Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2023, Том 15, № 3 / 2023, Vol. 15, Iss. 3 https://esj.today/issue-3-2023.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/40NZVN323.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:
Воронцов, М. А. Перспективы и проблемы создания инверсивных детандер-компрессорных установок для применения в составе систем обустройства месторождений для повышения эффективности добычи газа / М. А. Воронцов, Д. В. Изюмченко, А. С. Грачев, А. А. Григорик // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 3. — URL: https://esj.today/PDF/40NZVN323.pdf

For citation:
Vorontsov M.A., Izumchenko D.V., Grachev A.S., Grigorik A.A. Prospects and problems of creating reversible expander-compressor units as part of field development systems for increasing efficiency of gas production. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(3): 40NZVN323. Available at: https://esj.today/PDF/40NZVN323.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 622.324.5; 621.5.09; 621.515.1; 621.515.4; 621.513.2

Воронцов Михаил Александрович
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Россия
Начальник лаборатории
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», Москва, Россия
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург, Россия
Кандидат технических наук
E-mail: Vorontsov.m@gubkin.ru
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=697293

Изюмченко Дмитрий Викторович
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Россия
Начальник центра
Кандидат технических наук
E-mail: rosine@mail.ru

Грачев Анатолий Сергеевич
ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Россия
Научный сотрудник
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: grachev.m@gubkin.ru

Григорик Андрей Александрович
ООО «Газпром комплектация», Санкт-Петербург, Россия
Начальник технического управления
E-mail: andrey.arh@inbox.ru

Перспективы и проблемы создания инверсивных детандер-компрессорных установок для применения в составе систем обустройства месторождений для повышения эффективности добычи газа

Аннотация. Задача повышения эффективности процессов добычи природного газа сохраняет свою актуальность. В статье представлены результаты исследования, выполненного с целью определения возможности комплексного полезного использования пластовой энергии при разработке месторождений с аномально высокими пластовыми давлениями. В ходе

исследования осуществлен поиск и анализ данных открытых источников, рассмотрены наиболее распространенные способы повышения эффективности добычи газа путем внедрения дополнительного оборудования в состав системы обустройства газовых промыслов (эжекторов, модульных компрессорных установок, турбодетандеров и др.). Подробно рассмотрен перспективный способ повышения эффективности добычи газа на основе применения обратимых (инверсивных) установок на базе винтовых машин и показана ограниченность его применения. Рассмотрена возможность создания инверсивных детандер-компрессорных установок на основе других типов оборудования. Результаты, представленные в данной работе, показывают, что: (а) наиболее распространенные способы повышения эффективности процессов добычи в основном разработаны для этапов компрессорного периода и/или падающей добычи, (б) предложения по использованию высокого пластового давления на начальном этапе разработки носят концептуальный характер, для их реализации требуется разработка нового оборудования, (в) существующий технический уровень винтового оборудования не позволяет разработать инверсивные детандер-компрессорные установки для обустройства месторождений без кардинальных доработок, (г) принцип инверсии может быть реализован на базе различных типов оборудования, предложены перспективные концепции создания инверсивных детандер-компрессорных установок для применения в составе систем обустройства месторождений природного газа (на основе динамических, объемных, комбинированных детандерных и компрессорных установок), обоснованы направления соответствующих перспективных научных и опытно-конструкторских работ.

Ключевые слова: эффективность добычи газа; аномально высокие пластовые давления; обратимые детандер-компрессорные установки; поршневые компрессоры; винтовые компрессоры; динамические компрессоры; поршневые детандеры; винтовые детандеры; турбодетандеры

Введение

Задача повышения эффективности процессов добычи природного газа сохраняет свою актуальность[1] [1]. Представляет интерес разработка технических решений, которые обеспечат полезное использование особенностей начального бескомпрессорного периода эксплуатации месторождений — высокие давления пластового газа. Данное направление развития технологий добычи газа наиболее актуально для месторождений с аномально высокими пластовыми давлениями (АВПД).

Наиболее известные решения повышения эффективности технологии добычи (распределенное компримирование, применение турбодетандерных агрегатов (ТДА), применение эжекторов для выравнивания давлений скважин с высоким и низким давлениями и др. [2–6]) в основном охватывают компрессорный период разработки месторождений, падающей и/или завершающей добычи. Соответственно, потенциал высоких давлений не преобразуется в положительный технологический и/или экономический эффект. В настоящее время избыточное давление редуцируется до значений, обусловленных необходимостью обеспечения надежности промысловых систем и оптимальных технико-экономических показателей проектов разработки.

[1] Паспорт программы инновационного развития ПАО «Газпром» до 2025 года: официальный сайт. — URL: https://www.gazprom.ru/f/posts/97/653302/prir-passport-2018-2025.pdf (дата обращения 05.07.2023).

Концепция обустройства месторождений природного газа, предусматривающая полезное использование особенностей начального периода разработки, изложена в патенте «Способ повышения эффективности добычи газа и установка для его осуществления»[2], в котором описано решение на основе внедрения в состав систем обустройства принципиально новых инверсивных детандер-компрессорных установок (ИДКУ), которые могут работать в режимах и расширения, и сжатия природного газа. В данном патенте для ИДКУ принято название установок генерации электроэнергии и компримирования низконапорного газа (ГЭиКНГ): в начальный период разработки месторождения данные установки позволяют использовать высокие давления пласта для бестопливной выработки электрической энергии, а после снижения пластового давления ниже минимально-допустимого значения, оборудование «переключают» для работы в режиме компримирования газа. Примеры создания и применения ИДКУ на данный момент отсутствуют, данная технология в настоящий момент находится на этапе освоения и осмысления целесообразности ее практического применения и потенциала для масштабного внедрения.

Авторами был проведен анализ возможности использования решений патента[2] для повышения эффективности разработки месторождений с АВПД путем обеспечения комплексного использования пластовой энергии. К месторождениям с АВПД относят Астраханское месторождения, ачимовские залежи Уренгойского месторождения и др. Анализ и расчетные оценки, представленные в данной статье, выполнены для условий Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ). На АГКМ[3] [7] осуществляется редуцирование газа от устьевых давлений 41,1…35,0 МПа до давления в газосборной сети (ГСС) 12,0 МПа. Неэффективно редуцируемый перепад порядка 29,1…23,0 МПа может быть использован для осуществления бестопливной генерации электрической энергии.

