



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК АДСОРБЦИОННОЙ И КРИОГЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА 40 000 НМЗ/ЧАС КИСЛОРОДА С ЧИСТОТОЙ 93%

АНДРЕЙ ВОРОНЕЦКИЙ
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ВВЕДЕНИЕ

Данная публикация является продолжением работы [1], которая вызвала широкий дискуссионный интерес у потенциальных заказчиков, стоящих перед выбором способа производства кислорода. К этой дискуссии подключились и разработчики обеих технологий, и эксплуатирующие организации.

С получением новой информации, как от производителей, так и от потребителей технологий воздухоразделения, у нас появилась возможность дополнить ранее сделанные выводы и разобраться в особенностях работы технологии ВКЦА, которая пока не так широко распространена для решения подобных задач.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Решаемая задача остаётся прежней: получение 40 000 Нм³/час кислорода с чистотой не менее 93% и давлением 0.5 МПа (и) на выходе из кислородной станции, режим работы круглосуточный и круглогодичный.

Среднегодовая загрузка установки составляет 0.7 от номинального режима. Диапазон регулирования максимально возможный. Установку необходимо разместить с использованием существующего здания. Располагаемая площадь для технологического оборудования 100х30м, высота здания 24 м, до крюка мостового крана – 17.3 м.

Необходимо дать сравнительный анализ строительства и эксплуатации ВРУ для двух типов: **криогенного** и **адсорбционного**.

ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ

После выхода публикации [1] предполагаемые решения были более конкретизированы для применения к решению поставленной задачи:

ВАРИАНТ 1

Криогенная технология с размещением холодного блока криогенной ВРУ вне здания, а «тёплой» технологии в отапливаемом помещении. Выбран один блок с номинальной производительностью 40 000 Нм³/час. Питающих компрессоров два с возможностью установки третьего резервного (по желанию заказчика). Это позволяет установке работать с производительностью 50% без сброса воздуха и кислорода. При проведении сравнения мы не рассматриваем дополнительные возможности **криогенной** ВРУ по производству побочных продуктов: жидкого кислорода, жидкого азота, газообразного азота 99.99%, аргона.

* - Здесь и далее нормировка 1м³ по условиям: +20С, 0% влажности, 101325Па

Установка оптимизирована для производства одного продукта – газообразного кислорода чистотой 95% и давлением 0.5 МПа(и), остальные являются бонусом этой технологии.

ВАРИАНТ 2

Станция на базе 5 блоков ВКЦА с производительностью 8000 Нм³/час каждый, включая 5 кислородных компрессоров (по одному на блок ВКЦА). Резервного оборудования не предусматривается

ОСОБЕННОСТИ ВЫБРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

При выборе технологии ВРУ основным фактором является энергопотребление, поскольку именно расходы на электроэнергию будут основными эксплуатационными расходами.

Дополнительная информация, полученная от производителей оборудования по обеим технологиям применительно к решаемой задаче, позволяет уточнить их энергопотребление и особенности эксплуатации.

1. КРИОГЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Поскольку данная технология уже давно отработана многими производителями, при оптимизации криогенной ВРУ под решаемую задачу, её энергетические показатели удаётся существенным образом улучшить, по сравнению с более общими случаями применения, и довести удельное энергопотребление до **0.3925** кВт*час/Нм³ [1] при отсутствии сбросов, т.е. среднечасовая потребляемая мощность **15 700 кВт** с учётом периодического включения БКО (блока комплексной очистки) для производства 40 000 Нм³/час. Электронагреватель регенератора БКО работает периодически (1 час через 2), потребляя 2400 кВт во время работы – т.е., 800 кВт в среднем.

Работа без сброса воздуха на свечу происходит при регулировании производительности питающих компрессоров с помощью ВНА в диапазоне 70 – 100%, при котором энергетические показатели существенно не меняются (на 70% производительности удельные энергетические показатели ухудшаются до **0.4306** кВт*ч/Нм³ (примерно на 9%)). Это означает среднюю потребляемую мощность **12057** кВт для производства **28 000** Нм³/час кислорода 95%.

При снижении производительности до 60% потребляемая мощность будет той же - 12057 кВт, а производительность - 24000 Нм³/час, поскольку часть воздуха (10% номинальной производительности) с компрессоров будет сбрасываться на свечу, что означает удельное энергопотребление **0.5** кВт*ч/Нм³.

Также есть ещё одна рабочая точка – 50% производительности при одном выключенном питающем компрессоре, что соответствует минимальной производительности холодного блока. Для этого режима при удельных энергозатратах 0.4062 кВт*ч/Нм³ средняя потребляемая мощность составит **8124** кВт – для производства 20 000 Нм³/час.

Улучшить энергопотребление для **криогенной** схемы в диапазоне 50% -70% можно при использовании двух питающих компрессоров с различными производительностями, т.е., вместо 2 по 50%, использовать 70% + 30%. В этом случае, до общей производительности 70% они работают оба без сброса, после этого меньший отключается, а больший переходит на 100% своей мощности и снова регулируется до 70% своей производительности, т.е., до 50% общего расхода - без сброса. Можно также использовать 3 компрессора по 35% мощности, но такой вариант будет стоить дороже.

Снижение/увеличение производительности **криогенной ВРУ** происходит медленно (0.3% в минуту), т.е. для снижения на 25% нужно 83 минуты.

Потребности в охлаждающей воде составляют от 900 до 1600 м³/час, в зависимости от возможного перепада температур, обеспечиваемого системой охлаждения: 900 м³/час соответствует $\Delta T = 18C$, а 1600 м³/час $\Delta T=10C$ соответственно. Температурный перепад 10C обычно достигается обратной системой водоснабжения на базе вентиляторных градирен для температуры окружающего воздуха +25C ... +30C. В свою очередь, перепад в 18C может быть достигнут в более холодный период или при использовании большого внешнего водоёма с температурой воды не выше +15C... +17C.

Подогрев входного воздуха для питающих центробежных компрессоров не требуется до температур минус 60C. При этом, для защиты воздушных фильтров от обмерзания нужно 400 кВт (суммарно), что уже учтено в общем энергопотреблении.

