растворения / В.С. Войтенко, С.Ф. Шемет, А.М. Гречко, С.Г. Шутин // Горный журнал. – 2014. – № 2. – С. 33–36.
2. Каратыгин, Е.П. Проблемы разработки месторождений бишофита подземным растворением / Е.П. Каратыгин, Ф. Валькхофф, В.А. Ермаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – Сем. 14. – С. 246–253.
3. Underground hydrogen storage in salt caverns: Recent advances, modeling, approaches, barriers, and future outlook / B.A. Oni, Sh.O. Bade, S.E. Sanni, O.D. Orodu // Journal of Energy Storage. – 2025. – Vol. 107. – 114951. DOI: 10.1016/j.est.2024.114951
4. Tightness of an underground energy storage salt cavern with adverse geological conditions / T. Wang, L. Ao, B. Wang, Sh. Ding, K. Wang, F. Yao, J. J. K. Daemen // Energy. – 2022. – Vol. 238. – Part. C. – 121906. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121906
5. Study on dissolution kinetics of rock salt in the construction of underground energy storage salt cavern / T. Wang, D. Xie, Yo. Liao, K. Xie, T. He // Chemical Engineering Science. – 2025. – Vol. 309. – 121508. DOI: 10.1016/j.ces.2025.121508
6. Underground Hydrogen Storage in Salt Cavern: A Review of Advantages, Challenges, and Prospects / X. Qian, Sh. You, R. Wang, Yu. Yue, Q. Liao, J. Dai, Sh. Tian, X. Liu // Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – 5900. DOI: 10.3390/su17135900
7. Fliß, T. Solution mining — emission-free mining operation for a sustainable utilization of natural resources / T. Fliß, J. Bach, W. Ramm. – K-UTEC AG Salt Technologies. Germany.
8. Chang, J. The self-healing property of rock salt damage in underground gas storage: A review / J. Chang, Ya. Qi, R. Yang, T. Hao // Results in Engineering. – 2025 – Vol. 27. – 106098. DOI: 10.1016/J.RINENG.2025.106098
9. Mathematical model of salt cavern leaching for gas storage in high-insoluble salt formations / J. Li, X. Shi, Ch. Yang, Yi. Li, T. Wang, H. Ma // Scientific reports. – 2018. – Vol. 8. – 372. DOI: 10.1038/s41598-017-18546-w
10. A Study on the Dissolution Characteristic of Salt Rock Using an Extended Rapid Cavity Creation Device / Ch. Zha, R. Pang, W. Wang, G. Liu // Energies. – 2025. – Vol. 18. – 737. DOI: 10.3390/en18030737
11. Mikhalyuk, A.V. Acceleration of cavity washout process in rock salt deposits for creating underground storage facilities / A.V. Mikhalyuk, V.V. Zakharov, P.A. Parshukov // Journal of Mining Science. 1999. – Vol. 35. – P. 77–83. DOI: 10.1007/BF02562449
12. Coupled thermos-hydro-mechanical-chemical processes in salt formations for storage applications / R. Habibi, Sh. Zare, A. Asgari, M. Singh, S. Mahmoodpour // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Vol. 188. – 113812. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113812
13. Пьянкова, А.А. Бактериальное сообщество рассолов, извлекаемых при подземном растворении калийно-магниевых солей Якшинского месторождения (Республика Коми) / А.А. Пьянкова, Е.Г. Плотникова, С.Н. Шанина // Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки. – 2022. – Т. 164, кн. 3. – С. 457–474. DOI: 10.26907/2542-064X.2022.3.457-474
14. Microbial life in salt caverns and their influence on H_2 storage – Current knowledge and open questions / N. Dopffel, B.A. An-Stepec, P. Bombach, M. Wagner, E. Passaris // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 58. – P. 1478–1485. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.334
15. Газоносность по свободным газам пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон Верхнекамского месторождения / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Т.А. Лялина, Е.А. Нестеров // Горная промышленность. – 2021. – №. 4. – С. 125–133.
16. Малюков, В.П. Особенности строительства подземных выработок-емкостей для хранения газонефтепродуктов в каменной соли с большим содержанием газа / В.П. Малюков // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2012. – № 3. – С. 36–48.
17. Смайльс, Н.Ю. Газодинамические явления и внезапные выбросы рассола и газа на скважинах подземного растворения каменной соли / Н.Ю. Смайльс // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 7. – С. 177–179.