Методика исследования

Исследование основано на обзоре научной литературы, материалов и каталогов производителей детандерного и компрессорного оборудования, на применении общетеоретических методов анализа и синтеза информации, а также классификации и систематизации рассмотренных способов повышения эффективности процессов добычи газа, конструктивных особенностей, достигнутых характеристик и параметров работы детандерного и компрессорного оборудования (давления, единичные мощности и отношения давлений). Также выполнены расчеты перепадов давлений на установке ИДКУ в режиме компримирования для ожидаемых показателей их эксплуатации в составе систем обустройства АГКМ.

Результаты исследования

Краткий обзор решений для повышения эффективности технологических процессов добычи газа

Перспективные технологические решения для повышения эффективности процессов добычи газа должны обеспечивать возможность увеличения срока эффективной добычи [1], а

[2] Патент № 2788803 Российская Федерация, МПК F17D 1/065 (2006.01), СПК F17D 1/065 (2022.08). Способ повышения эффективности добычи газа и установка для его осуществления: № 2021136412: заявл. 09.12.2021: опубл. 24.01.2023 / Воронцов М.А., Грачев А.С., Козлов А.В., Прокопов А.В., Ротов А.А., Фальк А., Чепурнов А.Н.; заявитель Газпром ВНИИГАЗ. — 9 с.: ил. — Текст: непосредственный.

[3] Изюмченко Д.В. Усовершенствование газодинамических методов исследования скважин астраханского газоконденсатного месторождения // Диссертация на соискание звания кандидата технических наук. — Москва. — 2002. — 114 с.

также учитывать современные глобальные тренды, которые в обозримой перспективе могут привести к кардинальному изменению внешних коньюнктурных факторов, например, стремления увеличить долю альтернативных источников генерации электрической энергии и повестку по декарбонизации ведущих мировых экономик[4].

Известны различные решения для повышения эффективности разработки месторождений: распределенное компримирование [2], технологии подготовки газа с ТДА [3], применение эжекторов для выравнивания давлений скважин с высокими и низкими давлениями [4; 5], технологии выноса жидкости из скважин и шлейфов в период снижения пластовых давлений [6] и др.

Распределенное компримирование реализуется на газовых промыслах в результате ввода модульных компрессорных установок (МКУ) в состав систем обустройства месторождений природного газа, что позволяет осуществлять интенсификацию отборов газа, а также позволяет реализовать эффективные способы борьбы с обводнением скважин и шлейфов. Принципиальная схема распределенного компримирования представлена на рисунке 1. Достоинствами данной технологии являются [2]:

- снижение негативных последствий накопления жидкости в промысловых газосборных сетях (ГСС) и, как следствие, улучшение условий работы скважин;
- снижение гидродинамических потерь в промысловых трубопроводах ГСС за счет увеличения уровня эксплуатационных давлений;
- более гибкое регулирование режимов работы дожимной компрессорной станции (ДКС), что позволит обеспечивать условия эффективной загрузки газоперекачивающих агрегатов;
- возможность управления разработкой отдельных зон газовой залежи и рационального использования энергии пластового давления.

К недостаткам данных систем следует отнести:

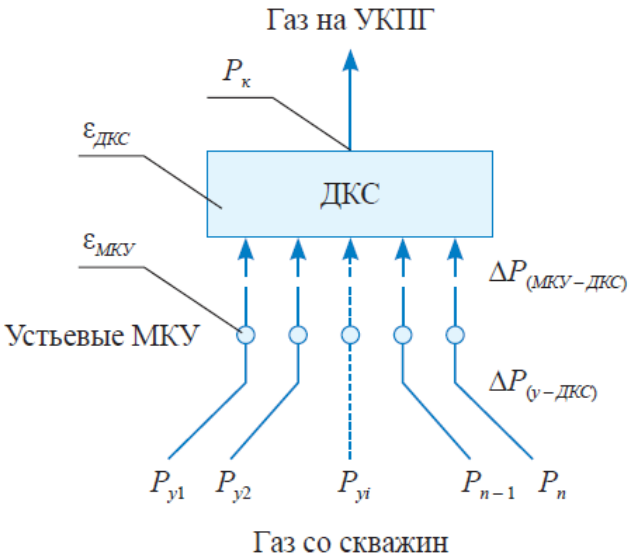
- усложнение технологической схемы промысла и, как следствие, более высокие требования к согласованию параметров элементов промысловых технологических систем (устье скважин — МКУ — ГСС — ДКС и др.);
- повышенные требования к надежности оборудования устьевых МКУ, на которые подается «неосушенный» газ, прошедший только предварительную подготовку;
- экономические риски применения МКУ вследствие дополнительных затрат на их ввод и эксплуатацию в период падающей добычи, т. е. в период снижения доходной составляющей проекта разработки месторождения.

К настоящему времени накоплен достаточный и показательный опыт применения МКУ как в России[5] (ООО «Газпром добыча Ноябрьск» и ООО «Газпром добыча Ямбург») [2; 8], так

[4] Отчет ПАО «Лукойл» «Перспективы развития мировой энергетики до 2050 года»: официальный сайт. — URL https://lukoil.ru/Business/Futuremarkettrends (дата обращения 21.05.2023). Alexandra Saitova. Energy efficiencies and CO_2 emissions associated with lowtemperature separation technologies for the processing of formation fluid from the Achimov deposits. // Petroleum research — URL: http://www.keaipublishing.com/en/journals/petroleum-research/ (дата обращения 05.07.2023).

[5] МКУ ТАКАТ: от опытного образца до серийной модульной компрессорной установки // Газовая промышленность. — 2021. — Спецвыпуск № 4(825). — С. 20–21. — URL: https://compressormash.ru/upload/iblock/01d/p551s07quhfpyyrdb4ktxj2t5ep8maqh/nauka.pdf (дата обращения 05.07.2023).