Суммарная **пиковая** потребляемая мощность **криогенной** ВРУ составит около **18 200 кВт** (при работе электронагревателя регенератора БКО – один час каждые 3 часа), что важно при выборе трансформаторов ГПП (главной понизительной подстанции) и расчёта системы электроснабжения. Такая мощность позволяет выбрать трансформаторы 25000 кВА для ГПП.

Межрегламентный пробег **криогенной** ВРУ составляет до 3 лет без останова. Замена маслофильтров и воздушных фильтров производится «на ходу», за счёт байпасных переключений. Регламентные работы на питающих центробежных компрессорах проводятся через 40 000 часов наработки. Замена масла - 1 раз в 3 года или по состоянию (но не чаще). Замена адсорбента в БКО - 1 раз в 10 лет.

На нужды КИП воздух отбирается после БКО.

Дожимные кислородные компрессоры не требуются.

Общий план размещения оборудования (типовой) представлен на [рис. 1](#)

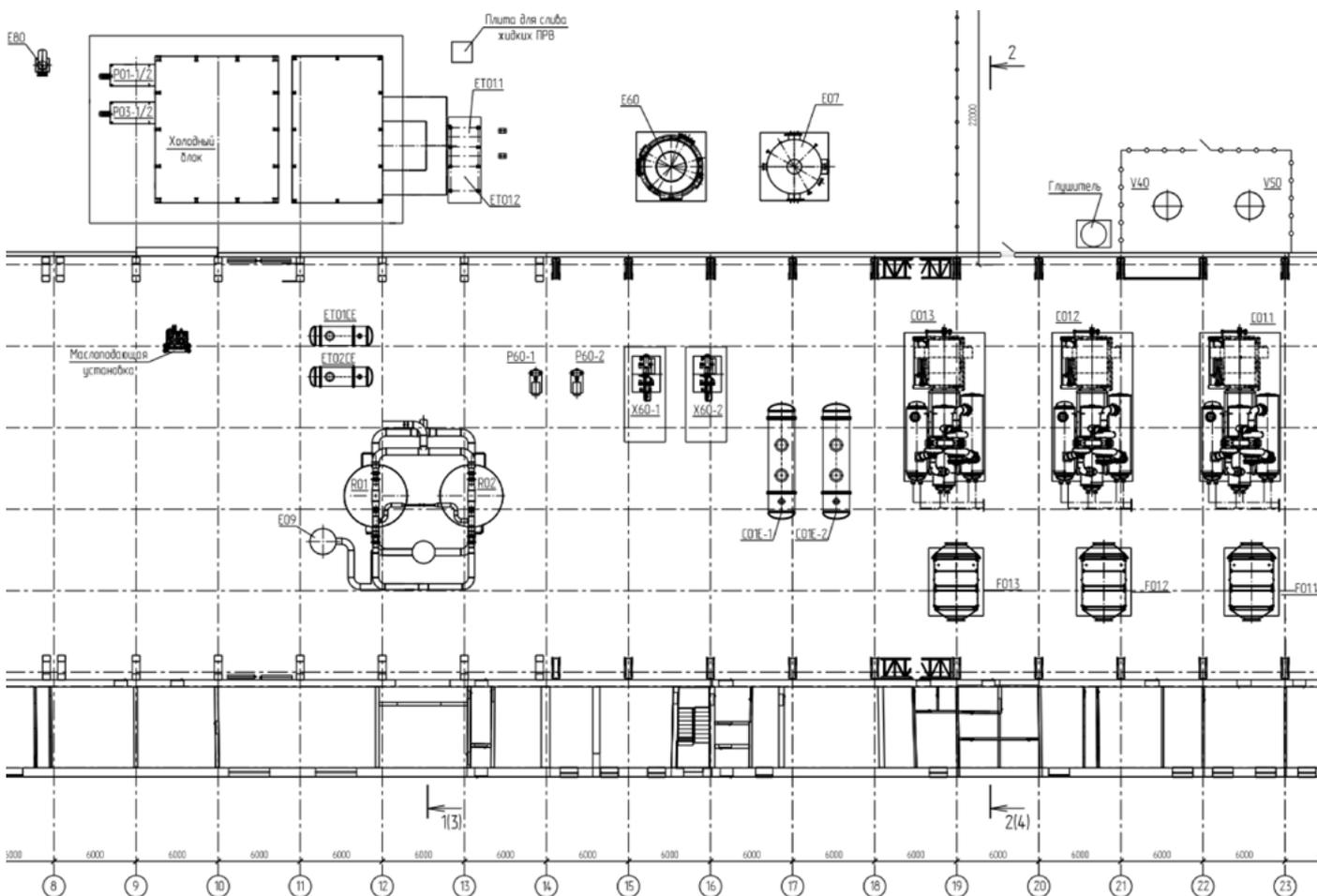


Рис. 1. Типовая компоновка **криогенной** ВРУ. Показано 3 питающих компрессора (третий резервный - по желанию заказчика). Компоновка может быть оптимизирована под меньшую площадь.

2. АДСОРБЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ (ИЛИ ВКЦА)

Выбор единичной производительности блока ВКЦА 8000 Нм³/час определяет конфигурацию блока и размеры технологических трубопроводов. Схема имеет два адсорбера, но для обеспечения необходимого расхода воздуха применяется сдвоенная воздухоудвка (2 агрегата типа Рутса с приводом от общего электромотора). То же самое с вакуумными насосами – сдвоенный агрегат. Такое решение вызвано отсутствием на рынке стандартного оборудования типа Рутса требуемой единичной производительности.

Каждый блок ВКЦА дополняется дожимным кислородным компрессором.

Таким образом, в составе одного блока ВКЦА будет 3 электромотора: 1500 кВт для воздуходувок, 2250 кВт для вакуумных насосов, 800 кВт – для кислородного компрессора.

Суммарная установленная мощность этих приводов составляет **4550** кВт на блок, а **пиковая** потребляемая 4150 кВт (**22750** кВт и **20750** кВт, соответственно, на станцию), но средняя потребляемая заявлена производителем как **3250** кВт (**16250** кВт на станцию) на номинальном режиме работы. Т.е., средняя загрузка электродвигателей будет около 0.7.

