

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Энергосбережение и энергоэффективность

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Повышение энергетической энергоэффективности химического предприятия

Обучающийся

Ж.С. Бинеев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.п.н., доцент, М. Н. Третьякова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

Содержание

Введение.....	3
1 Анализ состояния существующего химического предприятия	7
1.1 Анализ нормативно-правовой базы	7
1.2 Характеристика объекта исследования.....	9
1.3 Анализ потребления химического предприятия.....	16
2 Повышение энергетической эффективности на промышленных предприятиях	31
2.1 Повышение энергоэффективности холодильного оборудования.....	31
2.2 Повышение энергоэффективности работы электродвигателей	36
2.3 Энергоэффективность в нефтяной промышленности.....	39
3 Технико-экономический расчет внедряемых мероприятий	48
3.1 Расчет энергоэффективности холодильной машины	48
3.2 Расчет энергетической эффективности внедрения электродвигателей	57
Заключение	68
Список используемых источников.....	70

Введение

Повышение энергетической эффективности объектов промышленности является одним из наиболее приоритетных направлений РФ.

В соответствии с этим утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года.

Согласно данной стратегии, энергоёмкость экономики РФ снижается. Но несмотря на это, в РФ имеется значительный потенциал энергосбережения.

«Энергоёмкость экономики Российской Федерации с 2008 года по 2018 год снизилась на 9,3 процента (с 10,8 до 9,8 т у.т./млн. рублей валового внутреннего продукта в ценах 2016 года). Основными факторами, которые обеспечили снижение энергоёмкости, стали технологический фактор (рост энергоэффективности энергопотребляющего оборудования) и уровень загрузки производственных мощностей.

В Российской Федерации имеется потенциал энергосбережения, достигающий третьей части текущего энергопотребления, и существуют возможности значительного повышения экономической эффективности проектов в сфере энергетики. Уровни энергоёмкости производства важнейших отечественных промышленных продуктов выше (хуже) среднемировых в 1,2–2 раза, а по отношению к лучшим мировым практикам – в 1,5 - 4 раза.

По сравнению с 2008 годом достигнуто снижение энергоёмкости в отраслях топливно-энергетического комплекса – коэффициент полезного использования попутного нефтяного газа увеличился на 9,2 процентных пункта и достиг 85,1 процента, удельный расход топлива на отпуск электрической энергии на тепловых электростанциях снизился на 7,8 процента и составил 309,8 г у.т./кВт·ч, потери электрической энергии в электрических сетях снизились с 13 процентов до 10,6 процента» [10].

Касаемо промышленных предприятий, энергосбережение помогает повысить эффективность деятельности предприятия благодаря следующим факторам:

- снижение энергозатрат, что приводит к снижению себестоимости производства и как следствие приводит к повышению конкурентоспособности;
- модернизация оборудования, поскольку более современное оборудование способно себя окупить более низким энергопотреблением;
- улучшение экологической обстановки в районах расположения химических предприятий.

Для промышленных предприятий химического назначения это является особенно актуальным поскольку, в случае повышения энергетической эффективности, стоимость конечной продукции снижается.

Исследуемое химическое предприятие направлено на производство полипропилена в гранулах в количестве 500000 тон в год [16].

Полипропилен нашел свое применение в таких областях как: пищевая промышленность (в качестве упаковки или тары), машиностроение, электроника, медицина. Также данный материал применяется в качестве волокна и антикоррозийного материала.

«Полипропилен является вторым по значимости пластиком в мире» [12].

Высокий спрос усугубляется дефицитом мощностей для производства мономеров [10].

Актуальность исследования обусловлена тем, что производство полипропилена является достаточно важным продуктом химической промышленности, на производство которого расходуется значительная доля энергетических ресурсов.

В соответствии с этим сформулирована следующая тема магистерской диссертации: «Повышение энергоэффективности химического предприятия».

Объектом исследования является химическое предприятие. На основании исследования объекта магистерской диссертации будут сформулированы мероприятия, которые позволят повысить энергетическую эффективность рассматриваемого объекта химической промышленности.

Целью магистерской диссертации является повышение энергетической эффективности объекта химической промышленности.

Препятствовать достижению поставленной цели будет следующий ряд проблем:

- недостаток информации и ограниченность знаний относительно современных энергоэффективных решений;
- нехватка контрольно-измерительных решений для повышения энергетической эффективности;
- нежелание брать ответственность за внедрение проектов по повышению энергетической эффективности, а также отсутствие опыта в принятии решений при их реализации;
- отсутствие финансирования, длительный период окупаемости проектов по повышению энергетической эффективности.

Помимо вышеперечисленных проблем, необходимо, чтобы инженерно-технический персонал имел соответствующую мотивацию по внедрению данных проектов, а также умел быстро адаптироваться к изменениям в законодательстве и нормативно-технической документации.

Поэтому для достижения энергетической эффективности любого объекта необходимо проведение организационных, технологических, а также экономических мероприятий.

В соответствии с этим сформулируем следующие задачи для достижения поставленной цели:

- анализ состояния проектируемого химического предприятия;
- анализ существующих решений по повышению энергетической эффективности;
- технико-экономическое обоснование предлагаемых решений.

Наиболее эффективным способом анализа энергоэффективности объекта являются энергетические обследования. Они позволяют определить мероприятия необходимые для повышения энергоэффективности.

Научная новизна диссертации заключается том, что существующие технологии и мероприятия, используемые на объектах промышленности химического назначения применены для повышения энергетической эффективности объекта исследования.

В качестве теоретической и методологической основы исследования будут использованы фундаментальные и прикладные исследования ученых, нормативно-техническая документация. В процессе исследования будет использован метод системного подхода (теоретический) и экспериментальный метод (практический).

1 Анализ состояния существующего химического предприятия

1.1 Анализ нормативно-правовой базы

Внедрение различного рода законодательной и нормативно-правовой базы, структура которой приведена на рисунке 1, необходимо для повышения энергоэффективности любой отрасли промышленности, в том числе химической.

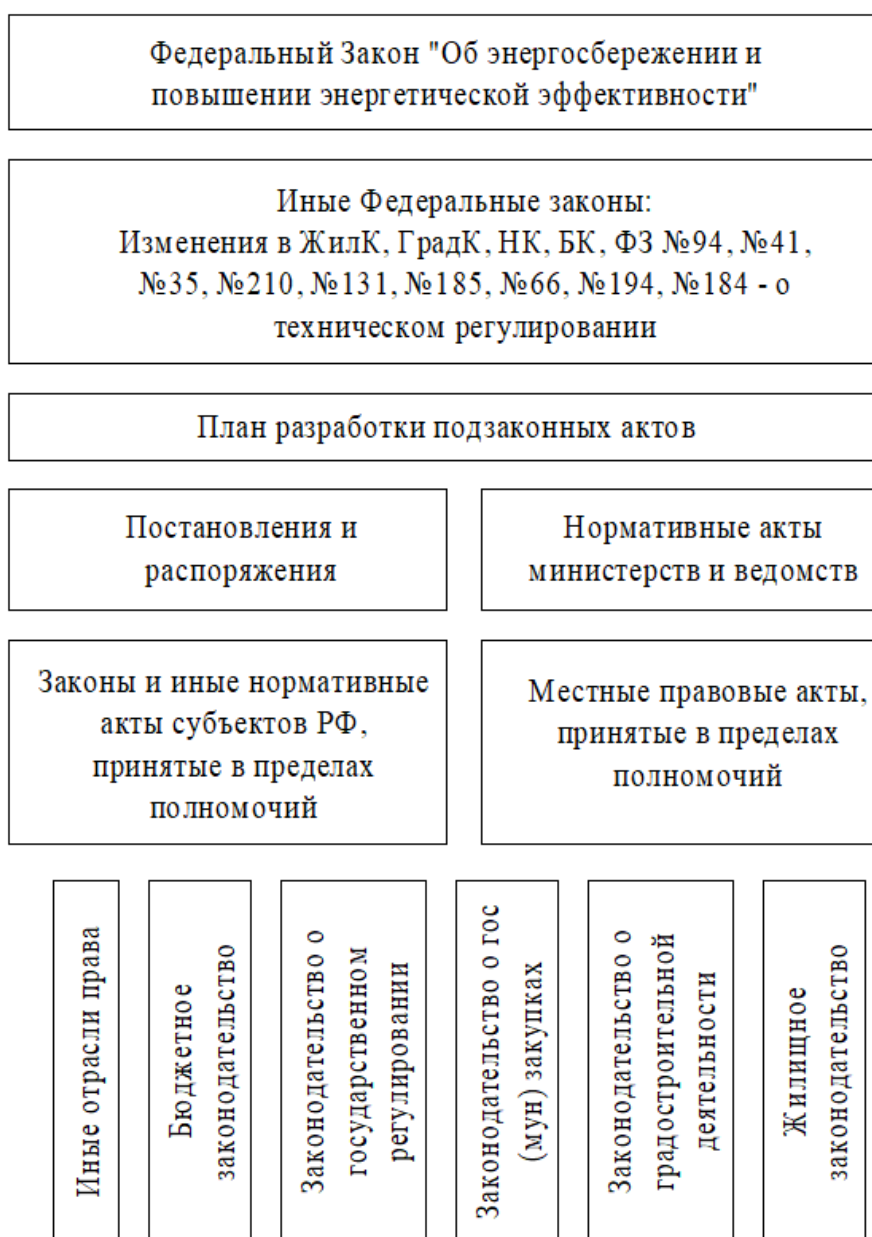


Рисунок 1 – Схема нормативно-правовой базы

«Федеральные законы в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности действуют в нашей стране уже более 20 лет» [23].

«Требования энергетической эффективности зданий, строений, сооружений должны включать в себя:

- показатели, характеризующие удельную величину расхода энергетических ресурсов в здании, строении, сооружении;
- требования к влияющим на энергетическую эффективность зданий, строений, сооружений архитектурным, функционально-технологическим, конструктивным и инженерно-техническим решениям;
- требования к отдельным элементам, конструкциям зданий, строений, сооружений и к их свойствам, к используемым в зданиях, строениях, сооружениях устройствам и технологиям, а также требования к включаемым в проектную документацию и применяемым при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте зданий, строений, сооружений технологиям и материалам, позволяющие исключить нерациональный расход энергетических ресурсов как в процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта зданий, строений, сооружений, так и в процессе их эксплуатации» [24].

Согласно нормативно-правовым документам прослеживается рост производства продукции химической отрасли:

«Производство нефтегазохимического сырья (этан, сжиженный углеводородный газ, нефтя) по сравнению с 2008 годом увеличилось на 64 процента, а его использование для производства нефтегазохимической продукции и крупнотоннажных полимеров возросло почти на 43 процента. С 2012 года в нефтегазохимии началась активная стадия реализации целого ряда крупных инвестиционных проектов. Введены в эксплуатацию мощности по производству полистирола, АБС-пластиков, полиэтилентерефталата, пропилена, полипропилена и поливинилхлорида.

Показателем решения задачи эффективного удовлетворения внутреннего спроса на российскую нефтегазохимическую продукцию и повышения ее конкурентоспособности на мировых рынках является доля импорта в общем объеме потребления крупнотоннажных полимеров на внутреннем рынке:

- 2018 год – 23 процента;
- к 2024 году – 20 процентов;
- к 2035 году – 15 процентов» [10].

Безусловно, промышленные предприятия являются очень крупной сферой потребления энергоресурсов, если не самой крупной. Но вопросу энергосбережения промышленных предприятий не уделяется должного внимания, также по причине того, что данный вопрос остается на решении у профильных органов управления. Необходимость проведения энергоаудита определяют для себя отдельно взятые промышленные предприятия, при этом результаты внедрения мероприятий по повышению энергосбережения и энергоэффективности остаются конфиденциальными.

Что касается химической промышленности, то проведем анализ состава предприятия, его основных параметров и характеристик.

1.2 Характеристика объекта исследования

Исследуемый объект химической промышленности представляет собой газохимический комплекс, который сконцентрирован на производстве полимеров.

Химическое предприятие включает в себя следующие производственные площадки:

- установка дегидрирования пропана (PDH). Данная установка использует технологию Catofin;
- установка полимеризации (PP). Данная установка использует технологию Novolen (рисунок 2);

– объекты общезаводского хозяйства.

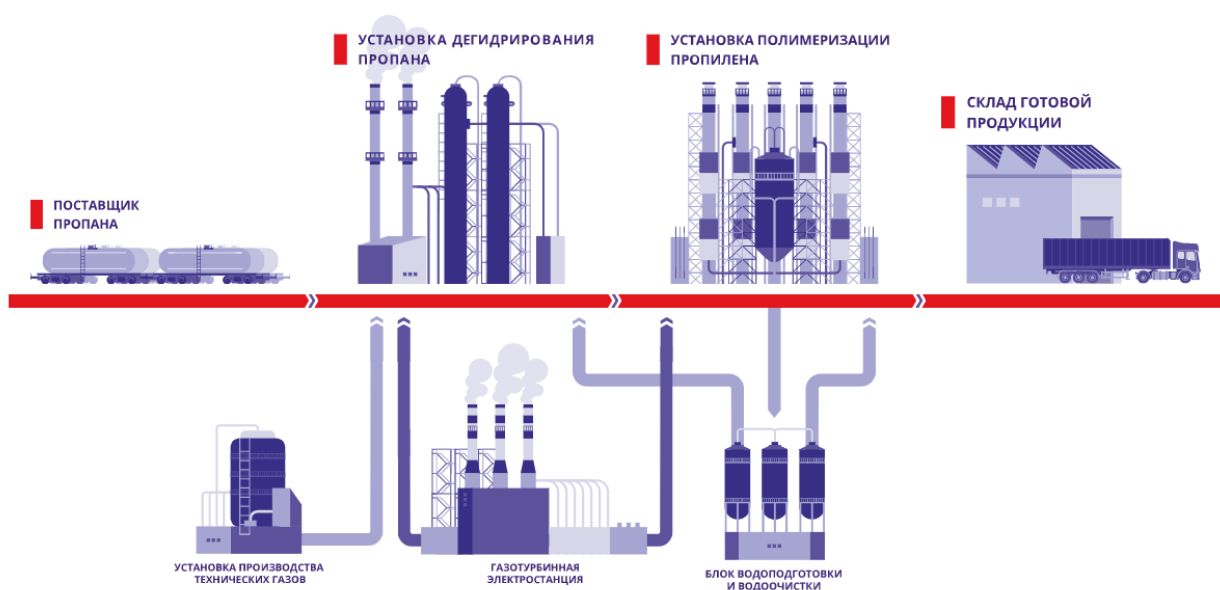


Рисунок 2 – Схема производства

Процесс Catofin превращает пропан в пропилен через алюхромовый катализатор. Непревращенный пропан рециркулируется, так что пропилен является единственным чистым продуктом. Рабочие условия выбираются таким образом, чтобы оптимизировать взаимосвязи между селективностью, конверсией и потреблением энергии в области температуры и давления, равной 600°C и 0,5 бар абс., соответственно. Побочные реакции происходят одновременно с основной реакцией, вызывающей образование некоторых легких и тяжелых углеводородов, а также осаждение кокса на катализаторе. Процесс происходит в реакторах с неподвижным слоем, которые работают циклически. Многореакторная система обеспечивает непрерывность основных технологических потоков. В одном полном цикле пары углеводородов дегидрируются; реактор затем продувают паром и воздухом, чтобы подогреть катализатор и сжечь небольшое количество кокса, который осаждается на катализаторе в течение реакционного цикла. За этими шагами

следует очищение и восстановление, а затем начинается другой цикл (рисунок 3).

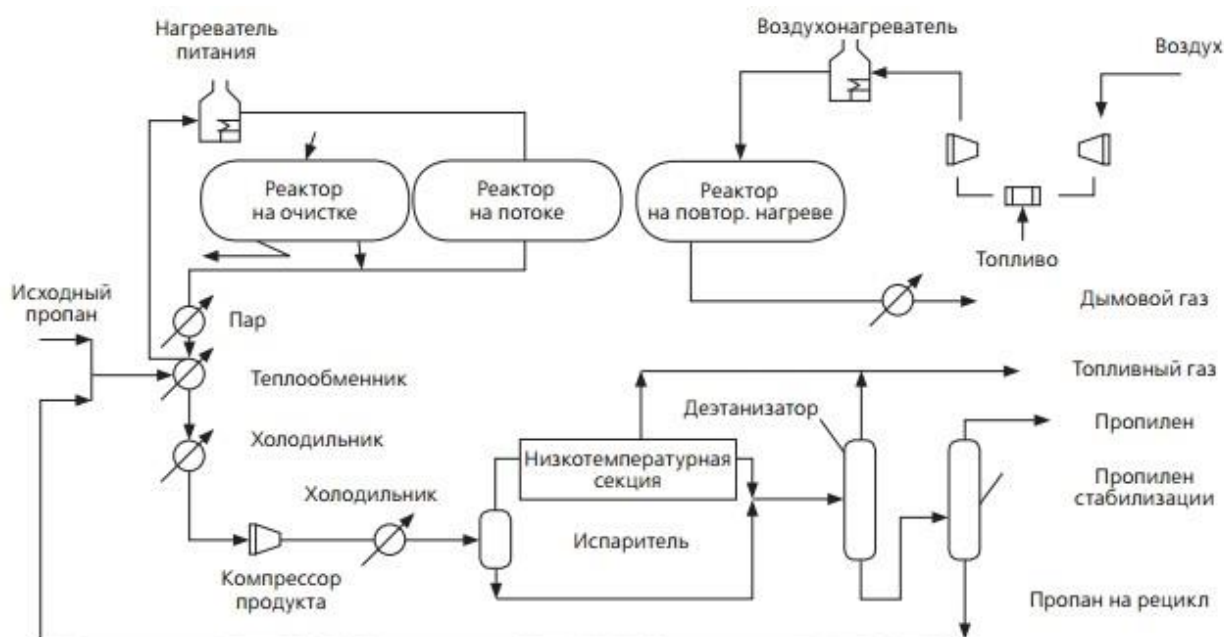


Рисунок 3 – Схема установки дегидрирования пропана

Катализатор производится компанией Clariant, ведущей компанией в области разработки технологических катализаторов. Благодаря своим превосходным термодинамическим условиям работы в вакууме и более низкой температуре для реакторов, Catofin обеспечивает самую высокую конверсию и селективность превращения парафинов в олефины. Даже при совместном производстве пропилена и изобутилена можно поддерживать высокую конверсию. В процессе Catofin используется несколько реакторов, работающих циклически с автоматизированной программой, так что поток технологических потоков является непрерывным [26], [27].

