

Министерство энергетики Российской Федерации

Петербургский энергетический институт повышения  
квалификации руководящих работников и специалистов  
(ПЭИПК)

Кафедра электроэнергетического оборудования  
электрических станций, подстанций  
и промышленных предприятий

Монастырский А.Е.

Регенерация, сушка и дегазация  
трансформаторного масла

Учебное пособие

Дополнительный гираж

Санкт-Петербург  
2005

Регенерация, сушка и дегазация трансформаторного масла

Учебное пособие

Одобен и рекомендован к опубликованию Ученым Советом Института

Протокол № 1 от 11 сентября 1996 года

В учебном пособии рассматриваются основные аспекты регенерации трансформаторных масел, а также практические проблемы их сушки и дегазации. Приводится описание основного технологического оборудования для обработки масел. Предназначено для специалистов, занимающихся обслуживанием и ремонтом маслянаполненного оборудования.

Научный редактор кандидат технических наук, доцент Таджикиев А.И.

© Издание Петербургского энергетического института повышения квалификации руководящих работников и специалистов Минэнерго РФ

В трансформаторном оборудовании высших классов напряжения в качестве теплопроводящей и изолирующей среды широко используют нефтяные трансформаторные масла, которые применяются в качестве жидкой компоненты в двух видах изоляционных конструкций: маслобарьерная изоляция (МБИ) в качестве главной изоляции силовых трансформаторов и реакторов и бумажномасляная изоляция (БМИ) в качестве продольной изоляции, а также изоляция высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов тока и напряжения. В первом случае трансформаторное масло является основной изолирующей средой и определяет электрическую прочность всей конструкции. Во втором случае основной изолирующей средой является твердая компонента - целлюлозные материалы в виде бумаги или электрокартона, а трансформаторное масло используется для пропитки твердой компоненты с целью заполнения в ней газовых пор и воздушных прослоек.

Во всех случаях основным требованием, предъявляемым к трансформаторным маслам, является высокая электрическая прочность, достигаемая путем тщательной очистки, сушки и дегазации масла перед заливкой в оборудование на стадии изготовления или ввода в эксплуатацию.

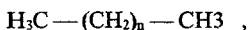
В современном трансформаторном оборудовании масло работает в достаточно жестких условиях: высокая напряженность электрического поля, высокая температура и др. Поэтому, наряду с высокой электрической прочностью, трансформаторные масла должны обладать высокой стабильностью к окислению, газостойкостью в электрическом поле, низкими диэлектрическими потерями. В процессе эксплуатации трансформаторные масла подвергаются термохимическому и электрическому старению, что приводит к снижению их эксплуатационных характеристик, связанному с изменением молекулярного состава масла. При этом, срок службы трансформаторных масел должен составлять 10 лет и более. После достижения предельных эксплуатационных характеристик трансформаторное масло в оборудовании должно заменяться новым. Отработанное масло подлежит либо утилизации, либо регенерации. Под регенерацией понимается совокупность технологических операций, изменяющих молекулярный состав отработанных масел, с целью максимального приближения его к молекулярному составу новых масел. Экономическая целесообразность регенерации масел наиболее резко проявляется в последние годы в связи с существенным увеличением стоимости новых масел и их дефицитом.

В процессе транспортировки и хранения новых и регенерированных масел при контакте их с воздухом происходит растворение в масле молекул воздуха и воды, т.е. увеличение влажности и общего газосодержания масла. В то же время к маслам, заливаемым в оборудование высших классов напряжения, предъявляются достаточно жесткие требования по этим параметрам. Поэтому, перед заливкой в оборудование, масла подвергаются сушке и дегазации. Эти технологические операции направлены на удаление из масла, соответственно, влаги и растворенного газа.

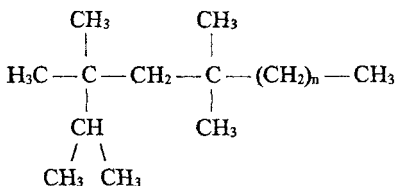
В настоящем учебном пособии рассматриваются теоретические основы и практические методы перечисленных технологических операций, а также технологическое оборудование, используемое при их реализации.

