

## References

1. Bednazh, V. A. Realizatsiya sovremennoy kontseptualnoy modeli issledovaniya zadach v oblasti prikladnykh Internet-tehnologiy [Implementation of a modern conceptual model for the study of problems in the field of applied Internet technologies]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2018, no. 10, pp. 22–26.
2. Savvateev, M. E. Vozmozhnosti sistem upravleniya konfiguratsiyami pri razvertivani i nastroyke pochtovoy sistemy v ramkakh deyatelnosti obrazovatelnoy organizatsii [The Capabilities of configuration management when you deploy and configure the mail system in the framework of the activities of an educational institution]. *Universitet na puti k novomu kachestvu nauki i obrazovaniya : Natsionalnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem* [The University on the way to a new quality of science and education "National scientific-practical conference with international participation"], 2020. 5 p.
3. *Ansible Documentation*. Available at: <http://docs.ansible.com> (accessed 02.03.2021).
4. *Chef Progress*. Available at: <https://www.chef.io> (accessed 18.03.2021).
5. Hochstein, Lorin, Moser, René. *Ansible: Up and Running. Automating Configuration Management and Deployment the Easy Way*. Published by O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472, 2017. 429 p.
6. *iRedMail – Open Source Mail Server Solution*. Available at: <https://www.iredmail.org> (accessed 21.04.2021).
7. Keating, Jesse. *Mastering Ansible – Third Edition*. 3rd ed. Packt Publishing Ltd., 2019. 412 p.
8. *Make infrastructure actionable, scalable and intelligent*. Available at: <https://puppet.com> (accessed 18.04.2021).
9. Morris, Kief. *Infrastructure as Code*. 2nd ed. Published by O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472, 2021. 430 p.
10. *Salt Project*. Available at: <https://saltproject.io> (accessed 18.03.2021).
11. Masek, P., Stusek, M., Krejci, Ja., Zeman, K., Pokorny, J., Kudlacek, M. Unleashing full potential of Ansible Framework: university labs administration. *Conference of open innovations association (FRUCT)*, 2018, no. 22, pp. 144–150.

DOI 10.54398/2074-1707\_2022\_1\_26

УДК 504

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УГРОЗ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Статья поступила в редакцию 15.07.2021, в окончательном варианте – 13.02.2022.

**Амшинов Ника Мерабович**, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

аспирант, ORCID: 0000-0002-7107-1610, e-mail: amshinov.nika@yandex.ru

**Ажмухамедов Искандар Маратович**, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

доктор технических наук, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности, профессор кафедры информационной безопасности, ORCID: 0000-0001-9058-123X, e-mail: aim\_agtu@mail.ru

Статья посвящена анализу основных экологических угроз, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, при эксплуатации газовых скважин. Рассмотрены возможные осложнения, возникающие на газовых скважинах на этапе эксплуатации, а также основные негативные экологические воздействия на окружающую среду. Проведен анализ работ, посвященных возможным осложнениям на скважинах, приводящих к негативному воздействию на окружающую среду, и способам их устранения. Систематизированы основные осложнения, приведенные в источниках. Отмечено, что последствия, вызванные осложнениями либо мероприятиями по ликвидации осложнений, в свою очередь, приводят к негативному экологическому воздействию на окружающую среду, что впоследствии может грозить штрафами для компании и затратами на ликвидацию последствий от негативного воздействия на экологию. Выделены группы экологических происшествий по среде, на которую оказывается воздействие. Построена онтологическая схема загрязнения окружающей среды при эксплуатации скважин. Введен критерий эффективности, а именно «минимальный риск для компании», позволяющий минимизировать возможные экологические и экономические риски от принимаемых решений по ликвидации осложнений. Данный критерий представляет собой сумму рисков, связанных с технологическими осложнениями на газодобывающих скважинах и экологическими происшествиями, вызванными данными осложнениями.

**Ключевые слова:** системный анализ, экологические угрозы, газовые скважины

## SYSTEM ANALYSIS OF THE MAIN ENVIRONMENTAL THREATS TO THE ENVIRONMENT DURING THE OPERATION OF GAS WELLS

The article was received by the editorial board on 15.07.2021, in the final version – 13.02.2022.

*Amshinov Nika M.*, Astrakhan State University, 20a Tatischev St. Astrakhan, 414056, Russian Federation,

postgraduate student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7107-1610>, e-mail: [amshinov.nika@yandex.ru](mailto:amshinov.nika@yandex.ru)

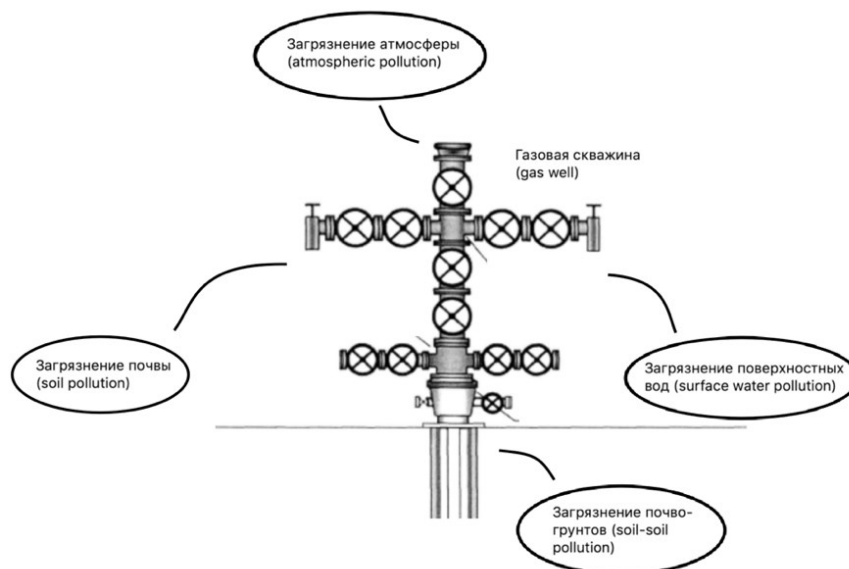
*Azhmukhamedov Iskandar M.*, Astrakhan State University, 20a Tatischev St. Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Dean of the Faculty of Digital Technologies and Cybersecurity, Professor of the Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9058-123X>, e-mail: [aim\\_agtu@mail.ru](mailto:aim_agtu@mail.ru)

The article is devoted to the analysis of the main environmental threats that have a negative impact on the environment during the operation of gas wells. Possible complications arising at gas storage facilities at the operational stage, as well as the main negative environmental impacts on the environment are considered. The analysis of works devoted to possible complications at gas wells leading to a negative impact on the environment and ways to eliminate them has been carried out. The main complications listed in the sources are systematized. It is noted that the consequences caused by complications or measures to eliminate complications, in turn, lead to a negative environmental impact on the environment, which can subsequently threaten fines for the company and the costs of eliminating the consequences of a negative impact on the environment. Groups of environmental incidents are identified by the environment that is affected. The ontological scheme of environmental pollution during the operation of wells is constructed. An efficiency criterion has been introduced, namely, "minimum risk for the company", which allows minimizing possible environmental and economic risks from decisions taken to eliminate complications. This criterion is the sum of the risks associated with technological complications at gas producing wells and environmental accidents caused by these complications.

**Keywords:** system analysis, environmental threats, gas wells

### Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** Обеспечение экологической безопасности является важной проблемой при эксплуатации опасных производственных объектов (ОПО), связанных с добычей, транспортировкой и переработкой углеводородов (УВ). Негативное экологическое воздействие на окружающую среду (ОС) стало стремительными темпами возрастать в связи с увеличением доли используемых пожаро-, взрыво-, химически опасных технологий, являющихся основными источниками загрязнения природы. Несмотря на то, что разработано множество нормативных документов федерального и отраслевого уровня, направленных на обеспечение экологической безопасности, воздействие на природу со стороны ОПО остается на очень высоком уровне.