18. Зильбершмидт, В.Г. Разрушение соляных пород / В.Г. Зильбершмидт, В.В. Зильбершмидт, О.Б. Наймарк. – М.: Наука, 1992. – 144 с.
19. Барях, А.А. Деформирование соляных пород / А.А. Барях, С.А. Константинова, В.А. Асанов. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. – 180 с.
20. Асанов, В.А. Деформирование соляных пород при длительном нагружении / В.А. Асанов, И.Л. Паньков, В.В. Аникин // Физ.-тех. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 4. – С. 50–56.
21. Агенко, В.А. Исследование реологических свойств каменной соли / В.А. Агенко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 1. – С. 115–120.
22. Здановский, А.Б. Галургия / А.Б. Здановский. – Л.: Изд-во «Химия», 1972. – 528 с.
23. Подземное растворение соляных залежей (проблемы, моделирование, управление) / Е.П. Каратыгин, А.В. Кубланов, Л.М. Пустыльников, В.П. Чанцев. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1994. – 221 с.
24. Аренс, В.Ж. Физико-химическая геотехнология: учеб. пособие / В.Ж. Аренс. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2001. – 656 с.
25. Калабин, А.И. Добыча полезных ископаемых подземным выщелачиванием / А.И. Калабин. – М.: Атомиздат, 1969. – 369 с.

26. Барях, А.А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника / А.А. Барях, А.Е. Красноштейн, И.А. Санфиров // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2009. – №. 2. – С. 40–49.
27. Laouafa, F. Underground Rock Dissolution and Geomechanical Issues / F. Laouafa, J. Guo, M. Quintard // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2021. – Vol. 54. – P. 3423–3445. DOI: 10.1007/s00603-020-02320-y
28. Salt exploration by dissolution – and alternative method to reduce post-closure risks / D. Moisuc-Hojda, M. Lazar, F. Faur, I.-M. Apostu // Matec Web of Cinferences. – 2024. – Vol. 389. – 00076. DOI: 10.1051/matecconf/202438900076
29. Mineralogy, microstructures and geomechanics of rock salt for underground gas storage / V. Vandeginste, Yu. Ji, F. Buysschaert, G. Anoyatis // Deep Underground Science and Engineering. – 2023. – Vol. 2. – P. 129–147. DOI: 10.1002/dug2.12039
30. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 505. – М., 2020.
31. Инструкция по безопасному ведению работ и охране недр при разработке месторождений солей растворением через скважины с поверхности РД 03-243-98. УТВЕРЖДЕНА Госгортхнадзором России Постановление от 26.11.98 N 68. – М., 1998.
32. Sorensen, H. Modeling of gas solubility in brine / H. Sorensen, K.S. Pedersen, P.L. Christensen // Organic Chemistry. – 2002. – Vol. 33. – P. 635–642. DOI: 10.1016/S0146-6380(02)00022-0.
33. Smith, S.P. The solubility of noble gases in water and in NaCl brine / S.P. Smith, B.M. Kennedy // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1983. – T. 47, vol. 3. – P. 503–515.
34. Crozier, T.E. Solubility of hydrogen in water, sea water, and sodium chloride solutions / T.E. Crozier, S. Yamamoto // Journal of Chemical and Engineering Data. – 1974. – T. 19, vol. 3. – P. 242–244.
35. Schumpe, A. The estimation of gas solubilities in salt solutions / A. Schumpe // Chemical engineering science. – 1993. – T. 48, № 1. – С. 153–158.
36. Кудряшов, А.И. Верхнекамское месторождение солей / А.И. Кудряшов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. – 429 с.
37. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей: утв. ПАО «Уралкалий». – Пермь, Березники, 2022. – 118 с.
38. Смайльс, Н.Ю. Закономерности формообразования подземной камеры при подземном растворении пластов каменной соли / Н.Ю. Смайльс // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2001. – № 9. – С. 163–166.
39. Салохин, В.И. Влияние гидродинамических процессов в камере подземного растворения на осаждение и вынос нерастворимых включений / В.И. Салохин, А.С. Хрулев, Д.В. Каналин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 12. – С. 122–125.
40. Calculation of IFT in porous media in the presence of different gas and normal alkanes using the modified EoS / S. Hamidpour, A. Safaei, Y. Kazemzadeh, A. Hasan-Zadeh, A. Khormali // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13, № 1. – 8077. DOI: 10.1038/s41598-023-35320-3
41. Travalloni, L. Phase equilibrium of fluids confined in porous media from an extended Peng–Robinson equation of state / L. Travalloni, M. Castier, F.W. Tavares // Fluid Phase Equilibria. – 2014. – Vol. 362. – P. 335–341.