и за рубежом [9–12]. В основном распределенное компримирование применяют уже в период падающей добычи.



$P_к$ — давление газа на выходе ДКС; P_{y1}, P_{y2}, P_{yi} — давление на устьях скважин; P_{n-1}, P_n — давление на шлейфах ГСС; $\Delta P_{(МКУ-ДКС)}$; $\Delta P(у-ДКС)$ — перепад давлений между МКУ и ДКС, устьем и ДКС соответственно; $\varepsilon_{ДКС}$, $\varepsilon_{МКУ}$ — отношение давлений компрессорного оборудования на МКУ и ДКС соответственно

Рисунок 1. *Схема распределенного компримирования газа [2]*

Технология подготовки газа с ТДА [3] представляет собой пример реализации замены дроссельных устройств на более эффективный холодопроизводящий элемент. Турбодетандер по сравнению с дросселем обладает более высокой эффективностью процессов охлаждения газа и требует меньшего перепада давлений для достижения низких температур, при которых осуществляется низкотемпературная сепарация (НТС) природного газа. Дополнительно турбодетандер позволяет вырабатывать механическую мощность, которая может быть использована для обеспечения работы полезной нагрузки, например, электрогенератора, газового компрессора, насоса. На практике в качестве полезной нагрузки ТДА используется газовый компрессор, который позволяет восстановить часть давления, затраченного на охлаждение газа и тем самым снизить нагрузку на ДКС. Соответственно, технология НТС с ТДА повышает эффективность использования пластовой энергии и, соответственно, энергетическую эффективность процесса добычи. При этом возрастают затраты на покупку и эксплуатацию оборудования, а также требования к квалификации эксплуатационного персонала. При этом, применение НТС с ТДА не исключает полностью потребность в редуцировании устьевых давлений, максимальное значение давления на входе в УКПГ составляет не более 10,0…12,0 МПа и его дальнейшее повышение ограничено совокупностью факторов обеспечения надежности и эффективностью окупаемости капитальных вложений.

Применение эжекторов позволяет повысить эффективность совместной эксплуатации продуктивных пластов с различным энергетическим потенциалом [4; 5]. За счет использования эффекта эжектирования обеспечивается «выравнивание» давлений скважин с высокими и низкими давлениями, потоки газа из скважин с высоким давлением используют в качестве эжектирующего потока для повышения давления газа из скважин с низким давлением. В результате на вход в УКПГ и/или ДКС подается газ с более высоким давлением по сравнению с вариантом прямого смешения потоков. Таким образом, при вводе в разработку новых объектов с более высокими давлениями, чем в эксплуатируемых, пластовая энергия используется более рационально. Соответственно, данная технология, как и НТС с ТДА позволяет повысить показатели энергетической эффективности добычи газа. Существенным

недостатком является то, что эжектор является струйной машиной, которая позволяет работать в узком диапазоне расходных и барических параметров. Как следствие, положительный эффект может быть получен на коротком промежутке времени или потребуется частая замена или реконструкция эжекторов для адаптации к меняющимся условиям разработки. Применение эжекторов снижает масштабы непроизводительного редуцирования давлений, но не исключает его, так в газосборные сети газ поступает с некоторым промежуточным значением давлений в диапазоне от минимального устьевого (действующие объекты разработки) до максимального устьевого (новые объекты разработки).

Технология выноса жидкости из скважин и шлейфов в период снижения пластовых давлений [6] используется для создания условий «выноса» скопившейся жидкости в результате интенсификации режима работы ДКС. Данная технология не требует дополнительного оборудования, а только форсирования режима работы существующей ДКС. При форсировании режима работы ДКС в системе «скважины-шлейфы» снижается рабочее давление и, соответственно, увеличивается скорость течения газа до скорости «выноса». Таким образом, происходит «продувка» систем от скопившейся жидкости и улучшения их гидравлических характеристик. Данная технология позволяет повысить энергетическую эффективность процессов добычи газа, пропускную способность ГСС и скважин. Технология реализуется без дополнительных затрат с использованием установленного на промысле оборудования. К незначительным недостаткам или особенностям можно отнести то, что положительный эффект ограничен напорными характеристиками компрессорного оборудования ДКС.

Концепция обустройства с применением ИДКУ[2] предполагает установку обратимых детандер-компрессорных машин в составе промысловых систем обустройства на кустах скважин или на отдельных скважинах (рис. 2) для бестопливной генерации электрической энергии в период высоких пластовых давлений и компримирования газа после снижения давлений.

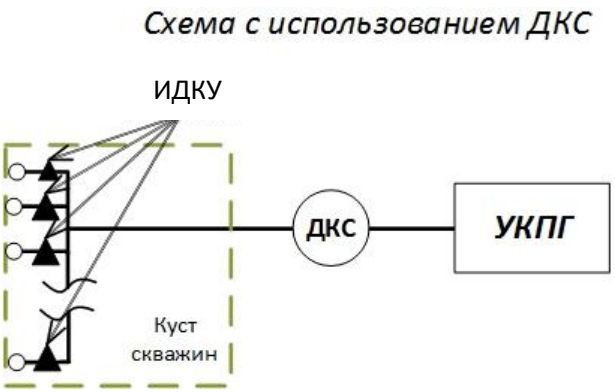


Рисунок 2. *Применение ИДКУ в составе промысловых систем обустройства*

Данная концепция позволяет обеспечить реализацию совокупности факторов формирования полезного эффекта:

«• снижение потребности в покупке или в генерации электрической энергии для нужд месторождения на начальном этапе разработки;

• оптимизация технических решений для ДКС (отдаление сроков ввода, снижение мощности и т. п.) или полное исключение потребности в ДКС вследствие перехода на работу на месторождении по схеме распределенного компримирования при снижении пластового давления. При этом отсутствует необходимость дополнительных капитальных вложений, т. к. установки ИДКУ являются обратимыми;

- увеличение полезного срока использования оборудования на протяжении всего периода эксплуатации месторождения по сравнению с использованием традиционных расширительных машин;
- оптимизация технических решений для газосборных сетей (исключение потребности в лупингах, вследствие перехода на работу месторождения по схеме распределенного компримирования, при которой возможно повысить давление в шлейфах, что проводит к снижению скоростей газа до допустимых значений без применения лупингов)»[2].