На сегодняшний день ведется активная работа по созданию и внедрению систем, предназначенных для мониторинга состояния окружающей среды и снижения риска возникновения аварийных ситуаций на ОПО. Особенно остро стал вопрос несвоевременного предупреждения экологических происшествий в связи с последними крупными авариями в Норильске (29 мая 2020 г. – крупнейшая утечка нефтепродуктов из резервуара [22]) и в Оренбургской области (23 февраля 2021 г. – взрыв федерального магистрального газопровода [23]). К сожалению, в случае экологических катастроф часто невозможно точно определить, какой вред нанесла утечка углеводородов окружающей среде и возможно ли полное восстановление экосистемы.

Газодобывающие предприятия также относятся к ОПО, а одним из самых опасных объектов данного производства является газодобывающая скважина (ГДС). Так, например, на Астраханском газоконденсатном месторождении (АГКМ) идет добыча газа с высоким содержанием кислых компонентов (углекислого газа, сероводорода, диоксида серы), что приводит к негативному воздействию на окружающую среду Прикаспийского региона.

Обеспечение охраны ОС становится все более сложной задачей в связи с ростом добычи УВ, а также проведением геологоразведки на территориях с ограниченным режимом природопользования.

Исходя из вышеизложенного, совершенствование существующих и разработка новых систем, которые будут предупреждать экологические происшествия и обеспечивать экологическую безопасность окружающей среды при эксплуатации газовых скважин, является весьма актуальным. Под термином «экологические происшествия» понимается негативное экологическое воздействие ГДС на окружающую среду в связи с осложнениями.

Жизненный цикл ГДС состоит из следующих этапов: проектирование, строительство, эксплуатация, ликвидация. Наиболее серьезные негативные экологические воздействия на окружающую среду происходят на этапах, изображенных на рисунке 1. На каждом из приведенных этапов могут возникать осложнения. При этом под термином «осложнение» понимаются затруднения при эксплуатации ГДС, которые могут привести к негативным экологическим последствиям для окружающей среды [21].

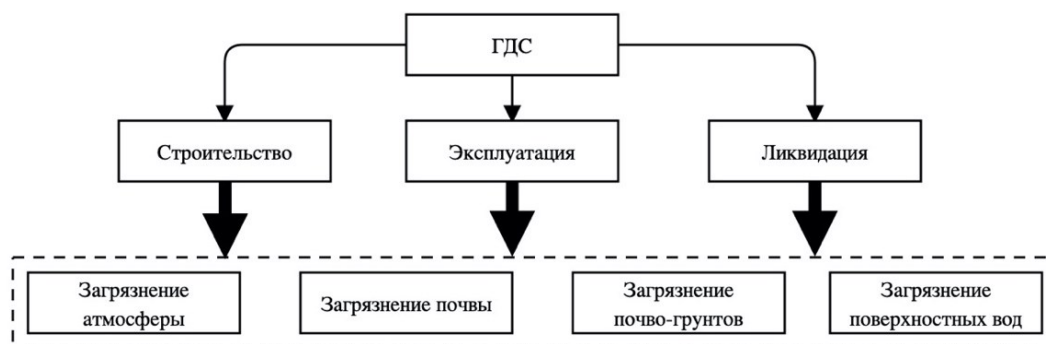


Рисунок 1 – Негативные экологические воздействия на этапах жизненного цикла ГДС

Проблемами возникновения осложнений и их негативного воздействия на экологию на этапе бурения ГДС занимались Ю.Г. Безродный, И.Ю. Макаренкова, А.И. Булатов и др. [11–13]. Проблема негативного экологического воздействия (НЭВ) на этапе ликвидации ГДС посвящены работы И.И. Агадулина, О.Я. Зорина, В.Г. Султанова и др. [16–18]. Имеются также работы, посвященные проблемам, возникающим в процессе эксплуатации ГДС (Ю.П. Коротаев, Ш.К. Гиматудинов, З.С. Алиев и др. [1–2, 5]). Однако данная проблема на сегодняшний день остается недостаточно проработанной.

**Постановка задачи.** В этой связи необходимо разработать методику оценки рисков возникновения осложнений, влекущих негативное экологическое воздействие на окружающую среду в процессе эксплуатации газовых скважин. Это, в свою очередь, требует системного анализа влияния технологических параметров, характеризующих процесс эксплуатации ГДС, на вероятность возникновения различных осложнений, которые приводят к загрязнению атмосферы, почв, подземных и поверхностных вод и т. п.

**Системный анализ основных экологических угроз для окружающей среды при эксплуатации газовых скважин.** Рассмотрим подробнее возможные экологические риски, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации газовых скважин.

НЭВ на окружающую среду со стороны газовых скважин возникают в результате плановых (прогнозируемых) и внеплановых (непрогнозируемых) осложнений, которые могут привести к экологическим происшествиям.

Изучению возможных осложнений на газовых скважинах, приводящих к негативному воздействию на ОС, и способам их устранения посвящены работы [1–9].

В работе [1] рассмотрено влияние жидкости в стволе и на забое на работу газовых и газоконденсатных скважин, а также приведены основные результаты исследований по данному вопросу. Под термином «ствол» скважины понимается пространство в массиве горных пород, ограниченное контурами скважины, т. е. ее устьем, стенками и забоем, а «забой» – нижняя часть скважины, вскрывающая продуктивный пласт. В процессе работы газовых и газоконденсатных скважин происходит конденсация водяных паров и тяжелых углеводородов из-за дросселирования и теплообмена газа со стенками скважины. Содержание конденсационной воды и конденсата может быть незначительным, но в процессе эксплуатации спустя время может скопиться значительное количество жидкости (от 0,1 до 40 кг на 1000 м<sup>3</sup> газа), а высота столба жидкости будет зависеть от дебита газа, давления и конструкции ствола скважины.

Практика эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений подтверждает факт, что в большинстве газовых и газоконденсатных месторождений в призабойной зоне пласта (ПЗП) и в стволе скважин конденсируются водяные пары и жидкие УВ. Помимо конденсационной воды, в пласте в зависимости от его строения (конфигурации и размеров пор) может содержаться от 5 до 50 % остаточной воды (считая от свободной пористости), которая также может выноситься вместе с газом.

Наряду с этим, эксплуатация газовых скважин осложняется из-за образования конуса воды вследствие притока подошвенных вод в связи с большими дебитами скважин. Вода поступает в ствол скважины, что снижает дебиты скважин по газу и увеличивает нагрузку на наземные сооружения. В этой связи авторами были выделены две группы скважин в зависимости от количества жидкости, дебита газа, давления, конструкции ствола и забоя. К первой группе отнесены скважины, в которых не происходит вынос жидкости на поверхность, а ко второй – скважины, в которых происходит вынос жидкости на поверхность. Для устранения рассмотренных осложнений на ГДС требуется проведение ремонтных работ, которые могут привести к загрязнениям подземных вод и почво-грунтов.

В [2] рассмотрены химические, механические и тепловые методы воздействия на ПЗП, основанные на искусственном увеличении проводимости пород, в результате которых возможно повышение производительности скважин. Каждому из методов дана оценка эффективности их применения.

Одним из распространенных методов является кислотная обработка пласта. Суть метода заключается в закачке в пласт определенных кислот (соляной, серной или фтороводородной) с целью образования каналов разведания, которые соединяют забой скважин с насыщенными газом участками пласта. Наряду с хорошей результативностью данного метода существует ряд основных недостатков, а именно:

1. Кислота вызывает коррозию внутрискважинного оборудования (ВСО), поэтому с целью ее предотвращения добавляют ингибиторы коррозии.