В мире работает девять заводов Catofin по дегидрированию пропана, производящих более 5,0 млн тонн пропилена в год. По всему миру работает шесть заводов Catofin по дегидрированию изобутана, производящих около 3,0 млн тонн изобутилена в год. Две установки одновременно производят пропилен и изобутилен в одной реакторной системе.

Ключевая особенность процесса заключается в том, что тепло, поглощаемое в течение периода эндотермического дегидрирования, достигается путем регулировки температуры воздуха и углеводородов на входе и окисления кокса. Контрольно-измерительные приборы цикла включают в себя срабатывание клапанов с гидравлическим приводом для управления работой. Система соответствующим образом блокируется для обеспечения безопасной работы клапанов в последовательности и предотвращения смешивания воздуха и углеводородов [28], [29].

Преимущества технологии Catofin следующие:

- надежная и надежная работа – высокий коэффициент эксплуатации;
- самая высокая конверсия за проход (более 45% для пропана и более 53% для изобутана) и селективность (более 88% по весу для пропана и более 89% по весу для изобутана) – более низкие капиталовложения и эксплуатационные расходы;
- самый низкий расход сырья;
- гибкость сырья/чистота корма – предварительная обработка корма не требуется;
- более высокий выход водорода;
- более быстрое время запуска и производства продуктов (первоначальный и повторный запуск);
- более простые и короткие обороты;
- конструкции с максимальной производительностью одной линии (более 1000 тыс. тонн в год для пропана и изобутана) – экономия за счет масштаба;
- катализатор из благородных металлов;
- простая металлургия для реакторов;
- нет собственного оборудования;
- без подпитки катализатором;
- отсутствие обработки хлора/каустической очистки;

– нет рециркуляции водорода или разбавляющего пара.

В процессе производства полипропилена по технологии Novolen (рисунок 2), может производиться много различных сортов полимеров. Доступные типы продукции (гомополимеры, статические со- и тер-полимеры, ударопрочные сополимеры), производство которых определяется схемой работы реакторов. Сорта выпускаемых полимеров регулируются скоростью подачи и типом катализаторов, со-катализаторов, стереомодификатора и водорода, а также добавок. Водород используется в качестве агента обрыва цепи для управления индексом расплава и молекулярно-массовым распределением некоторых смол продукта. На характеристики полимерного продукта также влияет присутствие сомономеров. Сорта полимеров могут классифицироваться следующим образом [30]:

- гомополимеры, включая только пропилен;
- рандом, сополимеры и ударопрочные сополимеры, содержащие этилен как сополимер;
- рандом, содержащие этилен и бутен-1 в качестве сополимеров.

Процесс основан на реакции газовой фазы с катализаторами в процессе перемешивания. Каждая линия полипропилена разделена на две основные технологические зоны: полимеризации и экструзии. Площадки для хранения полипропиленовых гранул и химреактивов расположены рядом с основными технологическими зонами. Кроме того, в объем установки входят участки обычной отгонки мономера и регенерации азота. Вспомогательные установки и объекты хранения расположены вне границ установки.

Газофазный процесс по технологии Novolen использует один или два идентичных вертикальных газофазных реактора с перемешиванием. Гомополимеры и статистические сополимеры могут производиться как в одном реакторе, так и в каскаде из двух реакторов, в зависимости от требуемой производительности и номенклатуры продукции. В качестве альтернативы два реактора могут работать параллельно для достижения более высоких мощностей установки с одной линией и для производства бимодальных смол.

Каскадная конфигурация реактора необходима для производства ударопрочных сополимеров, тогда как в первом реакторе полимеризуется матрица пропиленового гомополимера (или статистического сополимера), а во втором реакторе производится этилен-пропиленовый каучук (ЭПК). Независимо от выбранной конфигурации все реакторы идентичны по конструкции, размеру и материалу [3]. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 4.

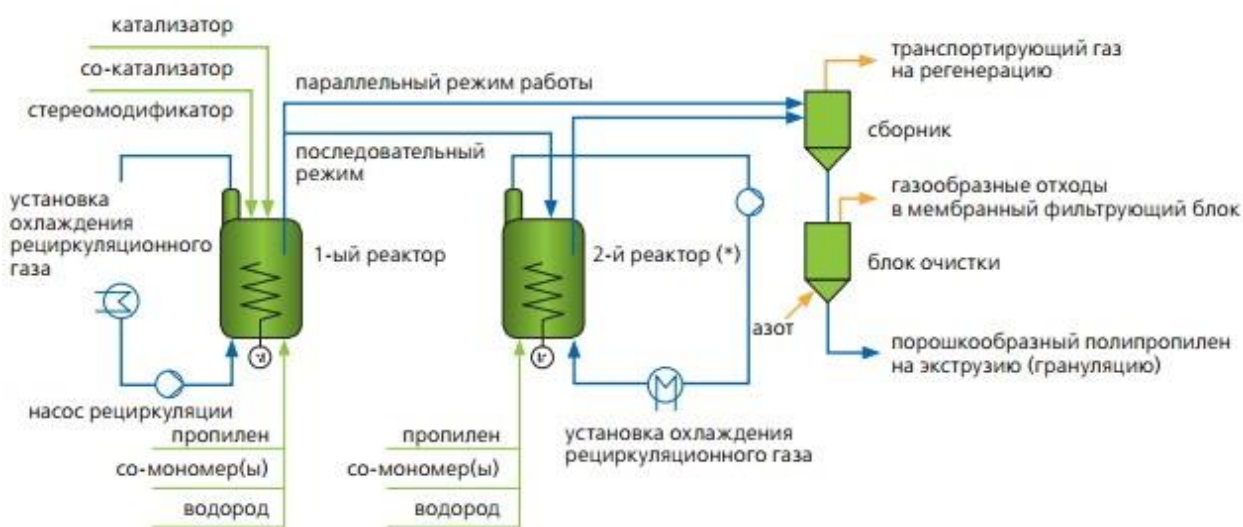


Рисунок 4 – Схема установки производства полипропилена

Преимущества технологии Novolen следующие:

- производит полный спектр гомополимеров, статистических и ударопрочных сополимеров всего в двух идентичных реакторах с катализаторами Циглера-Натта и металлоценовыми катализаторами, что охватывает широкий спектр продуктов для всех рынков/применений, включая ударопрочный каучук со сверхвысоким содержанием (до 50%). сополимеры и терполимеры, а также рандом-сополимеры с очень высокой степенью жесткости и высокой прозрачностью;

- нет специального реактора для производства ударопрочного сополимера. Два одинаковых реактора, соединенные в ряд, позволяют производить ударопрочный сополимер, а также гомополимер.
- эксклюзивная вакуумная дегазация на экструдере. Продукты с самым низким уровнем содержания летучих веществ на рынке с очень низким уровнем вкуса и запаха для особо требовательных применений (например, трубы для питьевой воды и упаковка для пищевых продуктов). Может сочетаться с нашей эксклюзивной технологией десорбера;
- простой газофазный процесс без растворителей. Одни из самых низких эксплуатационных расходов и затрат на техническое обслуживание в отрасли;
- капельный металлоценовый катализатор. Технологические установки Novolen готовы к использованию катализатора Novocene без каких-либо существенных модификаций установки. Новые марки полипропилена (ПП) с выдающимся сочетанием свойств;
- небольшой объем реактора приравняется к небольшому запасу газа. Быстрые изменения класса. Минимизация запасов приводит к более безопасному процессу и снижению капитальных вложений и эксплуатационных затрат.
- отсутствие проприетарного оборудования и оборудования одного поставщика.

Производство полипропилена по технологии Novolen предусмотрено с помощью двух производственных линий. Первая линия имеет один реактор с единичной операцией для полимеризации гомополимеров и статических сополимеров. Вторая линия состоит из двух реакторов в параллельном или каскадном режиме для производства гомополимеров, статических сополимеров и ударных сополимеров.

В реактор (реакторы) подают пропилен, этилен и любые другие необходимые сомомеры. Водород добавляют для контроля молекулярной

массы. Условия полимеризации (температура, давление и концентрация реагентов) определяются маркой получаемого полимера. Сама реакция экзотермическая. Охлаждение реактора достигается за счет испарения сжиженного реакторного газа, который впрыскивается в реактор. Мгновенное испарение жидкости в слое полимера обеспечивает наиболее эффективный отвод тепла.

Порошок полимера выгружают из реакторов и отделяют от газа в разгрузочном циклоне при атмосферном давлении. Любой непрореагировавший мономер, отделенный от порошка, сжимается и либо перерабатывается, либо возвращается в предыдущую установку олефинов для извлечения. Окончательная дегазация полимера производится в продувочном бункере путем продувки азотом. Отходящие газы продувки направляются в систему регенерации. Наконец, порошок превращается в гранулы, которые включают полный набор хорошо диспергированных добавок.

Для особо требовательных применений, требующих чрезвычайно низких уровней летучих веществ и запаха, газофазный процесс предлагает дополнительный блок десорбера для обработки гранул после экструзии.

1.3 Анализ потребления химического предприятия

Установка дегидрирования пропана включает в себя такие электроприемники как:

- холодильные машины,
- компрессорные агрегаты,
- испарители,
- конденсаторы,
- воздухонагреватели,
- калориферы,
- парогенераторы,
- насосные установки.

При производстве полипропилена по технологии Novolen используются следующие электроприемники:

- рециркуляционные насосы,
- установки охлаждения рециркуляционного газа.

Данное оборудование входит в состав реакторов, которые способны работать в параллельном режиме (рисунок 2).

Также на химическом предприятии имеется установка по производству технических газов:

- азот – 5000 $\text{нм}^3/\text{час}$;
- сухой сжатый воздух – 4000 $\text{нм}^3/\text{час}$.

Для производства технических газов используются воздухоразделительные установки [22]:

- криогенные,
- короткоцикловой адсорбции,
- мембранные.

Блок водоочистки и водоподготовки химического предприятия, согласно паспортным данным, имеет следующие параметры производительности:

- обессоленная вода: 360 $\text{м}^3/\text{час}$;
- производственная вода: 3 $\text{м}^3/\text{час}$;
- деминерализованная вода: 56,37 $\text{м}^3/\text{час}$;
- очистка хозяйственно-бытовых сточных вод: 35 $\text{м}^3/\text{час}$;
- очистка нефтесодержащих и ливневых сточных вод: 22 $\text{м}^3/\text{час}$;
- очистка химически загрязненных сточных вод: 73 $\text{м}^3/\text{час}$.

Склад готовой продукции химического предприятия включает в себя помимо нагрузки освещения также нагрузку климатического и вентиляционного оборудования, поскольку определенные продукты и материалы должны храниться в благоприятных условиях. Также для погрузки и разгрузки больших объемов продукции применяются грузоподъемные механизмы и краны, которые также используются в помещениях первичной

продукции (пропана). Поставка пропана составляет 629 000 тонн/год (10 500 вагонов в год), а транспортировка со склада готовой продукции имеет производительность по упаковке 1500-1800 тонн/сутки.

Классификация электроприемников, тепловых и энергетических установок по доле потребления представлена на рисунке 5. В целом предприятие требует 35 МВт мощности.

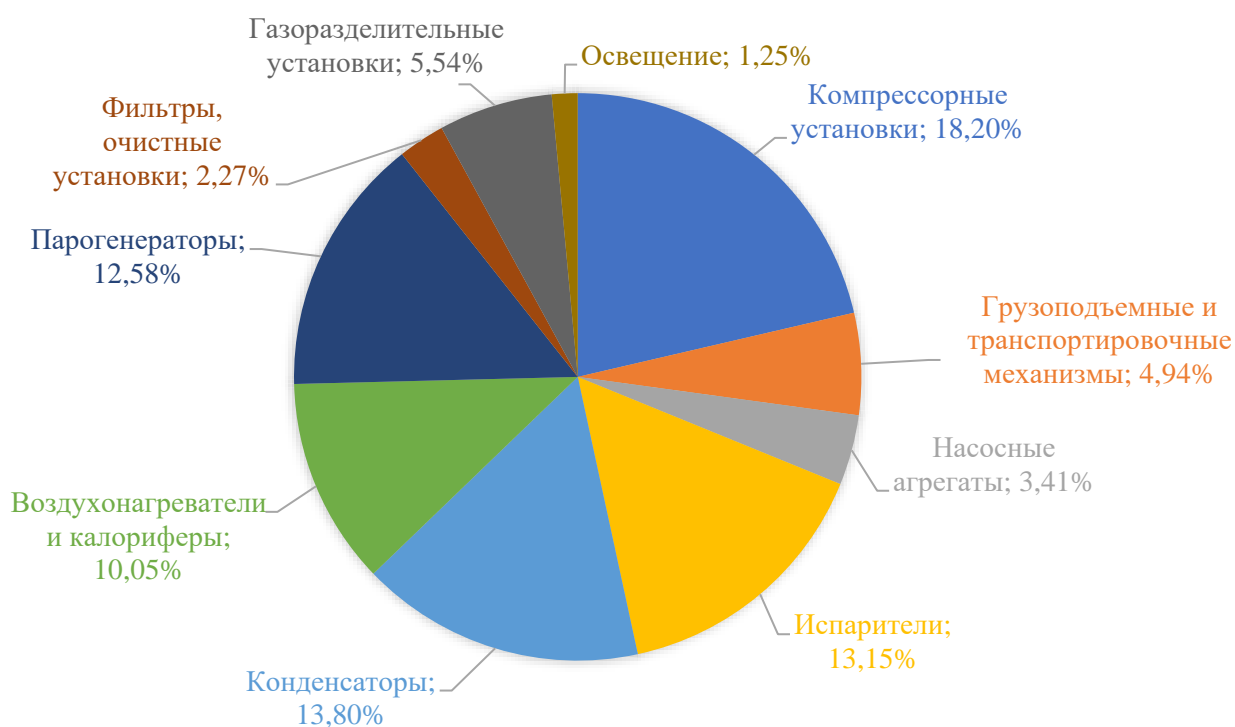


Рисунок 5 – Удельная мощность энергетических установок предприятия

По данной диаграмме мы видим, что наиболее энергозатратными сферами химического предприятия являются тепловые и энергетические установки. Данные установки требуют большого потребления электроэнергии. Нагревательные установки, а также холодильные машины имеются в составе всех установок при производстве любого продукта химической промышленности. Это связано с тем, что при протекании реакции необходимо поддерживать продукты реакции при определенном

температурном режиме, а также необходимы для протекания различных тепловых процессов (рисунок 6).



Рисунок 6 – Классификация тепловых процессов протекающих на химическом предприятии

В состав любой холодильной и тепловой машины входят:

- компрессорные установки [21],
- испарители,
- конденсаторы,
- терморегулирующий вентиль (ТРВ).

Принцип работы холодильных и тепловых машин заключается в использовании электроэнергии для отведения холода одного контура и тепла другого контура для различного назначения. Этот процесс основан на термодинамическом цикле Карно [20]. Принципиальная схема холодильной машины представлена на рисунке 7.

