



СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КРИОГЕННОЙ И АДсорбЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КИСЛОРОДА С ЧИСТОТОЙ 93%.

АНДРЕЙ ВОРОНЕЦКИЙ
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое развитие получает технология производства кислорода методом короткоциклового вакуумной адсорбции (далее – ВКЦА) – в тех случаях, когда требуемая чистота кислорода составляет 80 – 93% или даже меньше. При этом, производительность кислородных станций, работающих на базе этой технологии составляет от 1 до 22 тысяч $\text{Нм}^3/\text{час}$ (по кислороду), что сопоставимо с рабочим диапазоном криогенной технологии, имеющей в настоящее время наибольшее распространение. В указанном диапазоне производительности рынок практически поделён между несколькими ведущими мировыми производителями: Linde, Praxair, Air Liquide, Air Products, Mahler, Pioneer, Sumitomo. Причём, наиболее часто такая технология производства кислорода применяется в странах Юго-восточной Азии, имеющими тёплый климат (что существенно). Основным преимуществом адсорбционной технологии производители называют низкие удельные энергозатраты на производство 1 $\text{Нм}^3/\text{час}$ (до 0.33 кВт* час/ Нм^3 кислорода), а также возможность отключать установку и запускать её по мере необходимости, поскольку выход на рабочий режим составляет не более одного – полутора часов. Однако, при этом (в маркетинговых целях) они далеко не всегда упоминают условия работы такой установки, давление кислорода на выходе и его чистоту. При выборе той или иной технологии будущему владельцу кислородной станции следует понимать с какими реальными проблемами он может столкнуться в том или ином случае. В этой публикации мы рассмотрим и сравним криогенную и адсорбционную технологии производства газообразного кислорода применительно к конкретной решаемой задаче.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предприятию необходимо 40 000 $\text{Нм}^3/\text{час}$ кислорода с чистотой 93% и давлением 0.5 МПа (и) на выходе из кислородной станции. Требуемый диапазон регулирования производительности 5 - 100% («рваный» график потребления), при этом, средняя нагрузка на станцию оценивается в 70% от номинального режима. Режим работы круглосуточный и круглогодичный. Размещение оборудования в отапливаемом помещении. Температура окружающего воздуха (на точке воздухозабора) от -47 С до +30°С.

ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ

ВАРИАНТ 1

Криогенная технология: 1 блок на 40 000 $\text{Нм}^3/\text{час}^*$ кислорода или 2 блока по 20 000 $\text{Нм}^3/\text{час}$ кислорода.

ВАРИАНТ 2

Станция на базе ВКЦА: 10 блоков по 4000 $\text{Нм}^3/\text{час}$ кислорода или 7 блоков по 5800 $\text{Нм}^3/\text{час}$ кислорода или 5 блоков по 8000 $\text{Нм}^3/\text{час}$ кислорода.

* - Здесь и далее нормировка 1м^3 по условиям: +20С, 0% влажности, 101325Па

ОБЩАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ РАССМАТРИВАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА КИСЛОРОДА И ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Под энергетическими показателями подразумеваются прямые (мощности основного технологического оборудования) и косвенные (мощности вспомогательного оборудования и инженерных систем).

1. КРИОГЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Является классической для таких объёмов производства кислорода. Единичная мощность блока может быть практически любой, начиная от 500 и до 120 000 $\text{Nm}^3/\text{час}$ по кислороду. Брошюра с хорошим описанием основ криогенной технологии воздуходеления представлена на ресурсе [2]

Среди многочисленных схем используем схему низкого давления с питающим воздушным компрессором, имеющим давление нагнетания 0.55 МПа (и) – рис. 1. (В ней есть одно небольшое отличие, против схемы на рис. 1 – В смесевую колонну подводится воздух вместо паров кубовой жидкости. Это как раз и позволяет получать кислород с давлением 0.50 МПа (и) вместо 0.25 МПа).

