

МРНТИ 52.47.15

DOI: <https://doi.org/10.62724/202530606>

Мукамбеткалиева Айнаш Нурбулатовна*¹

докторант,

Атырауский университет нефти и газа имени С.Утебаева,
Атырау, Казахстан, ainash_m_89@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2236-0333

Шагильбаев Адил Жолдасович²

Заместитель директора филиала по производству

АФ ТОО «КМГ Инжиниринг»

Атырау, Казахстан, a.shagilbayev@kmge.kz, ORCID ID: 0009-0009-3653-7882

Губашев Сарсенбай Абилович³

Директор департамента проектирования бурения и экологии

АФ ТОО «КМГ Инжиниринг»

Атырау, Казахстан, S.Gubashev@kmge.kz, ORCID ID: 0009-0009-7261-9324

Әшімова Еркежан Джақыпбекқызы⁴

Докторант

Казахский национальный исследовательский технический университет

им.К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,

ashimovayerkezhan@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2763-6001

**АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ БУРЕНИЯ ГАЗОВЫХ
СКВАЖИН С ПРИМЕНЕНИЕМ АЗОТА**

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ оборудования, применяемого при бурении газовых скважин с использованием азота, с акцентом на его преимущества, особенности эксплуатации и перспективы внедрения в Казахстане. Азотная технология рассматривается как современный и перспективный метод, позволяющий значительно повысить эффективность и безопасность буровых работ. Она обеспечивает увеличение скорости проходки, снижение рисков обрушений и прихватов, минимизацию повреждения продуктивного пласта, а также сокращение затрат за счёт уменьшения потребности в тяжелой технике, персонале и промежуточном цементировании. Проведена сравнительная оценка различных конфигураций азотных комплексов: моноблочных установок на тяжелом шасси МЗКТ и мобильных систем на базе автомобилей КамАЗ и прицепов ПЗГТ. Анализ по ключевым эксплуатационным параметрам показал явное преимущество мобильных комплексов, которые лучше адаптированы к геологическим и логистическим условиям месторождений. Особое внимание уделено вопросам безопасности при работе с криогенными средами и высоким давлением, а также экологическим аспектам. Полученные результаты подтверждают эффективность применения азота и открывают новые перспективы для развития нефтегазовой отрасли Казахстана, повышая её устойчивость и конкурентоспособность.

Ключевые слова: азот, бурение, газовые скважины, азотные комплексы, криогенное оборудование, насосный агрегат.

Мукамбеткалиева Айнаш Нурбулатқызы*¹

докторант,

С.Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті,

Атырау, Қазақстан,

ainash_m_89@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2236-0333

Шагильбаев Адил Жолдасович²

Филиал директорының өндіріс жөніндегі орынбасары

"ҚМГ Инжиниринг" ЖШС АФ, Атырау, Қазақстан,

a.shagilbayev@kmge.kz, ORCID ID: 0009-0009-3653-7882

Губашев Сарсенбай Абилович³

Бұрғылау және экологияны жобалау департаментінің директоры

"ҚМГ Инжиниринг" ЖШС АФ, Атырау, Қазақстан,

S.Gubashev@kmge.kz, ORCID ID: 0009-0009-7261-9324

Әшімова Еркежан Джақыпбекқызы⁴

Докторант

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Алматы, Қазақстан,

ashimovayerkezhan@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2763-6001

**АЗОТТЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ГАЗ ҰНҒЫМАЛАРЫН БҰРҒЫЛАУҒА
АРНАЛҒАН ҚОЛДАНЫЛАТЫН ЖАБДЫҚТЫ ТАЛДАУ**

Аңдатпа. Мақалада газ ұнғымаларын бұрғылауда қолданылатын азоттық жабдықтарға кешенді талдау ұсынылған, онда оның артықшылықтарына, пайдалану ерекшеліктеріне және Қазақстанда енгізу перспективасына баса назар аударылған. Азоттық технология бұрғылау жұмыстарының тиімділігі мен қауіпсіздігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік беретін заманауи әрі болашағы зор әдіс ретінде қарастырылады. Ол өтімділіктің артуын, опырылу мен қыстырылу тәуекелдерінің төмендеуін, өнімді қабаттың зақымдануын барынша азайтуды, сондай-ақ ауыр техникаға, персоналға және аралық цементтеуге деген қажеттілікті азайту арқылы шығындарды қысқартуды қамтамасыз етеді. Өртүрлі азоттық кешендердің конфигурацияларына салыстырмалы баға берілді: ауыр МЗКТ шассисіндегі моноблокты кондырғылар және КамАЗ автокөліктері мен ПЗГТ тіркемелері негізіндегі мобильді жүйелер. Негізгі пайдалану параметрлерін талдау мобильді кешендердің айқын артықшылығын көрсетті, олар кен орындарының геологиялық және логистикалық жағдайларына жақсы бейімделген. Криогендік ортада және жоғары қысымда жұмыс істеу кезіндегі қауіпсіздік мәселелеріне, сондай-ақ экологиялық аспектілерге ерекше көңіл бөлінген. Алынған нәтижелер азотты қолданудың тиімділігін растап, Қазақстанның мұнай-газ саласын дамытудың жаңа перспективаларын ашып, оның тұрақтылығы мен бәсекеге қабілеттілігін арттырады.