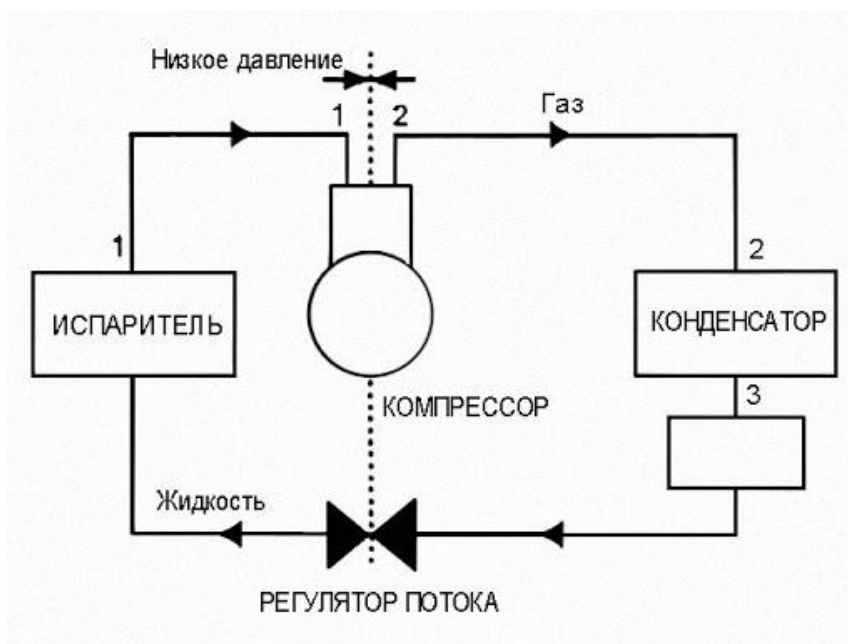


Рисунок 7 – Принципиальная схема работы холодильной машины

Цикл работы холодильной машины начинается с участка 1-1. Хладагент находится в состоянии пара при низком давлении и температуре. При прохождении через компрессор, давление хладагента повышается, что также приводит к повышению его температуры. После прохождения участка 2-2 хладагент проходит через конденсатор, где охлаждается и переходит в жидкую фазу, оставаясь при этом под высоким давлением. При прохождении через регулятор потока (ТРВ), давление понижается, часть жидкости переходит в газообразное состояние. Проходя через испаритель смесь жидкости и пара начинает кипеть, отбирая из окружающей среды тепло, и переходит в парообразное состояние.

Конденсатор и испаритель представляют собой теплообменники интенсивность теплопередачи которых может управляться с помощью частотных преобразователей, путем регулирования скорости вращения двигателей вентиляции.

Холодильные и тепловые машины классифицируются как по виду используемого в контуре хладагента, так и по типу используемого компрессора в составе холодильной машины (рисунок 8).



Рисунок 8 – Классификация компрессоров

Компрессоры приводятся в движение электродвигателями. В холодильных и тепловых машинах могут использоваться трехфазные синхронные и асинхронные электродвигатели. Передача механической энергии производится с помощью общего вала, соединения муфтой, ременных передач, а также редуктора, если необходимо повысить количество оборотов.

«Синхронные электродвигатели применяют для привода крупных компрессоров и размещают на одном валу с ними. Ротор электродвигателя при

посадке его на вал тихоходного горизонтального компрессора служит одновременно маховиком. В комплект также включены возбуждающие агрегаты, питающие обмотку якоря постоянным током. Их снабжают дополнительной асинхронной обмоткой для запуска двигателя и достижения синхронного числа оборотов, соответствующего числу пар полюсов, установленных на статоре двигателя.

Такая конструкция синхронных двигателей повышает коэффициент использования потребляемой электрической мощности — косинус φ [15].

Для пуска синхронных двигателей используются станции управления, которая обеспечивает асинхронный пуск и при достижении определенного числа оборотов вращения двигателя подает возбуждение для последующего включения синхронной обмотки двигателя. Если производится пуск асинхронных двигателей, то применяются магнитные пускатели.

Электродвигатели в промышленности используются различного исполнения: открытые, взрывозащищенные, взрывонепроницаемые. Смеси, используемые на химическом предприятии, имеют категорию ПА [13]. В соответствии с этим большинство электродвигателей рассматриваемого химического предприятия имеют взрывонепроницаемую оболочку.

Холодильные и тепловые машины довольно часто работают при нагрузке, которая является ниже номинальной. Работа таких машин чаще всего рассчитана на пиковую нагрузку, а управление производительностью не осуществляется.

Объемные компрессоры имеют постоянный крутящий момент, крутящее усилие вала носит постоянный характер и не зависит от скорости вращения. Отсюда можно сделать вывод о том, что мощность на валу зависит от рабочих условий (давления), способа управления производительностью, которые влияют на крутящий момент. В общем, уменьшение скорости вращения пропорционально уменьшению мощности на валу двигателя (рисунок 9) [14].



Рисунок 9 – Зависимость крутящего момента от скорости вращения (постоянный момент)

Для эффективного использования компрессоров, управления производительностью тепловой и холодильной машины используют преобразователи частоты. Преобразователи частоты применяются для изменения скорости вращения ротора электродвигателя.

Ключевыми преимуществами использования преобразователей частоты являются снижение потерь мощности, связанных с применением золотникового механизма, а также уменьшение износа.

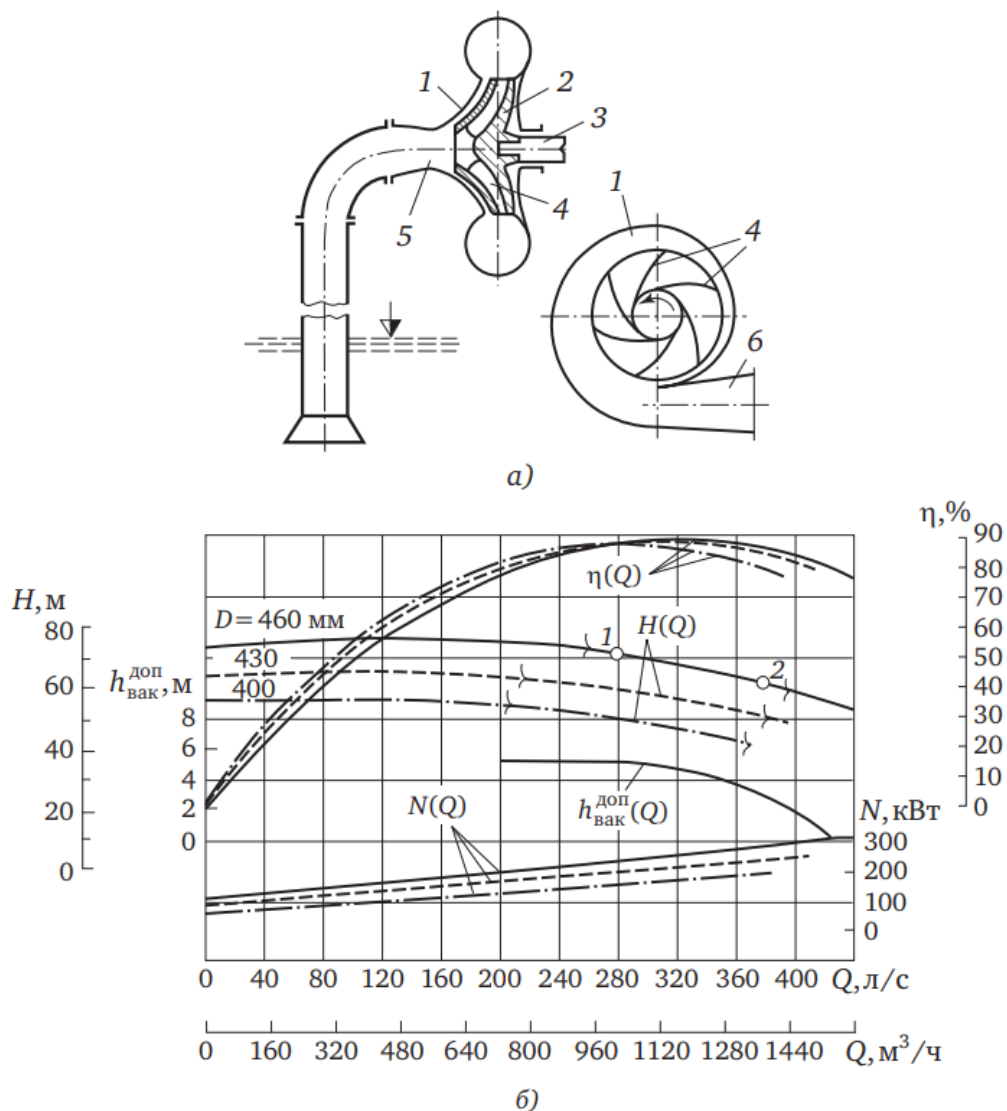
Преобразователи частоты также могут использоваться для управления работой вентиляторов и насосов. Вентиляторы могут использоваться в системах вентиляции, в испарителях и конденсаторах тепловых и холодильных машин.

Главными показателями, которые характеризуют режим работы насосов, являются напор и подача. Насосные установки классифицируются следующим образом:

- водопроводные (понижительные и повысительные, для технической и для питьевой воды),
- канализационные,

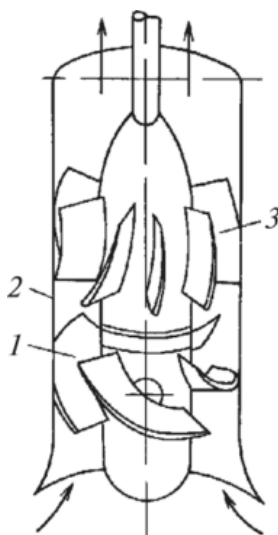
- теплофикационные (питательные, конденсаторные и циркуляционные),
- нефтеперекачивающие.

По исполнению лопастей используются центробежные (рисунок 10) и осевые (рисунок 11) насосные установки. При вращении лопастей рабочего колеса насоса, под действием центробежной силы происходит перемещение жидкости.



H – напор; Q – подача; η – КПД; $h_{\text{доп}}$ — допустимая вакуумметрическая высота всасывания; N — мощность; D — диаметр рабочего колеса

Рисунок 10 – Схема одноступенчатого центробежного насоса (а) и его рабочие характеристики (б)



1 – рабочее колесо; 2 – корпус; 3 – направляющий аппарат

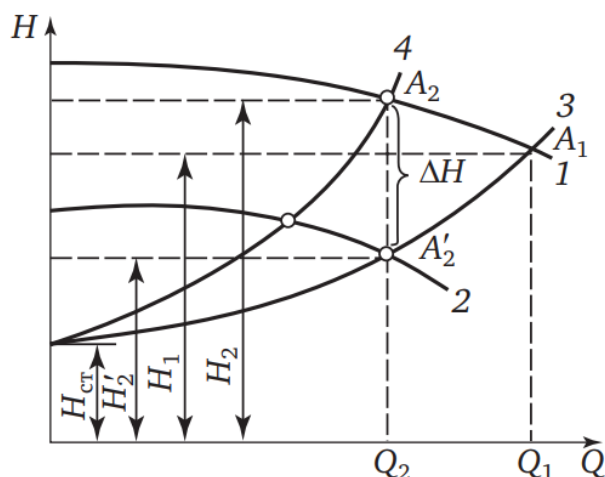
Рисунок 11 – Схема осевого насоса

Осевые насосы применяются для создания невысокого напора (около 20 м), для перемещения воды в больших объемах. В связи с этим, наиболее распространенными насосами являются центробежные.

В качестве привода для различных типов насосов применяются чаще всего асинхронные и синхронные двигатели. Для асинхронных двигателей в большинстве случаев применяют короткозамкнутый ротор, с фазным ротором – реже.

Довольно часто требуется изменение подачи и напора (регулирование) насосов различного назначения.

Ранее, для регулирования использовали такой способ регулирования как изменение степени открытия (закрытия) задвижки. Но данный способ, называемый дросселированием, является энергозатратным и неэффективным. В связи с этим, все чаще используется способ изменения частоты вращения рабочего колеса насоса.



1 – номинальная частота вращения рабочего колеса; 2 – пониженная частота вращения рабочего колеса насоса; 3 – полное открытие задвижки; 4 – частично открытая задвижка

Рисунок 12 – Регулирование режима работы центробежного насоса

Электроэнергия в насосных установках затрачивается на подъем жидкости и преодоление сопротивления в трубопроводных системах.

Энергопотребление насосов можно снизить путем уменьшения высоты подъема жидкости и напора в системе. Снижение напора помимо регулирования частоты вращения насосов возможно путем очистки поверхностей труб и применением фильтрующих установок (снижение гидравлического сопротивления трубопроводов).

К основным видам регулируемых электроприводов, которые применяются в насосных агрегатах относятся:

- частотный,
- асинхронно-вентильный каскад,
- на основе вентильного электрического двигателя,
- с электромагнитной муфтой скольжения.

«В последнее время наибольшее распространение получили частотные регулируемые электроприводы на IGBT-модулях (биполярных транзисторах с изолированным затвором). IGBT-модуль является высокоэффективным ключевым элементом. Он обладает малым падением напряжения, высокой скоростью и малой мощностью переключения» [4].

«Преобразователь частоты на базе автономного инвертора напряжения на IGBT-модулях с широтно-импульсной модуляцией и векторным алгоритмом управления асинхронным электродвигателем имеет преимущества по сравнению с другими типами преобразователей. Он характеризуется высоким значением коэффициента мощности во всём диапазоне изменения выходной частоты. Некоторые производители частотных преобразователей, в том числе «Данфосс», сами изготавливают IGBT-модули, что обеспечивает полный контроль качества преобразователей» [4].

Частотно-регулируемые электропривода фирмы «Данфосс» способны управлять несколькими насосными агрегатами. В составе данной системы могут применяться групповые и индивидуальные электропривода. В данные системы, также называемые станциями группового управления, включены электросиловые (защитные и коммутационные), а также управляющие и регулирующие элементы. К управляющим и регуливающим элементам относятся микропроцессорные контроллеры.

Автоматизированные станции группового управления хорошо себя зарекомендовали в различных отраслях промышленности. Если рассматривать данные станции в рамках применения в сфере химической промышленности, то к основным преимуществам следует отнести:

- контроль необходимых диапазонов значений технологических параметров (уровень, давление, температура, влажность) при протекании химических реакций;
- поддержание стабильных параметров работы (ток, напряжение, мощность) и защита электрических двигателей;
- переключение агрегатов, применение систем АВР и АПВ, оперативное управление.

Пример принципиальной схемы станции группового управления регулирующими электрическими приводами, применяемой в цехах химического предприятия, приведен на рисунке 13.

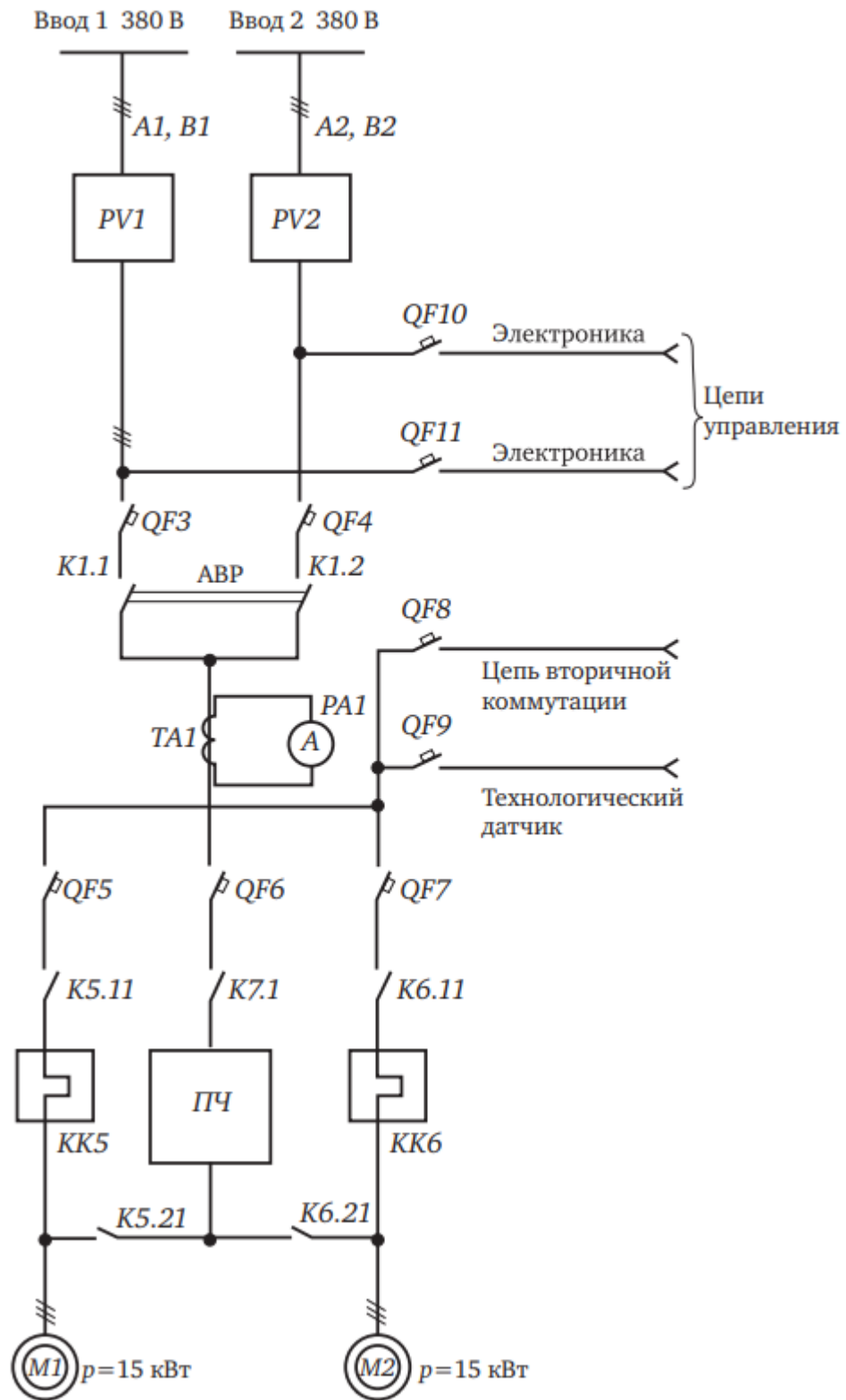


Рисунок 13 – Принципиальная схемы станции группового управления регулируемые электрическими приводами

Регулируемый электропривод также используется в составе оборудования, которое относится к подъемно-транспортному [6]. Данное оборудование необходимо для подъема и перемещения продукции химического предприятия. Регулируемый электропривод используется преимущественно в машинах периодического действия на рассматриваемом химическом предприятии, а также на погрузочно-разгрузочном оборудовании (рисунок 14).