Объясняется это циклической работой ВКЦА, при которой каждые 20 с нагрузка воздуходувок и вакуумных насосов меняется от минимальной до максимальной, а для кислородных компрессоров остаётся постоянной (см. рис. 2.).

Регулирование производительности каждого технологического блока ВКЦА возможно в диапазоне 30 – 100% от его единичной производительности. Но реализуется это путём увеличения длительности нерабочего шага в цикле. В результате, для 70% производительности удельное энергопотребление технологического блока возрастает до 0.483 кВт*ч/Нм³ (на 19%), для 50% - 0.580 кВт*час/Нм³ (на 43%), а для 30% - 0.807 кВт*ч/Нм³ (т.е., почти в 2 (!) раза увеличивается). По этой причине, организации, эксплуатирующие ВКЦА, стараются не снижать их производительность, а регулирование осуществлять ступенчато, выключением технологических блоков. В нашем случае такое регулирование получается с шагом 20%. При этом, процесс запуска и выхода на режим составляет до 10 минут по утверждению производителя.

Для обеспечения производства кислорода 28000 Нм³/час (исходя из режима средней загрузки станции 0.7 от номинальной) необходимо задействовать 3 технологических блока на номинальном режиме (3 x 8000 = 24000) и один блок с нагрузкой 50%. Получаем следующую потребляемую мощность:

$$3 \times 3250 \text{ кВт} + 0.58 \text{ кВт*час/Нм}^3 \times 4000 \text{ Нм}^3/\text{час} = 12070 \text{ кВт}$$

Для **криогенной** схемы, как мы помним, было **12057** кВт, т.е., потребление одинаково.

При снижении производительности до 60% (до 24000 Нм³/час) получим потребляемую мощность:

$$3 \times 3250 = 9750 \text{ кВт}$$

Это на 2307 кВт меньше (на 20%), чем для **криогенной** схемы.

Для рабочей точки 50% (20 000 Нм³/час) энергопотребление ВКЦА составит соответственно:

$$2 \times 3250 + 0.58 \text{ кВт} \cdot \text{час} / \text{Нм}^3 \times 4000 \text{ Нм}^3 / \text{час} = 8820 \text{ кВт}$$

Это почти на 700 кВт (около 8.5%) больше, чем для **криогенной** схемы.

Получаем, что до глубины регулирования 70% потребление электроэнергии для **криогенной** и **адсорбционной** технологий одинаковы, при снижении ниже 70% удельное энергопотребление **криогенной** схемы постепенно ухудшается (из-за сброса воздуха), за исключением рабочей точки 50%. В свою очередь, для адсорбционной технологии ухудшение происходит только при сильном отклонении от режимов, кратных 8000 Нм³/час, когда один из блоков работает на минимальной производительности или близко к ней.

При этом, если для криогенной схемы применять питающие компрессоры по схеме 30%+70% вместо 50%+50%, то энергопотребление обеих технологий будет примерно одинаково в диапазоне 50-100% (и даже лучше в случае криогенной схемы). Тогда, основное преимущество адсорбционной технологии будет заключаться только в скорости выхода на рабочий режим.

Поэтому, серьёзно говорить об энергетических преимуществах **адсорбционной** технологии можно лишь в том случае, когда значительную часть времени станция должна работать на режиме ниже 50%, а также, если её производительность будет кратна единичной производительности одного технологического блока (8000 Нм³/час). Но это уже не означает среднюю нагрузку 0.7 от номинальной мощности, т.е., исходная задача должна быть изменена.

Потребности в охлаждающей воде для станции на базе ВКЦА составляют от 425 до 750 м³/час в зависимости от возможного перепада температур, обеспечиваемого системой охлаждения: 425 м³/час соответствует $\Delta T = 18\text{C}$, а 750 м³/час $\Delta T = 10\text{C}$ соответственно.

Подогрев входного воздуха для воздуходувок типа Рутса нужно обеспечивать до плюсовых температур (по требованию производителя), что дополнительно потребует около 7 МВт тепловой мощности при наихудшем случае, что мы уже рассматривали в [1].

Межрегламентный пробег **адсорбционной** ВРУ определяется кислородными компрессорами и составляет до 6 мес без остановки (регламентные работы каждые 4000 и 8000 часов). Регламентные работы на воздуходувках и вакуумных насосах проводятся через 40 000 часов наработки, по высокоскоростным дисковым затворам 1 раз в год. Замена адсорбента заявлена производителем 1 раз в 10 лет, при этом, гарантийный срок не более 3 лет, а реальный срок службы доходит до 15-20 лет (по данным эксплуатирующих организаций), но со снижением эффективности примерно на 8-10%.