Кілт сөздер: азот, бұрғылау, газ ұнғымалары, азоттық кешендер, криогендік жабдық, сорғы агрегаты

Mukambetkaliyeva Ainash Nurbulatovna^{*1}

Doctoral Student

Atyrau University of Oil and Gas named after Safi Utebaev
Atyrau, Kazakhstan, ainash_m_89@mail.ru. ORCID ID: 0000-0003-2236-0333

Shagilbayev Adil Zholdasovich²

Deputy Director for Production,

Branch of “KMG Engineering” LLP, Atyrau, Kazakhstan,
a.shagilbayev@kmge.kz, ORCID ID: 0009-0009-3653-7882

Gubashev Sarsenbay Abilovich³

Director of the Department for Drilling and Environmental Design,

Branch of “KMG Engineering” LLP, Atyrau, Kazakhstan,
S.Gubashev@kmge.kz, ORCID ID: 0009-0009-7261-9324

Ashimova Yerkezhan Zhakyipbekkyzy⁴

Doctoral Student

Kazakh National Technical Research University named after K.I. Satbayev

Almaty, Kazakhstan,
ashimovayerkezhan@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2763-6001

**ANALYSIS OF EQUIPMENT USED FOR DRILLING GAS WELLS WITH
NITROGEN INJECTION**

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of equipment used in drilling gas wells with nitrogen, focusing on its advantages, operational features, and prospects for implementation in Kazakhstan. Nitrogen technology is considered a modern and promising method that can significantly improve the efficiency and safety of drilling operations. It provides higher penetration rates, reduces the risks of borehole collapses and stuck pipe incidents, minimizes damage to the productive reservoir, and lowers costs by reducing the need for heavy equipment, personnel, and intermediate cementing. A comparative evaluation of different nitrogen complex configurations was carried out, including monoblock units on heavy MZKT chassis and mobile systems based on KamAZ vehicles and PZGT trailers. The analysis of key operational parameters demonstrated the clear advantages of mobile complexes, which are better adapted to the geological and logistical conditions of the fields. Special attention is given to safety when working with cryogenic media and high pressure, as well as to environmental aspects. The results confirm the effectiveness of nitrogen application and open new prospects for the development of Kazakhstan’s oil and gas industry, enhancing its sustainability and competitiveness.

Keywords. nitrogen, drilling, gas wells, nitrogen complexes, cryogenic equipment, pumping unit.

Введение. Современная нефтегазовая отрасль сталкивается с усложнением разрабатываемых месторождений. Это требует внедрения инновационных и эффективных технологий бурения. Одной из таких технологий является бурение с применением азота. Оно особенно важно при работе в низкопроницаемых коллекторах,

зонах низкого давления и вечномёрзлых породах. Азот используется в жидком и газообразном виде. Его применение даёт многокомпонентный положительный эффект. Главным преимуществом является рост скорости проходки до трёх раз. Также снижается риск обрушения ствола скважины. Уменьшается вероятность пожаров и взрывов при вскрытии газонефтеносных пластов. Технология позволяет отказаться от промежуточного цементирования. Сокращается потребность в тяжёлой технике и обслуживающем персонале. Всё это ведёт к значительной экономии средств. Однако широкое внедрение ограничено высокой стоимостью азотных комплексов. Такие комплексы включают криогенные ёмкости, насосные агрегаты и испарители. Поэтому необходимо тщательно анализировать технические решения и выбирать рациональные конфигурации. Цель статьи — рассмотреть опыт применения азота в Казахстане на примере компании «Шлюмберже Well Services».

Использование азота при бурении нефтяных и газовых скважин обеспечивает значительный экономический эффект за счёт увеличения скорости проходки до трёх раз и сокращения числа агрегатов и персонала. Применение газообразного или увлажнённого азота снижает риск поломок оборудования, продлевает его срок службы и минимизирует повреждение пласта. Важным преимуществом является существенное снижение вероятности взрыва и уменьшение требований к компримированию. Для газового бурения используются азотные комплексы, включающие установку и криогенную ёмкость. Азотная установка преобразует жидкий азот в газообразное состояние и закачивает его в скважину, а криогенная ёмкость служит для хранения и транспортировки. Производители разрабатывают такие установки разными способами, в том числе монтируя всё оборудование на одном шасси.

Целью настоящего исследования является анализ применяемого оборудования для бурения газовых скважин с использованием азота и определение наиболее рациональных технических решений, адаптированных к условиям казахстанских месторождений [1].