# 1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАСЕЛ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

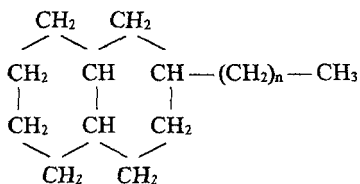
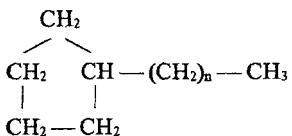
Трансформаторные масла представляют собой сложную многокомпонентную систему, получаемую путем очистки дистиллятов нефти с температурой кипения 280-430°C. Основными компонентами трансформаторных масел являются углеводородные соединения, которые представлены, в основном, насыщенными и ароматическими углеводородами. Насыщенные углеводороды составляют основную часть масла, их содержание в масле может достигать 95%. Насыщенные углеводороды подразделяются на парафиновые и нафтеновые. Парафиновые углеводороды представляют собой линейные структуры с прямой цепью (нормальные парафины):



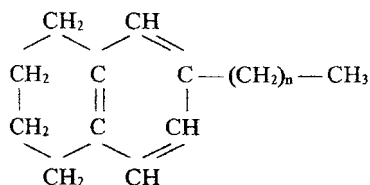
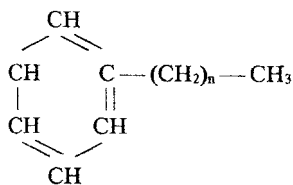
или разветвленной (изопарафины):



Нафтеновые углеводороды (циклопарафины) содержат одно или несколько (пяти- или шестичленных) колец, каждое из которых может иметь одну или несколько линейных боковых цепей. В зависимости от числа колец в молекуле различают моноциклические, бициклические, трициклические и т.д. нафтены:



Содержания ароматических углеводородов в маслах могут достигать 40%. К ароматическим относятся углеводороды, содержащие одно или более ароматических ядер (бензольных колец), которые могут быть соединены с нафтеновыми кольцами и (или) боковыми парафиновыми цепями:



Помимо углеводородных компонентов в состав масел входят соединения, содержащие серу, азот, кислород и др. атомы. Неуглеводородные соединения могут иметь как самостоятельную структуру, так и соответствующий углеводородный скелет с одним или несколькими атомами азота, серы и др. элементов. В число неуглеводородных компонентов трансформаторного масла входят асфальто-смолистые вещества, серо- и азотсодержащие органические соединения, нафтеновые кислоты, эфиры, спирты и соединения, содержащие металлы.

Содержание асфальто-смолистых веществ в трансформаторном масле обычно не превышает 1-2,5%. Однако, даже такое малое количество оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства масел. Асфальто-смолистые соединения придают трансформаторному маслу характерный цвет; некоторые из них обладают ингибирующим действием, другие пассивируют антиокислительные присадки. При окислении смолы переходят в состав осадка.

Содержание серы в товарных трансформаторных маслах обычно не превосходит 0,4%, при этом наиболее опасными являются коррозионно-активные соединения серы.

Количество азотистых соединений в нефти невелико и может достигать 0,8%. Несмотря на небольшое количество они играют существенную роль в процессах окисления нефтепродуктов.

Нафтеновые кислоты играют существенную роль в образовании нерастворимых осадков, поэтому они в значительной мере удаляются при очистке дистиллятов и в товарных маслах их концентрация не превышает 0,02% (что

соответствует кислотному числу 0,05 мг КОН на 1 г масла). Кроме нафтеновых кислот в маслах могут содержаться в небольших количествах и другие кислородсодержащие соединения: фенолы, эфиры, спирты и пр.

Таковы основные компоненты, входящие в состав трансформаторных масел, основными из которых, по количеству, являются достаточно крупные углеводородные соединения. В процессе эксплуатации под действием температуры в углеводородных соединениях начинаются процессы термохимической деструкции молекул с образованием активных радикалов. При этом на первом этапе старения происходит окисление радикалов с образованием гидроперекисей, которые в ходе дальнейшего окислительного процесса приводят к образованию устойчивых продуктов окисления - органических кислот, карбонильных соединений, спиртов, фенолов. Дальнейшее старение масла приводит к появлению продуктов конденсации - простых и сложных эфиров, смолистых веществ. При глубоких формах старения образуются также летучие продукты-окислы углерода, воды и др. Вода оказывает достаточно сильное каталитическое воздействие на процессы окисления масла. Образование низкомолекулярных кислот приводит к увеличению скорости старения масла и других компонентов изоляции, коррозии металлов. Образование продуктов конденсации приводит к появлению нерастворимых в масле соединений, которые выпадают в виде шлама. Смолистые вещества и шлам осаждаются на элементах конструкции аппаратов и их изоляции, вызывая ухудшение условий теплоотвода, рост диэлектрических потерь и в конечном итоге увеличивают скорость старения оборудования.