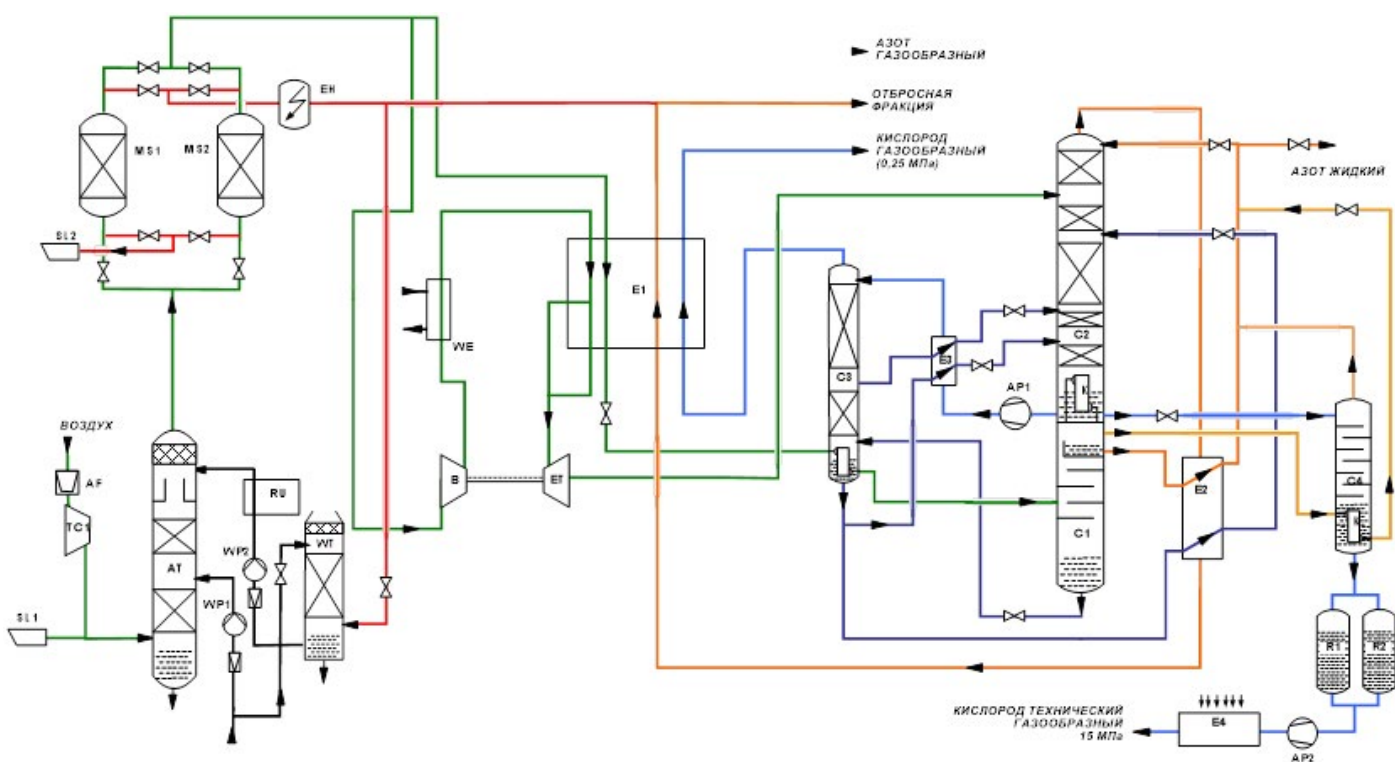


Рис. 1. Схема криогенной ВРУ (типовой вариант) [6]

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

AF	Входной воздушный фильтр
TC1	Воздушный компрессор
AT	Воздушный скруббер
WT	Азотный скруббер
WP1	Водяной насос
WP2	Водяной насос
RU	Холодильная машина
SL1	Глушитель
SL2	Глушитель
MS1, 2	Адсорбер блока очистки
AP1	Насос жидкого кислорода низкого давления
AP2	Насос жидкого кислорода высокого давления
K	Конденсатор-испаритель
C1	Нижняя колонна
C2	Верхняя колонна
C3	Смесевая колонна
C4	Дополнительная колонна
EH	Электроподогреватель
WE	Охладитель (водяной)
B1	Бустер
ET1	Турбодетандер
E1	Основной теплообменник
E2	Переохладитель
E3	Атмосферный испаритель высокого давления
R1, 2	Криогенный резервуар

В СОСТАВЕ ВРУ:

- Три питающих воздушных компрессора производительностью по 110 000 Нм³/час каждый (два рабочих, один резервный) центробежного типа многовальнoй схемы со встроенным мультипликатором, что позволяет обеспечивать регулирование входным направляющим аппаратом (ВНА) в диапазоне 70-100% для каждого компрессора без сброса и байпассирования. Компрессоры в полной комплектации включающей в себя маслосистему, промежуточные и концевые охладители, систему управления и электропривод с устройством плавного пуска, входной воздушный фильтр;
- Система предварительного охлаждения воздуха, включающая в себя: воздушно-водяной скруббер, охлаждающий воздух от 40°С до 10...15°С, азото-водяной скруббер, охлаждающий воду при непосредственном контакте воды и сухого азота, центробежных насоса охлажденной воды (рабочий и резервный), водоохлаждающие фреоновые холодильные машины (рабочая и резервная), КИП и А, трубопроводов;

- Системы очистки сжатого воздуха (блок комплексной очистки), состоящий из двух колонн-адсорберов, парового и электрического нагревателей (либо только электрического большей мощности), КИП и А, трубопроводов.
- Блока разделения, в составе которого:
 - Нижняя ректификационная колонна.
 - Нижняя секция верхней ректификационной колонны.
 - Верхняя секция верхней ректификационной колонны.
 - Смесевая ректификационная колонна.
 - Основной теплообменник.
 - Переохладитель жидкого азота и жидкого воздуха.
 - Центробежные кислородные криогенные насосы для подачи кислорода из куба верхней колонны в конденсатор-испаритель и смесевую колонну.
 - Комплект трубопроводов внутриблочной обвязки.
 - Комплект приборных трубопроводов;
 - Комплект криогенной, регулирующей, продувочной и приборной арматуры;
 - Комплект проводов для внутриблочных измерений;
 - Комплект контрольно-измерительных приборов;
 - Кожух блока, засыпанный перлитом с системой поддержания постоянного избыточного давления сухого азота в изоляции, что предотвращает проникновение атмосферной влаги внутрь кожуха блока разделения.

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТАВЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ:

Криогенная технология помимо газообразного кислорода позволяет одновременно получать относительно чистый азот, возможно также получение аргона (для этого потребуются дополнительный узел получения аргона, включающий колонну технического азота, колонну чистого аргона, конденсаторы-испарители, насосы), и это будет иметь экономический смысл при производительности установки свыше 1.5 – 2.0 тыс. Нм³/час по кислороду.

Кроме того, можно получать жидкий кислород и жидкий азот. Следует иметь в виду, что получение аргона возможно только на установках, вырабатывающих технический кислород (концентрация кислорода 99.5%).

Из особенностей эксплуатации – требуется останов раз в 2-3 года с отогревом установки. В это же время можно проводить регламентные работы на центробежных компрессорах. Замена адсорбента в блоке комплексной очистки может проводиться раз в несколько лет (до 10-15 лет – межрегламентный интервал).