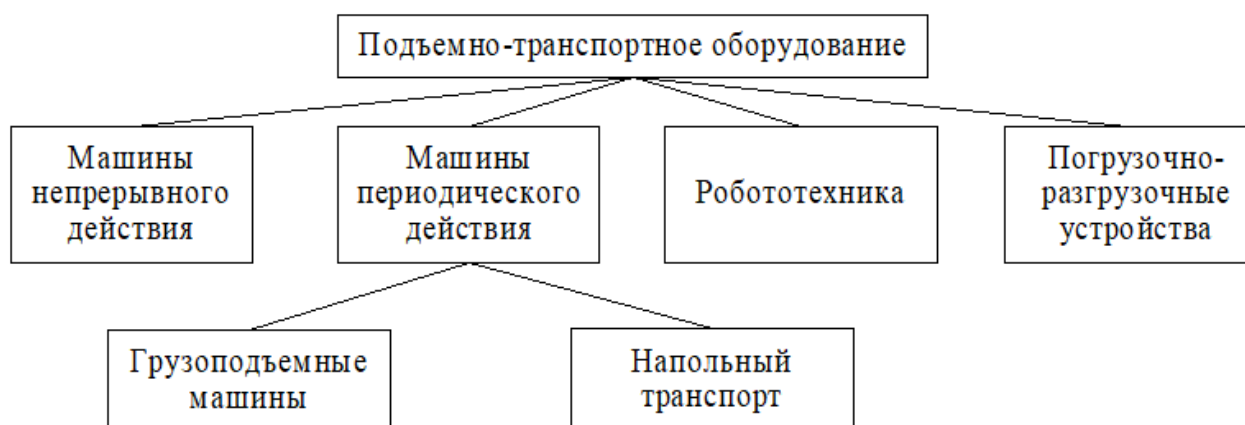


Рисунок 14 – Классификация подъемно-транспортного оборудования

Что касается машин непрерывного действия и робототехники, то на рассматриваемом предприятии данное оборудование не применяется. Для перемещения продукции по территории склада, а также для погрузки и разгрузки полипропилена в железнодорожные составы или грузовые автомобили используются мостовые краны.

Электрический двигатель мостового крана запитывается от троллеев, которые представляет собой стальной уголок, смонтированных к стене здания. При проведении регламентных работ и действий по обслуживанию троллей используется специальная площадка. Для подведения тока к электрическому двигателю, который расположен на тележке, применяются гибкие кабели. Гибкие кабели крепятся на специальных подвижных подвесках.

Рассмотрим ещё одну сферу потребления химического предприятия – освещение. Для освещения цехов и помещений химического завода используются светодиодные светильники. В качестве наружного освещения применяются светодиодные светильники (для освещения дорог, площадок цехов). Светодиодные светильники были смонтированы изначально при строительстве данного химического предприятия.

Для сокращения потерь электроэнергии, необходимо установить датчики движения и освещенности.

Выводы по первому разделу

В данной главе был проведен анализ нормативно-правовой базы необходимых для проведения мероприятий по повышению энергоэффективности химического предприятия. При проведении анализа мы выяснили, что прослеживается рост химической промышленности, что требует усиленного проведения энергосберегающих предприятий.

Для внедрения мероприятий, рассмотренное предприятие было охарактеризовано с точки зрения производимой продукции, а также проводимых операций с этой продукцией. Далее были рассмотрены основные группы потребителей химического предприятия. Самыми энергоемкими потребителями химического предприятия являются климатические, газоразделительные и насосные установки.

Перспективным направлением повышения энергоэффективности предприятия является модернизация электроприводов насосов, вентиляционных установок, компрессорных агрегатов, оборудования холодильной системы.

2 Повышение энергетической эффективности на промышленных предприятиях

2.1 Повышение энергоэффективности холодильного оборудования

На современном этапе, во многих крупных отраслях промышленности возраст оборудования составляет 25 лет и старше (рисунок 15). Данное оборудование является неэнергоэффективным поскольку не соответствует современным нормативам в области энергосбережения [9].

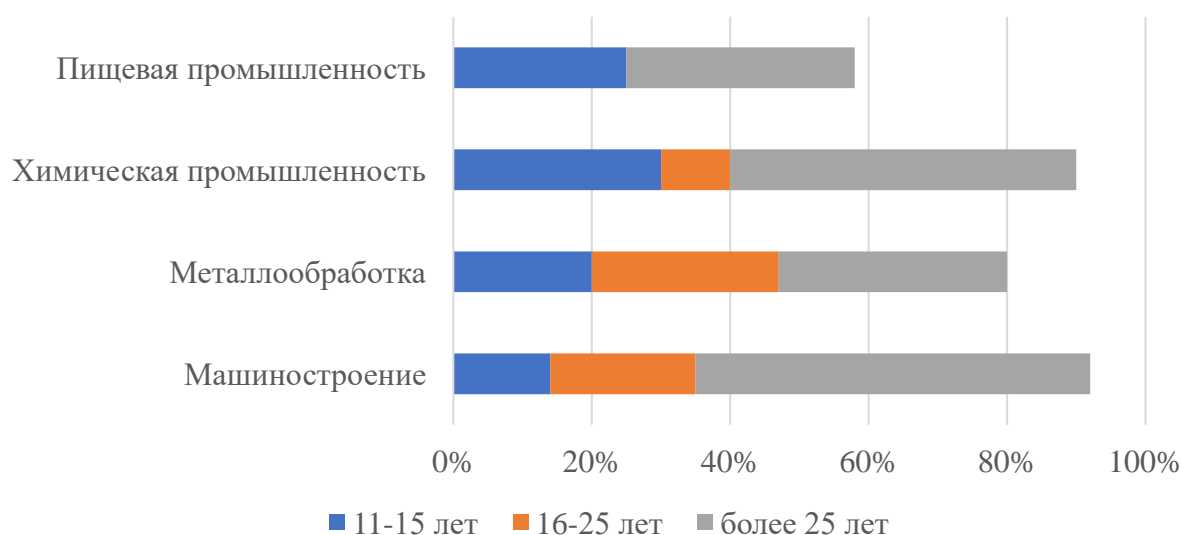


Рисунок 15 – Распределение холодильных машин по отраслям

В зоне восстановления при низкой температуре, система очистки продукта и холодильные системы необходимо интегрировать, чтобы минимизировать первоначальные инвестиции и оптимизировать энергоэффективность. Предполагается внедрение следующих технологий:

- каскадная система охлаждения пропилена и этилена.
- высокоэффективная конструкция холодильной камеры, минимизирующая количество оборудования и потребляемую мощность компрессора хладагента.

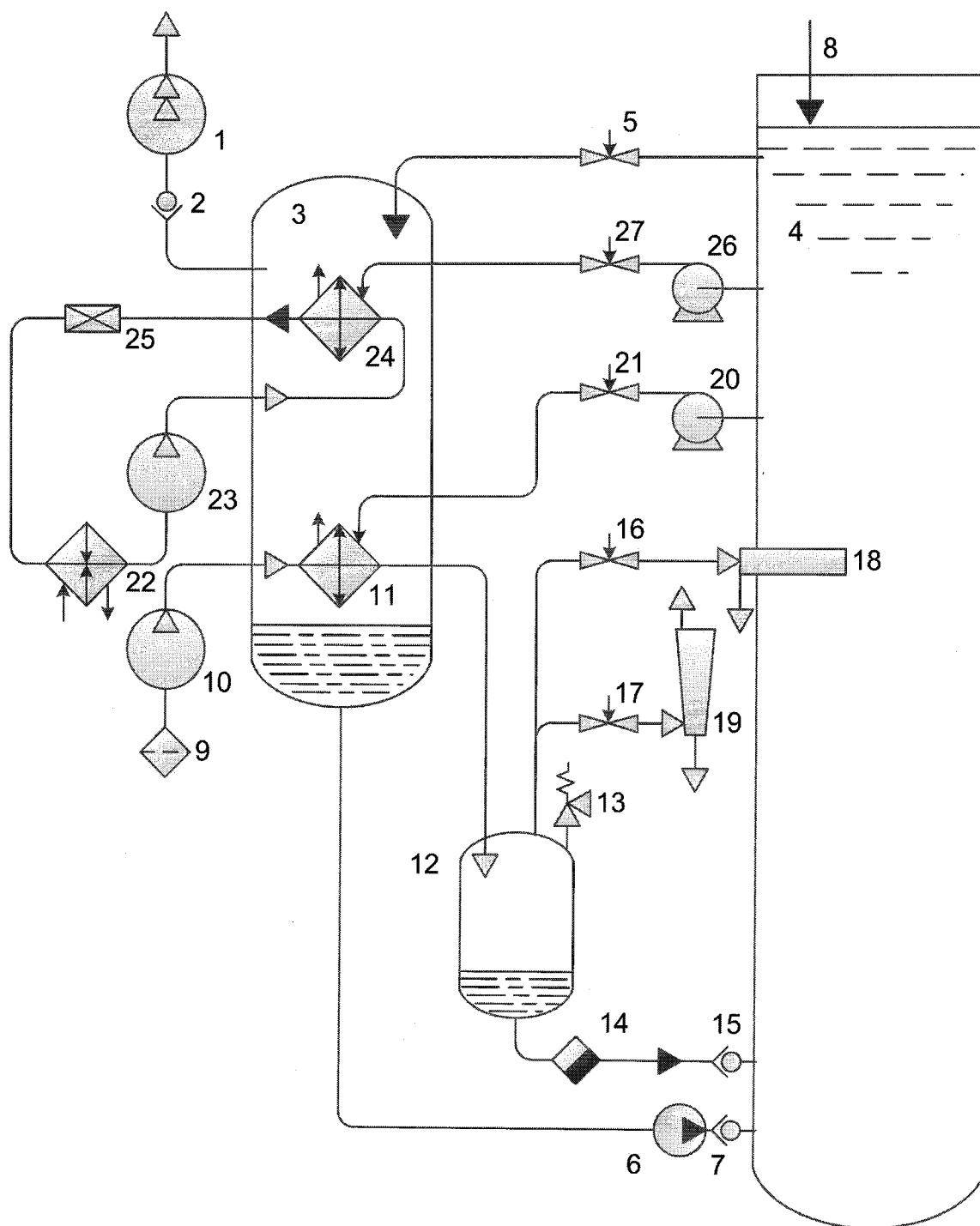
- деэтанализатор низкого давления, который устраняет необходимость в питающих насосах.
- разделитель продуктов низкого давления, встроенный в систему охлаждения пропилена.

Рассмотрим эффективность внедрения каскадной системы охлаждения.

Каскадная система охлаждения применяется как в системах кондиционирования, так и в пищевой промышленности. Теплоноситель каждого контура (каскада) используется разный. Для каждого диапазона температур подобран необходимый теплоноситель, который позволит работать наиболее эффективно. Причем может быть использован общий каскадный конденсатор, который является конденсатором высокотемпературного контура и одновременно с этим испарителем низкотемпературного контура. Это обеспечивает сокращение количества оборудования и соответственно электропотребления холодильной машины. Верхний контур выполняется разомкнутым с периодическим добавлением хладагента R718 (вода, водный соляной раствор). Контур является разомкнутым для испарения небольшого количества воды для вывода суммарных теплопритоков. Каскадный конденсатор-испаритель подключен к вакуум-насосу для вывода паров в окружающую среду. Нижний контур также выполняется разомкнутой с применением атмосферного воздуха.

Данная система позволяет (рисунок 16):

- исключить зависимость работы каскадной холодильной системы от температурных изменений окружающей среды;
- снижения количества хладагентов холодильной машины;
- увеличение термодинамической эффективности и экологичности;
- снижения электропотребления холодильной установки.



1 – вакуумный насос; 2 – обратный клапан; 3 – конденсатор-испаритель; 4 – аккумуляторный бак; 5,16,17,21,27 – запорно-регулирующий вентиль; 6 – объемный насос; 7,15 – обратный клапан; 8 – патрубок подпитки чистой воды; 9 – воздушный фильтр; 10 – пневматический компрессор; 11,24 – конденсатор влаги в сжатом воздухе; 12 – отделитель влаги; 13 – предохранительный клапан; 14 – отводчик влаги; 18 – волновая резонансная труба; 19 – вихревая труба; 20,26 – насос; 22 – испаритель; 23 – компрессор; 25 – дроссель

Рисунок 16 – Принципиальная схема каскадной холодильной машины

Экологичность работы достигается тем, что используются в качестве хладоносителей воздух и вода, которые с использованием разомкнутых нижнего и верхнего контуров возвращаются в холодильную машину.

«Устройство является синергетической системой, будучи по своему составу открытой динамической и неравновесной, которая обменивается энергией с окружающей средой без достижения с ней теплового уравнивания.

Синергетический сверхсуммарный эффект в предлагаемом устройстве определяется тем, что небольшая часть массы экологически чистого рабочего тела верхнего каскада (незначительная причина) используется в энергоемком фазовом превращении первого рода посредством самоиспарения малых количеств воды вследствие снижения давления ниже атмосферного до пограничных значений между низким и средним вакуумом. За счет перераспределения давления с понижением в диапазоне от 100 до 0,1 кПа посредством вакуум-насоса, к которому приложена извне механическая работа, помимо массообменного маломасштабного явления (причины) реализуется значительно более интенсивная энергетическая составляющая пространственной неоднородности в одном из объектов каскадной установки (испарителе-конденсаторе), что создает искусственную температурную неоднородность, как движущую силу в других объектах установки - нижних ветвях каскада, системе в целом. Численное соотношение испаренной массы воды 0,1 кг/с (причины) и соответствующей этой величине 250 кВт мощности теплоотбора (следствия), как однонаправленного процесса, без необходимости замыкания цикла с возвратом в исходную точку температурных показателей, подтверждает наличие синергетического эффекта указанной энерготрансформации с закономерно пониженными на 20% энергозатратами извне на ведение процесса» [11].

Условиями стабильной работы машины с разомкнутым контуром являются:

- незначительной диапазон отклонения атмосферного давления от среднегодового значения (не более 2%) в верхнем контуре;
- небольшой перепад атмосферного давления в верхнем контуре (не более 1 бар).

Диаграмма работы каскадной термодинамической машины представлена на рисунке 17.

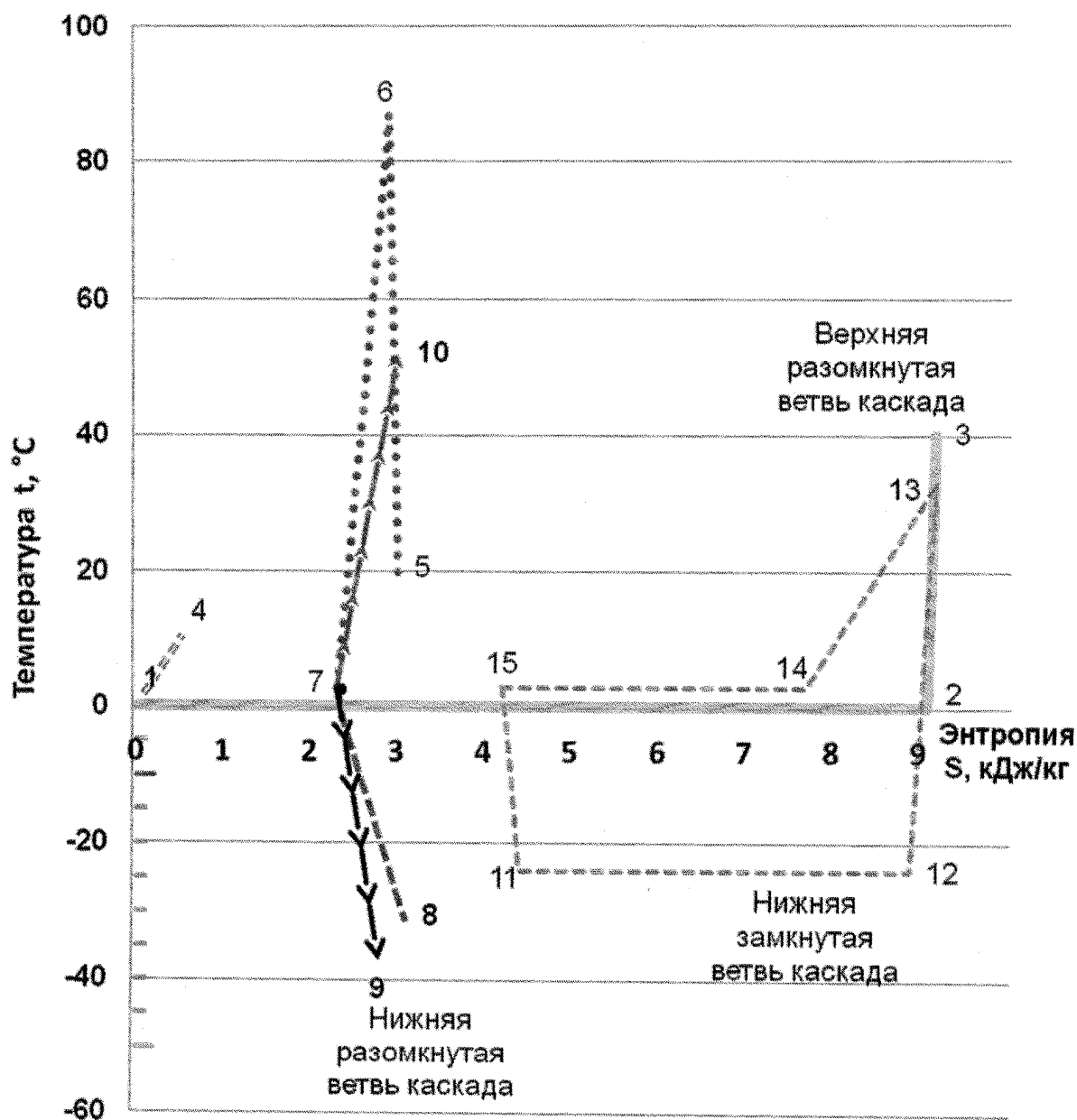


Рисунок 17 – Диаграмма термодинамических процессов каскадной холодильной машины

2.2 Повышение энергоэффективности работы электродвигателей

Значительную долю электроприемников составляют асинхронные электродвигатели. Для снижения величины тока в распределительных сетях и потерь электроэнергии применяются компенсирующие устройства. Для повышения эффективности работы компенсирующих устройств, их располагают ближе к источникам реактивной мощности.

