

Разработка отечественной мобильной компрессорной установки с моторкомпрессором ICL Baker Hughes

О. В. Бычков, И. В. Травкина, С. В. Кудрявцев, И. А. Странкалс, В. Е. Щавлев (к.т.н.) – ООО «ИНГК-Промтех»

Активная разработка российскими компаниями передового, технически сложного оборудования, приобретаемого ранее за рубежом, позволит нефтегазовому комплексу всерьез опереться на отечественного производителя во всех сложных ситуациях. Именно такие разработки могут восстановить национальный научно-технический суверенитет во всех отраслях промышленности.

In brief
Development of a domestic mobile compressor plant with ICL Baker Hughes motor compressor.
The active development by Russian companies of advanced, technically sophisticated equipment purchased earlier abroad will allow the oil and gas complex to rely seriously on the domestic manufacturer in all difficult situations. It is precisely such developments that will restore national scientific and technical sovereignty in all industries. In 2020, INGK started creating a mobile compressor unit for trial operation under a contract with Gazpromneft-Noyabrskneftegaz JSC and under a license agreement with Gazpromneft STC LLC.

В 2006 году компанией Baker Hughes был разработан моторкомпрессор ICL с нулевым уровнем выбросов (рис. 1). Он представляет собой центробежный компрессор, приводимый в действие непосредственно высокоскоростным синхронным электрическим двигателем. Компрессор может иметь несколько исполнений: одно рабочее колесо, консольно подвешенное на валу двигателя, или несколько рабочих колес в одном корпусе, расположенных в одной или двух технологических секциях (рядно или по схеме «спина к спине»). При этом и компрессор, и двигатель размещены в общем корпусе. Такая архитектура обеспечивает герметичность и позволяет избежать выбросов углеводородного газа.

Безредукторный привод и левитация вала на магнитных подшипниках (SKF) устраняют необходимость в смазке – экономия, по оценкам разработчика ICL, составляет 5000 литров масла за каждые пять лет. Ротор электрического двигателя и магнитный подвес в качестве охлаждающей среды используют перекачиваемый компрессором газ. Частотно-регулируемый привод позволяет изменять скорость с максимальной эффективностью и точностью во всем рабочем диапазоне для регулирования

степени повышения давления и расхода на входе, сокращая при этом энергопотребление. Малые массоинерционные характеристики ротора моторкомпрессора и характеристики магнитного подвеса обеспечивают рабочую частоту вращения менее чем за три минуты. В эксплуатации уровень шума моторкомпрессора ICL значительно ниже, чем у обычных компрессоров, – это обусловлено отсутствием трения, малыми размерами рабочих колес, точностью изготовления и конструкцией корпуса высокого давления. Еще одно преимущество моторкомпрессора ICL – компактные размеры, которые на 60 % меньше, чем у обычных вариантов машин для сжатия.

Таким образом, применение моторкомпрессора ICL особенно выгодно там, где важны высокая эффективность и экологические показатели (низкий уровень шума, отсутствие выбросов газа и масла) в сочетании с мобильностью и компактностью, при использовании для сжатия в широком диапазоне давлений чистого коммерческого природного газа или неочищенных слабосернистых газов. Простота конструкции значительно сокращает время монтажа, моторкомпрессор не имеет изнашиваемых деталей и критически важных вспомогательных систем и обеспечивает, по заявлению разработчика, 10 лет работы без технического обслуживания при компримировании чистого газа. Выгоды от применения моторкомпрессора ICL были подтверждены положительным опытом эксплуатации агрегатов на морских платформах с 2015 года.

Эти преимущества послужили причиной использования моторкомпрессора научно-техническим центром компании «Газпромнефть» (ООО «Газпромнефть НТЦ») в разработке технологической схемы модульной компрессорной установки и способа для сжатия



Рис. 1.

Моторкомпрессор ICL производства Baker Hughes

углеводородного газа. Целью разработки было создание мобильной, компактной и безопасной системы для сжатия газа, оптимизация эксплуатационных затрат и повышение автономности оборудования.

В предложенной модульной компрессорной установке поддерживается постоянное избыточное давление на входе в моторкомпрессор ICL путем организации линии рециркуляции газа в составе обвязки агрегата. Регулирование перепуска части газа на всасывание определяется соотношением расходов газа в магистраль и через байпас по прямой связи с линиями сбора газа с площадки. Незначительные пульсации давления в линиях сбора компенсируются объемом входного сепаратора.