Материалы и методы исследований. При использовании жидкого азота формируется прочная фильтрационная корка, которая затем самопроизвольно исчезает, сохраняя проницаемость продуктивного пласта. Азот химически инертен по отношению к пластовым средам и включениям, а его стабильные свойства не требуют применения дополнительных реагентов. Применение жидкого азота в процессе бурения позволяет сократить затраты и сроки строительства скважин, снизить негативное воздействие на окружающую среду, а также повысить удобство и эффективность работ, включая бурение в сложных и вечномёрзлых породах.

Газовые агенты, используемые при бурении, могут быть воздухом, природным газом или азотом. Системы нагнетания газа похожи, когда используются разные типы газов. На рисунке 1 показана типичная система газового бурения, в которой используется воздух (Lyons et al., 2009). [2]

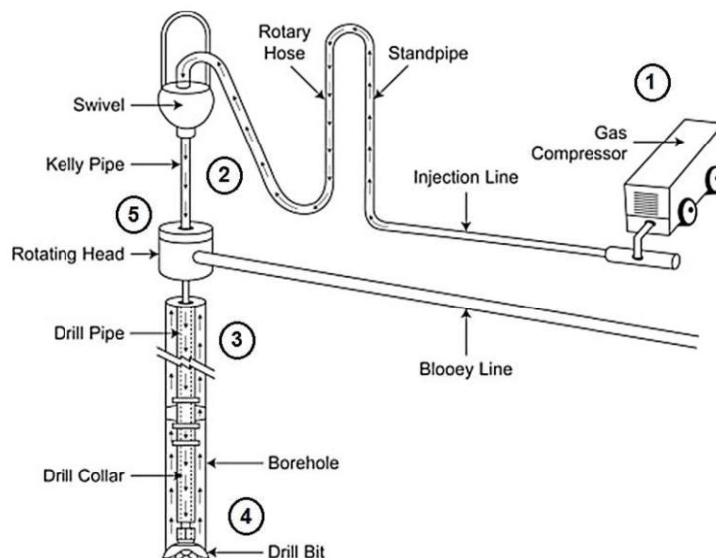


Рисунок 1 – Система бурения с использованием воздуха

Воздух перемещается (1) из атмосферы в компрессор, (2) от компрессора через стояк и ведущую трубу в бурильную колонну, состоящую из бурильных труб и утяжеленных бурильных труб (3), через бурильную колонну к долоту (4), через долото и вверх по кольцевому пространству между бурильной колонной и стволом скважины (открытый ствол и обсаженные участки ствола скважины) на поверхность (5) и через вращающуюся головку ротора в линию Блуи и обратно в атмосферу. Здесь специальным оборудованием контролируется давление нагнетания газа.

Азотная установка. Сокращение затрат всегда рассматривалось как один из ключевых способов повышения эффективности, а в условиях замедления экономического роста, в том числе в нефтегазовой отрасли, фактор экономии становится решающим при выборе оборудования. Для работы с азотом применяется криогенное насосное оборудование. В состав основных подсистем азотной насосной установки входят хранилищные ёмкости, бустерный центробежный насос жидкого азота, насос высокого давления и испаритель (теплообменник).