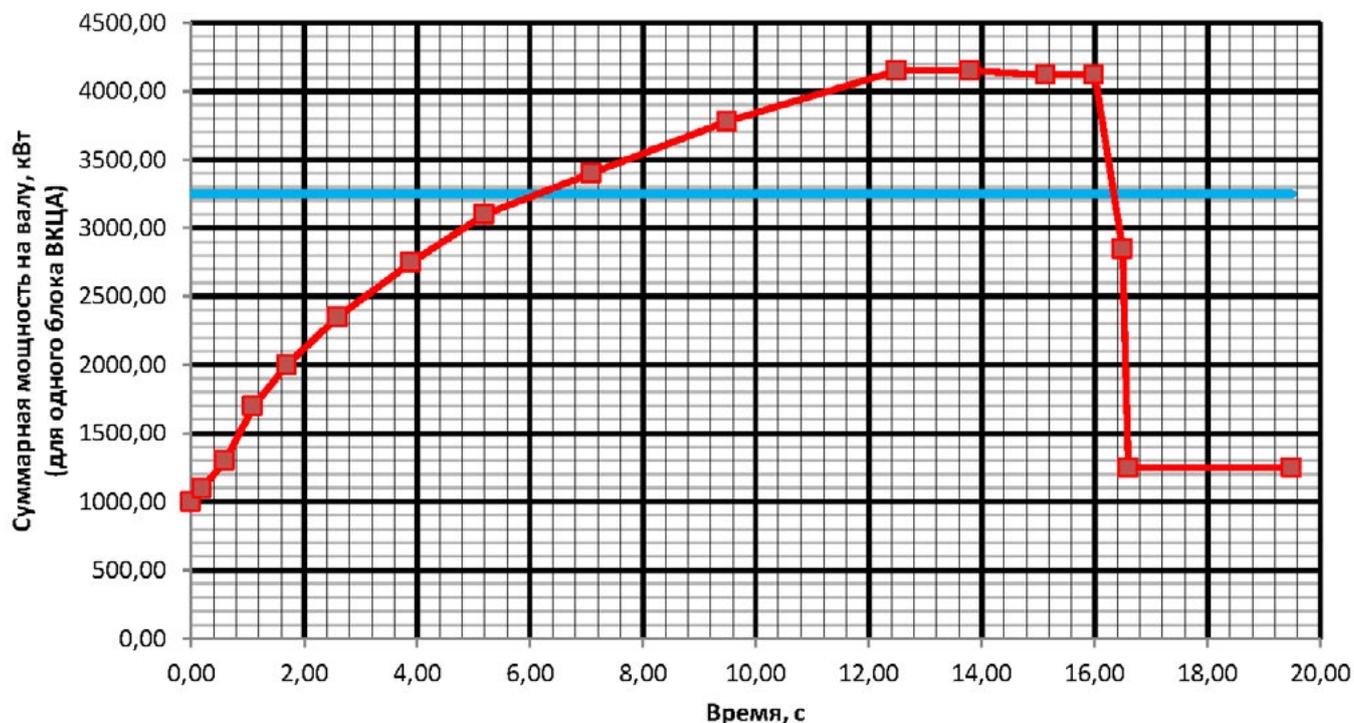


Рис. 2. Циклический график энергопотребления основного оборудования ВКЦА (суммарная мощность на валу для одного блока). Сплошной горизонтальной линией показано среднее значение, заявленное производителем.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТАЦИИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛЕНИЯ ДЛЯ РАССМАТРИВАЕМЫХ ВАРИАНТОВ

1. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Как мы уже определили выше, максимальная потребляемая пиковая нагрузка для **криогенной** технологии составляет **18200** кВт, для **адсорбционной** - **20750** кВт (и это без общестанционных и вспомогательных систем). Для обеспечения энергоснабжения таких мощных потребителей потребуется строительство новой отдельной ГПП 110/6кВ, обеспечивающей питание от высоковольтной линии (как правило, на предприятиях нет таких свободных мощностей на существующих ГПП), РУ 6 кВ для обеспечения мощных высоковольтных потребителей и КТП 6/0.4 кВ для общестанционных и вспомогательных систем.

Самым дорогостоящим объектом этой системы будет **ГПП 110/6**. И если для **криогенной** технологии мощность трансформаторов 110/6 уже сейчас можно определить как 2 по 25000 кВА, так как, запас мощности очевиден и достаточен, то для **адсорбционной** не всё так однозначно, поскольку установленная мощность высоковольтных потребителей составляет **22750** кВт, пиковая потребляемая мощность рабочего цикла ВКЦА близка к **20750** кВт, а средняя, вместе с низковольтными потребителями и собственными нуждами составит более **21500** кВт (без учёта электроподогрева входного воздуха). В этом случае потребуется более тщательно

проводить электротехнические расчёты, чтобы определить возможность применения трансформаторов по 25000 кВА с учётом пусковых режимов работы блоков или сразу увеличить мощность ГПП до 2 по 40 000 кВА (следующий по мощности трансформатор), либо изыскивать дополнительные источники электроснабжения на предприятии для питания общестанционных систем и вспомогательного оборудования (включая систему подогрева входного воздуха), а это составит несколько мегаватт (рассмотрим ниже). Таким образом, общая стоимость ГПП 110/6 для **адсорбционной** технологии может быть на 20 – 40% выше, чем для **криогенной**.

Следующий по сложности и стоимости объект системы электроснабжения – это **РУ 6 кВ**, к которому подключаются потребители кислородной станции. Он связан с ГПП шинопроводом.

Для **криогенной** технологии к нему будут подключены 2 (или 3) мотора питающих компрессоров и 2 КТП (одна – 2x1600 кВА для вспомогательных и общестанционных систем, вторая – 2x2500 кВА - для обеспечения работы нагревателей БКО). Общее количество ячеек в РУ 6 кВ составит 21 шт, включая собственные нужды, компенсацию реактивной мощности и устройства плавного пуска для мощных потребителей (моторы питающих компрессоров).

Для **адсорбционной** технологии необходимо обеспечить коммутацию и запуск 15 (!) единиц мощных потребителей – по 3 на каждый технологический блок (1500, 2250, 800 кВт), включая устройства плавного пуска и компенсаторы реактивной мощности, и 2 КТП (одна для вспомогательных и общестанционных систем, вторая – для обеспечения работы нагревателей подогревателей входного сырьевого воздуха при недостатке тепловой мощности от теплофикационной воды или её отсутствии). Общее количество ячеек 6 кВ составит 31 шт.

В состав нагрузок для первой КТП (2x1600 кВА) при **криогенной** технологии войдут низковольтные потребители: низковольтные потребители компрессоров, холодильные машины, криогенные насосы, водяные насосы, АСУТП, кроме того, общестанционные потребители (вентиляция, освещение, пожарные насосы и т.д.). Вторая КТП полностью предназначена для питания нагревателей регенератора БКО, её установленная мощность 2x2500 кВА (с учётом резервирования), средняя потребляемая - 800 кВт (нагрузки учтены в общем энергобалансе). Подогрев входного воздуха потребует 400 кВт для защиты фильтров от обмерзания и может быть реализован от теплофикационной воды, если такие мощности есть на существующих сетях.