Основным недостатком является тот факт, что примеры создания и применения ИДКУ на данный момент отсутствуют, данная технология в настоящий момент находится на этапе освоения и осмысления целесообразности для практического применения и потенциала для масштаба внедрения.

В таблице 1 представлены основные свойства рассмотренных решений, которые представляют интерес с точки зрения целей исследования — определения возможности комплексного полезного использования пластовой энергии при разработке месторождений АВПД.

Таблица 1

Технические и технологические решения для повышения эффективности процессов добычи газа

Технические и технологические решения	Этапы разработки месторождения, в которые осуществляется внедрение	Возможность полного использования потенциала пластового давления (без редуцирования)	Основные положительные эффекты	Степень проработки
Распределенное компримирование	Падающая добыча	нет	Повышение энергетической эффективности, исключение накопления жидкости в ГСС, интенсификация объемов добычи	Промышленное применение
Технология подготовки газа с ТДА	Весь период разработки	нет	Повышение энергетической эффективности, интенсификация объемов конденсата, снижение металлоемкости (исключение дополнительных СОГ)	Промышленное применение
Применение эжекторов для выравнивания давлений в различных пластах	Падающая добыча	нет	Повышение энергетической эффективности	Промышленное применение
Технологии выноса жидкости из скважин и шлейфов	Падающая добыча	нет	Повышение энергетической эффективности, исключение последствий накопления жидкости в ГСС	Промышленное применение
Применение инверсивных детендер-компрессорных установок	Весь период разработки	да	Повышение энергетической эффективности, отдаление сроков ввода и установленной мощности ДКС, снижение металлоемкости ГСС	Концептуальная проработка

Анализ возможности применения способа повышения эффективности добычи газа с применением ИДКУ для АВПД на примере АГКМ

Анализ выполнен на основании сравнения потребных показателей эксплуатации ИДКУ в составе АГКМ и сложившихся областей применения и технических ограничений для винтовых компрессорных машин.

Астраханское газоконденсатное месторождение уникально как по запасам, так и по составу пластовой смеси (высокое содержание кислых компонентов H_2S до 28 % и CO_2 до 16 %), кроме того АГКМ является месторождением с АВПД, на котором пластовое давление и температура достигают 62,0 МПа и 120,0°С, соответственно [7].

В патенте[2] установку для реализации способа повышения эффективности процессов добычи предлагается создавать на основе имеющегося опыта разработки и производства винтовых детандеров и компрессоров. Из анализа данных научно-технической литературы по компрессоростроению [8; 13–21] и типоразмеров продукции отечественных предприятий[6, 7, 8] [8] следует, что винтовые машины нашли широкое применение для рабочих давлений до 4,5…5,5 МПа.

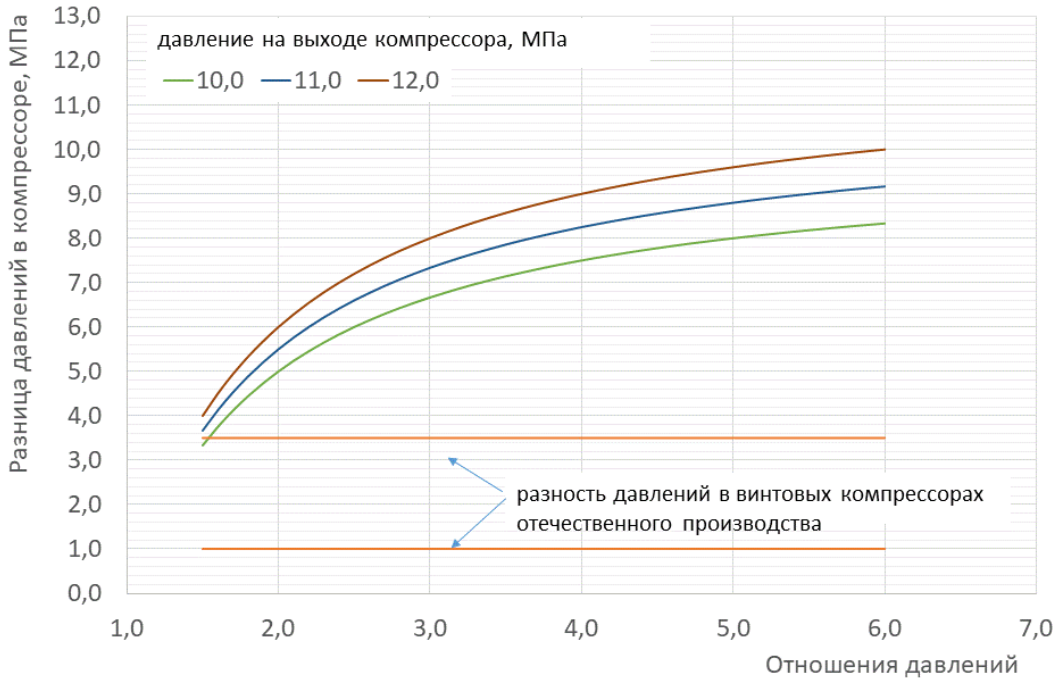


Рисунок 3. *Разность давлений в компрессоре для различных давлений на выходе*

[6] Каталог оборудования АО «Пензкомпрессормаш» [Электронный ресурс]. — URL: https://www.pkm.ru/news/file/catalog2017.pdf (дата обращения 05.07.2023).

[7] Продукция ОАО «Казанькомпрессормаш». Винтовые компрессорные установки маслозаполненные [Электронный ресурс]. URL: https://compressormash.ru/products/by_design/screw_compressor_installation/screw_compressors_oil_flooded/oil_filled/ (дата обращения 21.05.2023).

[8] Каталог оборудования АО «Арсмаш». Дожимные компрессорные станции природного, попутного и топливного газа [Электронный ресурс]. — URL: https://zif.su/catalog/zif-gaz/ (дата обращения 05.07.2023).