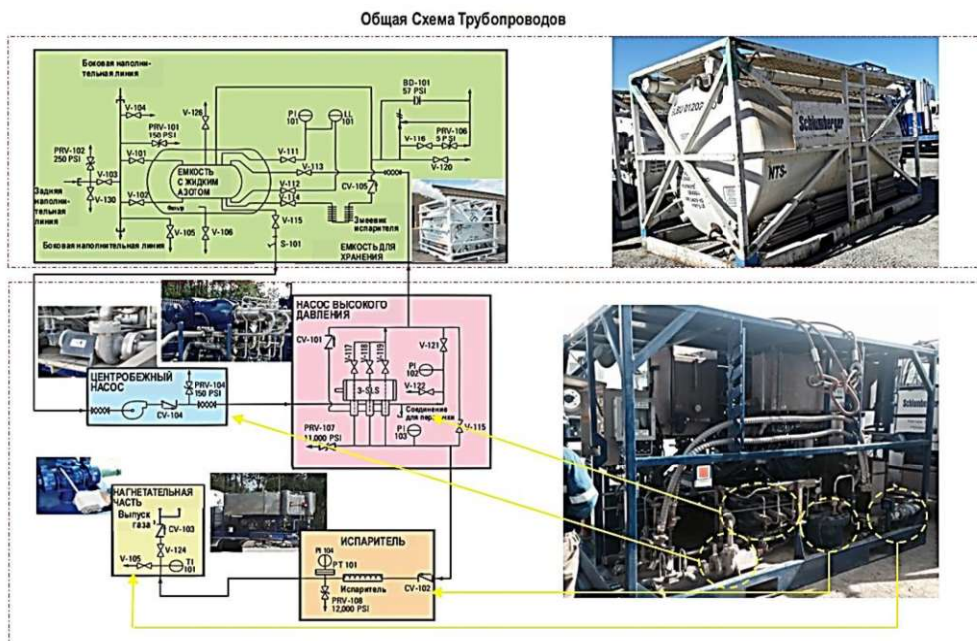


Рисунок 2 – Основные подсистемы азотной насосной установки

Следует учитывать, что подвижные, ходовые и вращающиеся элементы системы, контактирующие с жидким азотом, не имеют традиционной смазки, то есть масло в них не используется. Отвод тепла от этих деталей осуществляется за счёт низкой температуры азота. Зазоры между элементами и уплотнениями крайне минимальны, поэтому они должны быть полностью и равномерно охлаждены перед началом закачки. Нарушение или сокращение процедур охлаждения и заполнения может привести к повреждению насоса. Криогенная емкость специально сконструированы для содержания и транспортировки ЖН₂.



Рисунок 3 – Криогенная емкость

Жидкий азот быстро испаряется при комнатной температуре, поэтому криогенные ёмкости оснащаются вакуумной теплоизоляцией по принципу термоса, что обеспечивает сохранение его в жидком состоянии.

Насосный агрегат. Это криогенная установка, которая позволяет закачивать жидкий азот со сверхнизкой температурой (-196 градусов цельсия) и преобразовывать его в применимый газ, используя теплообменник.

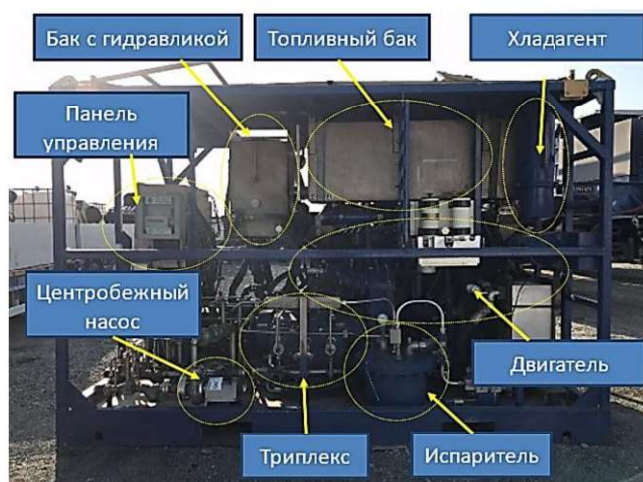


Рисунок 4 – Насосный агрегат криогенной установки

Агрегат состоит из дизельного двигателя, тепловых насосов, насоса высокого давления, испарителя, систем охлаждения и дополнительного оборудования. Он оснащён собственным двигателем и не требует внешнего питания. Двигатель соединён с приводом, который приводит в действие поршневой и шестерёнчатый насосы. Эти насосы обеспечивают подачу гидравлики на моторы, приводящие триплекс, центробежный и циркуляционный насосы. Тепловые насосы создают тепло за счёт перепада давления и при необходимости подогревают систему хладагента. Их работа контролируется с панели управления. Дополнительно бустерный центробежный насос подаёт жидкий азот в триплексный насос, поддерживая нужное давление для закачки и испарения.



Рисунок 5 – Бустерный центробежный насос для закачки жидкого азота

Бустерный центробежный насос подаёт жидкий азот из питающей ёмкости и поддерживает его давление, обеспечивая работу системы, а насос высокого давления выполняет функции плунжерного насоса, но с жидким азотом в качестве рабочей жидкости.



Рисунок 6 – Насос высокого давления

Испаритель (теплообменник) является ключевым элементом системы испарения. Он представляет собой специализированный теплообменный аппарат с камерой, внутри которой размещён змеевик, по которому циркулирует жидкий азот (ЖN_2). Жидкость контура циркуляции охлаждающей жидкости (вода/гликоль 50/50) заполняет камеру и обтекает змеевик под давлением $80\div 150 \text{ psi}\times\text{g}$.



Рисунок 7 – Теплообменник

При прохождении жидкого азота (ЖN_2) с температурой $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ по змеевику происходит его испарение и переход в газообразное состояние (ГN_2). Температура ГN_2 определяется скоростью потока жидкого азота, а также температурой и расходом водно-гликолевой смеси, поступающей в систему циркуляции хладагента. В среднем она составляет $16\text{--}20 \text{ }^\circ\text{C}$. Объём газового потока измеряется в стандартных кубических футах в минуту (SCFM) или в стандартных кубических метрах в минуту (SCMM). Контроль температуры хладагента осуществляется вручную с панели управления для поддержания стабильной температуры на входе в испаритель в пределах $38\text{--}49 \text{ }^\circ\text{C}$. Тепло для контура хладагента берётся от тепловых насосов, гидравлического теплообменника, системы охлаждения двигателя и системы смазки триплекса.