Для **адсорбционной** технологии нагрузки на первую КТП (2x1600 кВА) составят низковольтные потребители кислородных компрессоров, станция воздуха КИП, локальные и верхняя АСУТП, общестанционные нужды будут аналогичными случаю криогенной технологии. Вторая КТП 6/0.7 будет обеспечивать необходимый подогрев входного воздуха для ВКЦА через отдельный тепловой контур при отсутствии или недостатке тепловой мощности от сетей предприятия, её установленная мощность должна

составить 2 x 2x2500 кВА (с учётом резервирования).

По результатам этого анализа видно, что для случая с технологией **ВКЦА** общий объём электрооборудования будет на 30 – 50% больше, несмотря на одинаковые средние удельные значения электропотребления для производства одного и того же количества кислорода. В свою очередь, это отразится на стоимости и оборудования и СМР.

2. СИСТЕМА ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Основным различием для рассматриваемых технологий будет система оборотного водоснабжения, поскольку в инженерных системах здания ВРУ различий не ожидается.

Для **криогенной** технологии производитель оборудования заявил потребность в оборотном цикле от 900 до 1600 м³/час, для **адсорбционной** 425 – 750 м³/час для перепада температур по воде на 10С и 18С - соответственно. Т.е., **криогенная** технология требует в 2 раза больше охлаждающей воды, чем **адсорбционная**, что определяется, прежде всего, охлаждением питающих компрессоров.

Если предприятие обладает достаточным резервом в оборотном цикле, этот фактор не является определяющим.

3. СИСТЕМА ПОДОГРЕВА ВХОДНОГО ВОЗДУХА

Как уже было отмечено ранее, подогрев воздуха для питающих центробежных компрессоров в случае **криогенной** технологии не требуется до температуры минус 60С, что является стандартом ряда производителей компрессоров, но он может оказаться необходимым для защиты от замерзания входных воздушных фильтров при высокой влажности воздуха. Величина подогрева в этом случае невелика, поскольку необходим лишь небольшой подогрев, повышающий температуру воздуха на несколько градусов гарантированно выше точки росы, что и предотвращает замерзание воздушных фильтров. Для 200 000 Нм³/час достаточно около 400 кВт. Этот подогрев может быть реализован на электронагревателях или на водяном калорифере. Первый случай сильно проще в эксплуатации и лишён рисков внезапного замерзания самого калорифера, если он работает непосредственно на теплофикационной воде. Во втором случае есть возможность сэкономить на электроэнергии, если такая нагрузка критична, но 400 кВт – это не более 2.5% от общей среднепотребляемой мощности. Во всяком случае, заказчик решает сам, что ему выгоднее.

Для случая **адсорбционной** технологии обычно применяются воздуходувки типа Рутса, для них, по утверждению производителей, необходима положительная температура входного воздуха. В рассматриваемом случае, как уже было показано ранее, в том числе в работе [1], для среднего наихудшего случая необходимо

(по мнению разработчика рассматриваемой в сравнительном анализе **адсорбционной** технологии) около 7 МВт на подогрев. Если у предприятия есть свободные мощности на тепловых сетях, проблема решается с помощью закрытого гликолевого контура, обеспечивающего подачу тепла на входные калориферы технологических блоков ВКЦА. Если мощности тепловых сетей недостаточно (как в рассматриваемом случае), необходимо будет к этому контуру добавить электродогреватель для дополнительного подогрева теплоносителя. В нашем случае расчётная мощность электродогревателя составляет 5 МВт.

Для обеспечения электроснабжения предусматриваются две КТП 6/0.7 мощностью 2500 кВА каждая с резервными трансформаторами (всего 4 трансформатора по 2500 кВА). (Это в 2 раза больше, чем для обеспечения питания электронагревателя регенератора БКО для случая криогенной технологии). Для подключения этих КТП мощности ГПП 110/6 на базе трансформаторов по 25000 кВА уже недостаточно. Т.е., нужно либо увеличивать мощность ГПП до 2х40000 кВА, либо подключаться к другому источнику, если он есть на предприятии. Кроме того, при работе этого потребителя общая средняя потребляемая электрическая мощность увеличивается на 30%, что на те же 30% ухудшает удельные энергетические показатели **адсорбционной** технологии, это следует иметь в виду, даже при непродолжительном режиме работы электроподогрева.

Необходимо также отметить, что не все производители воздуходувок типа Рутса требуют положительных температур воздуха на входе, есть и такие, кто готов работать с температурой воздуха до минус 20С, но разработчики технологии **ВКЦА** такую информацию не подтверждают.

ОБЪЁМ И СЛОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ СМР, СРАВНЕНИЕ КАПИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ

По количеству оборудования трубопроводов и металлоконструкций объём монтажных работ для рассматриваемой **криогенной** ВРУ составляет около 1200 тонн (что подтверждается многочисленными аналогами). Для **адсорбционной** установки, по предварительным оценкам, объём монтажа составит около 1500 тонн.

По общему пятну застройки **криогенная** установка занимает примерно в 2 раза меньше места, чем **адсорбционная** (компоновки представлены на [рис. 1 и 3.](#)).

Самым сложным для СМР **криогенной** установки является монтаж криогенного блока. Если нет возможности привезти его готовыми секциями заводского изготовления, сборку придётся делать на месте. Но, криогенный блок будет стоять вне здания, а «тёплая технология» внутри существующего здания. Это означает возможность параллельного ведения монтажных работ разными бригадами, что сокращает сроки монтажа, который специалисты оценивают в 6-8 месяцев на основе опыта реализации многочисленных аналогичных проектов.

Для **адсорбционной** технологии большая часть оборудования и трубопроводов располагаются внутри здания, снаружи ставятся только кислородосборники (компоновочное решение представлено на [рис. 3](#)). Из-за большой скученности оборудования и единственного мостового крана в здании монтаж можно будет вести только последовательно от блока к блоку. Даже при максимальной заводской готовности трубопроводов на сборку одного технологического блока по оценкам самого разработчика технологии уйдёт не менее 2 месяцев, что означает 10 месяцев на 5 блоков. Ни на одном из объектов-аналогов на такой площади не устанавливалось такое количество оборудования.