2. Большое количество вредных примесей приводит к образованию новых нерастворимых соединений, вызывающих кольматацию ПЗП (для минимизации риска образования таких соединений добавляют такие стабилизаторы, как хлористый барий, уксусная кислота и др.).

Следующий метод – гидравлический разрыв пласта (ГРП). В результате данного метода происходит образование, под воздействием давления, трещин в связи с нагнетаемой в скважину плохо фильтрующейся жидкости. Основными этапами процесса можно отметить:

1) закачка жидкости в пласт для образования трещин, которые заполняются крупнозернистым песком;

2) нагнетание жидкости-песконосителя;

3) закачка жидкости для продавливания песка в скважину. Данный метод является эффективным, но требует серьезных трудозатрат и значительных средств, а также материалов для реализации.

Еще одним методом является гидropескоструйная перфорация. Суть метода в перфорации гидropескоструйным перфоратором, спускаемым в скважину на насосно-компрессорных трубах (НКТ), обсадной колонны и породы, что позволит увеличить приток газа. К сожалению, данный метод не всегда может быть эффективен в связи с необратимыми механическими изменениями в строении пород из-за снижения пластового давления в процессе добычи и ухудшения фильтрационных свойств под влиянием возрастающего эффективного вертикального напряжения.

Четвертым методом является теплофизическое воздействие на ПЗП. Данным методом происходит удаление парафина, смол и солей. Также периодически прогреваются породы пласта вокруг скважины, благодаря чему достигается сохранение фильтрационных свойств пласта.

Пятый метод – импульсно-ударное и вибрационное воздействие. С помощью сильных ударных волн, генерирующихся при взрыве глубинных зарядов (или бомб), повышается проводимость пласта из-за образования сети трещин.

Представленные методы воздействия на ПЗП могут привести к необратимым изменениям в скелете горной породы, загрязнению подземных вод и почво-грунтов.

Работа [3] посвящена комплексному решению проблем гидратообразования в скважинах и промышленных коммуникациях. Наиболее подробно рассматриваются применяемые для борьбы с данным явлением ингибиторы, такие как: метанол, гликоли, хлорид кальция и др. Даны рекомендации по их применению.

Рассмотрено использование забойных и устьевых нагревателей газа, теплоизоляция стволов скважин и шлейфов, экономическая эффективность этих методов. Также приведено применение рассольных пластовых вод для предупреждения гидратообразования в скважинах и шлейфах. Негативное экологическое воздействие на окружающую среду связано с аварийными выбросами и разливами при транспортировке на ГДС ингибиторов, что приводит к загрязнению почв, атмосферы и поверхностных вод.

В [4] рассмотрено влияние на режим эксплуатации газовых скважин деформации пласта в призабойной зоне. Изменение давления и температуры в процессе добычи приводит к ухудшению фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) горных пород, что влияет на технологический режим работы скважин.

Помимо этого, в статье рассмотрены вопросы выбора технологического режима эксплуатации газовых скважин при наличии коррозионно-активных компонентов в составе газа и пластовой воде. Эксперименты показали, что при наличии в газовой смеси углекислого газа увеличение давления среды может привести к росту интенсивности коррозии (при заданной концентрации углекислоты). Особенно важным является минерализация и количество поступающей пластовой воды в скважину. При наличии в пластовой воде органических кислот вместе с углекислым газом в природном газе происходит усиление интенсивности коррозии скважинного и промышленного оборудования.

Одна из самых сложных проблем в эксплуатации газовых скважин связана с присутствием в составе газа сероводорода, что, например, весьма актуально для Астраханского ГКМ. При наличии водного раствора сероводорода большинство сталей при напряженном состоянии быстро разрушаются. Авторами отмечено, что при снижении температуры общая коррозия увеличивается. В результате экспериментальных исследований с образцами различных марок сталей было установлено, что при наличии в газе одновременно сероводорода и углекислого газа разрушение происходило именно из-за действия сероводородной коррозии. Коррозия трубопроводов и оборудования на ГДС может привести к непредвиденным утечкам добываемой смеси и загрязнению окружающей среды.

В работе [5] рассмотрены вопросы рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Авторы отмечают, что качество проектов разработки месторождений существенно влияет на данные показатели. В свою очередь качество проектов зависит от выбранных при проектировании методов и технологий добычи.

Авторами также даны рекомендации по достижению степени экологической чистоты. По мнению авторов, необходимо: создание определенных линейных коммуникаций; компактное размещение скважин; вертикальная компоновка оборудования; создание условий для быстрой локализации аварий.

В работе отмечается, что влияние на ОС оказывают такие факторы, как: расположение скважин; бурение скважин; освоение и исследование скважин, режим их работы; система обвязки скважин с установками комплексной подготовки газа; дожимные компрессорные станции (ДКС), промбаза, установки регенерации ингибиторов. Указанные объекты газодобычи оказывают негативное экологическое воздействие на атмосферу из-за выбросов вредных веществ; на почву из-за сброса отходов производства.

В работе [6] рассмотрены вопросы, связанные с накоплением и выносом жидкости из ствола скважины. Отмечено, что накопленную жидкость возможно удалить при периодической продувке скважин в атмосферу, также через сифонные трубки, остановкой скважин для поглощения жидкости пластом, либо при помощи ввода в скважину пенообразователя.

Рассмотрено также влияние горного давления на параметры разработки газовых и газоконденсатных месторождений. Установлено в результате экспериментальных исследований, что проницаемость и объем пор снижаются из-за деформации пород [6]. Это, в свою очередь, влияет на темп падения давления в пласте. Указанные осложнения могут привести к загрязнению атмосферы и почвогрунтов.

В [7] рассмотрены проблемы эксплуатации скважин в неустойчивых коллекторах. Проблема разрушения ПЗП, особенно вынос песка, на начальных этапах разработки была актуальна еще в самом начале развития нефтегазодобывающей промышленности. Отмечено, что основными факторами, способствующими разрушению ПЗП, являются: неправильная перфорация колонны; создание высоких депрессий на пласт; высокие забойные депрессии; большие дебиты; наличие жидкости в ПЗП.

В свою очередь, механические характеристики и деформации горных пород оказывают значительное влияние на разработку месторождений. Особенно данное влияние проявляется при высоких депрессиях, пластовых давлениях и температурах. Такие условия характерны для месторождений на больших глубинах с аномально высоким пластовым давлением (АВПД). Порода на таких месторождениях оказывается недоуплотненной из-за уравнивания горного давления пластовым давлением флюида. Отбор при таких условиях происходит при высоких депрессиях, что приводит к разрушению структуры порового пространства и ухудшению коллекторских свойств пласта и снижению показателей разработки. Представленные осложнения могут привести к нерентабельности эксплуатации скважины и перевода ее в статус «ликвидированной», что приводит к серьезным экологическим проблемам для окружающей среды (загрязнение атмосферы, поверхностных и подземных вод).

В работе [8] отмечено, что одним из основных осложняющих факторов является деформация обсадных колонн скважин. Оседание земной поверхности может произойти в процессе разработки месторождения (интервал оседания колеблется в пределах от 10 см до 10 метров и более). Деформация пласта-коллектора происходит в связи с отбором пластового флюида и, как следствие, снижением пластового давления. Зоны с незацементированными участками колонн и в первую очередь участки, находящиеся в зонах кавернообразования, деформируются. Авторами указано, что деформации обсадных колонн можно свести к минимуму при помощи следующих способов: создание зумпфа; проведение периодической инклинометрии ствола скважины; вскрытие продуктивного пласта по нормали к его кровле; тампонаж вязкопластическими жидкостями.