При применении двух установок по 20 000 Нм³/час кислорода, состав каждой установки будет аналогичным, а компрессорная станция с питающими компрессорами такой же, как и в случае с одной установкой (3 по 50%). При этом, стоимость строительства такого объекта будет примерно на 50% выше.

Криогенная установка может быть остановлена без отогрева на 8 часов и даже до суток с последующим запуском и выводом на режим. Поэтому, при рваном режиме загрузки, одну из остановок можно останавливать на такой период. Ещё одним преимуществом использования двух установок по 50% каждая во взаимном резервировании (на 50%) в период регламентных и ремонтных работ, если нет других источников кислорода.

Один из основных возможных рисков – останов питающего компрессора, который может произойти либо при перебое с электроснабжением, либо при проблемах с обратным водоснабжением (останов по перегреву). При останове работающего компрессора производится автоматический запуск резервного (он должен быть готов к пуску: подключен и работает стартовый маслонасос, на системе водоснабжения стоят автоматические задвижки, которые отключают поток на останавливаемом компрессоре и включают его на запускомся).

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КРИОГЕННОЙ УСТАНОВКИ:

Потребная производительность компрессора (или компрессоров) для производства 40000 Нм³/час кислорода (чистота 95%) составляет 220 000 Нм³/час по воздуху. Соответственно, установленная мощность электродвигателя (или электродвигателей) 19175 кВт (без учёта резерва). Вторым по значимости потребителем являются система регенерации блока комплексной очистки (БКО) – электронагреватель. Для БКО производительностью 220 000 Нм³/час его мощность составит 1200 кВт. Третьим потребителем является холодильная машина и насосы (325 кВт – без учёта резерва), но она используется только при высоких температурах окружающего воздуха.

Таким образом, установленные мощности для производства 40 000 Нм³/час кислорода (95%) составляют 20700 кВт (без резерва), а потребляемые будут при этом 16900 кВт. Причём, эти показатели будут приблизительно одинаковы как для одного блока на 40 000 Нм³/час, так и для двух блоков по 20 000 Нм³/час, поскольку воздушная компрессорная станция будет одинакова в обоих случаях (3 компрессора по 110 000 Нм³/час – 2 рабочих, 1 резервный), а для других потребителей удельные мощности одинаковы.

В итоге получаем, что прямые удельные затраты на производство 1 Нм³/час кислорода с чистотой 95% составят **0.40 - 0.45** кВт*час/Нм³ (для различных производителей). При этом, в процессе эксплуатации установки этот показатель остаётся практически неизменным, если вовремя проводить регламентные работы на питающих компрессорах и следить за системой охлаждения.

На выходе из установки давление газообразного кислорода составит 0.5 МПа (и), т.е. при такой схеме кислородные компрессоры не требуются.

Подогрев воздуха для питающих центробежных компрессоров будет нужен лишь для температур ниже минус 20°С (и то – только для защиты входных фильтров от возможного обмерзания при высокой влажности), а количество подогреваемого

воздуха – примерно 220 000 Нм³/час, то требуемое для подогрева этого воздуха от минус 47°С до минус 20°С тепловая энергия составит **2060** кВт. Эта величина соответствует пиковым значениям окружающих температур, но ниже минус 20°С температура держится лишь до 4 месяцев в году. Считая среднее значение за этот период минус 30°С, получаем среднюю мощность подогрева не более **400** кВт в течение 4 месяцев (**1,15 млн кВт*час** или **1000 Гкал** - как условная потребность в тепловой энергии).

Для охлаждения установки (включая питающие компрессоры) потребуется около **2000** м³/час воды из оборотного цикла (с перепадом температур 10°С). или же **950** м³/час (с перепадом температур 180°С, что вполне возможно при реализации оборотного цикла от большого водоёма (озера), среднегодовая температура в котором не превышает +7°С).

2. АДСОРБЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЛИ ТЕХНОЛОГИЯ ВКЦА

ВКЦА – вакуумная короткоцикловая адсорбция. В этом случае, единичная производительность одного технологического блока составляет у разных производителей от 4 до 8 тыс. Нм³/час при чистоте кислорода до 93%. Типовая технологическая схема представлена на [рис. 2](#). В схемах разных производителей могут быть некоторые различия. Например, воздух после воздуходувки может направляться на вход вакуумного насоса либо в общий глушитель сброса с вакуумного насоса. Как вариант, вакуумный насос может забирать воздух из помещения ВКЦА при переключке арматуры. Достаточно подробное описание адсорбционной технологий газоразделения можно найти в [статье \[1\]](#), кроме того, общие описания, а также компоновочные решения представлены производителями на своих web-сайтах [\[2,3,4,5\]](#)