Кроме того, считается, что винтовые машины не подходят для работы на газах с агрессивными компонентами вследствие контакта газа и масла. В литературе отмечают, что для обеспечения оптимума по эффективной работе винтового компрессора перепад давлений в нем не должен превысить 1,0…1,5 МПа [13–21], дальнейшее его увеличение отразится на снижении термодинамической эффективности установки из-за увеличения интенсивности перетоков горячих газов со стороны нагнетания на вход винтовой пары. В существующих конструкциях винтовых компрессорных установок природного газа разность давлений достигает 3,5…3,7 МПа[7].

По результатам экспертных оценок требуемых показателей их эксплуатации в составе технологических систем обустройства АГКМ установлено, что в режиме компримирования необходимо обеспечить давления на выходе от 10,0 до 12,0 МПа и отношения давлений не более 6,0.

На рисунке 3 показаны соответствующие результаты расчетной оценки разницы («перепада») давлений в ИДКУ при работе в режиме компрессора на АГКМ.

Из анализа графиков на рисунке 3 следует, что для условий АГКМ перепад давлений в ИДКМ при работе в режиме компрессора составит от 8,0 до 10,0 МПа при отношении давлений 5,0…6,0.

Соответственно, решение, предложенное в патенте[2] имеет ограниченную область применения вследствие сложившейся области использования винтовых компрессорных установок в т. ч. и для работы в составе объектов АГКМ.

С учетом выявленного ограничения и актуальности концепции обустройства для повышения эффективности разработки месторождений с ИДКУ[2] для АВПД был выполнен экспресс-анализ различных типов компрессорного и детандерного оборудования.

Перспективная инверсивная установка для оснащения месторождений с АВПД. Концептуальные основы и направления перспективных работ

Определение возможности создания ИДКУ для применения в составе систем обустройства месторождений с АВПД, а также концептуального технико-технологического облика таких установок выполнено на примере АГКМ.

Проведен сравнительный анализ ожидаемых показателей работы ИДКУ в составе АГКМ и соответствующих достигнутых значений параметров для различных типов детандерного и компрессорного оборудования. Кроме того, проведен анализа возможности создания обратимой конструкции.

Экспертные оценки требуемых показателей их эксплуатации ИДКУ в составе технологических систем обустройства АГКМ показали, что:

- В режиме детандирования необходимо обеспечить давления на входе в соответствии со значениями устьевых давлений от 40,0…34,0 МПа (с учетом возможных потерь в обвязке кустов скважин) и отношения давлений не более 3,4…2,9 для расширения до давления в ГСС 12,0 МПа. С момента установки ИДКУ отношение давлений будет снижаться во времени, пропорционально снижению устьевых и пластовых давлений.
- В режиме компримирования необходимо обеспечить давления на выходе от 10,0 до 12,0 МПа (в зависимости от объемов добычи) и отношения давлений не более 6,0.

Рассмотрены материалы каталогов производителей детандерного и компрессорного оборудования[9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], научной литературы — монографий и статей [8; 9–26]. Результаты анализа представлены в таблице 2.

Из анализа данных таблицы 2 следует, что наиболее целесообразно рассматривать следующие направления для разработки ИДКМ: на базе поршневого детандера, комбинированного винтового и поршневого компрессора, динамического оборудования.

Реализация принципа инверсии может быть обеспечена в случае использования в качестве основы ряд известных и апробированных конструкций:

- ТДА с консольным расположением рабочих колес и сменными корпусами[18, 19] [24] в случае применения динамического оборудования;
- поршневые компрессоры[10, 11] и детандеры[9] в случае применения объемного оборудования;
- установки с винтовыми и поршневыми ступенями, разрабатываемы для оснащения морских платформ или технологических судов в случае применения комбинированных установок[17].

Дальнейшая разработка ИДКУ на основании предложенных концептуальных положений потребует проведения ряда расчетных исследований, а также опытно-конструкторских работ.

---

[9] Детандерный агрегат ДПВ 2-200/6-3М производства АО «Уральский компрессорный завод» [Электронный ресурс]. — URL: https://www.ukz.ru/catalog/kriogennoe-oborudovanie/detandery/detandernyi-agregat-dpv-2-200-6-3m/ (дата обращения 05.07.2023).

[10] Продукция АО «Румо». Оппозитные поршневые компрессоры [Электронный ресурс]. — URL: https://aorumo.ru/production/prod_oppoz/ (дата обращения 05.07.2023).

[11] Продукция АО «Румо». Газомотокомпрессоры [Электронный ресурс]. — URL: https://aorumo.ru/production/prod_gaz/ (дата обращения 05.07.2023).

[12] Компрессорное оборудование АО «РЭПх». Референции поставок [Электронный ресурс]. — URL: https://www.reph.ru/upload/iblock/561/referentsii_kompressory_1947_2019.pdf (дата обращения 05.07.2023).

[13] Осевые компрессоры для доменных печей АО «РЭПх» [Электронный ресурс]. — URL: https://www.reph.ru/production/type/20/711/ (дата обращения 05.07.2023).

[14] Продукция ОАО «НПО «Искра». Компрессорное оборудование. [Электронный ресурс]. — URL: https://npoiskra.ru/catalog/kompressornoe-oborudovanie/ (дата обращения 05.07.2023).

[15] Продукция ОАО «Казанькомпрессормаш». Центробежные компрессорные установки с вертикальным разъемом корпуса. [Электронный ресурс]. — URL: https://compressormash.ru/products/by_design/centrifugal_compressors/vertical_split_casing/ (дата обращения 05.07.2023).

[16] Каталог оборудования АО «Казанькомпрессормаш» [Электронный ресурс]. — URL: https://compressormash.ru/products/ (дата обращения 05.07.2023).

[17] LMF High Pressure Compressor Systems [Электронный ресурс]. — URL: https://www.environmental-expert.com/products/lmf-high-pressure-compressor-systems-560486 (дата обращения 05.07.2023).