После испарителя азот подаётся в газообразном виде для закачки или смешивания, при пропускной способности теплообменника $180\,000 \text{ ст.куб. фут/час}$ и давлении до $10\,000 \text{ psi}$. Система охлаждения двигателя и гидравлический теплообменник обеспечивают необходимое тепло для контура, а в холодную погоду хладагент может подогревать гидравлическое масло[2].

Примеры применения азота в бурении. Для газового бурения азотом применяются комплексы, включающие азотную установку и криогенную ёмкость. Установка превращает жидкий азот в газообразный и закачивает его в скважину. Криогенная ёмкость, подобная термосу, хранит $13\text{--}16 \text{ м}^3$ жидкого азота. Такие установки используются на месторождениях давно. Один из вариантов исполнения — монтаж

агрегата и ёмкости на одном мощном пятиосном шасси. Однако этот вариант очень дорог в приобретении и эксплуатации. Кроме того, он требует специальных разрешений для передвижения и имеет низкую манёвренность. Большая масса и габариты ограничивают его проходимость по слабым грунтам. Поэтому всё больше внимания уделяется экономичным решениям. ООО «Колтэко» совместно с Yantai Jereh выбрали путь снижения затрат без потери качества.

Используя производственные мощности «Пермского завода грузовой техники», компания ООО «Колтэко» совместно с «Yantai Jereh Petroleum Equipment & Technologies Co., Ltd» организовала выпуск азотных комплексов на базе отечественных грузовиков высокой проходимости КамАЗ, а также прицепных шасси собственного производства ПЗГТ.

В результате нефтесервисным и нефтепромышленным компаниям предлагаются два варианта комплексов. Первый вариант – жидко-азотный комплекс на двух автомобилях КамАЗ с колесной формулой 6х6: на одном установлена азотная установка, на другом – криогенная ёмкость. Его основные преимущества – сравнительно низкая стоимость, высокая проходимость и манёвренность, простота эксплуатации, экономичность и высокая оборачиваемость. Второй вариант является ещё более доступным по цене: азотная установка размещена на шасси КамАЗ 6х6, а криогенная ёмкость – на трёхосном прицепе ПЗГТ. Здесь экономия достигается за счёт более низкой стоимости прицепа по сравнению с автомобилем, при сохранении достаточной манёвренности, проходимости и экономичности, поскольку прицеп не требует обслуживания двигателя.

Для объективной оценки эффективности трёх вариантов комплексов их характеристики были сведены в таблицу и проанализированы по балльной системе.

Азотные комплексы ООО «Колтэко», как и другие разработки компании (например, колтюбинговые установки), созданы на основе технологий «Yantai Jereh Petroleum Equipment & Technologies Co., Ltd» – международного концерна с широким производственным опытом. Большая практика проектирования и эксплуатации нефтегазового оборудования позволила создать комплексы с высоким функционалом, эффективностью и удобством работы.

Конструкция азотной установки на автомобильном шасси включает испарители, палубный двигатель внутреннего сгорания, аккумуляторные батареи и криогенный насос. Все узлы интегрированы в единую систему управления, размещённую в теплоизолированном модуле, откуда ведётся управление процессами, контроль и телеметрия. Кроме того, система может синхронизироваться с другим оборудованием, применяемым при работе со скважиной, например, с колтюбинговой установкой.

Комплексы спроектированы с учётом удобства операторов и рассчитаны на эксплуатацию в условиях умеренного климата, соответствуя требованиям ГОСТ 15150-69 категории У1. Это позволяет использовать их при перепадах внешних температур от –40 до +50 °С без снижения эффективности[3].

Таблица 1 -Сравнение вариантов исполнения азотных комплексов

	ВАРИАНТ №1	ВАРИАНТ №2	ВАРИАНТ №3
СРАВНИВАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ	Жидко-азотный агрегат с криогенной емкостью на	Жидко-азотный агрегат на шасси КамАЗ-65224 (6×6) + Емкость криогенная на	Жидко-азотный агрегат на шасси КамАЗ-65224 (6×6) Емкость

	шасси МЗКТ (10×10)	шасси КамАЗ- 65224 (6×6)	криогенная на шасси прицепа
Полная масса ТС комплекса (с полной емкостью) при эксплуатации по дорогам общего пользования, необходимость оформления спец, пропуска	51100 кг требуется разрешение	23000 кг + 30500 кг	23000 кг + 29000 кг
Габаритные размеры ТС комплекса при эксплуатации по дорогам общего пользования, необходимость оформления спец, пропуска	15275×2550×4155 требуется разрешение	9050×2500×4000 + 9050×2500×4000	18350×2500×4000
Емкость криогенной цистерны в составе комплекса	13 м ³	13 м ³	15 м ³
Паспорт транспортного средства	ПСМ	ПТС	ПТС
БАЛЬНАЯ СИСТЕМА СРАВНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ: 0 – худший показатель; 1 – приемлемо; 2 – лучший показатель			
Маневренность в условиях места работы	0	2	1
Проходимость в условиях бездорожья	1	2	1
Удобство эксплуатации	0	2	2
Количество персонала	0	1	2
Экономичность	0	1	2
Оборачиваемость (скорость перемещения и разворачиваемости)	0	2	2
Объем перевозимого жидкого азота	1	1	2
Возможность доступной оборачиваемости криогенной емкости	0	2	1
Ремонтпригодность, доступность запасных частей шасси	0	2	2
Надежность базового шасси	1	2	2
Сложность обслуживания и ремонта базового шасси	0	2	2
ИТОГО БАЛЛОВ:	3	19	19