42. Ahlers, J. Development of an universal group contribution equation of state: I. Prediction of liquid densities for pure compounds with a volume translated Peng–Robinson equation of state / J. Ahlers, J. Gmehling // Fluid Phase Equilibria. – 2001. – T. 191, vol. 1-2. – P. 177–188.
43. Намиот, А.Ю. Растворимость газов в воде под давлением / А.Ю. Намиот, М.М. Бондарева. – М.: Гостоптехиздат, 1963 – 147 с.
44. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
45. Дегазация жидкости при течении в трубе в условиях падения давления / Э.Л. Китанин, Е.Ю. Кумзерова, А.С. Чернышев, А.А. Шмидт // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, вып. 16. – С. 65–71.

References

1. Voitenko V.S., Shemet S.F., Grechko A.M., Shutin S.G. Poisk effektivnykh tekhnologii razrabotki malomoshchnykh kaliinykh plastov sposobom podzemnogo rastvoreniia [Search of efficient technologies of development of thin potassium layers by underground dissolution method]. *Gornyi zhurnal*, 2014, no. 2, pp. 33-36.
2. Karatygin E.P., Val'kkhoff F., Ermakov V.A. Problemy razrabotki mestorozhdenii bishofita podzemnym rastvoreniem [Problems of developing bischofite deposits by underground dissolution]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2004, Sem. 14, pp. 246-253.
3. Oni B.A., Bade Sh.O., Sanni S.E., Orodu O.D. Underground hydrogen storage in salt caverns: Recent advances, modeling, approaches, barriers, and future outlook. *Journal of Energy Storage*, 2025, vol. 107, 114951. DOI: 10.1016/j.est.2024.114951
4. Wang T., Ao L., Wang B., Ding Sh., Wang K., Yao F., Daemen J.J.K. Tightness of an underground energy storage salt cavern with adverse geological conditions. *Energy*, 2022, vol. 238, part, 121906 p. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121906
5. Wang T., Xie D., Liao Yo., Xie K., He T. Study on dissolution kinetics of rock salt in the construction of underground energy storage salt cavern. *Chemical Engineering Science*, 2025, vol. 309, 121508. DOI: 10.1016/j.ces.2025.121508
6. Qian X., You Sh., Wang R., Yue Yu., Liao Q., Dai J., Tian Sh., Liu X. Underground Hydrogen Storage in Salt Cavern: A Review of Advantages, Challenges, and Prospects. *Sustainability*, 2025, vol. 17, 5900. DOI: 10.3390/su17135900
7. Fließ T., Bach J., Ramm W. Solution mining - emission-free mining operation for a sustainable utilization of natural resources. K-UTEC AG Salt Technologies. Germany.
8. Chang J., Qi Ya., Yang R., Hao T. The self-healing property of rock salt damage in underground gas storage: A review. *Results in Engineering*, 2025, vol. 27, 106098. DOI: 10.1016/J.RINENG.2025.106098
9. Li J., Shi X., Yang Ch., Li Yi., Wang T., Ma H. Mathematical model of salt cavern leaching for gas storage in high-insoluble salt formations. *Scientific reports*, 2018, vol. 8, 372. DOI: 10.1038/s41598-017-18546-w
10. Zha Ch., Pang R., Wang W., Liu G. A Study on the Dissolution Characteristic of Salt Rock Using an Extended Rapid Cavity Creation Device. *Energies*, 2025, vol. 18, 737. DOI: 10.3390/en18030737
11. Mikhalyuk A.V., Zakharov V.V., Parshukov P.A. Acceleration of cavity washout process in rock salt deposits for creating underground storage facilities. *Journal of Mining Science*, 1999, vol. 35, pp. 77-83. DOI: 10.1007/BF02562449
12. Habibi R., Zare Sh., Asgari A., Singh M., Mahmoodpour S. Coupled thermos-hydro-mechanical-chemical processes in salt formations for storage applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, vol. 188, 113812. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113812
13. P'iankova A.A., Plotnikova E.G., Shanina S.N. Bakterial'noe soobshchestvo rassolov, izvlekaemykh pri podzemnom rastvorenii kaliino-magnievykh solei Iakshinskogo mestorozhdeniia (Respublika Komi) [Bacterial Community of the Brines Extracted during the Underground Dissolution of Potassium-Magnesium Salts of the Yakshinskoe Deposit (Komi Republic, Russia)]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Estestvennye nauki*, 2022, vol. 164, book 3, pp. 457-474. DOI: 10.26907/2542-064X.2022.3.457-474
14. Dopffel N., An-Stepec B.A., Bombach P., Wagner M., Passaris E. Microbial life in salt caverns and their influence on H_2 storage - Current knowledge and open questions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 58, pp. 1478-1485. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.334
15. Andreiko S.S., Ivanov O.V., Lialina T.A., Nesterov E.A. Gazonosnost' po svobodnym gazam porod sil'vinitovoi i sil'vinito-karnallitovoi zon Verkhnekamskogo mestorozhdeniia [Free gas content of the rocks of the silvinite and silvinitecarnallite zones at the Upper Kama Districts]. *Gornaia promyshlennost'*, 2021, no. 4, pp. 125-133. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-125-133.