[18] Продукция ОАО «Казанькомпрессормаш». Турбодетандерные агрегаты. [Электронный ресурс]. — URL: https://compressormash.ru/products/by_design/turbodetandernye_agregaty/ (дата обращения 05.07.2023).

[19] Продукция АО «Турбохолод». Турбодетандерные агрегаты. [Электронный ресурс]. — URL: http://turbokholod.ru/products/ (дата обращения 05.07.2023).

[20] Фролов Я.И., Кожухов Ю.В. Особенности проектирования осевых компрессоров газоперекачивающих агрегатов. [Электронный ресурс]. — URL: https://kviht.ru/2018/02/05 (дата обращения 05.07.2023).

Таблица 2

Основные результаты экспресс-анализа различных типов компрессорного и детандерного оборудования

Тип оборудования		Диапазоны рабочих давлений / отношения давлений / единичные мощности	Возможность реализации концепции обратимости	Возможность работы на газах с агрессивными компонентами
1. Объемные машины	Винтовые	0,1…5,5 МПа / до 10,0 / до 3,0 МВт	+	- / +*
	поршневые	0,1…200,0 / до 250,0 / до 4,5 МВт	+	+
2. Динамические машины (в одном корпусе)	Осевые	0,1…5,0 (11,88**) / до 40,0 / до 100,0 МВт	+	+
	центробежные	0,1…250,0 / до 8,0 / до 100,0 МВт	+	+
3. Комбинированные машины	Винтовой (первая ступень) + поршневой (вторая ступень)[17]	35,0 МПа / до 15,0 / до 1,0 МВт	+	- /+*

** — в ограниченном диапазоне давлений и температур, исключающих активное взаимодействие с маслом смазочной системы; ** — концептуальный проект для применения в составе компрессорных станций магистральных газопроводов*[20]

В части расчетных исследований необходимо:

1. Разработать принципиальные схемы установок и математические модели для расчета термодинамических процессов их работы.
2. Разработать методику определения оптимальных параметров ИДКУ с учетом особенностей объектов применения, которая будет включать указания по сбору исходных данных и выполнению расчетов, перечень критериев, количественно характеризующих целесообразность применения того или иного типа ИДКУ и рекомендации по принятию решений о выборе типоразмера установки.
3. Провести расчетные исследования с целью последующего проведения сравнительного анализа следующих характеристик различных вариантов исполнения ИДКУ:
   - энергетическая эффективность на различных режимах работы в условиях переменных значений расхода и/или рабочего давления, отношений давлений;
   - пропускная способность в условиях переменных значений температур, отношений давлений и рабочих давлений;
   - температуры на выходе установки и/или ступеней сжатия.

В части возможности и целесообразности реализации необходимо:

- оценить реализуемость концепции ИДКУ силами отечественных предприятий и определить наиболее целесообразный вариант для создания ИДКУ;
- поэтапно разработать эскизный проект и конструкторскую документацию на опытную установку;

- провести опытную эксплуатацию пилотного образца с целью определения эффективности принятых технических решений и целесообразности масштабного применения установок на объектах добычи газа.

Опытно-конструкторские работы должны проводиться проектной группой, включающей представителей эксплуатирующих предприятий, проектного института, профильных экспертов и отечественного машиностроения. Опыт разработки нового оборудования и его доводки в ходе опытно-промышленной эксплуатации может быть осуществлен на полигонах добычных предприятий с учетом имеющегося положительного опыта отработки высокотехнологичной продукции для реализации государственной программы импортозамещения [7].

Обсуждение результатов

Результаты, представленные в данной работе, позволяют планировать работы по повышению эффективности процессов добычи в продолжение всего жизненного цикла месторождения, включая начальный период разработки, а также разработку перспективных установок отечественными машиностроительными предприятиями. Для анализа и обсуждения авторы выделили три группы результатов:

1. Наиболее распространенные способы повышения эффективности процессов добычи, применяемые в настоящее время (распределенное компримирование [2] и эжекторы [4; 5], вынос жидкости из ГСС [6]), в основном разработаны для этапов компрессорного периода и/или падающей добычи. Соответственно, доступные решения не позволяют обеспечить комплексное повышение эффективности использования энергии пластового давление в продолжение всего периода разработки, поскольку не обеспечивают полезное использование высоких пластовых давлений в начальный период разработки. Основными положительными эффектами их применения являются повышение энергетической эффективности и продление периода рентабельности разработки. Основными ограничениями и сложностями их внедрения являются тот факт, что внедрение дополнительных систем на завершающей стадии или стадии падающей добычи требует и дополнительных капитальных вложений на фоне снижения доходной составляющей от реализации добываемых объемов. Исключением являются ТДА в составе УКПГ [3] — они могут использоваться в продолжение всего периода разработки, но их применение не позволяет полностью реализовать потенциал высоких устьевых давлений, что обусловлено ограничениями рациональных значений давлений на входе в УКПГ не более 10,0…12,0 МПа.

Указанные способы, кроме технологии НТС с ТДА, обеспечивают повышение эффективности разработки месторождений в период падающей и/или завершающей добычи.

2. Предложения по использованию высокого пластового давления на начальном этапе разработки носят концептуальный характер (патент «Способ повышения…»[2]), для их реализации требуется разработка нового оборудования. Важно отметить, что предлагаемая концепция предполагает ввод ИДКУ на начальном этапе разработки и их последующее применения до конца жизненного цикла месторождения, что позволит исключить потребность в дополнительных значительных затратах на этапе падающей добычи.

Существующие образцы винтовых компрессорных машин имеют ограничения по диапазонам рабочих параметров и не подходят для создания ИДКУ, которые могут быть использованы для обустройства месторождений с АВПД, в том числе и для АГКМ. Обосновано несколько концептуальных подходов к созданию ИДКУ на основе динамического или объемного детандер-компрессорного оборудования или кардинальной доработки винтового оборудования. Предложения разработаны на основании результатов сравнительного анализа

показателей разработки АГКМ и достигнутых параметров различных типов детандерного и компрессорного оборудования, а также на основании анализа возможности создания инверсивной конструкции, позволяющей работать как в режиме детандера, так и компрессора.