Все перечисленные продукты старения масел являются в той или иной степени вредными, так как нарушают нормальную работу оборудования.

Скорость процессов старения в масле не постоянна. На первом этапе эксплуатации, который носит название индукционный период, скорость мала и почти не увеличивается. В дальнейшем, по мере накопления продуктов старения, скорость резко увеличивается.

Помимо продуктов, образующихся в результате окисления масел при нормальных рабочих температурах, в масле образуются газообразные продукты, появление которых связано обычно либо с локальными перегревами элементов конструкций, либо с воздействием электрических разрядов в изоляции. К ним относятся, в первую очередь, водород, углеводородные газы (метан, этановые и др.), окислы углерода. Появление газообразных продуктов в ограниченных количествах, как правило, не столь опасно по сравнению с продуктами окисления масел, так как газообразные продукты растворяются в масле и мало влияют на его эксплуатационные свойства. Однако, по мере насыщения масла газообразными продуктами или при интенсивном их образовании в локальных объемах может наступить ситуация, при которой скорость газообразования превысит скорость растворения газа и он выделится в виде пузырьков. При этом резко снижается электрическая прочность масла и возможно появление мощных частичных разрядов и даже пробой изоляции.

Анализ процессов старения масла и продуктов, образующихся при старении, позволяет сделать вывод, что для восстановления эксплуатационных свойств масел из них надо удалять низкомолекулярные кислые продукты, высокомолекулярные нерастворимые в масле осадки (шламы), воду и газообразные продукты.

Описанные механизмы старения реализуются для всех типов масел не зависимо от использованного для их изготовления сырья, процентного состава компонентов, методов очистки нефтяных дистиллятов и др. факторов. Однако,

скорости процессов старения сильно зависят от перечисленных факторов. В связи с этим все трансформаторные масла делятся на марки, определяемые исходным сырьем, методами очистки и финишной обработки. Различные марки масел имеют различные преимущественные сферы применения. В таблице 1 (см. приложение) приведены основные марки отечественных масел, используемых на энергопредприятиях.

По показателю противоокислительной стабильности товарные масла существенно отличаются друг от друга и их условно можно разделить на три группы:

I группа - ТК<sub>н</sub>, ТА<sub>н</sub>, ТС<sub>н</sub>;

II группа - Т-750, Т-1500;

III группа - ГК, ГБ.

Если принять индукционный период окисления масел I группы за 1, то для II группы он составит 2-2,5, а для III группы - 4-5. Для снижения скорости окисления масел и увеличения индукционного периода в трансформаторные масла как на стадии производства, так и в эксплуатации добавляются антиокислительные присадки, являющиеся ингибиторами окисления масла. Наибольшее распространение в настоящее время имеет присадка ионол.

Производимые товарные масла должны удовлетворять нормативным требованиям по ряду характеристик, определяемым соответствующими нормативными документами (ГОСТ и ТУ). Основные требования к качеству трансформаторных масел приведены в таблице 2. Помимо требований, предъявляемых к товарным маслам существуют так называемые эксплуатационные характеристики, которым должны удовлетворять масла при заливке в оборудование и при его эксплуатации. Значения эксплуатационных характеристик при заливке оборудования приведены в таблице 3, а при эксплуатации - в таблице 4.

Если в процессе эксплуатации характеристики масла превышают допустимые, необходимо проведение соответствующей технологической обработки масла. При этом необходимо иметь в виду следующее: снижение пробивного напряжения обусловлено обычно повышением влажности масла или загрязнение его механическими примесями. Увеличение числа и содержания водорастворимых кислот связано с накоплением продуктов окисления масел, появлением "тяжелых" продуктов, а снижение температуры вспышки - появлением "легких", летучих продуктов. Диелектрические потери, так же как и растворимый шлам, заметно возрастают при появлении полярных "тяжелых" продуктов.

## 2. МЕТОДЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАСЛА В ЭКСПЛУАТАЦИИ

В процессе эксплуатации, как было показано в главе 1, в масле образуются различные продукты, снижающие его эксплуатационные характеристики и подлежащие удалению. Удаление продуктов старения масла может производиться либо постоянно в процессе эксплуатации оборудования, либо периодически при достижении эксплуатационными характеристиками предельно допустимых значений. Настоящая глава посвящена рассмотрению методов удаления продуктов старения в эксплуатации.