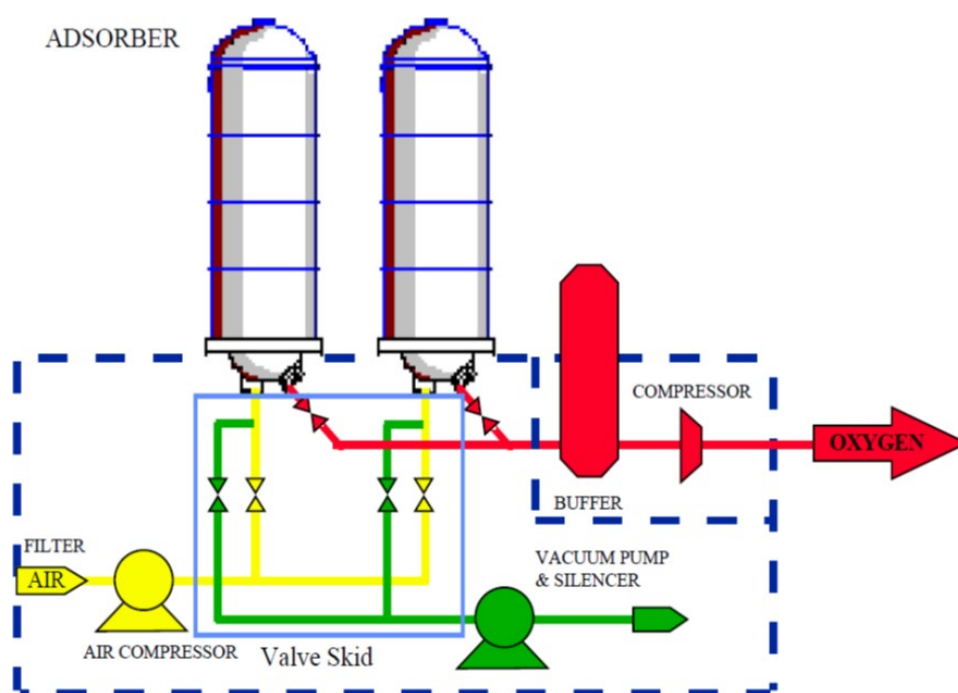


Рис. 2. Типовая схема ВРУ

Атмосферный воздух очищается в фильтре от механических примесей и поступает в воздуходувку, где его давление повышается примерно до 0,06 МПа изб, охлаждается водой в теплообменнике и поступает в адсорбер, заполненный молекулярным ситом. В адсорбере происходит удаление влаги, CO_2 , азота. Молекулы кислорода при этом молекулярными ситами не задерживаются. При насыщении молекулярного сита азотом, процесс адсорбции прерывается и начинается процесс десорбции. При десорбции насыщенное молекулярное сито регенерируется путем сброса давления ниже уровня адсорбции. Для этих целей в составе установки предусмотрен вакуумный насос.

Для непрерывного получения продукта с одного генератора он обеспечен двумя адсорберами. При этом, когда один адсорбер находится в работе, второй адсорбер находится в стадии регенерации.

Попеременная работа адсорберов обеспечивается в автоматическом режиме.

Вырабатываемый кислород на выходе из установки имеет давление близкое к атмосферному (до 0.02 МПа изб) дожимается в кислородных компрессорах и направляется потребителю.

Продолжительность рабочего цикла составляет от 30 до 60 сек, перекладка арматуры производится за 1.5 – 3 сек.

Эта схема является практически аналогом схемы адсорбционного осушителя и разница состоит только в применяемом адсорбенте, способе регенерации и длительности цикла (вместо продувки осушенным нагретым газом, забирающим влагу, используется вакуумирование, а вместо многочасового цикла – короткий с длительностью 30 – 60 сек). Т.е. никаких сложных технологий в производстве данного оборудования не применяется, а потому самыми важными элементами для технологии ВКЦА являются качественная высокоскоростная арматура и сам адсорбент. И если производителя арматуры (дисковые затворы с пневмоприводом и способностью длительно подвергаться циклическим нагрузкам) можно легко найти, то адсорбент с высокой поглощающей способностью и длительным жизненным циклом является главным секретом всех основных производителей ВКЦА. Каждый из них заявляет о своём эксклюзивном варианте и готов давать гарантии на параметры получаемого продукта только при его применении. Поэтому стоимость адсорбента может составлять до 30% (!) и выше от стоимости контракта. Количество засыпаемого адсорбента зависит от его поглощающей способности и параметров рабочего цикла ВКЦА. Свойства адсорбентов различных производителей представлены на [рис. 3](#).