Криогенная ёмкость является важной частью азотного комплекса и используется для перевозки запаса жидкого азота. По конструкции она представляет собой крупный термос с двойными стенками и теплоизоляционным слоем между ними. ООО «Колтэко» предлагает ёмкости объёмом 10; 12,5 и 16 м³. Такие ёмкости предназначены для приёма, транспортировки, кратковременного хранения и выдачи сжиженных газов — азота, кислорода и аргона. Их эксплуатация, как и всего азотного комплекса, возможна в

условиях умеренного климата (категория У) и категории размещения 1 по ГОСТ 15150-69, то есть на открытом воздухе при температурах от -40 до $+50$ °С.

Криогенные ёмкости могут монтироваться как на автомобильные шасси, так и на двух- или трёхосные прицепы. Подобные автопоезда поставлялись для сервисной компании ООО «УралДизайн-ПНП», которая успешно эксплуатирует их на нефтяных месторождениях Пермского края, Ханты-Мансийского автономного округа и других регионов.

Помимо указанных комплексов, ООО «Колтэко» совместно с «Yantai Jereh Petroleum Equipment & Technologies Co., Ltd» выпускает широкий спектр жидко-азотных установок. В линейке представлены как установки с регенерацией тепла, так и с прямым испарением. Среди них есть и уникальные машины, не имеющие аналогов на российском рынке. К примеру, установка с испарителем VWP-360 обеспечивает производительность по газообразному азоту до 170 м³/мин при максимальном давлении $103,4$ МПа.

Бурение на депрессии — это современный метод, который защищает пласт от повреждений при его вскрытии. В отличие от традиционных технологий, оно проводится при пониженном гидростатическом давлении, что предотвращает проникновение бурового раствора в пласт. Такой подход сохраняет проницаемость коллектора и повышает коэффициент извлечения нефти. Важным условием является контроль за взрывоопасностью метана и флюидов, которые поступают в скважину во время бурения. Азотирование бурового раствора обеспечивает взрывобезопасность, увеличивает скорость проходки и снижает износ бурового инструмента. Для предотвращения осложнений, таких как проникновение фильтрата или коррозия, в раствор закачивается азот с расходом 10 – 30 м³/мин. Эффективная схема предполагает использование трёх передвижных азотных компрессорных станций, работающих автономно. Эти установки позволяют получать азот высокой чистоты прямо на месте бурения, что делает процесс более безопасным и быстрым. Газообразный азот также применяется при цементировании и тампонажных работах, улучшая качество изоляции колонн. Вспененный азотом цемент сокращает время ввода скважины в эксплуатацию и снижает негативное воздействие на пласт.

Наша компания имеет значительный опыт участия в работах по бурению на депрессии. Компрессорные станции СДА-10/251 и ТГА-10/251, которые мы применяем, полностью отвечают требованиям к оборудованию для получения азота непосредственно на месте бурения с отрицательным дифференциальным давлением.

При традиционных технологиях бурения в зоне вечной мерзлоты нередко возникают осложнения, вызванные использованием буровых растворов с высокими рабочими температурами, негативно воздействующими на криолитовый слой. Основным методом предотвращения подобных проблем является поддержание отрицательной температуры стенок скважины. Для этого применяются различные буровые агенты — от охлаждённого воздуха и специальных растворов до устойчивой пены.

Эффективным способом решения указанных задач является использование жидкого азота в качестве рабочего агента. Азот составляет основную часть воздуха — $78,1\%$ по объёму и $75,6\%$ по массе. Для его сжижения необходимо охладить газообразный азот ниже критической температуры $t_{кр} = -149,9$ °С при давлении $P_{кр} = 3,9$ МПа. С термодинамическими свойствами азота можно ознакомиться в работах [2,3]. Азот экологически безопасен, инертен к воде, нефти и газу, а также является самым доступным газом, причём жидкий азот минимум в пять раз дешевле буровых растворов.

Технология бурения с применением жидкого азота улучшает работу долота за счёт промораживания стенок скважины, предотвращая их обвалы и прихваты инструмента, а также позволяет в ряде случаев проводить скважину за один спуск-подъём. Воздействие температурного удара вызывает микроразрывы в призабойной зоне, повышая проницаемость пласта. Создаваемая фильтрационная корка впоследствии самоликвидируется, сохраняя свойства коллектора. Жидкий азот инертен, не требует дополнительных реагентов и безопасен для пласта. Его применение снижает затраты, сокращает сроки строительства скважин, минимизирует экологический ущерб, повышает комфорт и эффективность работ, особенно в осложнённых и вечномёрзлых условиях[4].