В таблице 1 представлены данные о влиянии компенсирующих устройств на величину реактивных потерь.

Таблица 1 – Данные о влиянии компенсирующих устройств на величину реактивных потерь

Коэффициент мощности до компенсации	Коэффициент мощности после компенсации	Снижение тока, %	Снижение потерь по сопротивлению
0,50	0,80	37,50	61,00
0,50	0,90	44,50	69,00
0,60	0,80	25,00	43,50
0,60	0,90	33,00	55,50
0,70	0,80	12,50	23,00
0,70	0,90	22,00	39,50
0,80	0,90	11,00	21,00

Повысить коэффициент мощности можно следующими способами:

- изменение схемы переключения обмоток. При сокращении нагрузки до половины номинальной мощности электродвигателя, производить переключение схемы соединения обмоток с треугольника на звезду, что приводит к снижению мощности в 3 раза;
- установка контроллеров ограничения времени работы асинхронных двигателей в режиме холостого хода, а также других средств управления режимом работы электродвигателей;
- повышение уровня загруженности асинхронных двигателей.

К техническим средствам компенсации реактивной мощности относятся:

- «синхронные электродвигатели в режиме перевозбуждения;
- комплектные конденсаторные батареи;
- статические компенсаторы (управляемые тиристорами реакторы или конденсаторы)» [1].

Затраты по замене электродвигателя являются целесообразными в том случае, если его средняя загрузка составляет менее половины его номинальной мощности. Это связано с тем, что потери в железе начинают преобладать, эффективность работы быстро снижается. При загрузке до 75% уже следует проводить технико-экономический расчет.

Составляющие потерь в электрических двигателях представлены на рисунке 18.



Рисунок 18 – Сложение потерь мощности в электрических двигателях

Потери в стали (намагничивания) являются стандартными для каждого электродвигателя независимыми от нагрузки. Потери на трение зависят только

от частоты вращения. Активные потери возрастают пропорционально квадрату тока нагрузки, а добавочные зависят от величины нагрузки.

Применение регулятора напряжения электрического двигателя позволяет уменьшить магнитное поле в стали, потери в стали, увеличить КПД электродвигателя (рисунок 19). Регулятор напряжения имеет незначительное потребление электроэнергии.



Рисунок 19 – Влияние схемы обмоток на потери на примере двигателя мощностью 8 кВт

На ряду с автоматическим переключением обмоток в зависимости от нагрузки, также широко применяются частотно регулируемые электрические приводы. Они позволяют экономить в переменных режимах работы технологического оборудования значительную долю электроэнергии:

- вентиляторы и воздуходувки – 30-50%;
- компрессорные установки и агрегаты – 40-50%;
- насосное оборудование – 25%.

Тиристорные регуляторы являются более дешевым решением, поскольку диапазон регулирования более узкий относительно частотных регуляторов. Внедрение частотных регуляторов происходит медленно за счет высокой цены. Монтаж частотных регуляторов может окупиться, когда

значительную часть времени нагрузка электродвигателя примерно в три раза меньше его номинальной мощности.

Также следует отметить, что при увеличении мощности двигателя, соотношение цены за 1 кВт мощности становится выгоднее (рисунок 20).

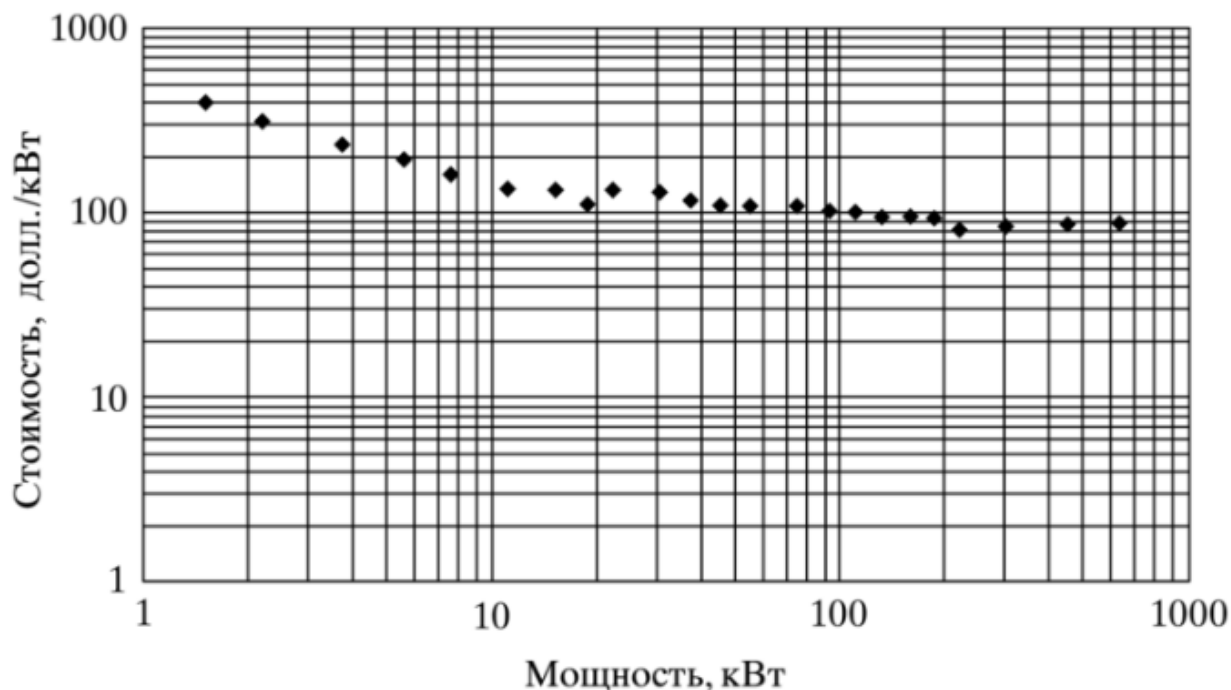


Рисунок 20 – Средняя удельная стоимость 1 кВт мощности частотного преобразователя

2.3 Энергоэффективность в нефтяной промышленности

Транспортировка нефти по трубопроводам составляет значительную долю энергетических затрат. Основные виды энергии, которые участвуют в транспортировке являются [2]:

- электрическая,
- тепловая,
- топливная.

Распределение затрат топливно-энергетических ресурсов приведем на рисунке 21 на примере объектов компании «Транснефть».

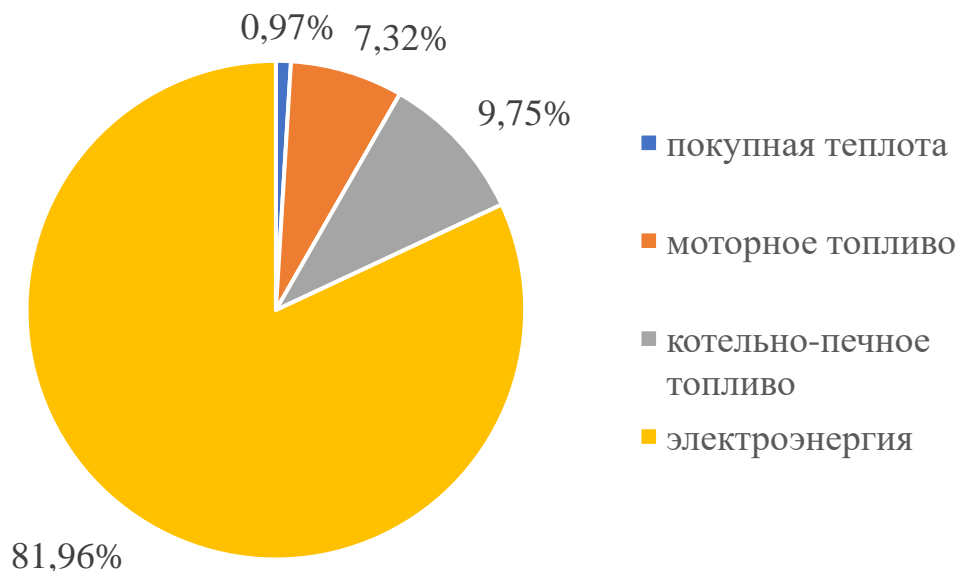


Рисунок 21 – Распределение затрат топливно-энергетических ресурсов на предприятиях компании «Транснефть»

Для правильного учета расхода топливно-энергетических ресурсов, приведенных на рисунке 21, осуществляют учет и нормирование удельных норм расхода.

Учету подлежит весь расход топливно-энергетических ресурсов применяемых для:

- перекачки нефти по магистральным нефтепроводам, с учетом потерь технологического оборудования и коммуникаций;
- налива нефти в наливной пункт;
- нужд линейной производственно-диспетчерской станции, перекачивающей станции и наливного пункта (очистные сооружения, водоснабжение, теплоснабжение, освещение и т.д.), включая потери;
- сооружения линейной части магистральных нефтепроводов.

«Электроэнергия в трубопроводном транспорте нефти расходуется на:

- а) непосредственное осуществление технологического процесса транспорта нефти подпорными и магистральными насосными агрегатами;
- б) налив нефти в емкости;
- в) вспомогательные операции:
 - 1) привод масляных и водяных насосов системы смазки и охлаждения технологических агрегатов;
 - 2) хозяйственно-бытовые и санитарно-гигиенические нужды станций;
 - 3) внутристанционная перекачка нефти;
 - 4) зачистка резервуаров;
 - 5) вентиляция насосных и других помещений;
 - 6) освещение помещений, установок и территории;
 - 7) водоснабжение и канализация;
 - 8) технологическое оборудование ремонтных мастерских;
 - 9) привод электрооборудования систем отопления;
 - 10) электрохимическая защита магистрального трубопровода и резервуаров;
 - 11) привод запорной и регулирующей арматуры;
 - 12) производственные нужды лабораторий, складов, гаражей, административных зданий.
- г) пуск агрегата после ремонта или простоя в холодном резерве;
- д) технически неизбежные потери при ремонте оборудования на установленном режиме (потери в оборудовании);
- е) потери в электрических сетях, трансформаторах и преобразователях от границ с электроснабжающей организацией до технологических агрегатов» [2].

Виды потерь электроэнергии представлены на рисунке 22.

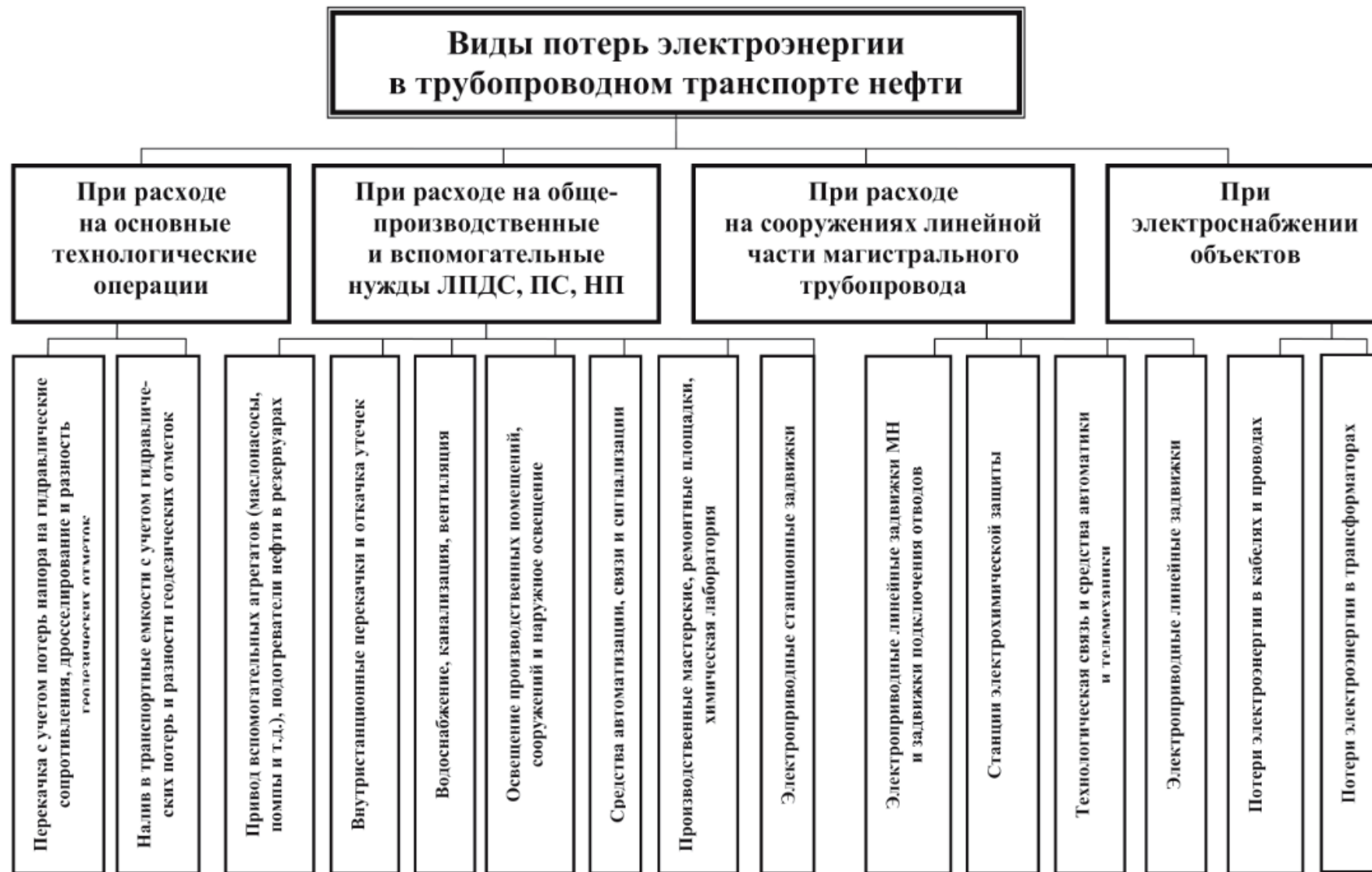


Рисунок 22 – Виды потерь электроэнергии

В нефтяной промышленности к основным неэффективным затратам относят [18]:

- использование технологического оборудования с низким КПД, а также несоответствие других параметров, которые ведут к эксплуатации в неэффективном режиме работы установки;
- нерациональный монтаж насосных станций, который требует дополнительного гидравлического напора и, соответственно, повышенного расхода электрической энергии;
- увеличенный объем перекачек внутри станций;
- скопления примесей в нефтепроводе;
- использование задвижек и прочей арматуры с повышенным гидравлическим сопротивлением;
- отсутствие компенсации реактивной мощности;
- высокое общее время работы оборудования на холостом ходу;
- повышенное падение напряжения в распределительных сетях;
- низкое качество производства изоляционных работ, приводящее к дополнительным потерям электрической энергии, которая расходуется станциями катодной защиты на электрохимическую защиту трубопровода.

Потребление электроэнергии объектов трубопроводного транспорта представлено на рисунке 23.