16. Maliukov V.P. Osobennosti stroitel'stva podzemnykh vyrabotok-emkostei dlia khraneniia gazonefteproduktov v kamennoi soli s bol'shim soderzhaniem gaza [Emissions salt and gas at underground dissolution]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Inzhenernye issledovaniia*, 2012, no. 3, pp. 36-48.
17. Smail's N.Iu. Gazodinamicheskie iavleniia i vnezapnye vybrosy rassola i gaza na skvazhinakh podzemnogo rastvoreniia kamennoi soli [Gas-dynamic phenomena and sudden outbursts of brine and gas in underground rock salt dissolution wells]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2000, no. 7, pp. 177-179.
18. Zil'bershmidt V.G., Zil'bershmidt V.V., Naimark O.B. Razrushenie solianykh porod [Destruction of salt rocks]. Moscow: Nauka, 1992, 144 p.
19. Bariakh A.A., Konstantinova S.A., Asanov V.A. Deformirovanie solianykh porod [Deformation of salt rocks]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 1996, 180 p.
20. Asanov V.A., Pan'kov I.L., Anikin V.V. Deformirovanie solianykh porod pri dlitel'nom nagruzhenii [Deformation of salt rocks under long-term loading]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2011, no. 4, pp. 50-56.
21. Ageienko V.A. Issledovanie reologicheskikh svoistv kamennoi soli [Study of the rheological properties of salt rock]. *Izvestiia Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2019, no. 1, pp. 115-120. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-115-120
22. Zdanovskii A.B. Galurgiia [Halurgy]. Leningrad: Khimiia, 1972, 528 p.
23. Karatygin E.P., Kublanov A.V., Pustyl'nikov L.M., Chantsev V.P. Podzemnoe rastvorenie solianykh zalezhei (problemy, modelirovanie, upravlenie) [Underground dissolution of salt deposits (problems, modeling, management)]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1994, 221 p.
24. Arens V.Zh. Fiziko-khimicheskaia geotekhnologiia [Physical and chemical geotechnology]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi gornyi universitet, 2001, 656 p.
25. Kalabin A.I. Dobycha poleznykh iskopaemykh podzemnym vyshchelachivaniem [In-situ leaching mining]. Moscow: Atomizdat, 1969, 369 p.
26. Bariakh A.A., Krasnoshtein A.E., Sanfirov I.A. Gornotekhnicheskie avarii: zatoplenie Pervogo Bereznikovskogo kaliinogo rudnika [Mining accidents: flooding of the First Berezniki potash mine]. *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra*, 2009, no. 2, pp. 40-49.
27. Laouafa F., Guo J., Quintard M. Underground Rock Dissolution and Geomechanical Issues. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, vol. 54, pp. 3423-3445. DOI: 10.1007/s00603-020-02320-y
28. Moisuc-Hojda D., Lazar M., Faur F., Apostu I.-M. Salt exploration by dissolution - and alternative method to reduce post-closure risks. *Matec Web of Cinferences*, 2024, vol. 389, 00076. DOI: 10.1051/matecconf/202438900076
29. Vandeginste V., Ji Yu., Buysschaert F., Anoyatis G. Mineralogy, microstructures and geomechanics of rock salt for underground gas storage. *Deep Underground Science and Engineering*, 2023, vol. 2, pp. 129-147. DOI: 10.1002/dug2.12039

30. Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti “Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh”. Utverzhdeny prikazom Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 08.12.2020 № 505 [Federal Industrial Safety Norms and Rules "Safety Rules for Mining and Processing of Solid Minerals." Approved by Order No. 505 of the Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Supervision dated December 8, 2020.].