Распределение газовых потоков между оборудованием модульной компрессорной установки осуществляется с частичным понижением давления сжатого газа. Газ с давлением нагнетания направляется на дроссель с целью снижения температуры газа с одновременным отделением из состава сконденсированной жидкой фазы. Часть очищенного от жидкой дисперсной фазы газа байпасируется и обеспечивает стабилизацию давления на входе в моторкомпрессор ICL. Другая часть отборов используется для поддержания автономной работы компрессорного агрегата: дросселированный и очищенный газ поступает в контур охлаждения моторкомпрессора, где снимает тепловую нагрузку от подшипников и ротора. Причем отборы газа не являются безвозвратными потерями, поскольку «отработанный» газ в итоге возвращается в газовый тракт моторкомпрессора.

Резюмируя изложенное, необходимо отметить, что применение в составе модульной компрессорной установки центробежного компрессора в герметичном закрытом корпусе с высокооборотным двигателем с частотным регулированием на магнитных подвесах позволило значительно повысить безопасность и эффективность КУ, снизить ее массогабаритные характеристики по сравнению с известными техническими решениями. При этом безопасность обеспечивается герметичной конструкцией компрессорного агрегата и поддержанием постоянного избыточного давления в газовых линиях путем перепуска газа, что исключает риск вакуумирования и подмешивания кислорода к взрывоопасной перекачиваемой среде.

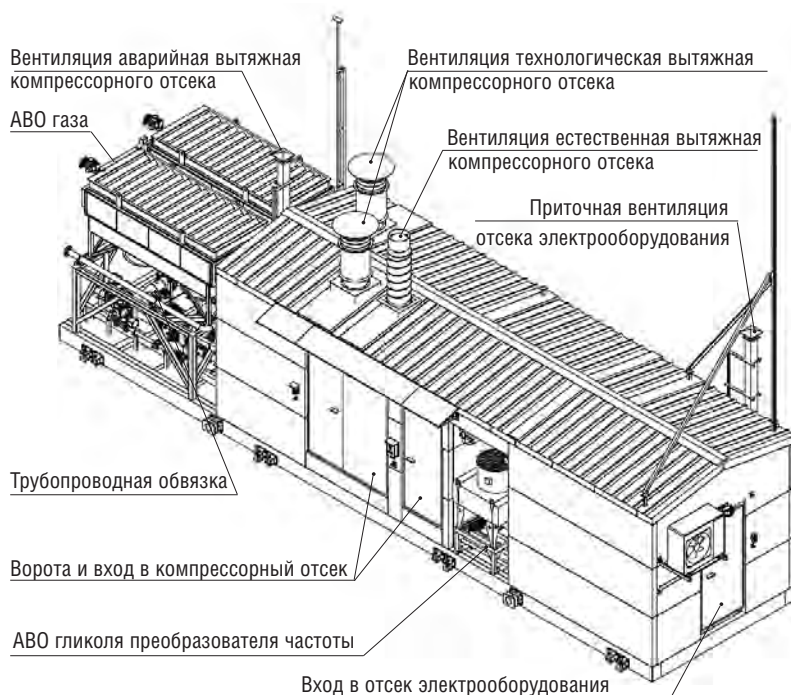
Предполагаемые эксплуатационные затраты должны быть снижены за счет простоты конструкции компрессорного агрегата, упрощения монтажа, отсутствия необходимости в смазке. Не требовалось сложного технического обслу-

живания и ремонта в процессе эксплуатации благодаря отсутствию контактных уплотнений и трущихся частей в компрессорном агрегате. В 2019 году ООО «Газпромнефть НТЦ» по итогам научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ получило патент на изобретение RU 2 692 859 «Способ использования углеводородного газа и модульная компрессорная установка для его осуществления».

В 2020 году компания «ИНГК» приступила к созданию мобильной компрессорной установки для опытной эксплуатации по договору с АО «Газпромнефть–Ноябрьскнефтегаз» и по лицензионному соглашению с ООО «Газпромнефть НТЦ». За основу была принята технологическая схема по патенту «Газпромнефть НТЦ» и использовался моторкомпрессор ICL с двухсекционным центробежным компрессором с двумя рабочими колесами в каждой секции. Мобильная компрессорная установка разработки «ИНГК» представлена на *рис. 2*.

Для охлаждения моторкомпрессора и его продувки с целью удаления воздуха и обеспечения взрывобезопасной концентрации газа внутри корпуса электродвигателя применялась система продувки. Технологический газ для охлаждения моторкомпрессора сначала очищается от примесей, затем по показаниям датчика температуры (при необходимости в холодное время года, для предотвращения переохлаждения) подогревается и подается на продувку зазора между ротором и статором двигателя и на подшипники центробежного компрессора и двигателя.