Рассмотрены также проблемы, связанные с коррозией металла. Указано, что почти треть от всей доли металла разрушается из-за коррозии. Факторами, влияющими на интенсивность коррозии, являются: механическое воздействие на металл, структура металла; состав агрессивной смеси; температура и давление среды. Для защиты оборудования от коррозии применяют ингибиторы, которые разделяются на группы: нейтрализаторы, экранирующие ингибиторы, комплексные ингибиторы. Помимо использования ингибиторов на промыслах для защиты оборудования применяют коррозионностойкие металлы, защитные покрытия (металлические, пластмассовые, лакокрасочные, стеклоэмалевые и др.).

Износ оборудования возможен не только по причине наличия агрессивных компонентов, но и механических примесей: частиц песка, барита, гематита, глины, продуктов коррозии. Данные механические частицы могут привести к коррозионно-абразивному износу наземного и подземного оборудования. Отмечено, что одним из наиболее эффективных средств повышения сопротивления стали газоабразивному изнашиванию является термомеханическая обработка. Также причиной разрушения газопроводов является почвенная коррозия и анаэробная биокоррозия. Для защиты трубопроводов от блуждающих токов применяются станции катодной и анодной защиты, протекторная защита и др.

Также авторами рассмотрен вопрос накопления неорганических солей при эксплуатации скважин. Основными факторами отложения солей являются: падение температуры и давления в процессе добычи; смешение пластовых вод с растворами ионного происхождения. Для предупреждения солеобразования применяются дозировочные насосы для подачи ингибитора на устье скважины. Если произошло образование глухой пробки, то необходимо провести капитальный ремонт скважины с подъемом НКТ.

В [9] рассмотрены основные причины снижения производительности скважин. На снижение продуктивности скважин, по мнению автора, влияют следующие геолого-промысловые факторы: снижение ФЕС ластва-коллектора; ухудшение состояния ствола скважины; накопление в стволе скважины жидкости. Отмечено, что на производительность скважин особенное влияние оказывает степень поражения ПЗП, которая зависит от размеров зон кольматации.

Рассмотрен также вопрос изменения продуктивности скважины из-за зацементирования водяной фазой газонасыщенных областей. Данное явление может привести к серьезному сокращению относительной проницаемости коллектора для углеводородной фазы.

Еще один фактор, влияющий на изменение продуктивности, – выпадение ретроградного конденсата в ПЗП. В связи с резкими изменениями термобарических условий вблизи забоев скважин условия накопления ретроградного конденсата разные. В процессе добычи происходит накопление конденсата в ПЗП, что приводит к уменьшению фазовой проницаемости пласта-коллектора.

Другим фактором снижения ФЕС пласта является выпадение парафинов. Из-за изменения давления и температуры находящиеся в газоконденсатной смеси тяжелые компоненты могут переходить в твердую фазу. Парафины в виде твердой и жидкой фаз могут значительно уменьшить проницаемость и пористость коллектора, что существенно может уменьшить продуктивность газоконденсатных скважин. Осложнения, рассмотренные в данной работе, могут привести к проведению капитальных ремонтных работ либо к ликвидации скважины и загрязнению атмосферы, наземных и подземных вод, почв и почвогрунтов.

Таким образом, в результате анализа имеющихся литературных источников можно сделать вывод, что к негативному экологическому воздействию могут привести как сами осложнения на ГДС, так и мероприятия по их устранению. Все основные осложнения, приведенные в данных источниках, необходимо систематизировать. Например, плановые и внеплановые осложнения можно разделить на осложнения, возникающие под землей и на земле (рис. 2а и 2б).

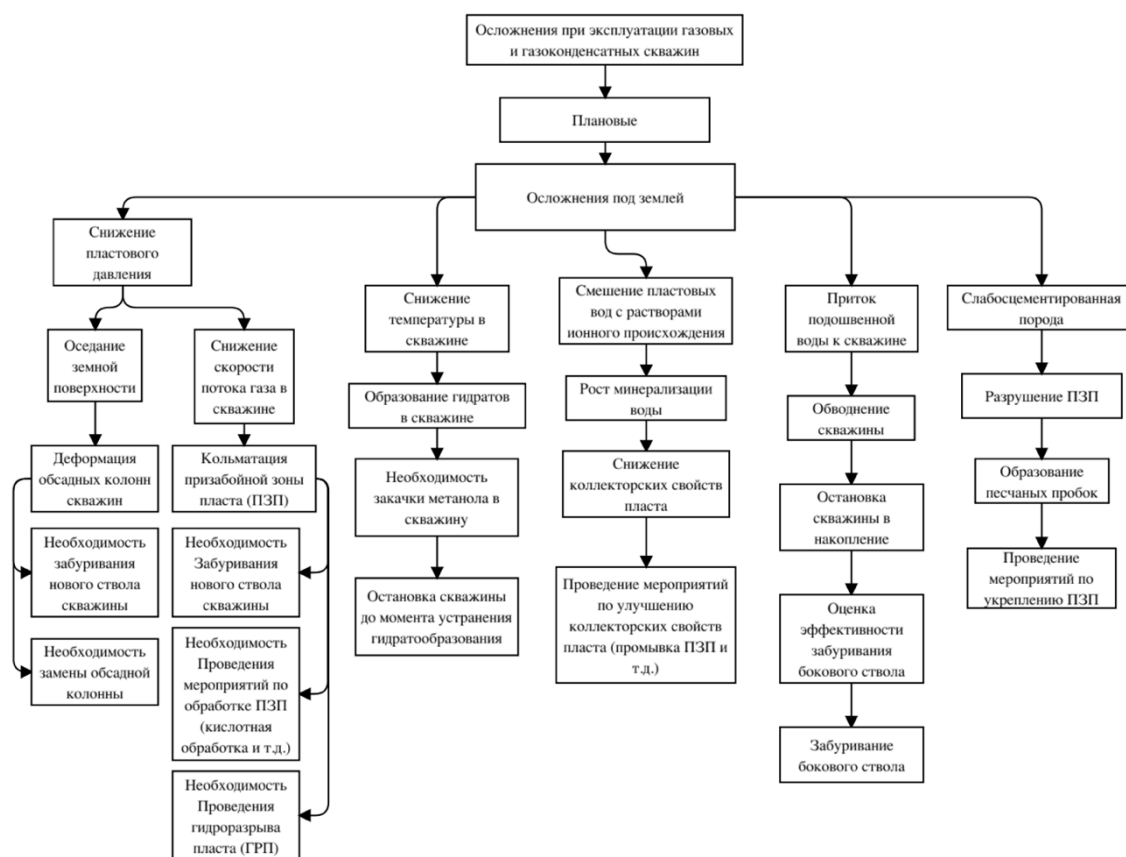


Рисунок 2а – Основные плановые осложнения под землей при эксплуатации скважины



Рисунок 2б – Основные плановые осложнения на земле при эксплуатации скважины

Помимо плановых осложнений на скважине, также могут возникнуть и внеплановые осложнения (рис. 3а и 3б).