При анализе возможности применения концепции применения ИДКУ для АГКМ[2] и других месторождений с АВПД подробно не рассмотрены режимы детандирования. Данный недостаток не является критичным, т. к. период работы в режиме детандера в два или в три раза меньше, чем период компримирования. Кроме того, ограничения по разности давлений на режимах детенадирования не являются столь существенными, как в период компримирования. Это обусловлено тем, что снижение эффективности при генерации энергии компенсируется повышением температуры на выходе из детандера, что в свою очередь снизит риски роста гидратов и потребность в ингибиторах гидратообразования. Снижение эффективности в процессе компримирования приведет росту потребления электрической энергии для работы ИДКУ и росту эксплуатационных затрат. Основные результаты соответствуют поставленной цели исследования — обоснованы концепции создания ИДКУ и сопутствующие направления НИОКР, которые включают и более детальный анализ работы ИДКУ в режиме детандера.

3. Рассматриваемая в работе задача повышения эффективности добычи газа является комплексной, соответственно обоснования перечня и формулировок отдельных подзадач также являются предметом научного обоснования. Одним из результатов исследования стал перечень исследовательских задач, которые необходимо решить для обоснования наиболее рационального технико-технологического облика ИДКУ. Основные задачи представлены авторами в тексте статьи.

Заключение

Разработка «Способ повышения эффективности добычи газа и установка для его осуществления»[2] представляет интерес для повышения эффективности процессов добычи газа путем повышения эффективности использования пластового давления, особенно для месторождений с АВПД. Реализация принципа инверсии от детандера к компрессору позволит обеспечить бестопливную выработку электрической энергии, что обеспечит полезное использование условий начального периода разработки месторождений и окажет положительное влияние на экологические показатели проектов разработки. Бестопливная генерация электрической энергии позволит обеспечить собственные нужды газового промысла (полностью или частично), а также может быть использована для передачи сторонним потребителям. При этом будет обеспечено снижение выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду.

Ключевым аспектом, который определит целесообразность развития и масштабы внедрения ИДКУ является возможность их создания силами отечественных предприятий. Обратимые (инверсивные) установки на базе винтовых машин имеют ограниченную область применения вследствие ряда ограничений для данного типа оборудования. В частности, предлагаемое решение не подходит для применения в составе АНГКМ из-за высоких рабочих давлений и наличия в составе газа агрессивных компонентов. Потребуется кардинальная доработка существующих конструкций или применения других типов оборудования.

Установлено, что принцип инверсии может быть реализован на базе различных типов оборудования и предложены альтернативные концепции создания перспективной ИДКУ: на базе поршневого детандера, комбинированного винтового и поршневого компрессора, динамического оборудования. Предложенные концепции могут развиваться на основе уже существующих образцов техники. Сформулированы задачи для последующих исследований и

опытно-конструкторских работ, в результате решения которых будет определен наиболее рациональный тип оборудования для создания ИДКУ.

В настоящее время продолжаются исследования с учетом представленных в статье формулировок целей и задач. Последующие публикации о ходе исследований будут подготовлены по мере получения интересных и представительных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скоробогатов В.А. Энергетический мир в 2040 году. Взгляд из две тысячи двадцатого // Вести газовой науки — 2021. — № 3(48). — С. 218–231. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48167887 (дата обращения 05.07.2023).
2. Перспективы применения распределенного компримирования в промысловых системах добычи газа / М.А. Воронцов, А.А. Ротов, И.В. Марущенко, Е.М. Лаптев // Вести газовой науки. — 2017. — № 4(20). — С. 164–173 — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22797579 (дата обращения 05.07.2023).
3. Опыт и перспективы применения турбодетандерных агрегатов на промысловых технологических объектах газовой промышленности России / В.А. Хетагуров, П.П. Слугин, М.А. Воронцов, А.Н. Кубанов // Газовая промышленность. — 2018. — № 11. — С. 14–22.
4. Мухамадеев Д.Х. Применение газовых эжекторов на скважинах УКПГ-8В // Химический журнал. — 2008. — Том 15. № 2. — С. 152–154.
5. Балабанов А.В., Касьяненко А.А. Струйные технологии для разработки многопластовых газовых месторождений // Neftegaz.RU. — 2017, No 10. — с. 88–93.
6. Технология удаления жидкости из трубопроводов газосборных сетей за счет кратковременного увеличения отборов газа / А.А. Ротов, В.А. Истомин, Т.В. Чельцова, Р.А. Митницкий // Газовая промышленность. — 2019. — № S1(782). — С. 86–92.
7. Разработка и внедрение отечественного оборудования обвязки устья скважин Астраханского газоконденсатного месторождения / Н.Ф. Низамов, А.Ф. Коренякин, А.Г. Екотов, Н.Е. Рылов, Г.В. Афанасов // Газовая промышленность. — 2022. — Спецвыпуск № 3(773). — С. 40–43. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35572486 (дата обращения 05.07.2023).
8. Опыт создания серийной МКУ ТАКАТ для технологии распределенного компримирования на объектах добычи ПАО «ГАЗПРОМ» / Ш.Ш. Биктимеров, А.Ф. Сарманаева, Ф.Ф. Калимуллин, Л.Б. Минязев, Е.Р. Ибрагимов, А.С. Жуков // Компрессорные технологии. — 2021. — № 5. — С. 16–20. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46505047 (дата обращения 05.07.2023).
9. Rooney M.J. Small compressor units successfully field-tested // Oil and Gas Journal. — 1975. — № 73(34). — P. 81–83.
10. Bode, David H. Small wellhead compressor packages finding popularity // Diesel progress North American. — 1985. — № 51(12). — P. 24–25.

11. Harms L.K. Wellhead Compression on Tight Gas Wells in the Long Run: A Follow-Up Case History on Seven Years of Success in Lobo // Tight Gas Completions Conference. — San Antonio, Texas, USA. — November 2010. — URL: https://doi.org/10.2118/138488-MS (дата обращения 05.07.2023).