Рис. 2.
Мобильная компрессорная установка МКУ001 разработки ООО «ИНГК»



После моторкомпрессора газ, использованный для охлаждения, поступает в линию нагнетания первой ступени.

Часть очищенного газа для охлаждения поступает во входной сепаратор перед моторкомпрессором для быстрого заполнения газовой системы продувочным газом при предпусковой подготовке. Для охлаждения статора двигателя дополнительно применена жидкостная система охлаждения с замкнутым контуром, содержащим насос и АВО гликоля. Аналогичная система применена для охлаждения преобразователя частоты двигателя моторкомпрессора.

Все оборудование мобильной компрессорной установки, включающее (помимо уже перечисленного) промежуточный и выходной сепараторы, двухсекционный АВО газа, а также шкафы системы автоматического управления и силового электрооборудования, скомпоновано на общей транспортируемой раме. Для обеспечения транспортных габаритов АВО гликоля двигателя моторкомпрессора было размещено под АВО газа, а АВО гликоля преобразователя частоты – в нише блока-контейнера между компрессорным отсеком и отсеком электрооборудования.

Компания «ИНГК» разработала и изготовила мобильную компрессорную установку исполнения МКУ001 в феврале 2021 года. Одновременно с заводскими испытаниями были проведены сертификационные испытания на соответствие требованиям технического регламента ТР ТС 012/2011, и в начале марта 2021 года получен сертификат, подтверждающий безопасность КУ для работы во взрывоопасной среде. В ноябре 2021 года установка МКУ001 была поставлена на месторождение, в феврале 2022-го специалисты ООО «ИНГК» начали ее эксплуатационные испытания

при участии специалистов компаний Baker Hughes и SKF.

Нужно иметь в виду, что перечисленные выше технические достоинства мобильной компрессорной установки с моторкомпрессором ICL обусловлены высокой точностью изготовления ее компонентов и результатом их сложного взаимодействия. Все заявленные характеристики могут быть достигнуты только при строгом соблюдении всех технологических параметров процесса, которые закладываются при проектировании машины. Опыт первого запуска МКУ001 показал, на что следует обращать особое внимание при проектировании вспомогательных систем.

1. Расход продувочного газа, используемого для охлаждения подшипников и ротора двигателя

В технологической схеме нужно обязательно предусматривать устройство регулирования расхода газа (клапан), т.к. рабочий диапазон скорости вращения для моторкомпрессоров ICL довольно широк (для использованного в МКУ001 – 15 000...30 000 об/мин), и по мере разгона значительно возрастает расход продувочного газа. Поскольку вращающаяся часть всегда находится в состоянии левитации на магнитном подвесе, то поток газа для охлаждения на номинальной скорости вращения, при отсутствии регулирования, динамически воздействует на ротор и смещает его за пределы допустимого диапазона для начальных рабочих скоростей.

2. Регулирование системы защиты от помпажа при запуске

Следует обязательно учитывать тот факт, что газ, проходя через компрессор, меняет свой состав. Газ, используемый для охлаждения вращающихся частей, возвращается в линию нагнетания между ступенями. Таким образом, при запуске, когда компрессор работает в режиме полной рециркуляции, состав газа значительно отличается от перекачиваемого, и, как следствие, система защиты от помпажа неправильно идентифицирует положение помпажной кривой и рабочей точки.

3. Надежность системы электроснабжения

Данный параметр является критически важным для любых агрегатов с магнитными подвесами, т.к. кратковременное прерывание питания блоков управления магнитными подшипниками может приводить к прекращению левитации с задействованием страховочных подшипников, имеющих ограниченный ресурс. Высокие скорости вращения требуют еще большего внимания

Рис. 3.
Поврежденный ротор



к данному параметру. Производитель моторкомпрессора ICL решает данную проблему, используя эффект возбуждения в обмотках при вращении ротора на выбеге ЭДС, достаточный для поддержания режима левитации после отключения питания вплоть до относительно безопасной для посадки на страховочные подшипники скорости вращения.

При эксплуатационных испытаниях МКУ001 решался ряд технических проблем, которые были следствием изначально жестких исходных требований: компрессор должен был перекачивать газ с давлением на всасывании, равным атмосферному, при ограниченном объеме контура рециркуляции из-за требований к габаритам блока-укрытия компрессора. Поскольку запуск любого центробежного компрессора всегда выполняется с полной рециркуляцией для недопущения явлений помпажа, появлялись определенные сложности с переходом компрессора на магистральный входной трубопровод по причине повышенного давления на всасывании, а также из-за повышенной нагрузки на двигатель при работе на линии рециркуляции. Тонкая настройка системы защиты от помпажа и регулятора подачи продувочного газа позволили компенсировать данные негативные явления.