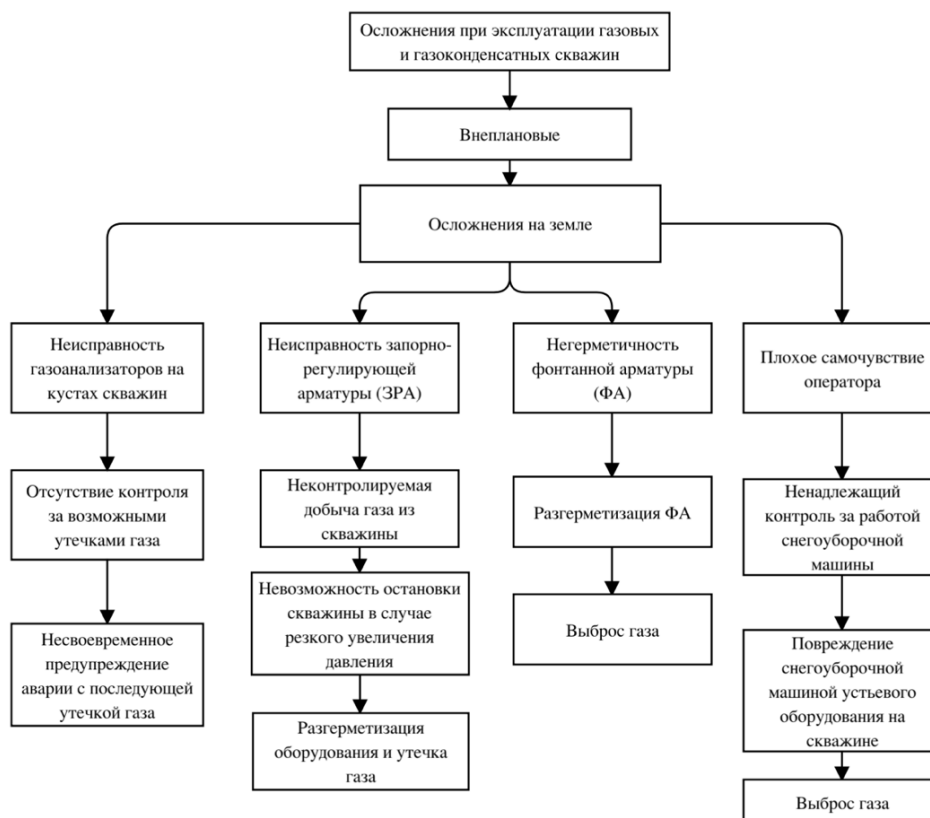


Рисунок 3а – Основные внеплановые осложнения на земле при эксплуатации скважины



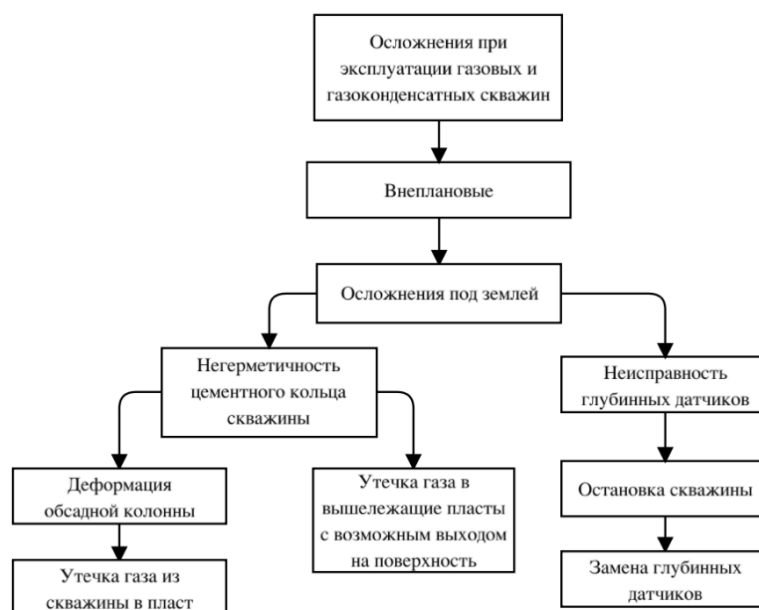


Рисунок 3б – Основные внеплановые осложнения под землей при эксплуатации скважины

Последствия, вызванные осложнениями либо мероприятиями по ликвидации осложнений, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Осложнения при эксплуатации ГДС

Классы осложнений	Условные обозначения	Осложнения	Причины осложнений
ППЗ (плано- вые под землей)	ППЗ <sub>1</sub>	Деформация обсадных колонн	Снижение пластового давления
	ППЗ <sub>2</sub>	Кольматация призабойной зоны	
	ППЗ <sub>3</sub>	Закачка метанола в скважину	Снижение температуры в скважине
	ППЗ <sub>4</sub>	Мероприятия по улучшению коллекторских свойств пласта	Смещение пластовых вод с растворами ионного происхождения
	ППЗ <sub>5</sub>	Забуривание бокового ствола	Приток подошвенной воды
	ППЗ <sub>6</sub>	Проведение мероприятий по укреплению ПЗП	Слабосцементированная порода
ПНЗ (плано- вые на земле)	ПНЗ <sub>1</sub>	Разгерметизация труб и оборудования и утечка добытой смеси	Агрессивные компоненты состава газа
	ПНЗ <sub>2</sub>	Продувка скважин на факельных установках при исследовании	Плановые исследования скважин геологами
	ПНЗ <sub>3</sub>	Разгерметизация трубы и оборудования и утечка добытой смеси	Окончание срока службы труб и оборудования по паспорту
ВППЗ (вне- плановые под землей)	ВППЗ <sub>1</sub>	Несвоевременное предупреждение аварии с последующей утечкой газа	Неисправность газоанализаторов на кустах скважин
	ВППЗ <sub>2</sub>	Разгерметизация оборудования и утечка газа	Неисправность запорно-регулирующей арматуры (ЗРА)
	ВППЗ <sub>3</sub>	Выброс газа из-за разгерметизации фонтанной арматуры (ФА)	Негерметичность фонтанной арматуры (ФА)
	ВППЗ <sub>4</sub>	Выброс газа из-за повреждения ФА снегоуборочной машиной	Плохое самочувствие оператора
ВПНЗ (вне- плановые на земле)	ВПНЗ <sub>1</sub>	Утечка газа из скважины в пласт	Негерметичность цементного кольца скважины
	ВПНЗ <sub>2</sub>	Утечка газа в вышележащие пласты с возможным выходом на поверхность	

Последствия, вызванные осложнениями либо мероприятиями по ликвидации осложнений, в свою очередь, приводят к негативному экологическому воздействию на окружающую среду, что впоследствии может грозить штрафами для компании и затратами на ликвидацию последствий от негативного воздействия на экологию.

В работе [19] предлагалось характеризовать НЭВ на окружающую среду по их длительности (долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные), масштабу (региональные, локальные и точечные) и степени устойчивости (постоянные, обратимые и необратимые). Однако необходимо отметить, что НЭВ также характеризуется объемом выбрасываемых в окружающую среду загрязняющих веществ за единицу времени и значимостью каждого воздействия, что, в свою очередь, влияет на их интенсивность. В работе [20] приводится шкала масштабов воздействия и градация экологических последствий, согласно которой можно определить экологическую значимость определенного НЭВ. В соответствии с данной шкалой можно классифицировать: **по масштабу** (выделяют локальные, где площадь воздействия до 1 км<sup>2</sup>, ограниченные – площадь до 10 км<sup>2</sup>, также местные, где площадь воздействия от 10 до 100 км<sup>2</sup>, региональные – площадь более 100 км<sup>2</sup>); **по времени** (бывают кратковременные, где время воздействия менее шести месяцев, средней продолжительности – время воздействия от шести месяцев до одного года, продолжительные – от одного до трех лет, многолетние – от трех лет и более); **по интенсивности** (бывают незначительные, где изменения не превышают пределы природной изменчивости; слабое – изменения превышают существующие пределы природной изменчивости, природная среда полностью самовосстанавливается; умеренное – изменения превышают существующие пределы природной изменчивости и приводят к нарушению отдельных компонентов природной среды, но природная среда сохраняет способность к самовосстановлению; сильное – изменения в природной среде приводят к значительным нарушениям компонентов природной среды, отдельные компоненты природной среды теряют способность к самовосстановлению); **по значимости** (низкая – величина воздействия достаточно низка; средняя – величина НЭВ находится в пределах от низкого до уровня, почти нарушающего узаконенный предел; высокая – величина превышает допустимые пределы интенсивности нагрузки на компонент природной среды, либо отмечается воздействие большого масштаба).