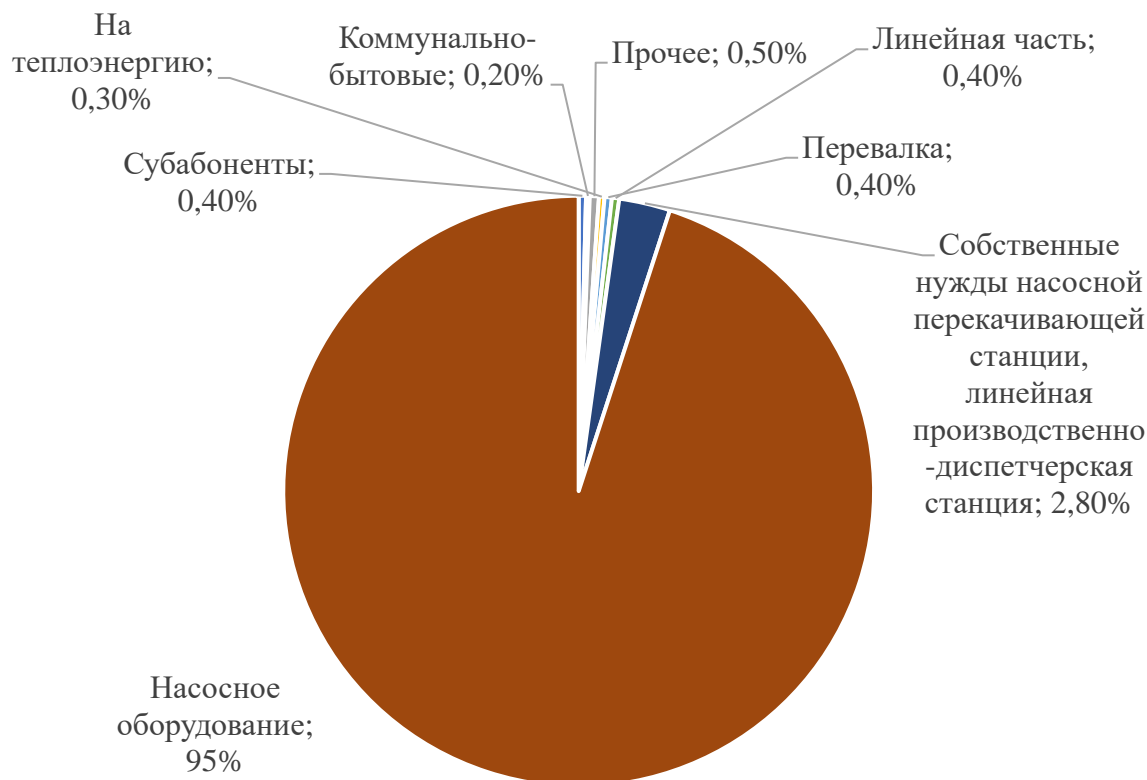


Рисунок 23 – Структура потребления электроэнергии

При эксплуатации магистральных насосов довольно часто требуется изменять их гидравлические характеристики для повышения энергетической эффективности их работы. Существуют следующие методы регулирования на нефтяных предприятиях:

- установка дросселей,
- перепуск (байпасирование),
- отключение малонагруженных насосов, изменение схемы обвязки,
- использование сменных роторов,
- частотно-регулируемый электропривод,
- монтаж регулирующих муфт,
- применение газотурбинного привода,
- чистка и промывка трубопровода, повышение его пропускной способности, а также снижение гидросопротивления.

Применение байпаса на практике довольно редкое, поскольку метод незначительно экономичнее, чем дросселирование.

Существует параллельная и последовательная схема обвязки насосных агрегатов. Параллельное соединение используется тогда, когда не достигается необходимая подача перекачиваемой жидкости.

Но более широкое применение получила последовательная обвязка. Насосы монтируются друг за другом, что обеспечивает увеличение напора и КПД. Используется такая схема преимущественно, когда наблюдается ускоренный рост гидравлических потерь с одновременным повышением расхода.

Поскольку значительная часть современных насосов комплектуется вместе со сменными роторами, то таким образом можно регулировать подачу. Сменные роторы позволяют работать на 50% и 70% от номинальной подачи насоса. Некоторые же насосы могут поставляться также с ротором, работающим на повышенной подаче (125% от номинальной подачи).

В некоторых случаях применяются механические устройства плавного регулирования, вместо частотно-регулируемых электроприводов из-за экономических соображений. По принципу работы муфты могут классифицироваться:

- гидравлические,
- электромагнитные,
- сухого трения,
- мокрого трения.

«Для плавного регулирования частоты вращения рабочего колеса можно использовать гидравлические трансмиссии. В этом виде трансмиссий передача энергии от ведущего вала к ведомому валу осуществляется за счет кинетической энергии напора рабочей жидкости. Конструктивно это реализуется в виде гидромуфты с регулируемым коэффициентом проскальзывания» [2].

Гидравлическая муфта состоит из (рисунок 24):

- насосного колеса с лопатками,
- турбинного колеса.

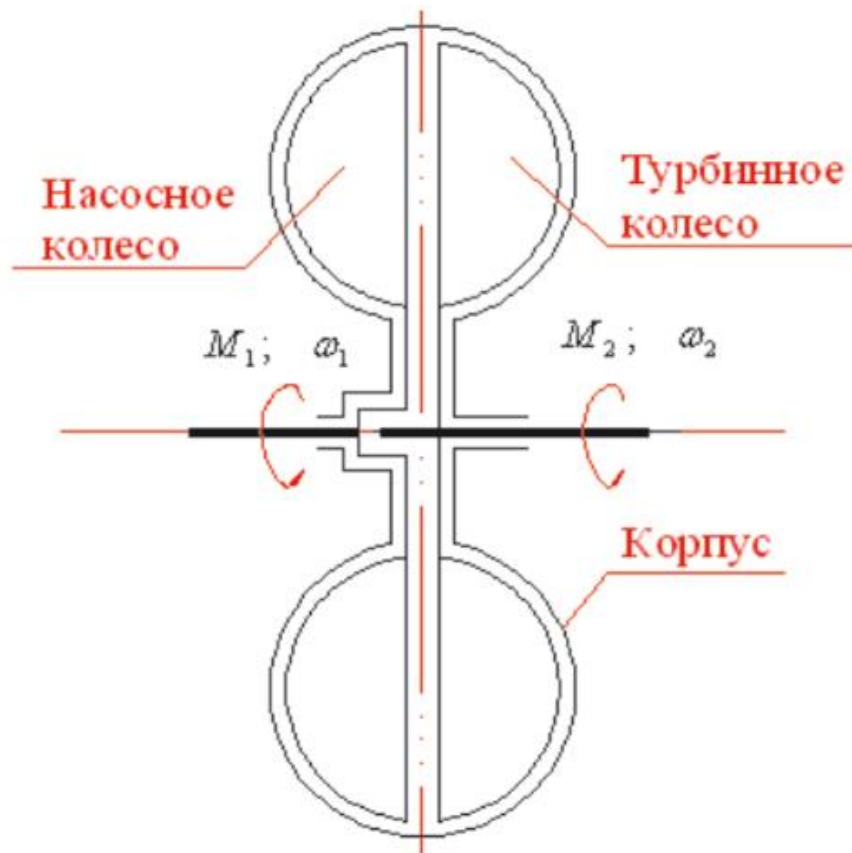


Рисунок 24 – Принципиальная схема гидравлической муфты

Основные преимущества гидравлической муфты:

- высокий КПД;
- возможность запуска электродвигателя под нагрузкой, снижение пусковых токов;
- бесступенчатая регулировка мощности и числа оборотов;
- плавный разгон, отсутствие ударных нагрузок на обмотки, подвижные части;
- исключение гидроудара, гашение вращательных колебаний, вибрации;
- защита от перегрузок.

Несмотря на достоинства гидравлической муфты, данное устройство не позволяет регулировать крутящий момент электродвигателя в зависимости от нагрузки на ведомом валу.

Выводы по второму разделу

Каскадная холодильная машина позволяет повысить термодинамическую и экономическую эффективность работы системы охлаждения. Также следует добавить, что за счет открытой системы, эксплуатационная безопасность стала выше.

Автоматизация холодильной машины стала проще, поскольку уменьшилось количество параметров для управления теплопередачей, исключена зависимость процесса от температуры окружающей среды.

Данный тип холодильной машины позволяет затраты электроэнергии на 25% при поддержании стабильного охлаждения продуктов химической реакции.

Для повышения энергоэффективности систем вентиляции, кондиционирования, водоснабжения, необходимо управление производительностью работы электрических двигателей. Для каждой инженерной системы необходимо провести технико-экономический анализ эффективности внедрения средств управления производительностью электродвигателей.

3 Технико-экономический расчет внедряемых мероприятий

3.1 Расчет энергоэффективности холодильной машины

Для расчета экономических показателей холодильных установок приведем данные рассматриваемой климатической зоны на рисунке 25.

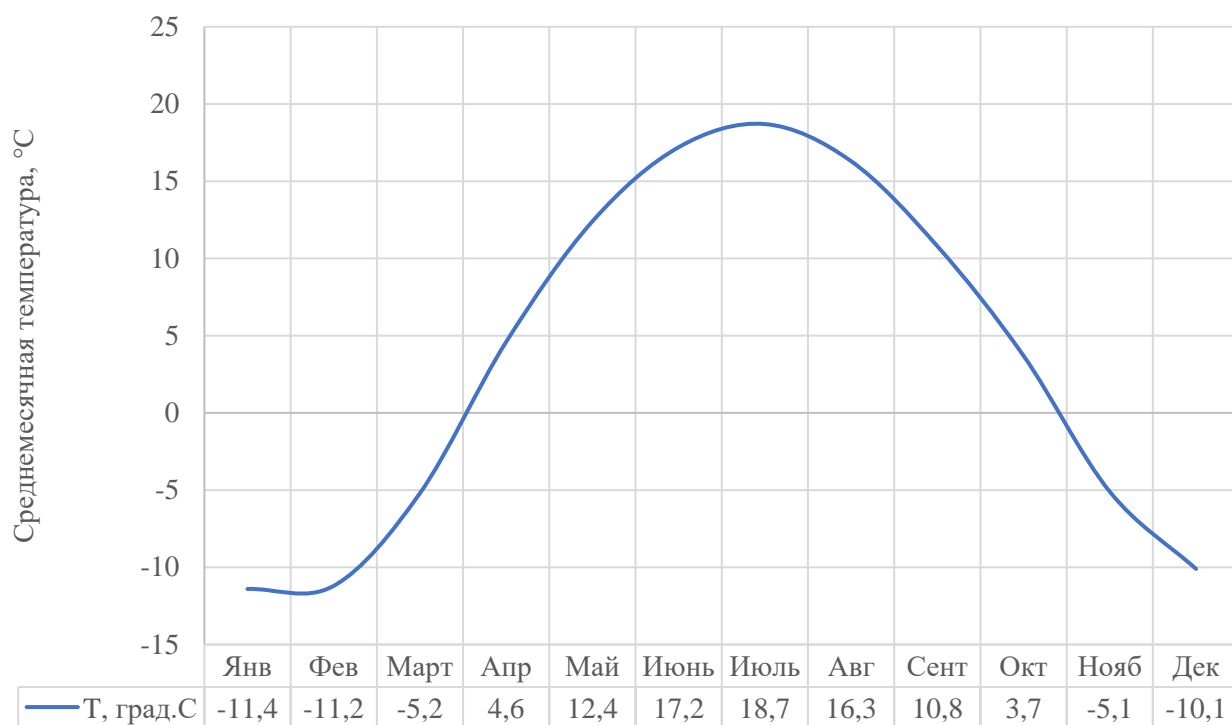


Рисунок 25 – График изменения температуры в течение года в рассматриваемой климатической зоне

В существующей системе применяется хладагент R404A. Температура теплоносителя на конденсаторе 45°C. Общее холодопотребление цеха составляет 216 кВт для среднетемпературного оборудования и 30 кВт – для низкотемпературного.

Для сравнения возьмем каскадную холодильную машину CO₂.

Использование углекислого газа вместо других хладагентов позволяет добиться благоприятных термо-физических свойств определенного диапазона температур. Углекислый газ обладает следующими характеристиками:

- инертность;
- пожаробезопасность;
- взрывобезопасность;
- пониженная вредность для здоровья человека (требуется большая концентрация для нанесения вреда здоровью человека).

«CO₂ обретает свойства жидкости при достижении сравнительно высокого уровня давлений при довольно низких температурах испарения и конденсации. Эти давления в некоторых случаях значительно превышают допустимые рабочие значения для типовых стандартных компрессоров (Рис. 3). При сравнении рабочего режима установки с R22, с температурой испарения -35 °C (SST) и температурой конденсации -10 °C (SCT) для CO₂ это соответствует "+30 °C / +64 °C". Такие рабочие условия в реальных установках встречаются весьма нечасто. Несмотря на низкую плотность паров CO₂ по сравнению с галогенсодержащими хладагентами такие термо-физические свойства выражаются в более высокой механической нагрузке на привод компрессора, а следовательно, в необходимости определённого роста требуемого приводного момента.

Самый простой путь приспособления компрессора для работы на CO₂ - это комбинирование в одном типовом корпусе определённой серии компрессоров самой малой объёмной производительности с самой большой мощностью мотора. Для поршневого компрессора это означает использование самого малого диаметра поршней, что приведёт в результате к снижению нагрузки на подшипники и уменьшению изгибающего усилия на каленвал. Это также относится и для подшипников пальцев шатунов, которые также воспринимают значительные нагрузки. В малых поршневых компрессорах пальцы, как правило, скользят непосредственно в соединяемых деталях, но с учётом специфических нагрузок при работе на CO₂ необходимо на пальцы устанавливать дополнительные подшипники скольжения» [8]

Холодильные установки на CO₂ являются наиболее экономически выгодными, поскольку данные машины эффективно работают с системами

рекуперации тепла для ГВС и отопления. Стоимость заправки также является весомым аргументом в пользу данных машин (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные данные энергопотребления холодильных машин

Месяц	R404a ($T_c=45^{\circ}\text{C}$)	R404a ($T_v, \Delta T=30^{\circ}\text{C}$)	R744	Экономия относительно R404a ($T_c=45^{\circ}\text{C}$), %	Экономия относительно R404a ($T_v, \Delta T=30^{\circ}\text{C}$), %
Январь	69189,9	31453,6	17369,1	74,9	44,8
Февраль	62399,5	28337,6	15497,2	75,2	45,3
Март	69251,4	31514,6	18074,3	73,9	42,6
Апрель	66717,3	32827,5	25388,2	61,9	22,7
Май	69883,8	40617,3	40472,4	42,1	0,4
Июнь	68587	45279	49493,3	27,8	-9,3
Июль	70721,4	48686	55931,8	20,9	-14,9
Август	70630,4	45375,7	49481,3	29,9	-9,0
Сентябрь	66803,6	36312,6	33964,6	49,2	6,5
Октябрь	69273,8	32597,7	24222,3	65,0	25,7
Ноябрь	67153,71	30560,8	17682,3	73,7	42,1
Декабрь	68717,8	31219,9	17286,2	74,8	44,6
Всего за год, кВтч	819329,61	434782,3	364863	55,5	16,1

По полученным результатам, представленным в таблице 2, мы видим, что система на CO_2 имеет меньший расход электроэнергии, не считая летнего времени года.

На основе полученных данных построим гистограммы (рисунок 26). Сравнивая рисунки 25 и 26, мы видим, что температура окружающей среды играет ключевую роль в энергетической эффективности работы сравниваемых холодильных установок. Чем ниже температура окружающей среды, тем ниже потребляемая энергия [7].

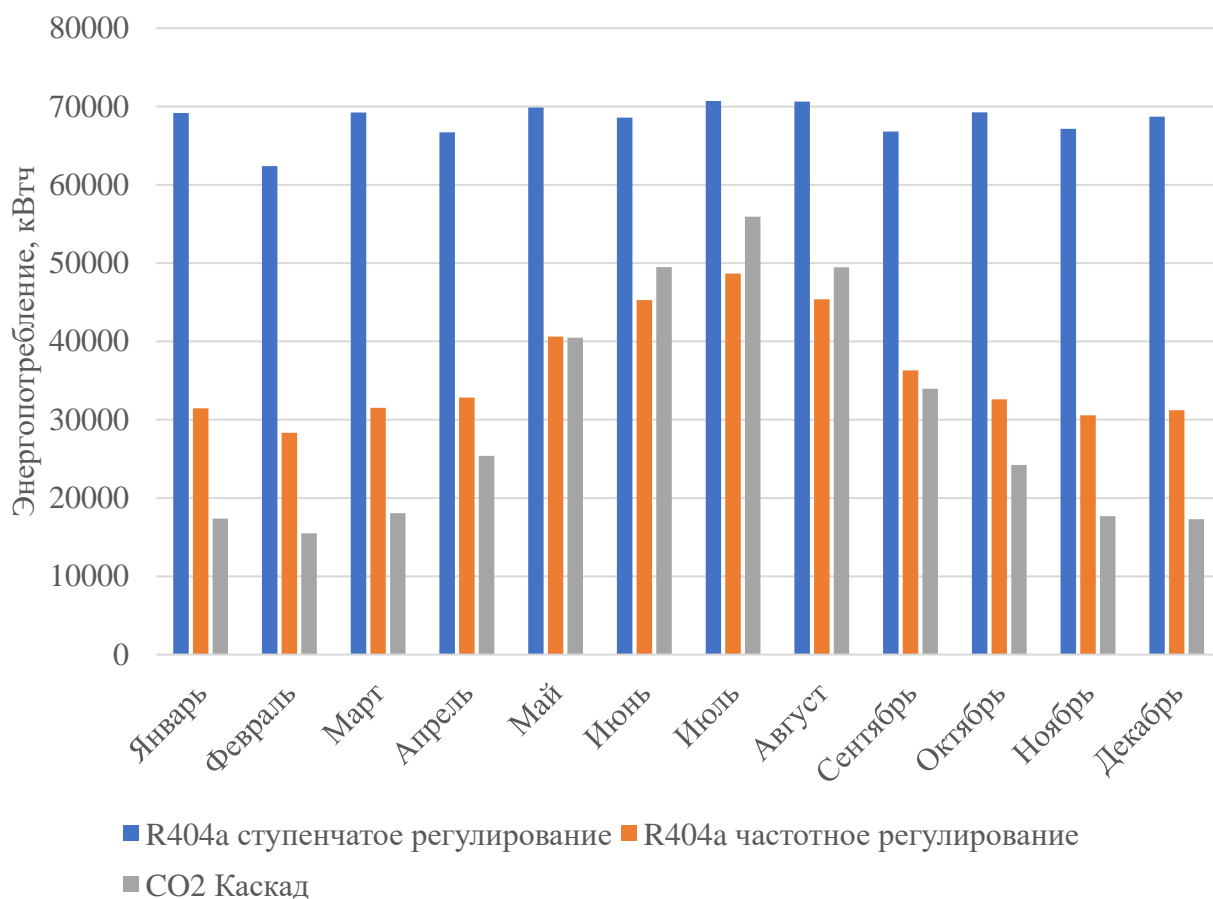


Рисунок 26 – График энергопотребления холодильных машин

Наиболее экономичной является каскадная холодильная машина. Принципиальная схема каскадной холодильной машины с CO₂ хладагентом представлена на рисунке 27.