Бурение скважин с применением азота (БСПА). При нормальных условиях (комнатная температура и атмосферное давление) азот представляет собой бесцветный, без запаха, нетоксичный и негорючий газ. В жидком состоянии он находится при чрезвычайно низких температурах и представляет собой прозрачную жидкость с плотностью около 0,8 г/см³. Жидкий азот относится к криогенным жидкостям: при контакте с живыми тканями он вызывает мгновенное отмораживание, а при соприкосновении с некоторыми видами стали способен вызвать растрескивание.

Перевозится азот в виде жидкого азота (ЖN₂), а в скважину закачивается уже в газообразной форме (ГN₂). В процессе закачки он претерпевает значительные изменения — от температуры -196 °С при давлении 1,02 атм. до +40 °С и давления до 680,5 атм., что соответствует максимальному выходному давлению насосов для закачки азота.

Таблица 2 -Переводные показатели объема азота

Жидкий азот (ЖN ₂)	Вес (фунты)	Ст. куб. футов газа	Галлонов жидкости
1 фунт	1,0	13,8	0,148
1 галлон	6,735	93,12	1,0
1 куб. фут	50,46	696	7,48

В связи с естественным падением пластового давления в резервуаре месторождения Б компания ТШО внедрила технологию бурения с азотной шапкой, что позволяет поддерживать гидравлическую связь с продуктивным пластом и обеспечивает безопасное проведение буровых работ методом бурения без выхода циркуляции (ББВЦ). Представленная программа носит характер методических рекомендаций, при этом окончательные свойства бурового раствора будут определяться реальными условиями конкретной скважины.

Программа буровых растворов. В рассматриваемом интервале бурение выполняется с использованием раствора на нефтяной основе с водонефтяным фактором 80/20–95/5 и плотностью 0,77–1,93 г/см³. Такой раствор характеризуется ДНС 10–15 фнт/100 фт², пластической вязкостью 4–16 сПз и СНС 11–22 фнт/100 фт². Водоотдача при высоких температуре и давлении составляет 2,0–4,0 мл/30 мин, а электрическая стабильность достигает 1000–1500 В. Параметры поддерживаются следующим образом: щёлочность раствора – 6–8, избыточная известь – 7,0–10,0 фнт/барр, оксид цинка – 3–4 фнт/барр.

Состав раствора включает: VG-Supreme (органоглиняная глина), VersMul (эмульгатор), VersaMod (модификатор реологии), VersaTrol (понижитель фильтрации), VersaThin HF (разжижитель), VersaCoat HF (эмульгатор), хлорид кальция, известь,

дизельное топливо, раствор хлорида кальция, Versa HRP (загуститель), барит, добавки для регулирования фильтрации и оксид цинка (нейтрализатор H₂S).

В условиях бурения без выхода циркуляции (ББВЦ) затрубное пространство заполняется столбом раствора на нефтяной основе, что создаёт пластовое давление выше гидростатического. Статическое равновесие затрубья обеспечивается устьевым давлением на вращающемся превенторе. При проведении СПО КНБК или хвостовика скважину переводят на постоянное контролируемое поглощение до восстановления элемента ВПУ, поддерживая при этом управляемый гидродинамический столб.

Предлагаемый модифицированный метод заключается в формировании азотной шапки под давлением над столбом раствора, что позволяет удерживать гидравлическую связь с продуктивным пластом. При дальнейшем снижении пластового давления ниже 6,6 ррг изменений в технологии не требуется, корректируется лишь объём закачиваемого азота. В зависимости от условий можно регулировать либо давление азотной шапки, либо гидростатический столб для сохранения забойного давления.

Этот подход может успешно применяться до тех пор, пока пластовое давление не опустится ниже гидростатического давления самого лёгкого бурового раствора. На данный момент на месторождении Б используется AMODRILL 1500 с минимальной плотностью 6,6 ррг. Если давление пласта снизится ниже этого уровня, методику ББВЦ придётся адаптировать, чтобы устранить риски, возникающие при невозможности поддерживать гидростатический столб от устья до продуктивного горизонта. [5].

Результаты и их обсуждение. Проведённый сравнительный анализ трёх вариантов исполнения азотных комплексов показал выраженное преимущество решений, основанных на шасси КАМАЗ (6×6) и прицепах ПЗГТ, по сравнению с моноблочным вариантом на базе тяжёлого шасси МЗКТ. При балльной оценке эксплуатационных параметров данные варианты набрали по 19 баллов, тогда как моноблочная установка получила лишь 3 балла. Такое распределение связано с целым рядом факторов, включая более высокую маневренность, экономичность, простоту эксплуатации и отсутствие необходимости в специальных разрешениях при транспортировке оборудования по дорогам общего пользования.