Кроме того, ЭП можно разделить на группы по среде, на которую оказывается воздействие (атмосфера, почвы, грунты и т.п.): первая группа «Загрязнение атмосферы» (ЭП<sub>1</sub>) включает в себя: ПНЗ<sub>1</sub>, ПНЗ<sub>2</sub>, ПНЗ<sub>3</sub>, ВППЗ<sub>1</sub>, ВППЗ<sub>2</sub>, ВППЗ<sub>3</sub>, ВППЗ<sub>4</sub>, ВПНЗ<sub>2</sub>; вторая группа «Загрязнение почвы» (ЭП<sub>2</sub>): ПНЗ<sub>1</sub>, ВПНЗ<sub>1</sub>, ВПНЗ<sub>2</sub>; третья группа «Загрязнение почвогрунтов» (ЭП<sub>3</sub>): ППЗ<sub>1</sub>, ППЗ<sub>2</sub>, ППЗ<sub>3</sub>, ППЗ<sub>4</sub>, ППЗ<sub>5</sub>, ППЗ<sub>6</sub>; четвертая «Загрязнение подземных вод» (ЭП<sub>4</sub>): ППЗ<sub>1</sub>, ППЗ<sub>2</sub>, ППЗ<sub>3</sub>, ППЗ<sub>4</sub>, ППЗ<sub>5</sub>, ППЗ<sub>6</sub>; пятая «Загрязнение поверхностных вод» (ЭП<sub>5</sub>): ПНЗ<sub>1</sub>, ВПНЗ<sub>1</sub>.

Все вышеизложенное позволило построить онтологическую схему предметной области, представленную на рисунке 4.

Помимо экологических рисков, возникающих в процессе эксплуатации ГДС, осложнения несут в себе экономические потери ( $Q$ ) для компаний. Данные осложнения или меры по устранению этих осложнений с определенной вероятностью ( $P$ ) приводят к экологическим происшествиям (ЭП). ЭП, в свою очередь, характеризуются определенными рисками ( $R$ ) негативного экологического воздействия на атмосферу, почву, почвогрунты, подземные и поверхностные воды. Риски ЭП определяются вероятностью возникновения ЭП ( $P$ ), количеством выбросов загрязняющих веществ ( $V$ ) и суммой ущерба от данных выбросов ( $S$ ).

Поэтому необходима разработка системы, позволяющей в зависимости от текущего положения на ГДС минимизировать возможные экологические и экономические риски от принимаемых решений по ликвидации осложнений. При этом критерием эффективности должен являться минимальный риск для компании:

$$R \rightarrow \min, \quad (1)$$

где под  $R$  понимается совокупный риск от ЭП.

В свою очередь,  $R$  представляет собой сумму рисков, связанных с технологическими осложнениями на ГДС и ЭП, вызванными данными осложнениями:

$$R = R^T + R^{\text{ЭП}}, \quad (2)$$

где  $R^T$  – риски, связанные с технологическими осложнениями на ГДС;  $R^{\text{ЭП}}$  – риски, связанные с ЭП на ГДС.

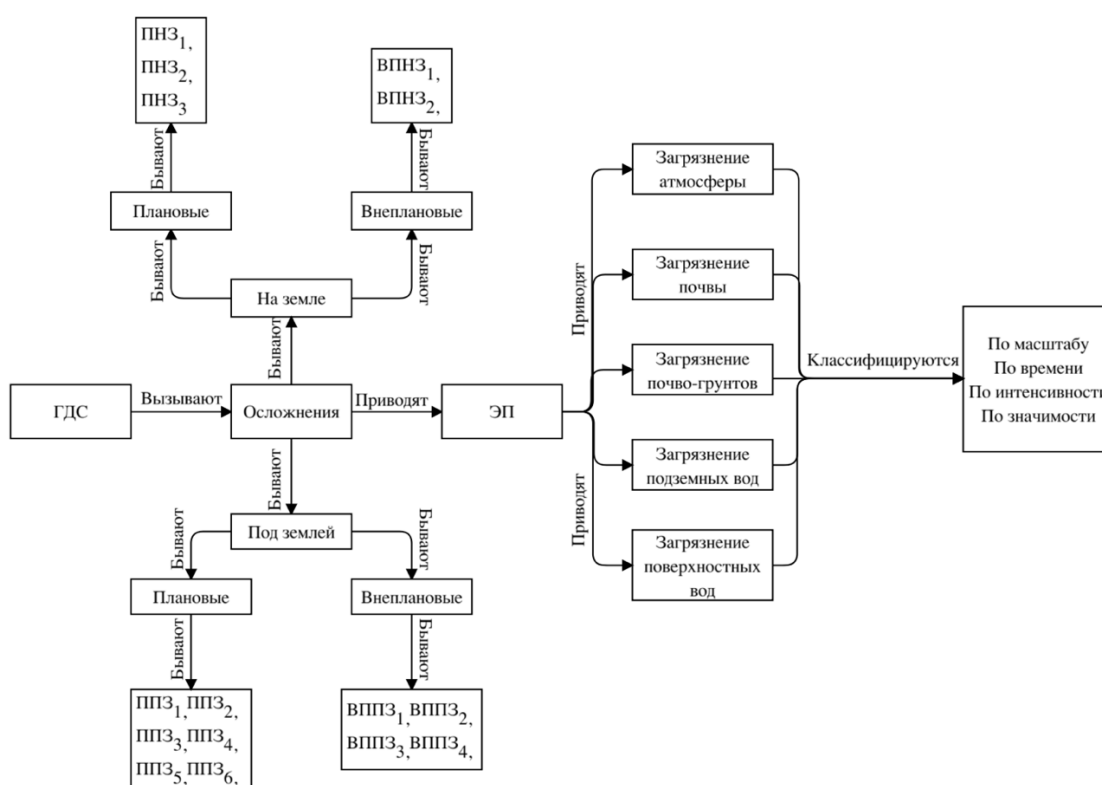


Рисунок 4 – Онтологическая схема загрязнения окружающей среды при эксплуатации ГДС

Такая система поддержки принятия решений (СППР) даст возможность лицу, принимающему решения (ЛПР), более обоснованно выбирать варианты управленческих воздействий с целью минимизации экологических и экономических потерь.

**Заключение.** Таким образом, проведенный системный анализ технологических осложнений на ГДС, которые могут приводить к негативным экологическим воздействиям на окружающую среду и высоким экономическим рискам для компаний, позволяет перейти к разработке системы, способной в оперативном режиме прогнозировать и предупреждать возможные экологические и экономические риски. В частности, выделенные плановые и внеплановые осложнения под землей и на земле на ГДС и их группировка по среде воздействия на окружающую среду могут быть использованы в формировании Базы знаний (БЗ) для СППР.