В качестве контроллера используется АК-РС 783А, который может управлять 12 компрессорами.

Контроллер осуществляет регулирование производительности следующими способами:

- по датчику давления всасывания,
- по температуре охлаждающей жидкости,
- по рабочему давлению в отдельном контуре.

Увеличение и уменьшение производительности производится ступенчато (рисунок 28).

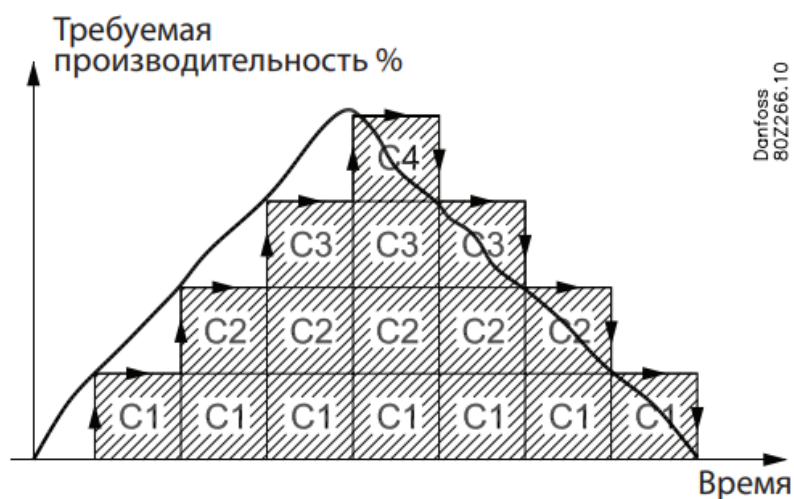


Рисунок 28 – Ступенчатое управление работой группы компрессоров

В контроллере также имеется возможность для частотного управления ведущим компрессором при использовании группы компрессоров. Переменная работа компрессора необходима для заполнения провалов производительности ступенчатого режима.

«Каждая ступень производительности состоит из постоянной и переменной производительности. Постоянная производительность будет соответствовать минимальной скорости компрессора, а переменная производительность будет находиться между мин. и макс. скоростью. Для достижения наилучшего управления переменная производительность должна

быть больше каждой из ступеней производительности, которые она должна перекрывать при управлении. Если присутствуют значительные кратковременные колебания требуемой производительности установки, то это увеличивает потребности в переменной производительности» [17].

Отообразим на рисунке включение и отключение ступени с переменной производительностью на рисунке 29.

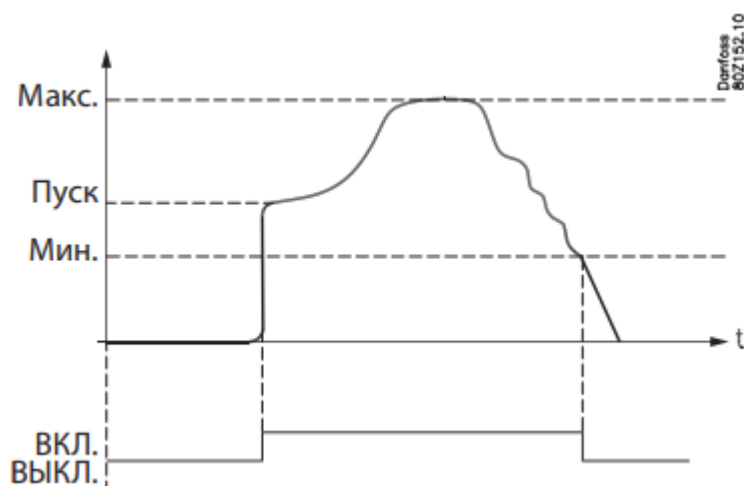


Рисунок 29 – График зависимости производительности компрессора (с переменной нагрузкой под управлением частотного преобразователя) от времени

Проведем расчет стоимости оборудования данной холодильной машины. Расчет стоимости представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Экономический расчет стоимости оборудования каскадной холодильной установки

№ на схеме	Наименование оборудования	Стоимость оборудования, тыс. руб	Стоимость монтажных работ, тыс. руб	Стоимость пусконаладочных работ, тыс. руб	Общая стоимость установки, тыс. руб
1, 25	Компрессор	2 040,00	102,00	40,80	2 182,80
2, 26, 37	Клапан обратный	40,00	2,00	0,80	42,80

Продолжение таблицы 3

№ на схем е	Наименование оборудования	Стоимость оборудовани я, тыс. руб	Стоимость монтажных работ, тыс. руб	Стоимость пусконалаго дных работ, тыс. руб	Общая стоимость установки, тыс. руб
3, 27	Реле высокого давления	30,00	1,50	0,60	32,10
4, 28	Реле низкого давления	50,00	2,50	1,00	53,50
5, 34	Клапан запорный	30,00	1,50	0,60	32,10
6, 29	Маслоотделитель	70,00	3,50	1,40	74,90
7	Масляный фильтр	60,00	3,00	1,20	64,20
8	Регулятор уровня масла	80,00	4,00	1,60	85,60
9	Регулятор ресиверного давления	120,00	6,00	2,40	128,40
10	Вентиль сервопривода	130,00	6,50	2,60	139,10
11	Пилот	115,00	5,75	2,30	123,05
12, 30	Кран шаровый	105,00	5,25	2,10	112,35
13	Воздушный конденсатор	75,00	3,75	1,50	80,25
14	Обратнозапорный вентиль	90,00	4,50	1,80	96,30
15	Линейный ресивер	80,00	4,00	1,60	85,60
16	Предохранительны й вентиль	60,00	3,00	1,20	64,20
17, 23, 38	Фильтр-осушитель	40,00	2,00	0,80	42,80
18	Обзорное стекло	20,00	1,00	0,40	21,40
19, 20	Электромагнитный вентиль и катушка	110,00	5,50	2,20	117,70

Продолжение таблицы 3

№ на схеме	Наименование оборудования	Стоимость оборудования, тыс. руб	Стоимость монтажных работ, тыс. руб	Стоимость пусконаладочных работ, тыс. руб	Общая стоимость установки, тыс. руб
21	Расширительный вентиль	105,00	5,25	2,10	112,35
22	Испаритель-конденсатор	500,00	25,00	10,00	535,00
24	Отделитель жидкости	110,00	5,50	2,20	117,70
31	Ресивер циркуляционный	120,00	6,00	2,40	128,40
32	Многоходовой вентиль	70,00	3,50	1,40	74,90
33	Уровнемер	110,00	5,50	2,20	117,70
35	Насос	400,00	20,00	8,00	428,00
36	Фильтр FIA	50,00	2,50	1,00	53,50
39	Датчик температуры	70,00	3,50	1,40	74,90
40, 41, 42	Преобразователь давления	120,00	6,00	2,40	128,40
43	Щит электрический с датчиком газа и контроллером	110,00	5,50	2,20	117,70
44, 45	Частотный преобразователь	600,00	30,00	12,00	642,00
46	Фильтр синусоидальный	400,00	20,00	8,00	428,00
Итого:		6 110,00	305,50	122,20	6 537,70

Таким образом, управляя производительностью компрессора, в зависимости от требуемой нагрузки, можно снизить потребление электроэнергии на технологические нужды при производстве химической продукции.

3.2 Расчет энергетической эффективности внедрения электродвигателей

«Главным знаком энергоэффективности электродвигателей является КПД. КПД – это отношение полезно использованной к суммарной энергии, полученной системой. Основные потери можно условно разделяют на:

- механические потери (возникают от трения, возникшего в динамических частях двигателя);
- магнитные потери (например, из-за токов Фуко);
- электрические потери (потери в стали при протекании тока).

Для того чтобы классифицировать электрические двигатели была разработана особая классификация, утвержденная организацией ИЕС. Так действующим евростандартом ИЕС60034-30-1 выделяют классы энергоэффективности электродвигателей:

- IE1 – это стандартный тип;
- IE2 – высокая группа эффективности;
- IE3 – сверхвысокий класс;
- IE4 – премиум класс» [25].

Класс энергоэффективности электродвигателя может быть повышен следующими способами:

- «использование аддитивных технологий. Возможность использования широкого спектра материалов: пластиков, керамики, металлических сплавов и даже органических/биоматериалов ставит аддитивные технологии в авангарде современных технологий производства. В настоящее время уже имеется опыт изготовления катушек/обмоток, элементов электрической изоляции, блоков магнитных сердечников статора/ротора, постоянных магнитов, корпуса двигателя, конструктивных элементов на основе использования новых материалов и технологий. Однако, следует отметить относительно низкую технологическую зрелость данной технологии – так,

например, магнитные или обмоточные материалы обладают несколько худшими физическими свойствами по сравнению с существующими решениями. Тем не менее, исследования и разработки в этой области быстро прогрессируют [20].

- использование принципиально нового типа изоляции. В процессе работы от преобразователя частоты в двигателе возникают дополнительные потери в обмотке, вызванные ШИМ-модуляцией, однако именно изоляция является одним из важнейших узлов, определяющих долговечность электрической машины.
- улучшение аэродинамических свойств для снижения вентиляционных потерь путем оптимизации геометрии и топологии ротора.
- увеличение точности обработки и изготовления узлов и деталей двигателя, а также увеличение точности системы управления электрическим приводом за счёт внедрения в работу высокочувствительных датчиков и микроконтроллеров. Микроконтроллеры, применяемые к электромеханике, должны обладать такими характеристиками, как достаточное количество модулей захвата (САР), большое статическое ОЗУ, несколько каналов 12-разрядных АЦП, несколько модулей ШИМ.
- использование двигателя совместно с частотным преобразователем, который позволяет регулировать коэффициент мощности машины, а также наличие ПЧ позволяет использовать синхронные реактивные двигатели, класс энергоэффективности которых может достигать IE5.
- использование подшипников более высокого класса (NSK, SKF), выше 6, расчетный срок службы которых составляет более 40000 часов [13].
- альтернативой к использованию традиционных подшипников может стать внедрение магнитных подшипников, которые сейчас используются только в высокоскоростных электрических машинах. Недостатки в магнитной системе подшипников могут заключаться в сложной системе управления электромагнитами в таких системах» [5].

На рисунке 30 представлен график зависимости КПД электродвигателя от мощности.

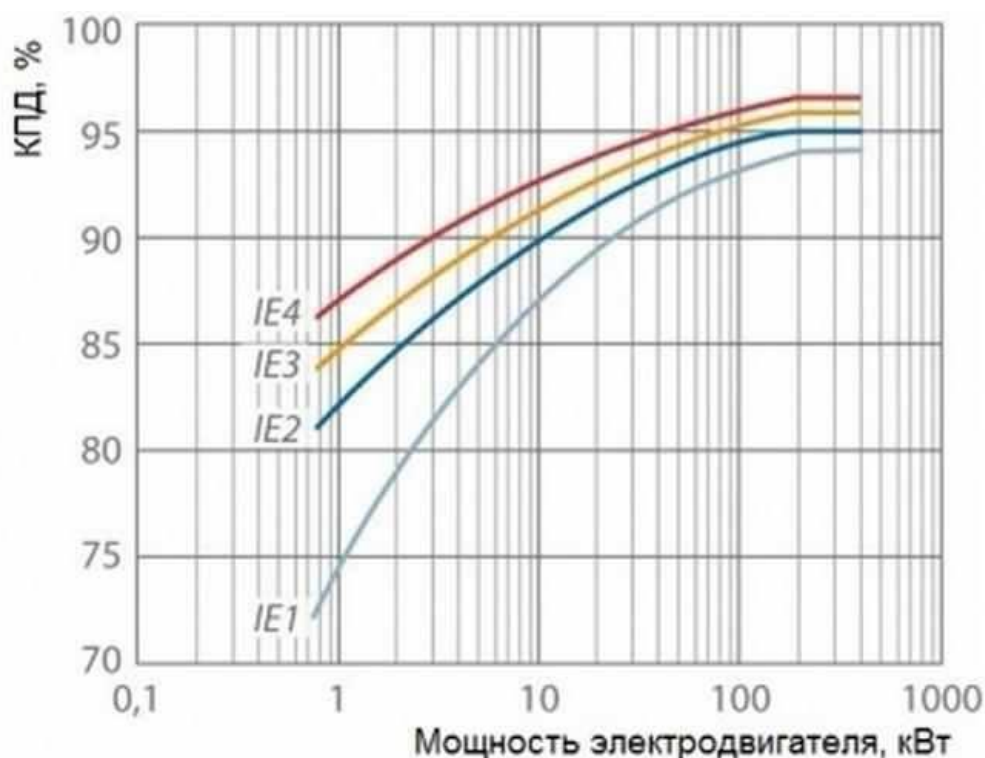


Рисунок 30 – График зависимости КПД электродвигателя от мощности

На рисунке видно, что чем выше КПД выдаваемый асинхронным электродвигателем при заданной нагрузке, тем выше класс энергоэффективности.

Стоимость 1 кВтч электроэнергии примем 4,46 руб. Для установки примем электродвигатели классом энергоэффективности IE2. Данные электродвигатели имеют меньшую мощность, при практически тех же механических характеристиках.

Присоединительные размеры электродвигателей (используемых и устанавливаемых) соответствуют стандарту DIN EN 50347.

Сравнение параметров асинхронных электродвигателей представим в таблице 4, а технико-экономический расчет занесем в таблицу 5.