ОБЪЁМ И СЛОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ СМР, СРАВНЕНИЕ КАПИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ

По количеству оборудования трубопроводов и металлоконструкций объём монтажных работ для рассматриваемой **криогенной** ВРУ составляет около 1200 тонн (что подтверждается многочисленными аналогами). Для **адсорбционной** установки по предварительным оценкам объём монтажа составит около 1500 тонн.

По общему пятну застройки **криогенная** установка занимает примерно в 2 раза меньше места, чем **адсорбционная** (компоновки представлены на [рис. 1 и 3](#)).

Самым сложным для СМР **криогенной** установки является монтаж криогенного блока. Если нет возможности привезти его готовыми секциями заводского изготовления, сборку придётся делать на месте. Но, криогенный блок будет стоять вне здания, а «тёплая технология» внутри существующего здания. Это означает возможность параллельного ведения монтажных работ разными бригадами, что сокращает сроки монтажа, который специалисты оценивают в 6-8 месяцев на основе опыта реализации многочисленных аналогичных проектов.

Для **адсорбционной** технологии большая часть оборудования и трубопроводов располагаются внутри здания, снаружи ставятся только кислородосборники (компоновочное решение представлено на [рис. 3](#)). Из-за большой скученности оборудования и единственного мостового крана в здании монтаж можно будет вести только последовательно от блока к блоку. Даже при максимальной заводской готовности трубопроводов на сборку одного технологического блока по оценкам самого разработчика технологии уйдёт не менее 2 месяцев, что означает 10 месяцев на 5 блоков. Ни на одном из объектов-аналогов на такой площади не устанавливалось такое количество оборудования.

Максимально - не более 2 технологических блоков похожего размера в аналогичном по площади помещении. Поэтому, из-за условий большой стеснённости и невозможности параллельного выполнения работ при ведении СМР срок монтажа следует увеличить на 20 – 40% - до 12 – 14 месяцев.

Кроме того, следует помнить о больших уровнях вибраций, имеющих циклический характер, совпадающий с полуциклом работы ВКЦА, создаваемых воздушными насосами типа Рутса из-за пульсаций давления при работе этого типа нагнетателя. Для СМР это означает особые требования к фундаментам и возможные работы по усилению конструкций существующего здания, в котором будут одновременно работать 25 единиц мощного виброгенерирующего оборудования (10 воздушных насосов Рутса, 10 вакуумных насосов Рутса, 5 поршневых компрессоров).

Как уже упоминалось выше, аналогов таких станций, с таким количеством мощного динамического оборудования в одном здании нет, что ведёт к определённым рискам возможных разрушений.

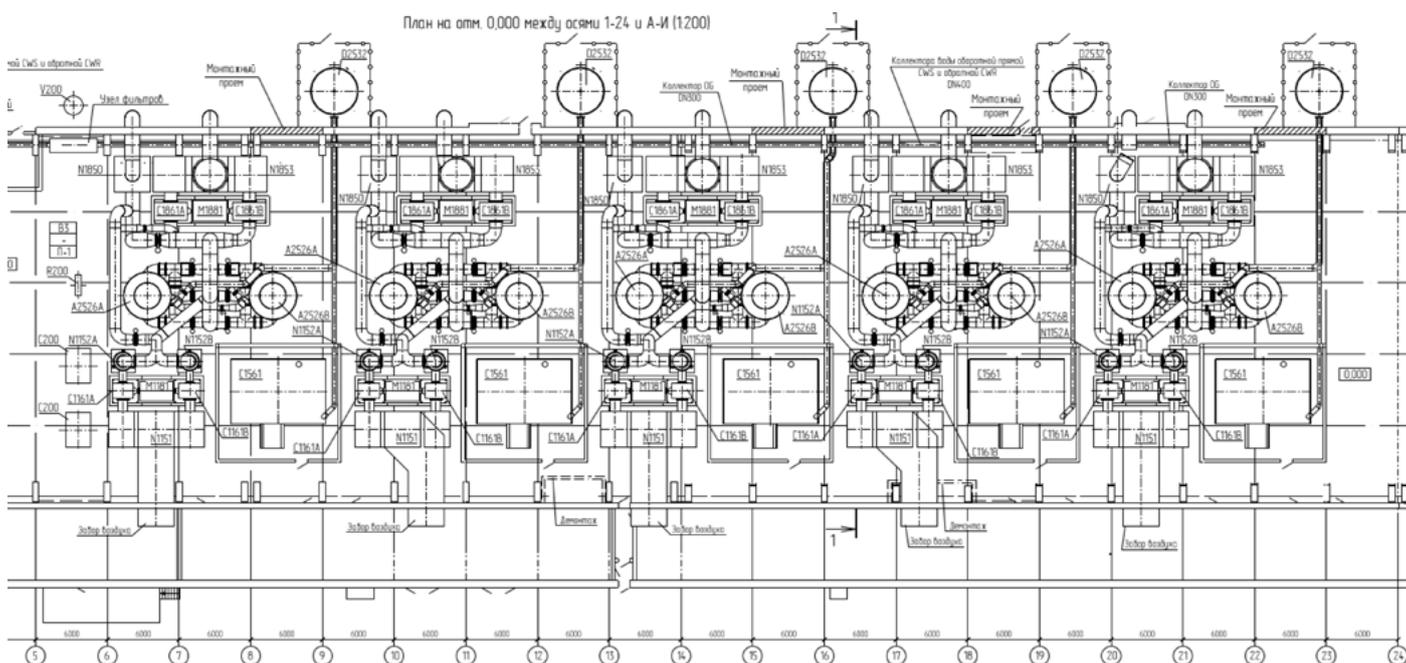


Рис. 3. Компонировочное решение для 5 блоков ВКЦА (вместе с кислородными компрессорами).

Объём фундаментов и бетонных работ можно сравнить, исходя из площади, занимаемой оборудованием для обоих случаев и массы этого оборудования. При этом, как мы уже отмечали выше, для случая **ВКЦА** превалирует оборудование с большими динамическими нагрузками, что не может не отразиться на массе фундаментов. Для оборудования **криогенной** технологии такие нагрузки минимальны, поскольку центробежные компрессоры практически не создают вибраций при работе.