#### Библиографический список

1. Коротаев, Ю. П. Комплексная разведка и разработка газовых месторождений / Ю.П. Коротаев. – Москва : Недра, 1968. – 428 с.
2. Гиматулинов, Ш. К. Разработка и эксплуатация нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений / Ш. К. Гиматулинов, И. И. Дунюшкин, В. М. Зайцев, Ю. П. Коротаев, Е. В. Левыкин, В. А. Сахаров. – Москва : Недра, 1988. – 304 с.
3. Дегтярев, Б. В. Борьба с гидратами при эксплуатации газовых скважин в северных районах / Б. В. Дегтярев, Э. Б. Бухгалтер. – Москва : Недра, 1976. – 198 с.
4. Гриценко, А. И. Руководство по исследованию скважин / А. И. Гриценко, З. С. Алиев, О. М. Ермилов, В. В. Ремизов, Г. А. Зотов – Москва : Наука, 1995. – 523 с.
5. Алиев, З. С. Руководство по проектированию разработки газовых и газонефтяных месторождений г. Печора / З. С. Алиев, В. В. Бондаренко. – Печора : Печорское время, 2002. – 895 с.
6. Мирзаджанзаде, А. Х. Основы технологии добычи газа / А. Х. Мирзаджанзаде, О. Л. Кузнецов, К. С. Басниев, З. С. Алиев. – Москва : Недра, 2003. – 880 с.
7. Зотов, Г. А. Эксплуатация скважин в неустойчивых коллекторах / Г. А. Зотов, А. В. Динков, В. А. Черных. – Москва : Недра, 1987. – 172 с.
8. Вяхирев, Р. И. Теория и опыт добычи газа / Р. И. Вяхирев, Ю. П. Коротаев, Н. И. Кабанов. – Москва : ОАО «Издательство «Недра», 1998. – 479 с.
9. Тер-Саркисов, Р. М. Разработка месторождений природных газов / Р. М. Тер-Саркисов. – Москва : ОАО «Издательство «Недра», 1999. – 659 с.
10. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – Москва : Бюро НТД, 2017. – 271 с.

11. Безродный, Ю. Г. Разработка методов обеспечения охраны окружающей среды при проектировании и строительстве нефтегазовых скважин : дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.15 / Юрий Георгиевич Безродный. – Москва, 2009. – 369 с.
12. Макаренко, И. Ю. Экологическая оценка воздействия нефтегазодобывающей деятельности на водные объекты Среднего Приобья : автореф. дис. ... канд. геогр. наук / И. Ю. Макаренко. – Ростов н/Д, 2007. – 25 с.
13. Булатов, А. И. Актуальные проблемы охраны окружающей среды при бурении скважин / А. И. Булатов, В. И. Рябченко, В. Ю. Шеметов // Нефтяное хозяйство. – 1988. – № 6. – С. 5–9.
14. Об охране окружающей среды : федеральный закон от 10 января 2002 года № 7-ФЗ ; в ред. от 30.12.21 // Собрание законодательства РФ. – 2021. – № 52. – Ст. 1704.
15. О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года : указ Президента Российской Федерации [издан Президентом 19 апреля 2017 г. № 176] // Собрание законодательства РФ. – 2017. – № 17. – Ст. 2546.
16. Агадулин, И. И. Экологические аспекты негерметичности заколонного пространства в скважинах различного назначения / И. И. Агадулин, В. Н. Игнатьев, Р. Ю. Сухоруков // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 4. – С. 82–90.
17. Зорина, О. Я. Система удаленного газомониторинга приустьевое пространство ликвидированных глубоких скважин / О. Я. Зорина, В. В. Кудинов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 8. – С. 26–28.
18. Султанов, В. Г. Проблемы качественного крепления нефтяных скважин при их строительстве и обеспечение в последующем их надежной ликвидации, консервации / В. Г. Султанов, Л. В. Примак // Механизация строительства. – 2014. – № 7. – С. 44–48.
19. ИТС 29-2017 Добыча природного газа, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии.
20. Предварительная оценка воздействия на окружающую среду к проекту разработки месторождения Айрантыкар, Филиал ТОО «КМГ ИНЖИНИРИНГ» «Казахский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа», г. Актау. – С. 119–127.
21. Предеин, А. П. Осложнения и аварии при строительстве нефтяных и газовых скважин : учеб. пособие / А. П. Предеин. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 381 с.
22. Компанию «Норникеля» оштрафовали на рекордные 146 млрд рублей за разлив нефти // BBC NEWS. – Режим доступа: <https://www.bbc.com/russian/news-55950310>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 12.01.2022).
23. В Оренбургской области на магистральном газопроводе произошел взрыв // ТАСС. – Режим доступа: <https://tass.ru/proisshestviya/10763889>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 10.01.2022).
24. Sun, Y. Q. A Critical Review of Risks, Characteristics, and Treatment Strategies for Potentially Toxic Elements in Wastewater from Shale Gas Extraction / Y. Q. Sun, D. Wang, D. C. W. Tsang et al. // Environment International. – 2019. – Vol. 125. – P. 452–469.
25. Monika, Wójcik. Environmental Risk Assessment for Exploration and Extraction Processes of Unconventional Hydrocarbon Deposits of Shale Gas and Tight Gas: Pomeranian and Carpathian Region Case Study as Largest Onshore Oilfields / Monika Wójcik, Wojciech Kostowski // Journal of Earth Science. – 2020. – № 31 (1). – P. 215–222.
26. Mac Kinnon, M. A. The role of natural gas and its infrastructure in mitigating greenhouse gas emissions, improving regional air quality, and renewable resource integration / M. A. Mac Kinnon, J. Brouwer, S. Samuelsen // Prog. Energy Combust. Sci. – 2018. – № 64. – P. 62–92.
27. Mackay, D. J. C. Potential greenhouse gas emissions associated with shale gas extraction and use / D. J. C. Mackay, T. J. Stone. – London, United Kingdom : Department of Energy and Climate Change. – 2013. – № 50.
28. McKenzie, L. M. Human health risk assessment of air emissions from development of unconventional natural gas resources / L. M. McKenzie, R. Z. Witter, L. S. Newman, J. L. Adgate // Sci. Total Environ. – 2012. – Vol. 424. – P. 79–87.
29. Shonkoff, S. B. C. Environmental public health dimensions of shale and tight gas development / S. B. C. Shonkoff, J. Hays, M. L. Finkel // Environ. Health Perspect. – 2014. – Vol. 122 (8). – P. 787–795.
30. Annika, W. Walters. Multiple approaches to surface water quality assessment provide insight for small streams experiencing oil and natural gas development / Annika W. Walters, Carlin E. Girard, Richard H. Walker, Aida M. Farag, David A. Alvarez // Integrated Environmental Assessment and Management. – 2019. – № 15 (3). – P. 385–397.

#### References

1. Korotaev, Yu. P. *Kompleksnaya razvedka i razrabotka gazovykh mestorozhdeniy* [Integrated exploration and development of gas fields]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 428 p.
2. Gimatudinov, Sh. K. Dunyushkin, I. I., Zaytsev, V. M., Korotaev, Yu. P., Levykin, E. V., Sakharov, V. A. *Razrabotka i ekspluatatsiya neftyanykh, gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy* [Development and operation of oil, gas and gas condensate fields]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 304 p.
3. Degtyarev, B. V., Bukhgalter, E. B. *Borba s gidratami pri ekspluatatsii gazovykh skvazhin v severnykh rayonakh* [Fight against hydrates during the operation of gas wells in the northern regions]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 198 p.
4. Gricenko, A. I., Aliev, Z. S., Ermilov, O. M., Remizov, V. V., Zotov, G. A. *Rukovodstvo po issledovaniyu skvazhin* [Guidelines for the study of wells]. Moscow, Nauka Publ., 1995. 523 p.
5. Aliev, Z. S., Bondarenko, V. V. *Rukovodstvo po proektirovaniyu razrabotki gazovykh i gazonefitynykh mestorozhdeniy goroda Pechora* [Guidelines for the design of the development of gas and gas-oil fields in the city of Pechora]. Pechora, Pechorskoe vremya Publ., 2002. 895 p.
6. Mirzadzhanzade, A. H., Kuznetsov, O. L., Basniev, K. S., Aliev, Z. S. *Osnovy tekhnologii dobychi gaza* [Fundamentals of gas production technology]. Moscow, Nedra Publ., 2003. 880 p.