Таблица 4 – Параметры асинхронных электродвигателей

Оборудование	Месторасположение	Электродвигатель используемый				Электродвигатель устанавливаемый				Механические параметры электродвигателей		
		Тип	η	$\cos\phi$	P, кВт	Тип	η	$\cos\phi$	P, кВт	Мп/Мн	Мmax/Мн	n, об/мин
Насосы рециркуляции	Установка Catofin	АИР 112М2	0,87	0,88	7,5	АИС 112М2-IE2	0,86	0,88	4	2,3	2,3	2972
		АИР 132М4	0,88	0,84	11	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	2,2	2,3	1440
		АИР 250М2	0,94	0,91	90	АИС 250М2-IE2	0,93	0,89	55	2,2	2,3	2975
		АИР 250М4	0,94	0,88	90	АИС 250М4-IE2	0,94	0,86	55	2,2	2,3	1480
Сетевые насосы	Установка Catofin	АИР 250М4	0,94	0,88	90	АИС 250М4-IE2	0,94	0,86	55	2,2	2,3	1480
		АИР 250М6	0,93	0,86	55	АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	2,1	2,1	980
Сетевые насосы	Установка Novolen	АИР 250М4	0,94	0,88	90	АИС 250М4-IE2	0,94	0,86	55	2,2	2,3	1480
		АИР 250М6	0,93	0,86	55	АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	2,1	2,1	980
Компрессоры	Установка Catofin	АИР 315М4	0,95	0,89	200	АИС 315М4-IE2	0,95	0,89	132	2,1	2,2	1480
		АИР 315М2	0,95	0,92	200	АИС 315М2-IE2	0,95	0,9	132	2	2,2	2975

Продолжение таблицы 4

Оборудование	Месторасположение	Электродвигатель используемый				Электродвигатель устанавливаемый				Механические параметры электродвигателей		
		Тип	η	$\cos\phi$	P, кВт	Тип	η	$\cos\phi$	P, кВт	Mп/Мн	Mmax/Мн	n, об/мин
Компрессоры	Установка <i>Novolen</i>	АИР 315М4	0,95	0,89	200	АИС 315М4-IE2	0,95	0,89	132	2,1	2,2	1480
		АИР 315М2	0,95	0,92	200	АИС 315М2-IE2	0,95	0,9	132	2	2,2	2975
Циркуляционные насосы системы отопления и ГВС	Технологические установки, административные корпуса и складские помещения	АИР 112М2	0,87	0,88	7,5	АИС 112М2-IE2	0,86	0,88	4	2,3	2,3	2972
Вентиляционные установки		АИР 132М4	0,88	0,84	11	АИС 132М4-IE2	0,89	0,83	7,5	2,2	2,3	1440
		АИР 250М6	0,93	0,86	55	АИС 250М6-IE2	0,92	0,83	37	2,1	2,1	980
		АИР 250М4	0,94	0,88	90	АИС 250М4-IE2	0,94	0,86	55	2,2	2,3	1480

Таблица 5 – Техничко-экономический расчет внедрения энергоэффективных электродвигателей

Оборудование	Месторасположение	Электродвигатель устанавливаемый		п, шт	Экономия			Стоимость замены электродвигателя, тыс. руб	Общая стоимость, тыс. руб	Простой срок окупаемости, лет
		Тип	Р, кВт		кВт	кВтч/год	тыс. руб			
Насосы рециркуляции	Установка Catofin	АИС 112М2-IE2	4	10	35	102200	455,81	27,33	273,31	0,60
		АИС 132М4-IE2	7,5	4	14	40880	182,32	51,25	204,98	1,12
		АИС 250М2-IE2	55	1	35	102200	455,81	375,80	375,80	0,82
		АИС 250М4-IE2	55	1	35	102200	455,81	375,80	375,80	0,82
Сетевые насосы	Установка Catofin	АИС 250М4-IE2	55	4	140	408800	1 823,25	375,80	1 503,20	0,82
		АИС 250М6-IE2	37	4	72	210240	937,67	252,81	1 011,24	1,08
Сетевые насосы	Установка Novolen	АИС 250М4-IE2	55	4	140	408800	1 823,25	375,80	1 503,20	0,82
		АИС 250М6-IE2	37	4	72	210240	937,67	252,81	1 011,24	1,08
Компрессоры	Установка Catofin	АИС 315М4-IE2	132	4	272	794240	3 542,31	901,92	3 607,68	1,02
		АИС 315М2-IE2	132	4	272	794240	3 542,31	901,92	3 607,68	1,02

Продолжение таблицы 5

Оборудование	Месторасположение	Электродвигатель устанавливаемый		п, шт	Экономия			Стоимость замены электродвигателя, тыс. руб	Общая стоимость, тыс. руб	Простой срок окупаемости, лет
		Тип	Р, кВт		кВт	кВтч/год	тыс. руб			
Компрессоры	Установка <i>Novolen</i>	АИС 315М4-IE2	132	4	272	794240	3 542,31	901,92	3 607,68	1,02
		АИС 315М2-IE2	132	4	272	794240	3 542,31	901,92	3 607,68	1,02
Циркуляционные насосы системы отопления и ГВС	Технологические установки, административные корпуса и складские помещения	АИС 112 М2-IE2	4	16	56	163520	729,30	27,33	437,29	0,60
Вентиляционные установки		АИС 132М4-IE2	7,5	14	49	143080	638,14	51,25	717,44	1,12
		АИС 250М6-IE2	37	8	144	420480	1 875,34	252,81	2 022,49	1,08
		АИС 250М4-IE2	55	4	140	408800	1 823,25	375,80	1 503,20	0,82
Итого		–	–	–	–	5898400	26 306,86	–	25 369,02	–

Применение энергоэффективных электродвигателей класса IE2 позволили снизить потери электрической энергии предприятия на 5898 МВтч/год при работе в одну смену.

Срок окупаемости при внедрении электрических двигателей класса IE2 составляет не более чем 1 год и 2 месяца при полной нагрузке в течение года 8 часов в сутки.

Электродвигатели IE3 являются более дорогостоящими и приводят к окупаемости значительно позже.

Далее проведем технико-экономический расчет внедрения частотных преобразователей.

Используя данные рисунка 20, примем стоимость 1 кВт мощности равной 6 тыс. рублей.

При производстве химической продукции электродвигатели предприятия задействованы на 55-65%. Поэтому использование преобразователей частоты позволит снизить потери электроэнергии.

Простой срок окупаемости рассчитывается как отношение стоимости оборудования к экономии электроэнергии в рублях.

Расчет экономии электроэнергии для каждого электродвигателя представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Экономия электроэнергии при внедрении частотных преобразователей

Оборудование	Месторасположение	Электродвигатель		n, шт	Стоимость преобразователя частоты, тыс. руб	Годовое электропотребление, кВтч	Годовое потребление с преобразователем частоты, кВтч	Экономия		Простой срок окупаемости, лет
		Тип	P, кВт					кВтч/год	тыс. руб	
Насосы рециркуляции	Установка Catofin	АИС 112М2-IE2	4	10	24	11680	7008	46720	208,3712	1,15
		АИС 132М4-IE2	7,5	4	45	21900	13140	35040	156,2784	1,15
		АИС 250М2-IE2	55	1	330	160600	99572	61028	272,1849	1,21
		АИС 250М4-IE2	55	1	330	160600	96360	64240	286,5104	1,15
Сетевые насосы	Установка Catofin	АИС 250М4-IE2	55	4	330	160600	102784	231264	1031,437	1,28
		АИС 250М6-IE2	37	4	222	108040	64824	172864	770,9734	1,15
Сетевые насосы	Установка Novolen	АИС 250М4-IE2	55	4	330	160600	96360	256960	1146,042	1,15
		АИС 250М6-IE2	37	4	222	108040	64824	172864	770,9734	1,15

Продолжение таблицы 6

Оборудование	Месторасположение	Электродвигатель		п, шт	Стоимость преобразователя частоты, тыс. руб	Годовое электропотребление, кВтч	Годовое потребление с преобразователем частоты, кВтч	Экономия		Простой срок окупаемости, лет
		Тип	Р, кВт					кВтч/год	тыс. руб	
Компрессоры	Установка Catofin	АИС 315М4-IE2	132	4	792	385440	231264	616704	2750,5	1,15
		АИС 315М2-IE2	132	4	792	385440	238972,8	585868,8	2612,975	1,21
Компрессоры	Установка Novolen	АИС 315М4-IE2	132	4	792	385440	246681,6	555033,6	2475,45	1,28
		АИС 315М2-IE2	132	4	792	385440	242827,2	570451,2	2544,212	1,25
Циркуляционные насосы системы отопления и ГВС	Технологические установки, административные корпуса и складские помещения	АИС 112 М2-IE2	4	16	24	11680	7008	74752	333,3939	1,15
Вентиляционные установки		АИС 132М4-IE2	7,5	14	45	21900	13140	122640	546,9744	1,15
		АИС 250М6-IE2	37	8	222	108040	64824	345728	1541,947	1,15
		АИС 250М4-IE2	55	4	330	160600	96360	256960	1146,042	1,15
Итого		–	–	–	–	–	–	4169117,6	18594,26	–

Выводы по третьему разделу

Внедрение каскадной холодильной машины позволило снизить потребление электроэнергии на 454467 кВтч в год, что в денежном эквиваленте составляет 2 млн рублей. Поскольку стоимость оборудования составляет 6537 тыс. рублей, то простой срок окупаемости каждой каскадной холодильной машины составит 3 года и 3 месяца.

Применение энергоэффективных электродвигателей класса IE2 позволили снизить потери электрической энергии предприятия на 5898 МВтч/год при работе в одну смену.

Для дополнительного снижения потерь были установлены частотные преобразователи, которые позволяют снижать излишнюю производительность электроприводов технологического оборудования.

Заключение

В начале исследования в данной диссертации был проведен анализ нормативно-правовой базы необходимых для проведения мероприятий по повышению энергоэффективности химического предприятия. При проведении анализа мы выяснили, что прослеживается рост химической промышленности, что требует усиленного проведения энергосберегающих предприятий.

Затем рассмотренное предприятие было охарактеризовано с точки зрения производимой продукции, а также проводимых операций с этой продукцией. Далее были рассмотрены основные группы потребителей химического предприятия. Самыми мощными потребителями химического предприятия являются климатические, газоразделительные, насосные установки. Поэтому на производство химической продукции, а также на осуществление технологических процессов расходуется значительная доля энергетических ресурсов.

Что касается затрачиваемой электроэнергии, то она в значительной степени используется для работы электроприводов насосов, компрессоров технологических установок, а также компрессоров холодильных установок и их вентиляторов (которые установлены в конденсаторном оборудовании). В меньшей степени электроэнергия расходуется на питание электроприводов системы вентиляции, а также на общезаводские нужды химического предприятия.

Поэтому для повышения энергетической эффективности исследуемого объекта были проанализированы различные способы повышения энергетической эффективности, используемые в других областях промышленности. На основании данного исследования были использованы следующие энергосберегающие мероприятия:

- для снижения потерь электрической энергии были установлены двигатели класса IE2. Потери снижены на 5898 МВтч/год при работе

предприятия в одну смену (8 часов). Срок окупаемости при внедрении электрических двигателей класса IE2 составляет не более чем 1 год и 2 месяца при полной нагрузке.

- поскольку технологическое оборудование работает при неполной нагрузке, то были установлены частотные преобразователи, снизившие потери электроэнергии на 4169 МВтч/год. Простой срок окупаемости составляет не более чем 1 год и 3 месяца.
- для снижения потерь электроэнергии на производство холода были установлены две каскадные холодильные машины (одна на установку Catofin, другая на установку Novolen). Срок окупаемости холодильных машин составляет 3 года и 3 месяца.

Научная новизна работы заключается в том, что в ходе проведения исследования были применены современные методики по повышению энергетической эффективности рассматриваемого химического предприятия, которые объединены в одном объекте исследования.

Закупка, демонтаж и монтаж, а также пусконаладка составляют следующие капитальные затраты:

- две каскадные холодильные машины на установки Catofin и Novolen – 13075,4 тыс. рублей;
- энергоэффективные электрические двигатели класса IE2 – 25369,9 тыс. рублей;
- частотные преобразователи – 22278 тыс. рублей.

Общие затраты для внедрения энергосберегающих мероприятий составляют 60723,3 тыс. рублей.

Годовая финансовая экономия после внедрения энергосберегающих мероприятий составляет 46928 тыс. рублей.

Практическая значимость работы заключается в том, что внедрение мероприятий по повышению энергоэффективности химического предприятия позволяет снизить затраты на производство полимеров, тем самым повышает свою конкурентоспособность.

Список используемых источников

1. Анчарова Т. В., Рашевская М. А., Стебунова Е. Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. 415 с.
2. Артюшкин В. Н., Тянь В. К. Энергосбережение при эксплуатации магистральных насосных агрегатов. Москва - Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. 112 с.
3. Афонин А. М., Царегородцев Ю. Н., Петрова А. М., Петрова С. А. Энергосберегающие технологии в промышленности. М : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2020. – 271 с.
4. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. М.: СОЛОН-Пресс, 2020. 268 с.
5. Галунин С.А., Ситников М.А., Лобович А.З., Дмитроченко А.А., Тенденции и новые вызовы в области энергоэффективности электрических машин / Международная научно-практическая конференция «Развивая энергетическую повестку будущего» для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК. Препринт сборника докладов. Санкт-Петербург. 10 - 11 декабря, 2021 г. СПб.: Невская Типография, ООО «Добрые коммуникации», СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 30-34.
6. Глотов В. А., Зайцев А. В. , Ткачук А. П. Работоспособность грузоподъемных машин.. Москва - Берлин : Директ-Медиа, 2019. 159 с.
7. Демонстрационный проект с использованием диоксида углерода. Технико-экономическое обоснование [Электронный ресурс] : Озонобезопасные технологии в промышленности. Сетевое издание "Экология в промышленности". URL: https://hvacccenter.ru/demo_dioksid_ugleroda_obosnovanie (дата обращения 14.07.2022).
8. Каскадные холодильные установки на CO₂ с применением полугерметичных компрессоров BITZER [Электронный ресурс] :

Официальный сайт поставщика холодильного оборудования ООО «Фриготрейд». URL: <https://www.frigodesign.ru/energy-saving-technologies/cascade-installations/cascade-refrigeration-units.php> (дата обращения 14.07.2022).

9. Ковалева В.Д. Повышение энергоэффективности холодильного оборудования [Электронный ресурс] : Актуальные проблемы энергетики. СНТК-74, 2018. С. 494-499.

10. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс] : Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. N 1523-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565068231> (дата обращения 01.04.2021).

11. Пат. 2547344 Российская Федерация, МПК F25B 7/00. Холодильная каскадная установка / заявитель и патентообладатель Новиков В.Б. – № 2011120843/06; заявл. 25.05.2011; опубл. 10.04.2015. Бюл. №10.

12. Полипропилен (PP) [Электронный ресурс] : Официальный сайт ООО Торгово-производственного предприятия «Техноформ». URL: <https://www.technoform.com/ru/material/polypropylene-pp> (дата обращения 01.04.2021).

13. Правила устройства электроустановок. 7-е издание / Ред. Л.Л. Жданова, Н. В. Ольшанская. М.: НЦ ЭНАС, 2013. 104 с.

14. Преобразователи частоты позволяют снизить энергопотребление и повысить эффективность холодильных машин [Электронный ресурс] : Официальный сайт Danfoss. URL: <https://drives.ru/stati/preobrazovateli-chastoty-rozvoluyayut-snizit-energopotreblenie-i-povysit-effektivnost-holodilnyh-mashin/> (дата обращения 02.08.2021).

15. Привод компрессоров [Электронный ресурс] : интернет-ресурс. URL: <http://www.stroitelstvo-new.ru/holodilnye-ustanovki/privod-kompressorov.shtml> (дата обращения 02.08.2021).

16. Проект интегрированного газохимического комплекса в Абтырауской области [Электронный ресурс] : Официальный сайт

Товарищества с ограниченной ответственностью «Kazakhstan Petrochemical Industries Inc.» («Казахстан Петрокемикал Индастриз Инк.»). URL: <https://kpi.kz/ru/activities/ighk-project/> (дата обращения 01.04.2021).

17. Руководство по эксплуатации контроллера производительности с функцией рекуперации АК-РС 781А [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании ООО «Данфосс». URL: https://open.danfoss.ru/file/1368974/show/ak_pc781a.pdf (дата обращения 14.07.2022).

18. Сибикин Ю. Д., Сибикин М. Ю. Технология энергосбережения. М.: ИНФРА-М, 2022. 336 с.

19. Справочное пособие. Стандартные холодильные машины. Решения для коммерческих и полупромышленных холодильных систем [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании ООО «Данфосс». URL: https://assets.danfoss.com/documents/160205/AD368545755008ru-RU0101.pdf?_ga=2.98232927.110584672.1617596272-684530625.1616739667 (дата обращения 14.07.2022).

20. Тепловые машины [Электронный ресурс] : Интернет-энциклопедия Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тепловые_машины (дата обращения 02.08.2021).

21. Термодинамика компрессорного процесса [Электронный ресурс] : Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды . URL: https://studref.com/385518/tehnika/termodinamika_kompressornogo_protsesta (дата обращения 02.08.2021).

22. Технологии CRYOTEC ANLAGENBAU GMBH [Электронный ресурс] : Официальный сайт поставщика промышленного оборудования CRYOTEC Anlagenbau GmbH. URL: <https://cryotec.de/ru/tekhnologii/vozdukhrazdelitelnye-ustanovki/> (дата обращения 07.07.2021).

23. Федеральный закон об энергосбережении – 10 лет в действии [Электронный ресурс] : Региональная энергетика и энергосбережение: РЭЭ. URL: <https://energy.s-kon.ru/zdorovye-glavniy-prioritet-kompanii-enel-rossiya-2-2-2-2-2/> (дата обращения 01.04.2021).

24. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 23.11.2009 №261 (ред. от 26.01.2020). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (дата обращения 01.04.2021).

25. Энергоэффективность электродвигателей [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании ООО «УЭСК». URL: <https://uesk.org/stati/energoeffektivnost-elektrodvigatelej/> (дата обращения 14.07.2022).

26. Shabdin N.H., Padfield R. Sustainable Energy Transition, Gender and Modernisation in Rural Sarawak. Chemical Engineering Transactions vol.56, 2018. p.259-264.

27. Donoso P., Schurch R., Ardila J., Orellana L. Analysis of Partial Discharges in Electrical Tree Growth Under Very Low Frequency (VLF) Excitation Through Pulse Sequence and Nonlinear Time Series Analysis. IEEE Access Vol. 8. 2020. p.673-684.

28. Benthous M. A coupled technological-sociological model for national electrical energy supply systems including sustainability. Energy, Sustainability and Society Vol. 9, №1. 2019. p.1-16.

29. Escrivá-Escrivá G., Roldán-Blay C., Roldán-Porta C., Serrano-Guerrero X. Occasional Energy Reviews from an External Expert Help to Reduce Building Energy Consumption at a Reduced Cost. Energies Vol. 12, №15. 2019. 14 p.

30. Xiao Han, Jing Qiu, Lingling Sun, Wei Shen, Yuan Ma, Dong Yuan. Low-carbon energy policy analysis based on power energy system modeling. Energy Conversion and Economics. Energy Conversion and Economics. 2020. p.34-44.