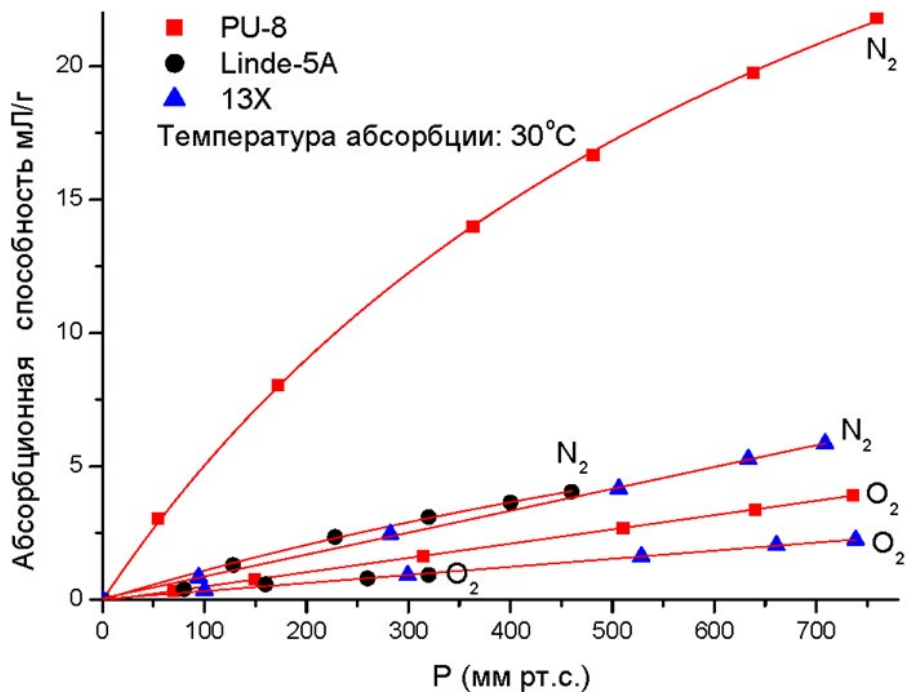


Рис. 3. А

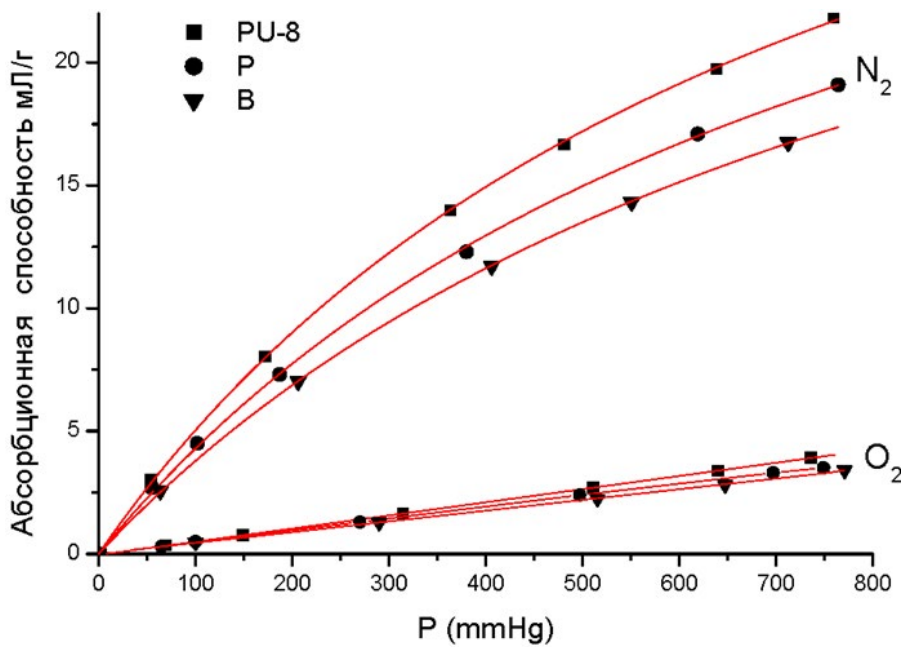


Рис. 3. Б. Примечание: P=Praxair, B-BOC

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТАВЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ:

Большинство производителей использует в качестве воздуходувок и в качестве вакуумного насоса нагнетатели объёмного действия типа Рутса. Часто они имеют один общий привод, либо попарно используются на общих приводах. Такие нагнетатели регулируются с помощью перепуска либо сброса.

По утверждениям производителей адсорбент имеет срок службы 15 лет. Но с течением времени его свойства постепенно снижаются. В результате, первоначальное значение кратности сырьевой воздух/кислород изначально декларируемое производителями ВКЦА как 7 – 8 увеличивается до 10 и даже до 12 (исходя из реальных характеристик нагнетателей). Поскольку мощность нагнетателей при этом изначально выбирается на наихудший вариант, то они оказываются перемеренными.

Возможности и глубина регулирования без сброса воздуха: снижение производительности возможно до 60% и даже до 30% от номинальной. Делается это за счёт изменения продолжительности рабочего цикла.

При переключении арматуры для переключения адсорберов на несколько секунд адсорбер отключается и от вакуумного насоса, и от воздуходувки, при этом воздух из воздуходувки перепускается в вакуумный насос (на некоторых схемах часть воздуха вакуумным насосом ещё забирается из окружающей среды).

Для производства 40 000 Нм³/час кислорода (93%) разработчик технологии ВКЦА указывает необходимость подачи 8-кратного количества сырьевого воздуха, т.е. 320 000 Нм³/час, тем не менее, по расчётным показателям воздуходувок эти 320 000 превращаются в 470 000 Нм³/час, что в 1.5 раза выше. Объясняется это особенностью циклической работы ВКЦА, когда некоторую часть времени рабочего цикла воздух не подаётся ни в один из адсорберов (но оборудование работает без остановок), а также тем, что эффективность адсорбента по поглощению азота снижается с течением времени под влиянием различных факторов, а потому, оборудование выбирается для наихудших условий работы. Повышенная производительность воздуходувки и вакуумного насоса регулируется настройкой длительности адсорбционного цикла.

Одним из факторов ухудшения эффективности адсорбента является содержание в воздухе SO₂, максимальная концентрация которого лимитируется производителем адсорбента на уровне до 3 ppm по объёму. Для защиты установки от превышения этого значения производители используют либо газоанализаторы с системой защитного отключения, либо специальные входные адсорбционные не-регенерируемые фильтры (замена раз в год или по состоянию), либо слой другого специального регенерируемого адсорбента, поглощающего SO₂.

Следует также отметить, что уровень шума, создаваемый нагнетателями типа Рутс в составе одного технологического модуля составляет от 108 до 115 дБ (на режиме пуска). К этому следует добавить 85 дБ от глушителя выхлопа вакуумного насоса.

Для станции на базе 10 блоков по 4000 Нм³/час (по кислороду) применяется 10 блоков механического оборудования (воздуходувка и вакуумный насос с общим электроприводом). При такой производительности возможно применение «сухого» вакуумного насоса (без впрыска воды для уплотнения). Мощность одного мотора 1950 кВт, 600 Об/мин. Для такого двигателя возможно до 3 последовательных пусков в час.