31. Instruktsiia po bezopasnomu vedeniiu rabot i okhrane nedr pri razrabotke mestorozhdenii solei rastvoreniem cherez skvazhiny s poverkhnosti RD 03-243-98. UTVERZhDENA Gosgortekhnadzorom Rossii Postanovlenie ot 26.11.98 N 68 [Instructions for the safe conduct of work and protection of subsoil resources during the development of salt deposits by dissolution through wells from the surface RD 03-243-98. APPROVED by the State Mining and Industrial Supervision Authority of Russia Resolution No. 68 of November 26, 1998].
32. Sorensen H., Pedersen K.S., Christensen P.L. Modeling of gas solubility in brine. *Organic Chemistry*, 2002, vol. 33, pp. 635-642. DOI: 10.1016/S0146-6380(02)00022-0
33. Smith S.P., Kennedy B.M. The solubility of noble gases in water and in NaCl brine. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, vol. 47, no. 3, pp. 503-515.
34. Crozier T.E., Yamamoto S. Solubility of hydrogen in water, sea water, and sodium chloride solutions. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1974, vol. 19, no. 3, pp. 242-244. DOI: 10.1021/je60062a007
35. Schumpe A. The estimation of gas solubilities in salt solutions. *Chemical engineering science*, 1993, vol. 48, no. 1, pp. 153-158. DOI: 10.1016/0009-2509(93)80291-W
36. Kudriashov A.I. Verkhnekamskoe mestorozhdenie solei [Verkhnekamskoe salt deposit]. Perm': Gornyi institut Ural'skogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2001, 429 p.
37. Ukazaniia (meropriiatiia) po zashchite rudnikov PAO “Uralkalii” ot zatopleniia i okhrane ob"ektov na zemnoi poverkhnosti ot vrednogo vliianiia podzemnykh razrabotok na Verkhnekamskom mestorozhdenii solei: utv. PAO “Uralkalii” [Instructions (measures) for the protection of Uralkali mines from flooding and the protection of objects on the earth's surface from the harmful effects of underground mining at the Verkhnekamskoye salt deposit: approved by Uralkali PJSC]. Perm', Berezniki, 2022, 118 p.
38. Smail's N.Iu. Zakonomernosti formoobrazovaniia podzemnoi kamery pri podzemnom rastvorenii plastov kamennoi soli [Patterns of formation of an underground chamber during underground dissolution of rock salt layers]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2001, no. 9, pp. 163-166.
39. Salokhin V.I., Khrulev A.S., Kanalin D.V. Vliianie gidrodinamicheskikh protsessov v kamere podzemnogo rastvoreniia na osazhdenie i vynos nerastvorimykh vkliuchenii [The influence of hydrodynamic processes in the underground dissolution chamber on the sedimentation and removal of insoluble inclusions]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2002, no. 12, pp. 122-125.
40. Hamidpour S., Safaei A., Kazemzadeh Y., Hasan-Zadeh A., Khormali A. Calculation of IFT in porous media in the presence of different gas and normal alkanes using the modified EoS. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, no. 1, 8077. DOI: 10.1038/s41598-023-35320-3
41. Travalloni L., Castier M., Tavares F.W. Phase equilibrium of fluids confined in porous media from an extended Peng-Robinson equation of state. *Fluid Phase Equilibria*, 2014, vol. 362, pp. 335-341. DOI: 10.1016/j.fluid.2013.10.049
42. Ahlers J., Gmehling J. Development of an universal group contribution equation of state: I. Prediction of liquid densities for pure compounds with a volume translated Peng-Robinson equation of state. *Fluid Phase Equilibria*, 2001, vol. 191, no. 1-2, pp. 177-188. DOI: 10.1016/S0378-3812(01)00626-4
43. Namiot A.Iu., Bondareva M.M. Rastvorimost' gazov v vode pod davleniem [Solubility of gases in water under pressure]. Gostoptekhizdat, 1963, 147 p.
44. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam [Handbook of hydraulic resistance]. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 672 p.
45. Kitanin E.L., Kumzerova E.Iu., Chernyshev A.S., Shmidt A.A. Degazatsiia zhidkosti pri techenii v trube v usloviiakh padeniia davleniia [Degassing of liquid during flow in a pipe under conditions of pressure drop]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2007, vol. 33, iss. 16, pp. 65-71.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500030-7).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.