Для рассматриваемого случая площади фундаментов основного оборудования для **криогенной** технологии составят около 600 м² (без третьего резервного компрессора), для **адсорбционной** - около 1200 м². Объём бетона будет определяться заглублением и конструкцией фундаментов. Аналоги для **криогенной** установки показывают общий объём бетонных и железобетонных конструкций до 4000 м³.

Если принять заглубление фундаментов 6м, то при монолитной конструкции объём составит 3600 м³, но использование монолитных блоков нецелесообразно и фундаменты обычно делают сборными. В этом случае объём бетона можно принять 2500 м³. Соответственно, для адсорбционной технологии это количество будет, как минимум, в 2 раза больше, а, учитывая высокие динамические нагрузки от оборудования, может составить и 6000 м³. В результате, с учётом большего количества самого оборудования это означает увеличение стоимости строительных и монтажных работ на 10 – 20%.

Стоимость комплекта основного оборудования **адсорбционной** ВРУ будет примерно на 20 – 25% выше, чем для **криогенной** (при рассмотрении производителей из одного региона).

Для электротехнического оборудования, как мы выяснили ранее, эта разница в стоимости может составить до 30%.

В итоге, можно говорить о об увеличении капитальных затрат на 15 – 20% при выборе **адсорбционной** технологии, по сравнению с **криогенной**, что эквивалентно 15 – 20 млн \$.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОПЕРАЦИОННЫЕ РАСХОДЫ

Энергопотребление мы рассмотрели, проведённый анализ показывает, что по средним значениям обе технологии примерно равны, но есть и другие не менее важные эксплуатационные расходы, связанные с ремонтными и регламентными работами, которые тоже необходимо оценить.

Эксплуатация **криогенных** установок аналогичной мощности имеет весьма значительную статистику по всему миру, что позволяет достаточно точно прогнозировать все операционные расходы и регламентные работы. На запчасти, расходные материалы и сервисные работы по такой установке с учётом всех регламентов и ремонтов оборудования, в среднем, по опыту эксплуатирующих организаций, уходит до 450 – 550 тыс. \$ в год.

Для случая **адсорбционной** технологии ситуация сложнее, поскольку предлагаемое технологическое оборудование, хоть и состоит из стандартных изделий, но не имеет необходимой статистики в условиях эксплуатации рассматриваемого объекта, более того, сами установки с единичной производительностью 8000 Нм³/час по кислороду являются пилотным проектом. Поэтому оценку эксплуатационных расходов можно делать по компонентам:

- Европейский производитель кислородных компрессоров оценил стоимость запчастей и регламентных работ на 20 лет эксплуатации в 7 000 тыс. €, т.е., в 350 тыс. € или 400 тыс. \$ в год.
- Стоимость адсорбента для 5 блоков составляет 10 млн. евро – без учёта стоимости доставки и самих работ по его замене. Производитель утверждает, что по статистике, его адсорбент эксплуатируется до 15 лет и более, но после 15 лет эксплуатации (а, возможно, и раньше) эффективность производства кислорода снижается с 93% до 85%. Это означает около 9% потерь (эквивалентное снижение производительности до 36500 Нм³/час) или ухудшение энергетических показателей на те же 9%, если, конечно, 85% кислорода допустимы для его использования в технологическом процессе. Поэтому расчётным сроком эксплуатации адсорбента было выбрано 10 лет с заменой для работы в течение следующих 10 лет. Здесь необходимо отметить, что одним из главных факторов ухудшения качества адсорбента является присутствие в воздухе диоксида серы в количестве более 3 ppm (!). Этот компонент забивает поры адсорбента и не извлекается при цикле десорбции. Производители ВКЦА используют для защиты специальные дополнительные фильтры (сменные) или рекомендуют отключать технологические блоки при превышении допустимой концентрации SO₂. Дополнительные фильтры весьма дороги (свыше 5 млн. евро), а отключение производства кислорода может оказаться невозможным для потребляющей его технологии по причине высоких убытков. В итоге, имеем расчётный срок службы 10 лет, и стоимость около 15 млн. \$ с учётом логистики (общий объём загрузки составляет 500 тонн) и работ по замене (проводят специалисты поставщика оборудования). Это эквивалентно 750 тыс. \$ в год.
- Остаются регламентные работы на воздуходувках и вакуумных насосах, а также ремонт высокоскоростных дисковых затворов. Анализ комплекта запчастей, представленного поставщиком **адсорбционной** технологии на 2 года эксплуатации, стоимостью 1 млн. € показывает, что значительную часть списка составляют запчасти к высокоскоростным затворам. При полуцикле 20 с имеем около 1500 000 срабатываний в год. По достижении этой наработки производитель рекомендует заменить подшипники, уплотнения и седло клапана. Т.е., регламенты на высокоскоростных затворах надо будет проводить раз в год на всех 5 блоках – 50 затворов. О стоимости этих ремонтов можно говорить только предварительно, исходя из понимания затрат, указанных поставщиком технологии 10 – 20 млн. € на 20 лет, с учётом кислородных компрессоров. Очевидной представляется сумма 250 тыс. \$ в год на 50 затворов с учётом приводов и установленного на них КИП, а также стоимости самих работ.

Регламентные работы на воздуходувках и вакуумных насосах проводятся раз в 40 тыс. часов, но обслуживать их маслосистемы надо не реже 1 раза в год с заменой маслофильтров. 40 000 часов – это, в среднем – раз в 5 лет. Если принять стоимость регламента 2-3 тыс. € на один агрегат, получаем примерно 15-20 тыс. \$ в год. К этому необходимо добавить стоимость заменяемых воздушных фильтроэлементов, что составит примерно 25 тыс. \$ в год на станцию.

В итоге, на это оборудование понадобится ещё 280 – 300 тыс. \$ в год.

Таким образом, предполагаемая стоимость эксплуатационных расходов на адсорбционную технологию составит 680 – 700 тыс. \$ год без замены адсорбента и 1430 – 1450 тыс. \$ в год, с учётом замены адсорбента.