При применении 5 блоков по 8000 Нм³/час (по кислороду) используются те же вакуумные насосы и воздуходувки, но собранные попарно на общих приводах (5 блоков воздуходувок и 5 блоков вакуумных насосов). Делается это по причине большого размера такого оборудования, что приведёт к нестандартному исполнению в случае одиночного агрегата. Т.е. Станция, собранная на базе 10 блоков будет отличаться от станции на базе 5 блоков только количеством адсорберов и, соответственно, арматуры. При этом, диаметры технологических трубопроводов для воздуха и вакуума будут 1000 – 1200 мм, что весьма проблематично при монтаже. Также помимо трубопроводов, для нагнетателей типа Рутса, создающим значительные пульсации необходимым условием является применение пульсационных емкостей (как для поршневых компрессоров), что также загромождает помещение компрессорной станции. Возможность применения центробежных воздуходувок, более компактных по размеру и менее шумных по сравнению с типом Рутса, большинством производителей не рассматриваются, очевидно, по причине недостаточного опыта работы с таким оборудованием и боязни новых рисков.

Промежуточным вариантом, возможно, упрощающем ситуацию, является применение 7 блоков по 5750 Нм³/час кислорода. В этом случае удаётся использовать 7 блоков механического оборудования, но при этом вакуумные насосы такого размера уже будут с водяным впрыском для уплотнения.

Кислород, получаемый на ВКЦА имеет низкое давление до 0.02 МПа (и) и требует дожимания кислородными компрессорами. Такими могут быть центробежные или поршневые (безмасляные). Применение центробежных компрессоров целесообразно по схеме 2+1 (2 в работе, один резервный). По типу конструкции это «бочки», диапазон регулирования которых без рецикла составляет 15 - 20%, что может рассматриваться потенциальным заказчиком как ухудшение энергетических показателей объекта в целом в случае длительной работы на пониженной производительности. Единственной альтернативой является применение поршневых компрессоров с безмасляным ходом поршня. Таких компрессоров нужно использовать 5 (для 5 или 10 технологических блоков) или 7 агрегатов (для 7 технологических блоков) без отдельного резерва. Обслуживание безмасляных поршневых компрессоров в отличие от центробежных требует проведения регламентных работ каждые 1000 - 1500 часов (замена поршневых колец). Их регулирование осуществляется рециклом через байпасный клапан, поэтому экономия

электроэнергии в сравнении с центробежным возможна лишь при отключении части компрессоров. Возможны 2 варианта подключения кислородных компрессоров в технологической схеме – 1 компрессора на 1 блок (или на 2 блока) либо все компрессоры подключаются на общий коллектор кислорода низкого давления и на выходе на общий коллектор кислорода высокого давления, соответственно. В целях обеспечения большей технологической гибкости следует использовать вариант 2, но он не всегда оказывается возможным, исходя из технологических компоновок оборудования.

Одним из самых больших технологических рисков для случая станции ВКЦА, состоящей из нескольких технологических блоков, находящихся в параллельной работе являются пульсации. Наихудшим в этом случае будет вариант с 10-ю технологическими блоками и 5-ю поршневыми компрессорами. Самое опасное, что может произойти – это вхождение 10 блоков в резонанс при их одновременной работе и совпадении рабочих циклов, что может привести к раскачиванию здания. Следует также помнить, что и для других вариантов это возможно. В этом случае решением может являться контроль фазы рабочего цикла для каждого блока с верхнего уровня АСУТП- для их разнесения по времени.

Самым уязвимым местом в эксплуатации для ВКЦА являются высокоскоростные дисковые затворы, которые подвергаются большим динамическим и ударным нагрузкам, а потому имеют ограниченный ресурс. Кроме того, по сообщениям службы эксплуатации на аналогичных объектах часто из-за высокого уровня вибрации, вызванного работой нагнетателей типа Рутса, выходят из строя концевые выключатели и приборы КИП и А.

Также весьма важным фактором риска является отсутствие опыта применения данной технологии в условиях предприятия заказчика и отсутствие необходимой многолетней статистики применения ВКЦА в рассматриваемых климатических условиях. Опыта реализации таких крупных проектов на базе технологии ВКЦА в РФ нет.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВКЦА:

Установленные мощности приводов воздуходувок и вакуумных насосов, обеспечивающих производство 40 000 Нм³/час кислорода составляет 17500 - 19500 кВт – для разных производителей. Установленные мощности кислородных компрессоров составляют 3750 – 4400 кВт. В итоге, получаем 21900 - 23250 кВт. При этом, в качестве потребляемой мощности производители ВКЦА указывают 15500 до 18950 кВт при полной нагрузке на номинальном режиме. Загрузка электродвигателей при этом получается 0.60 – 0.80, что говорит либо о сильном их переразмеривании (для чего?), либо о большой доли времени работы на холостом ходу в цикле ВКЦА. Исходя из общих принципов подбора электроприводов, нагрузка на максимальном режиме должна составлять 0.85 – 0.95 от установленной мощности, что обеспечивает максимальные значения КПД и косинуса Φ , более того, зачем платить за лишнюю установленную мощность и более мощное оборудование? Если принять среднюю загрузку двигателя 0.6, а максимальную 0.85 при минимальном

потреблении на холостом ходу, получим, что до 30% цикла воздухоудвки работают на закрытые клапана и это на номинальном (!) режиме. Очевидно, такие показатели потребляемой мощности даны не совсем корректно, поэтому для дальнейших оценок будем ориентироваться на потребляемую мощность **18950** кВт при установленной **23250** кВт, указанную одним из производителей для серийно выпускаемого оборудования производительностью 4000 Нм³/час кислорода 93%. В итоге получаем, что прямые удельные затраты на производство 1 Нм³/час кислорода с чистотой 93% составят **0.42 - 0.47** кВт*час/Нм³ (для различных производителей, без учёта подогрева входного воздуха).