Для удаления продуктов окисления масла в эксплуатации на работающем оборудовании устанавливаются специальные устройства, обеспечивающие очистку масла от различных продуктов окисления. Наибольшее распространение для очистки масла в эксплуатации получили термосифонные фильтры и адсорберы. Принцип действия этих устройств основан на поглощении соответствующих продуктов старения масел поверхностно-активными веществами - сорбентами. В термосифонных фильтрах осуществляется термодиффузная циркуляция масла сверху вниз через внешний цилиндр, заполненный сорбентом. В адсорберах циркуляция масла принудительная, осуществляемая с помощью масляного насоса, прокачивающего масло снизу вверх. Эффективность очистки масла определяется в основном скоростью потока масла и свойствами сорбента.

Действие сорбента основано на процессах адсорбции, т.е. поглощение вещества (адсорбата) поверхностью сорбента. Молекулы адсорбата испытывают притяжение со стороны поверхности сорбента и оседают на ней, покрывая эту поверхность слоем адсорбируемых молекул. При этом химической реакции не происходит и адсорбированные молекулы сохраняют свою индивидуальность. Адсорбционные силы имеют ту же природу, что и силы межмолекулярного взаимодействия, и начинают проявляться при приближении молекул адсорбата к поверхности сорбента на расстояние, соизмеримое с размерами молекул. Поэтому наибольшей эффективностью обладают сорбенты, имеющие пористую структуру с размерами пор соизмеримыми с размерами молекул адсорбата. В зависимости от размера пор различают крупнопористые сорбенты, к которым относятся силикагель, крупнопористые стекла, большинство природных сорбентов, и мелкопористые - активированные угли, мелкопористые стекла, цеолиты. Крупнопористые сорбенты адсорбируют тяжелые продукты окисления масел, размер молекул которых больше, чем молекулы углеводородов, составляющих

масло. Мелкопористые сорбенты, имеющие размер пор менее 5-6 А, не пропускают через свои поры углеводородные составляющие масла, имеющие размер 7-8 А, но быстро поглощают низкомолекулярные продукты окисления масла, воду и газообразные продукты - метан, этановые, окислы углерода.

Скорость адсорбции по мере эксплуатации сорбентов уменьшается и после достижения сорбентом равновесия процесс адсорбции прекращается. При этом необходимо либо заменять сорбент, либо регенерировать его. Экономичность адсорбционного процесса в значительной степени зависит от режима регенерации сорбента, требующей наибольших энергозатрат.

Для заполнения термосифонных фильтров и адсорберов чаще всего используют крупнопористые сорбенты. Существуют как природные сорбенты - гумбрин, диатомиты, курьинская и волжская опоки, зикеевская земля и др., так и синтетические, наиболее распространенные из которых - силикагели. Достоинство природных сорбентов состоит в малой их стоимости, поэтому после насыщения



сорбентов можно заменить их на новые. Наилучшие результаты получаются при использовании курьинской белой опоки, эстонской глины и зикеевской земли. Синтетические адсорбенты в силу высокой их стоимости целесообразно применять лишь при условии их многократного восстановления и повторного использования.

Из мелкопористых сорбентов наибольшее распространение для регенерации масла получили цеолиты. Цеолиты также делятся на природные и синтетические. До недавнего времени считалось, что залежи природных цеолитов невелики, поэтому, несмотря на высокие сорбционные свойства, промышленное применение их было ограничено. В настоящее время открыт ряд крупных месторождений природных цеолитов, поэтому, учитывая, что стоимость подготовки природных цеолитов примерно в сто раз ниже стоимости изготовления синтетических, первые могут широко применяться в системах регенерации масла. Наибольшее распространение из природных цеолитов получают шабазит, гмелинит (диаметр пор около  $5 \text{ \AA}$ ), натрийморденит ( $4,4 \text{ \AA}$ ), левинит, калийморденит ( $3,8 \text{ \AA}$ ).

Синтетические цеолиты, состоящие из окиси кремния, окиси алюминия и катиона какого-либо металла разделяются на типы А и X, основные различия которых заключаются в различном содержании ионов алюминия и кремния и в различиях структуры. При этом окна пор цеолитов типа А имеют средний диаметр  $4,2 \text{ \AA}$ , а типа X - ( $8-10$ )  $\text{ \AA}$ . Сорбционные свойства синтетических цеолитов зависят от катиона металла и возрастают от калия до кальция:  $\text{Ca} > \text{Na} > \text{K}$ .