В ходе испытаний произошла нештатная ситуация, которая привела к критической поломке двигателя моторкомпрессора: при работе разрушились магниты ротора, что далее вызвало повреждение карбонового банджа ротора (рис. 3). Наиболее вероятно, данный отказ стал следствием работы агрегата на режиме с повышенной нагрузкой и повышенной температурой подвижных узлов (хотя заложенные заводом-изготовителем предельные значения превышены не были) во время настройки технологического процесса для устранения негативных явлений, описанных выше, но также не исключалась вероятность заводского брака при изготовлении ротора.

Несмотря на действующий договор, компания Baker Hughes на фоне санкций, принятых западными странами против Российской Федерации, отказалась от своих гарантийных обязательств. В этой ситуации компании «ИНГК» пришлось самостоятельно искать выход из сложившейся ситуации. В результате кооперации с российской компанией «ЭРГА», обладающей необходимыми компетенциями, а также всей требуемой материально-технической базой в г. Калуге для ремонта роторов синхронных двигателей с высокой скоростью вращения, в достаточно сжатые сроки были изготовлены новые магниты и бандаж с более высокими прочностными характеристиками. Была также выполнена сборка двигателя и пробный запуск, при котором для

управления магнитными подшипниками SKF использовалась система управления производства ООО «ЭРГА» (компания применяет ее в двигателях с магнитными подшипниками собственной разработки).

В январе 2023 г. восстановленный двигатель моторкомпрессора ICL был доставлен на объект, смонтирован, и испытания установки продолжились. Первые запуски на малых и средних оборотах (15 000 об/мин) показали значительное улучшение температурных параметров после ремонта, но дальнейшее увеличение скорости вращения в итоге приводило к аварийному останову по параметру дисбаланса ротора двигателя, который контролируется комплектной системой управления магнитными подшипниками SKF (предельное значение 45 мкм). Данная величина двойной амплитуды достигалась при частоте вращения 20 000 об/мин. Мобильная компрессорная установка производства ООО «ИНГК» представлена на рис. 4.

Конструктив моторкомпрессора ICL не предусматривает штатных плоскостей коррекции для выполнения тонкой подбалансировки движущихся частей в сборе, а также не рассчитан для выполнения данных манипуляций на объекте. Поскольку доступ к приводной стороне ограничен кожухом, а с неприводной стороны физически невозможен, единственным элементом, с помощью которого можно изменить баланс, стала часть муфты, жестко соединенная с валом двигателя. Методом внесения дополнительного дисбаланса была предпринята попытка определения вектора и корректировки баланса ротора. В ходе нескольких итераций (разборка-сборка-запуск) с размещением калибровочных грузов в технологических отверстиях полумуфты были достигнуты показатели, которые согласно методике наиболее близки к оптимальным при данных ограничениях.

Рис. 4.
Мобильная компрессорная установка производства ООО «ИНГК»