Организация рабочего процесса в адсорбере требует температуры +30С. Степень повышения давления 1.6, реализуемая воздухоудвкой (нагнетание от 0.1 до 0.16 МПа (абс)) обеспечивает подогрев перекачиваемого воздуха на 50⁰С. Т.е. при минус 20⁰С на входе воздухоудвка должна дать требуемые +30⁰С на выходе – с центробежным нагнетателем так и получается, но производители воздухоудвок типа Рутса ставят жёсткое требование о входной температуре воздуха на воздухоудвку не ниже 0⁰С. Т.е. перед воздухоудвкой должен стоять подогреватель (при входных температурах ниже 0⁰С), а после неё холодильник – для достижения +30⁰С. С учётом необходимого для производства 40 000 Нм³/час кислорода 470 000 Нм³/час сырьевого воздуха при его подогреве от минус 47⁰С до 0С потребуются **7660** кВт тепловой энергии. Это пиковое значение. Для окружающих температур выше 0С получается около 4 месяцев. Средняя температура за 8 месяцев отрицательных температур составляет около минус 17⁰С. Это означает среднюю мощность подогрева **2800** кВт в течение 8 месяцев (**до 16 млн. кВт*час или 13870** Гкал).

Для охлаждения оборудования станции (при условии применения вакуумных насосов сухого типа) потребуется около 900 м³/час оборотного цикла (при перепаде температур 10⁰С).

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОБОИХ ВАРИАНТОВ

При выборе технологии производства кислорода немаловажным фактором является и экономическая оценка будущего проекта.

Цены на криогенное оборудование, давно и повсеместно производящееся весьма хорошо известны на рынке. Безусловно, цена криогенной установки зависит от использованной технологической схемы, видов получаемых продуктов, их конечного давления и наличия парка хранения.

Для ВКЦА вариантов комплектации сильно меньше: в качестве опции могут потребоваться дожимные кислородные компрессоры (как в рассматриваемой задаче), система подогрева входного воздуха (гораздо более мощная, чем для криогенной установки) и дополнительные фильтры на очистку входного воздуха от SO₂ и других примесей, молекулы которых забивают поры адсорбента и не могут их покинуть при вакуумной регенерации.

Порядок средней удельной цены оборудования ВКЦА с учётом кислородных компрессоров, но без дополнительных фильтров на условиях поставки с завода составляет до 1 миллиона евро за 1000 Нм³/час вырабатываемого кислорода (до 93%). Для производителей криогенных ВРУ при самой простой комплектации и применении схемы без внутреннего сжатия, без кислородных компрессоров (которые не требуются), без парка хранения жидких продуктов, без колонны аргона будет на тех же условиях на 10 - 15% ниже (и это с учётом комплектации криогенной ВРУ резервным питающим компрессором).

Площадь застройки криогенной ВРУ (для решаемой задачи) будет в 2 раза меньше, чем площадь станции ВКЦА (в рассматриваемом случае). Примерно также можно оценить стоимость строительных работ (количество фундаментов, строительный объём здания и т.д.). Стоимость монтажа оборудования может оказаться сопоставимой при условии блочной поставки ВКЦА за счёт уменьшения работ на месте, поскольку холодный блок на 40 000 Нм³/час кислорода может быть собран только на месте монтажниками высокой квалификации.

Что касается силового электрооборудования, то мощность ГПП в обоих случаях будет одинаковой – рассчитанной на 25 МВт установленных электрических мощностей, а вот РУ6 кВ с устройства плавного пуска для криогенной установки будет меньше, поскольку там только 3 мощных высоковольтных привода, тогда как в случае с ВКЦА их 14 или 15 (в зависимости от количества блоков).

В итоге, капитальные затраты на строительство станции ВКЦА для рассматриваемых условий задачи могут оказаться на 10 – 15% выше, чем в случае криогенной ВРУ.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВКЦА:

Основными эксплуатационными затратами будут:

1. Электроэнергия. Установленные мощности основного оборудования (без учёта резерва) для криогенной ВРУ будут на 5-10% ниже. По потребляемым мощностям для обоих вариантов на номинальном режиме и при снижении производительности до 70% энергозатраты можно условно принять одинаковыми, хотя по реальным подтверждённым показателям для криогенной ВРУ они будут ниже на те же 5-10% ниже, чем для ВКЦА. При работе на режиме ниже 70% могут проявляться преимущества ВКЦА.
2. Затраты на обратное водоснабжение и подогрев входного воздуха. Для Криогенной установки потребная производительность обратного цикла составит около 1000 - 2000 м³/час (в зависимости от входной температуры воды), для ВКЦА от 750 до 1000 м³/час (т.е. в 2 раза ниже). По затратам на технологический подогрев получаем разницу в 12800 Гкал или в 14.7 млн кВт*час) за год.