Практическая апробация оборудования на отечественных месторождениях подтвердила, что мобильные азотные комплексы на базе отечественных шасси обеспечивают высокую скорость развертывания и оборачиваемость, что особенно важно в условиях рассредоточенных объектов добычи. Они также позволяют существенно сократить затраты на логистику и обслуживание, сохранив при этом требуемый уровень производительности. Дополнительным преимуществом стала возможность эксплуатации комплексов в широком диапазоне климатических условий — от -40 до +50 °С, что отвечает требованиям стандартов ГОСТ 15150-69

Результаты испытаний также показали, что использование азота в качестве рабочего агента при бурении существенно повышает эффективность процессов. За счёт криогенного промораживания стенок скважины снижается риск обвалов и прихватов инструмента, что положительно сказывается на общей безопасности операций. При этом возрастает срок службы долота, сокращается необходимость промежуточного цементирование, а в ряде случаев возможно проведение скважины за один спуск-подъём. Экономическая целесообразность подтверждается снижением потребности в тяжёлой технике и уменьшением численности обслуживающего персонала

Обсуждая полученные результаты, следует отметить, что ключевым условием успешной реализации технологии является выбор оптимальной конфигурации азотного комплекса. Моноблочные установки, несмотря на более высокую вместимость и

мощность, оказываются экономически неэффективными и логистически ограниченными. Напротив, модульные решения на базе КАМАЗ и прицепов представляют собой сбалансированный вариант, позволяющий сочетать производительность и удобство эксплуатации.

Важным направлением дальнейшего развития технологии остаётся использование азота не только при бурении на депрессии, но и в процессе цементирования и тампонажных операций. Вспененные азотом цементные растворы позволяют повысить качество изоляции колонн и снизить риск повреждения продуктивного пласта, что делает данное направление перспективным для внедрения в отечественную практику. Кроме того, использование современных материалов, устойчивых к криогенным температурам, повышает надёжность оборудования и снижает эксплуатационные риски

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что применение азота в бурении является не только технологически целесообразным, но и экономически выгодным, а использование мобильных отечественных азотных комплексов открывает новые перспективы для нефтегазовой отрасли Казахстана.

Заключение. Анализ показал, что бурение с применением азота значительно эффективнее традиционных методов, обеспечивая высокую скорость проходки, снижение осложнений и экономию затрат. Технология экологически безопасна, так как азот инертен и не вредит пласту и окружающей среде. Наиболее оптимальными признаны азотные комплексы на шасси КамАЗ и прицепах ПЗГТ, сочетающие манёвренность, проходимость и экономичность, тогда как моноблочные установки оказались менее эффективными. Успешное применение требует соблюдения мер безопасности и использования специальных материалов. Дальнейшее развитие связано с автоматизацией и расширением применения азота, включая цементирование и тампонаж. Внедрение отечественных комплексов открывает новые перспективы для нефтегазовой отрасли Казахстана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галинов Яков Михайлович. Статья «Азотные комплексы. Снижение затрат при приобретении и эксплуатации» [Текст] / опубликована в журнале «Neftegaz.RU» (№6, Июнь 2015). Директор по стратегическому развитию ООО «Колтэко»
2. Equipment in Gas Drilling Systems. Boyun Guo Ph.D, Gefei Liu, in Applied Drilling Circulation Systems, 2011
3. Отчет компании “Шлюмберже Well Services” [Текст] / , 2018.
4. Зайцев В.И., Карпиков А.В., Бурение скважин с комбинированным регулированием давления. [Текст] / 2022г.
5. Технический проект на бурение эксплуатационной наклонно-направленной скважины Т, месторождение Б. [Текст] / - Атырау: ТОО «КМГ Инжиниринг». 2024. 87 с.

REFERENCES

1. Galinov Yakov Mihajlovich. Stat'ya «Azotnye kompleksy. Snizhenie zatrat pri pribretenii i ekspluatatsii» [The article "Nitrogen complexes. Cost reduction during acquisition and operation"] / opublikovana v zhurnale «Neftegaz.RU» (№6, Iyun' 2015). Direktor po strategicheskomu razvitiyu ООО «Kolteko» – (In Rus)
2. Equipment in Gas Drilling Systems. Boyun Guo Ph.D, Gefei Liu, in Applied Drilling Circulation Systems, (2011)
3. Otchet kompanii “Shlyumberzhe Well Services” [Report of the Schlumberger Well Services company] / , (2018). – (In Rus)

4. Zajcev V.I., Karpikov A.V., Burenie skvazhin s kombinirovannym regulirovaniem davleniya. [Drilling wells with combined pressure control.] / (2022) – (In Rus)

5. Tekhnicheskij proekt na burenie ekspluatacionnoj naklonno-napravlennoj skvazhiny T, mestorozhdenie B. [Technical design for drilling an operational directional well T, field B.] / - Atyrau: TOO «KMG Inzhiniring». (2024). 87 s. – (In Rus)