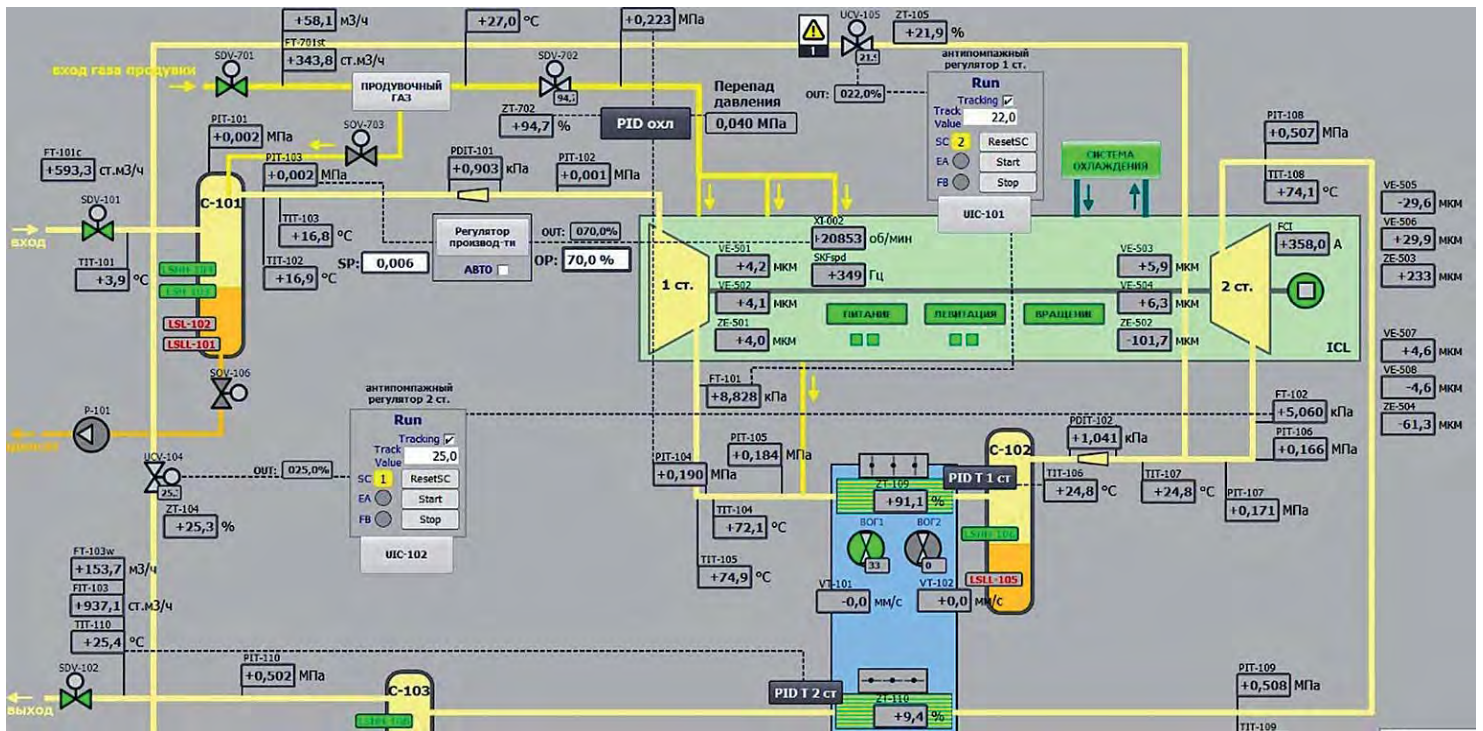


Рис. 5. Мнемосхема с параметрами рабочего режима

После проведенных работ система контроля параметров магнитных подшипников позволяла увеличивать частоту вращения до 26 000 об/мин.

Совместно с представителями заказчика было принято решение продолжить испытания характеристик компрессора. Результатом испытаний стало полное выполнение требований технического задания – перекачка объема 2 тыс. ст. м³/ч при давлении на всасывании, близком к атмосферному, избыточном давлении на нагнетании 0,8 МПа. Установка передана в эксплуатацию и в настоящий момент используется для перекачивания попутного нефтяного газа, поступающего в объеме 500 ст. м³/ч. Мнемосхема с параметрами рабочего режима представлена на рис. 5.

Специалисты ООО «ИНГК» уверены, что дополнительная повторная балансировка ротора могла бы позволить увеличить частоту вращения до максимального значения для использованного в МКУ001 моторкомпрессора ИЧЛ – 30 000 об/мин.

Результаты проектирования и изготовления компанией «ИНГК» мобильной компрессорной установки МКУ001 показали возможности создания оборудования с техническими характеристиками, соответствующими мировому уровню. Опыт кооперации с российскими предприятиями выявил высокий технический потенциал не только по ремонту импортного оборудования, но и по разработке и изготовлению аналогичной продукции. **Д**

Новости

ООО «ИНГК» приступило к монтажу двух ГПА-1604 на Сузунском месторождении.

Предприятие ведет монтаж ГПА-16 на УПГ Сузунского месторождения в Туруханском районе Красноярского края для АО «Сузун». Агрегаты предназначены для сжатия попутного нефтяного газа, подачи на установку подготовки газа и дальнейшего транспорта на центральный пункт сбора Ванкорского месторождения. Генеральный проектировщик – ООО «НК «Роснефть» – НТЦ, г. Краснодар.

В составе ГПА-1604 разработки и поставки «ИНГК» входят КШТ ГТУ открытого исполнения, системы всасывания и выхлопа, укрытия легкосборного типа компрессора с системами жизнеобеспечения, блоки электроснабжения и САУ. В составе полнокомплектных ГПА-1604 используются компрессоры Thermodyn (Baker Hughes) 2BCL456, приводы ГТУ НК-16-18СТ изготовления Казанского моторостроительного производственного объединения, САУ – НПФ «Система Сервис».