По итогам, за 20 лет эксплуатации превышение в операционных затратах (без учёта энергетики) для **адсорбционной** технологии по сравнению с криогенной составит от 10 до 20 млн. \$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ, проведённый на основе уточнённой информации от разработчиков технологии, показал полную адекватность выводов и рекомендаций, сделанных в [1] для решаемой задачи, и позволил дополнить их следующими положениями, в частности:

1. ПО ОБЩИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ:

- 1.1. Среднее удельное энергопотребление для **криогенной** и **адсорбционной** технологии практически **одинаково** в диапазоне от 70 до 100% от номинальной производительности. И это **без учёта** энергозатрат на подогрев воздуха для ВКЦА, что ухудшает её энергетические показатели. Кроме того, оно будет одинаковым и в диапазоне от 50% до 70%, если для криогенной технологии применить питающие компрессоры по схеме 30%+70% вместо схемы 50%+50%. Это потребует более комплексного регулирования их производительности, но не представляет никакой технической сложности для современных систем управления.
- 1.2. Преимуществом **ВКЦА** может являться быстрый старт и останов, а также быстрая смена режима работы по сравнению с **криогенной** ВРУ, и более широкий диапазон регулирования станции но это преимущество будет существенно только на объектах с частой сменой технологических режимов или при отсутствии постоянного потребления кислорода с длительными перерывами.
- 1.3. **Адсорбционная** технология имеет **большую** пиковую потребляемую мощность (достигаемую в каждом рабочем цикле ВКЦА дважды): суммарно для 5 блоков - 20250 кВт, против 18200 кВт для **криогенной** (это почти на 11% выше), что при одинаковой средней потребляемой мощности требует больших мощностей трансформаторов и больших мощностей системы электропитания и сетевого хозяйства. И это без учёта подогрева входного воздуха для **ВКЦА**. Можно попробовать разнести циклы 5 блоков по времени, но как это будет синхронизироваться при регулировании производительности, пока открытый вопрос. Использование подогрева входного воздуха для ВКЦА будет эквивалентно увеличению потребляемой мощности примерно на 1800 кВт (ещё на 10% выше) для среднегодового показателя (как было определено в [1]).

2. ПО СРАВНЕНИЮ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ, ОБЪЁМОВ СМР, ГРАФИКОВ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА:

- 2.1. Объём монтажных работ по основному технологическому оборудованию и трубопроводам для **адсорбционной** технологии будет на 20-25% больше, чем для **криогенной**.

- 2.2. Применение **адсорбционной** технологии повлечёт за собой необходимость существенного увеличения мощности системы электроснабжения, обеспечивающей постоянные циклические пиковые нагрузки и дополнительный электроподогрев входного воздуха, а также количества электрооборудования по сравнению с **криогенной** технологией. Предварительно можно говорить об увеличении стоимости электрической части проекта на 20 – 40%.
- 2.3. Исходя из условий размещения оборудования в существующем здании, монтаж оборудования адсорбционной технологии возможен только последовательно – блок за блоком, что увеличивает сроки реализации проекта на 6-7 месяцев.
- 2.4. В итоге, общие затраты на реализацию проекта с применением **адсорбционной** технологии ожидаются выше на 10 – 20%, чем для **криогенной**.

3. ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ЗАТРАТАМ

- 3.1. Существенным преимуществом **криогенной** технологии является отсутствие кислородных компрессоров, требующих частого регламента, и, вообще, меньшее количество механического оборудования, что сказывается на надёжности работы объекта, в целом, и на эксплуатационных затратах.
- 3.2. По проведённым оценкам, эксплуатационные затраты на **адсорбционную** технологию будут выше на 10 – 20 млн. \$ за срок службы 20 лет.

ВЫВОДЫ

1. По результатам проведенного сравнительного анализа можно сделать обоснованный вывод, что оптимальным решением рассматриваемой задачи является применение **криогенной** технологии. В случае значительного времени работы станции на режимах ниже 70% загрузки рекомендуется рассмотреть вариант питающих компрессоров по схеме 30%+70%. - для улучшения энергетических показателей (обеспечение работы без сброса воздуха до 50% номинальной производительности).
2. Реальными существенными преимуществами **адсорбционной** технологии для получения кислорода 93% с давлением 0.5 МПа являются возможность быстрого останова и выхода на режим по сравнению с **криогенной**, а также работа в диапазоне 6 - 50% без сброса кислорода, что недостижимо для **криогенной** установки. Но эти преимущества могут проявляться только в тех случаях, когда на предприятии отсутствует постоянное потребление кислорода, периоды простоя оборудования длительны и не прогнозируемы, система электроснабжения нестабильна, а требуемые пиковые расходы весьма значительны, что не позволяет использовать парк хранения жидкого продукта.
3. Очевидно, что служба заказчика должна определить, какова может быть реальная экономия затрат на электроэнергию за 20 лет эксплуатации кислородной станции, определяемая скоростью регулирования производительности и запуска **криогенной** и **адсорбционной** ВРУ, а также работой на режимах загрузки ниже 50%, и насколько такая экономия будет сопоставима с превышением приведенной стоимости капитальных и эксплуатационных затрат для **адсорбционной** технологии, составляющей от 25 млн. \$ (без замены адсорбента) до 40 млн. \$ (с заменой адсорбента) за 20 лет.

При стоимости электроэнергии 1 руб/кВт*час это означает необходимость обосновать экономию электроэнергии от 50% до 90% только(!) за счёт скорости регулирования производительности и работой на пониженных производительностях при применении адсорбционной технологии, что не представляется реальным. Кроме того, при ожидаемой средней нагрузке на станцию 0.7 и требовании круглосуточной и круглогодичной работы, производительность ниже 0.5 (50%) и длительные остановки маловероятны, исходя из постановки задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Воронцовский. Сравнительная оценка эффективности применения криогенной и адсорбционной технологий для производства кислорода с чистотой 93%. Главный механик. 07-2020 - С.54-68. Интернет версия от 16.01.2020 по ссылке (на сайте www.g-o-p.club): <https://g-o-p.club/upload/iblock/88c/88c17bf1c0636331c0c3937c9e1446a8.pdf>