12. Improved Production in Low-Pressure Gas Wells by Installing Wellsite Compressors / Navneet Behl, Keith Edward Kiser, Jeff // SPE Gas Technology Symposium. — Calgary, Alberta, Canada. — May 2006. — URL: https://doi.org/10.2118/99317-MS (дата обращения 05.07.2023).

13. Сакун И.А. Винтовые компрессоры: Основы теории, расчет, конструкция — Ленинград: Машиностроение. [Ленингр. отд-ние], 1970. — 400 с.

14. Царегородцев В.И., Ширковский А.И. Использование винтовых компрессоров на промысловых ДКС // Газовая промышленность. — 1981. — № 11. — С. 34–35.

15. Миронов В.Н., Паранин Ю.А. Винтовые компрессорные установки для рационального использования попутного нефтяного газа // Спецтехника и нефтегазовое оборудование. — 2012. — № 09-10(98). — С. 74–75. — URL: http://www.compressormash.ru/upload/iblock/084/kkm.pdf (дата обращения 05.07.2023).

16. Применение мобильных компрессорных установок на завершающей стадии разработки газовых залежей / В.З. Минликаев, Д.В. Дикамов, О.Б. Арно, А.В. Меркулов, С.А. Кирсанов, А.В. Красовский, С.Ю. Свентский, А.В. Кононов // Газовая промышленность. — 2015. — № 1. С. 15–17.

17. Хисамеев И.Г., Максимов В.А. Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры. Теория, расчет и проектирование. — Казань: ФЭН, 2000. — 638 с.

18. Хисамеев И.Г., Ибрагимов Е.Р., Паранин Ю.А., Гарифов К.И., Зискин Г.Ф. Экспериментальные исследования и результаты испытаний винтового компрессора на конечное давление 4,5 МПа // Вестник Казанского технологического университета. — 2011. — № 17. — С. 204–208. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-i-rezultaty-ispytaniy-vintovogo-kompressora-na-konechnoe-davlenie-4-5-mpa (дата обращения: 05.07.2023).

19. Пронин В.А., Ильина Т.Е. Перспективный холодильный винтовой компрессор сухого сжатия // Холодильная техника и кондиционирование. — 2015. — № 4. — С. 35–39. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnyy-holodilnyy-vintovoy-kompressor-suhogo-szhatiya (дата обращения: 05.07.2023).

20. Сравнительный анализ эффективности применения винтовых компрессоров / А.М. Зубарев, И.А. Кузин, Н.З. Хабибова // Успехи в химии и химической технологии. — 2016. — № 2(171). — С. 94–95 — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-effektivnosti-primeneniya-vintovyh-kompressorov (дата обращения: 05.07.2023).

21. Определение точки впрыска охлаждающей жидкости в винтовом компрессоре / В.И. Пекарев, С.Н. Иванова, Н.А. Сафонова // Холодильная техника и кондиционирование. — 2015. — № 2. — С. 45–48 — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-tochki-vpryska-ohlazhdayuschey-zhidkosti-v-vintovom-kompressore (дата обращения: 05.07.2023).

22. Gas turbines and turbocompressors for LNG service / Cyrus B. Meher-Homji, Terryl Matthews, Antonio Pelagotti, Hans P. Weyermann // Proceedings of the thirty-sixth turbomachinery symposium. — 2007 — P. 115–148.

23. Хисамеев И.Г., Максимов В.А. Промышленные центробежные компрессоры. История развития, типовые конструкции и перспективы // Компрессорная техника и пневматика. — 2009. — № 8. — С. 4–12. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13077966 (дата обращения 05.07.2023).

24. Бабиченко И.А., Соколов К.К., Михайлов А.А. Опыт разработки и внедрения инноваций в отечественном турбомашиностроении. Компания АО «Турбохолод» // Компрессорные технологии. — 2022. — № 6. — С. 11–14. — URL: https://compressortech.ru (дата обращения 05.07.2023).

Vorontsov Mikhail Aleksandrovich
Gazprom VNIIGAZ, Saint Petersburg, Russia
Gubkin University National University of Oil and Gas, Moscow, Russia
ITMO University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: Vorontsov.m@gubkin.ru
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=697293

Izumchenko Dmitry Viktorovich
Gazprom VNIIGAZ, Saint Petersburg, Russia
E-mail: rosine@mail.ru

Grachev Anatoly Sergeevich
Gazprom VNIIGAZ, Saint Petersburg, Russia
ITMO University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: grachev.m@gubkin.ru

Grigorik Andrey Aleksandrovich
Gazprom komplertatsia, Saint Petersburg, Russia
E-mail: andrey.arh@inbox.ru

Prospects and problems of creating reversible expander-compressor units as part of field development systems for increasing efficiency of gas production

Abstract. The task of increasing the efficiency of natural gas production processes remains relevant. The article presents the results of a study carried out to determine the possibility of complex beneficial use of reservoir energy in the fields with abnormally high reservoir pressures. In the course of the study, authors carried out the search and analysis of open source data and considered the most common ways to increase the efficiency of gas production by introducing new equipment into the system of arrangement of gas fields (ejectors, modular compressor units, turbo expanders, etc.). A promising method of increasing the efficiency of gas production based on the use of reversible installations based on screw machines was considered in detail and the limitations of its application for fields were shown. Also authors considered the possibility of creating the reversible expander-compressor units based on other types of equipment. The results presented in this paper show that: (a) the most common ways to improve the efficiency of production processes are mainly developed for the field stages of the compressor period and/or falling production period, (b) proposals for the use of high reservoir pressure at the initial stage of development are conceptual in nature, their implementation requires the development of new equipment, (c) existing technical level of screw equipment does not allow us to develop reversible expander-compressor units for the development of fields without cardinal improvements, (d) the principle of inversion can be implemented on the basis of various types of equipment, promising concepts for the creation of reversible expander-compressor units were proposed for use as part of gas field equipment systems (based on dynamic, volumetric, combined expander and compressor units). The directions of relevant promising scientific and development work were justified.

Keywords: gas production efficiency; abnormally high reservoir pressures; reversible expander-compressor units; reciprocating compressors; screw compressors; dynamic compressors; reciprocating expanders; screw expanders; turbo expanders