3. Обслуживание и ремонт. Для криогенной установки за 15 лет нужно будет 2 раза сделать средний ремонт (проверка/замена подшипников/уплотнений) на питающих компрессорах и замену адсорбента в блоке комплексной очистки. – цена вопроса 3М\$ за 15 лет. Основная статья расходов для ВКЦА – это замена адсорбента через 15 лет эксплуатации (либо раньше). Цена вопроса 30\$ x 450 000 кг = 13.5 М\$ + доставка + работа по выгрузке/загрузке (требуется квалифицированный персонал на 10 недель) – получаем до 14 М\$. А при использовании дополнительных защитных фильтров на SO₂ ещё до 5-6 М\$ - в итоге до 20 М\$ за 15 лет.
4. Зарплата персонала. Безусловно, 10 и даже 5 блоков при наличии 14 или 15 крупных единиц механического приводного оборудования для станции на базе ВКЦА (особенно, поршневые кислородные компрессоры) не идут ни в какое сравнение по трудоёмкости эксплуатации с тремя (пусть, даже, большими) центробежными компрессорами для криогенной ВРУ, поскольку остальное оборудование там существенно меньше и проще (насосы, детандеры, холодильные машины). И это потребует большего количества обслуживающего персонала. Но зарплата обслуживающего персонала составляет не более 10 - 20% даже от затрат на электроэнергию, а на каждом предприятии организация обслуживания оборудования строится по-своему и может отдаваться на внешние контракты. Поэтому в рассматриваемом случае условно примем эти расходы одинаковыми для обеих технологий.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Удельные затраты электроэнергии на 1 Нм³ кислорода для ВКЦА и Криогенной установки сопоставимы при работе на номинальном режиме или в диапазоне регулирования 70% - 100%. причём, без учёта подогрева входного воздуха
2. Криогенная ВРУ позволяет получать побочные продукты - азот (до 40 000 Нм³/час), жидкий азот, жидкий кислород. Также возможно получение аргона (при добавлении отдельной колонны и дополнительного криогенного оборудования).
3. Для криогенной ВРУ не требуются дожимающие кислородные компрессоры, обеспечивающие повышение давление кислорода до 0.5 МПа (и), что существенно образом упрощает вопросы эксплуатации оборудования и станции в целом.
4. Для криогенной ВРУ адсорбент в БКУ стоит на порядок дешевле, чем адсорбент для ВКЦА и его нужно в разы меньше. Более того, адсорбент, применяемый для БКУ, может длительное время работать в условиях присутствия в воздухе SO₂, что невозможно для адсорбента ВКЦА, которому необходима защита. Такая защита представляет собой либо дорогостоящий дополнительный адсорбционный фильтр на входе, требующий периодической замены, либо отключения ВКЦА при наличии SO₂ на входе, что может быть невозможно, исходя из условий работы оборудования, потребляющего кислород. В свою очередь, стоимость замены адсорбента для ВКЦА составляет более 30% от стоимости всего

технологического оборудования, а потому большинство производителей её не предполагают.

5. Площадь, занимаемая оборудованием криогенной ВРУ, будет примерно в 2 раза меньше, чем площадь, требуемая для ВКЦА, соответственно, и объём СМР также должен быть меньше, если не в 2, то в 1.5 раза.
6. Эффективность ВКЦА, определяющая её преимущество, может проявляться только в «рваном» режиме работы при снижении потребления кислорода ниже 70% от номинальной производительности. При этом,
7. Технология ВКЦА проще, соответственно, и требования к квалификации персонала могут быть ниже. Но ... если на предприятии уже есть парк криогенных ВРУ вопрос с персоналом уже должен быть решён.

Исходя из представленных выше результатов сравнения, можно дать следующие рекомендации по применению каждой из технологий:

СЛЕДУЕТ ИСПОЛЬЗОВАТЬ КРИОГЕННУЮ ТЕХНОЛОГИЮ В СЛУЧАЯХ, ЕСЛИ:

1. Требуемая чистота продукта (кислорода или азота) выше 93 - 95%,
2. Помимо основного продукта требуется получать побочные: кислород или азот, жидкий кислород, жидкий азот, аргон.
3. Потребная производительность по кислороду свыше 4000 – 6000 Нм³/час.
4. Температуры окружающей среды большую часть года отрицательные
5. В воздухе содержатся SO₂, меркаптаны.
6. Есть серьёзные ограничения по шуму
7. Предполагаемый срок службы 20 – 30 лет

СЛЕДУЕТ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ТЕХНОЛОГИЮ ВКЦА:

1. Нет постоянной потребности в кислороде (или азоте), а завозить его нерентабельно или нет возможности
2. Требуемая чистота продукта 50 – 90%
3. Потребная производительность от 100 до 4000 Нм³/час
4. Температуры окружающего воздуха большую часть года выше 0⁰С (в противном случае требуются дополнительные затраты на подогрев входного воздуха)
5. Низкая квалификация обслуживающего персонала
6. Предполагаемый срок службы 10 – 15 лет.

Таким образом, для решения предлагаемой задачи применение ВКЦА, даже несмотря на возможный рваный режим загрузки оборудования может оказаться нецелесообразным по причине высокой стоимости адсорбента и, более того, высокой стоимости дополнительного адсорбента на SO₂, либо недопустимости остановки ВКЦА на длительный период из-за наличия SO₂ во входном воздухе.

В результате, применение криогенной технологии для производства 40 000 Нм³/час кислорода видится более оправданным, т.к. единственным аргументом в пользу технологии ВКЦА оказывается работа станции в условиях «рваного» графика нагрузки. При этом, средней нагрузкой на станцию указывается 70% номинального режима, что соответствует нижнему пределу регулирования для ВРУ без сброса кислорода или работе питающих компрессоров на рецикле. Оценка такого графика с экономической точки зрения должна проводиться на основе реального срока окупаемости увеличенного объёма капиталовложений для ВКЦА по сравнению с криогенной ВРУ, а также реальных затрат на обслуживание и ремонт возникающего при использовании технологии ВКЦА.

Следует также принять во внимание, что ВКЦА такой большой мощности находятся в эксплуатации в местах с тёплым климатом.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Hazruna, M. Miyake, H. Sasano, Development of PSA Gas Separation Technology to Reduce Greenhouse Effect. Sumitomo Kagaku 2005-II (R&D Report)
2. www.vpsatech.com – веб сайт компании PIONEER
3. www.linde-engineering.ru – веб сайт компании Linde
4. www.mahler-ags.com – веб сайт компании Mahler AGS
5. www.praxair.com – веб сайт компании Praxair, Ink (VPSA Oxygen)