7. Zotov, G. A., Dinkov, A. V. Chernykh, V. A. *Ekspluatatsiya skvazhin v neustoychivyykh kollektorakh* [Operation of wells in unstable reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 172 p.
8. Vyakhirev, R. I., Korotaev, Yu. P., Kabanov, N. I. *Teoriya i opyt dobychi gaza* [Theory and experience of gas production]. Moscow, Publishing House "Nedra" OJSC, 1998. 479 p.
9. Ter-Sarkisov, R. M. *Razrabotka mestorozhdeniy prirodnykh gazov* [Development of natural gas deposits]. Moscow, Publishing House "Nedra" OJSC, 1999. 659 p.
10. *Informatsionno-tehnicheskyy spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam* [Information and technical guide to the best available technologies]. Moscow, BAT Bureau, 2017. 271 p.
11. Bezrodnyy, Yu. G. *Razrabotka metodov obespecheniya okhrany okruzhayushchey sredy pri proektirovaniy I stroitelstve neftegazovykh skvazhin : dissertatsiya ... doktora tekhnicheskikh nauk: 25.00.15* [Development of methods for ensuring environmental protection in the design and construction of oil and gas wells : dissertation ... of Doct. of Tech. Sciences: 25.00.15]. Moscow, 2009. 369 p.
12. Makarenkova, I. Yu. *Ekologicheskaya otsenka vozdeystviya neftegazodobyvayushchey deyatel'nosti na vodnye obekty Srednego Priobya : avtoreferat dissertatsii ... kandidata geograficheskikh nauk* [Ecological assessment of the impact of oil and gas production on water bodies of the Middle Ob : abstract of dissertation ... of Cand. Of Geogr. Sciences]. Rostov on Don, 2007. 25 p.
13. Bulatov, A. I., Ryabchepko, V. I., Shemetov, V. Yu. Aktualnye problemy okhrany okruzhayushchey sredy pri burenii skvazhin [Actual problems of environmental protection during well drilling]. *Neftyanoe khozyaystvo* [Oil industry], 1988, no. 6, pp. 5–9.
14. Ob okhrane okruzhayushchey sredy : federalnyy zakon ot 10 yanvarya 2002 goda № 7-FZ; v redaktsii ot 30.12.21 [On environmental protection : federal law of January 10, 2002 No. 7-FZ ; in ed. of 12.30.21]. *Sobranie zakonodatelstva RF* [Collection of legislation of the Russian Federation], 2021, no. 52, art. 1704.
15. O Strategii ekologicheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii na period do 2025 goda: ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii [izdan Prezidentom 19 aprelya 2017 goda № 176] [On the Strategy for Environmental Security of the Russian Federation for the period up to 2025: Decree of the President of the Russian Federation [issued by the President on April 19, 2017 No. 176]]. *Sobranie zakonodatelstva RF* [Collection of legislation of the Russian Federation], 2017, no. 17, art. 2546.
16. Agadulin, I. I., Ignatev, V. N., Sukhorukov, R. Yu. Ekologicheskie aspekty negermetichnosti zakolonnogo prostranstva v skvazhinah razlichnogo naznacheniya [Remote gas monitoring system near the wellhead of abandoned deep wells]. *Neftgazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2011, no. 4, pp. 82–90.
17. Zorina, O. Ya., Kudinov, V. V. Sistema udalennogo gazomonitoringa priustevogo prostranstva likvidirovannykh glubokikh skvazhin [Remote gas monitoring system near the wellhead of abandoned deep wells]. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas complex], 2012, no. 8, p. 26–28.
18. Sultanov, V. G., Primak, L. V. Problemy kachestvennogo krepleniya neftyanykh skvazhin pri ikh stroitelstve i obespechenie v posleduyushchem ikh nadezhnoy likvidatsii, konservatsii [Problems of high-quality casing of oil wells during their construction and ensuring their subsequent reliable liquidation, conservation]. *Mekhanizatsiya stroitelstva* [Construction Mechanization], 2014, no. 7, pp. 44–48.
19. *ITS 29-2017 Dobycha prirodnogo gaza, Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu I metrologii* [Natural gas production, Federal Agency for Technical Regulation and Metrology].
20. *Predvaritelnaya otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu k projektu razrabotki mestorozhdeniya Ayrantyykar, Filial TOO «KMG INZHINIRING» «Kazahskiy nauchno-issledovatel'skiy i proektnyy institut nefii i gaza»* [Preliminary environmental impact assessment for the Ayrantikar field development project, Branch of LLP "KMG ENGINEERING" "Kazakh Research and Design Institute of Oil and Gas"]. Aktau, pp. 119–127.
21. Predein, A. P. *Oslozhneniya i avarii pri stroitelstve neftyanykh i gazovykh skvazhin : uchebnoe posobie* [Complications and accidents in the construction of oil and gas wells : textbook]. Perm, Publishing House of Perm National Research Polytechnical, 2014. 381 p.
22. Kompaniyu "Normikelya" oshtrafovali na rekordnye 146 milliardov rubley za razliv nefii [Norilsk Nickel fined a record 146 billion rubles for an oil spill]. *BBC NEWS*. Available at: <https://www.bbc.com/russian/news-55950310>
23. *V Orenburgskoy oblasti na magistralnom gazoprovode proizoshel vzryv* [In the Orenburg region, an explosion occurred on the main gas pipeline]. *TASS* [TASS]. Available at: <https://tass.ru/proisshestviya/10763889>.
24. Sun, Y. Q., Wang, D., Tsang, D. C. W., et al. A Critical Review of Risks, Characteristics, and Treatment Strategies for Potentially Toxic Elements in Wastewater from Shale Gas Extraction. *Environment International*, 2019, vol. 125, pp. 452–469.
25. Monika, Wójcik, Wojciech, Kostowski. Environmental Risk Assessment for Exploration and Extraction Processes of Unconventional Hydrocarbon Deposits of Shale Gas and Tight Gas: Pomeranian and Carpathian Region Case Study as Largest Onshore Oilfields. *Journal of Earth Science*, 2020, no. 31 (1), pp. 215–222.
26. Mac Kinnon, M. A., Brouwer, J., Samuelsen, S. The role of natural gas and its infrastructure in mitigating greenhouse gas emissions, improving regional air quality, and renewable resource integration. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2018, no. 64, pp. 62–92.
27. Mackay, D. J. C., Stone, T. J. *Potential greenhouse gas emissions associated with shale gas extraction and use*. London, United Kingdom: Department of Energy and Climate Change, 2013, no. 50.
28. McKenzie, L. M., Witter, R. Z., Newman, L. S., Adgate, J. L. Human health risk assessment of air emissions from development of unconventional natural gas resources. *Sci. Total Environ.*, 2012, vol. 424, pp. 79–87.
29. Shonkoff, S. B. C., Hays, J., Finkel, M. L. Environmental public health dimensions of shale and tight gas development. *Environ. Health Perspect.*, 2014, vol. 122 (8), pp. 787–795.
30. Annika, W. Walters, Carlin, E. Girard, Richard, H. Walker, Aida, M. Farag, David, A. Alvarez. Multiple approaches to surface water quality assessment provide insight for small streams experiencing oil and natural gas development. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2019, no. 15 (3), pp. 385–397.