Как отмечалось выше, крупнопористые сорбенты удаляют из масла высокомолекулярные продукты, причем эффективность их работы увеличивается с уменьшением влажности масла. Мелкопористые сорбенты адсорбируют низкомолекулярные продукты и воду. Поэтому наибольшая эффективность очистки масла в эксплуатации достигается при комбинированном использовании в термосифонных или адсорбционных фильтрах мелко- и крупнопористых сорбентов. Фильтры заполняются таким образом, чтобы масло сначала проходило через мелкопористый сорбент, а затем через крупнопористый. Количество мелкопористого сорбента составляет обычно треть общего объема фильтра, а общее количество сорбента зависит от общего количества масла в аппарате и составляет  $0,8-1,25\%$  массы залитого масла.

Использование комбинированного заполнения термосифонных и адсорбционных фильтров позволяет удалять из масла практически все продукты его старения, включая и воду, однако, использование для удаления воды в эксплуатации мелкопористых сорбентов экономически нерационально, так как они достаточно быстро насыщаются влагой и приходится сравнительно часто производить регенерацию или замену сорбента. Поэтому, вопросом сушки масел или, точнее, изоляции в эксплуатации уделяется особое внимание.

Появление влаги в масле обусловлено не только процессами его старения, но в большей степени старением твердой изоляции, а также попаданием влаги извне оборудования, например, из воздуха для трансформаторов со свободным дыханием. При этом влага распределяется между компонентами изоляции крайне неравномерно; основное количество воды - до  $90-95\%$  сосредоточено в твердой целлюлозной изоляции. В этих условиях даже полное удаление влаги из масла не приведет к заметному снижению общего влагосодержания изоляции оборудования. Рассмотрение кинетики удаления влаги из изоляции показывает, что наиболее просто удаляется влага из масла. Сушка масла может производиться

различными способами, наиболее эффективным из которых является вакуумная сушка. Удаление влаги из масла приводит к нарушению равновесного влагосодержания в системе масло-целлюлоза и влага из целлюлозы начинает переходить в масло. Поверхностные слои целлюлозы подсушиваются достаточно быстро, так как скорость диффузии влаги на поверхности раздела твердой и жидкой изоляции сравнительно велика. Скорость же диффузии внутри целлюлозы значительно ниже. Поэтому после удаления влаги из масла и поверхности целлюлозы процесс сушки резко замедляется, несмотря на то, что общее влагосодержание почти не изменилось. Постоянные времени диффузии влаги из толщи твердой изоляции в масло оцениваются десятками и даже сотнями часов. Поэтому для сушки масла в эксплуатации использование интенсивных методов, требующих, как правило, больших энергозатрат нецелесообразно. Рациональнее использовать малопроизводительные способы, которые позволяют с помощью простого и дешевого оборудования, требующего малых энергозатрат, производить сушку масла со скоростями, соизмеримыми со скоростью диффузии влаги в твердой изоляции. Такие устройства могут устанавливаться на работающем оборудовании и производить постоянную сушку его изоляции в эксплуатации.

Одним из примеров таких устройств может служить электростатический осушитель, схема которого показана на рис. 1. Принцип действия электростатического осушителя состоит в следующем: при рабочей температуре трансформатора (60-80 °C) количество влаги, растворенной в масле, за счет поступления ее из твердой изоляции увеличивается по сравнению с нормальной температурой. При быстром охлаждении масла в основном и дополнительном охладителях влага не успевает покинуть масло, а за счет снижения растворимости воды в масле при снижении температуры переходит из растворенного состояния в эмульгированное, образуя микроскопические капли. Масло с эмульгированной влагой поступает в коагулятор, в котором на игольчатых электродах создается резконеоднородное электрическое поле. Происходит втягивание капель влаги в область сильного поля и слияние их в более крупные капли. После коагуляции масло с крупными (до 150 мкм) каплями поступает в выделитель, где под действием слабонеоднородного поля капли воды осаждаются на поверхности стекла, закрывающего внешний электрод, образуя водяной слой. С помощью полиэтиленовых лопастей на роторе выделителя образовавшийся водяной слой снимается со стекла и стекает на дно выделителя, откуда вода периодически сливается. Подсушенное масло через фильтр подается обратно в трансформатор. Достоинствами электростатического осушителя являются:

1. непосредственное выделение влаги из масла;  
без использования дополнительной среды или реагента;
2. простота и низкая стоимость устройства;
3. низкое энергопотребление;
4. дополнительная очистка масла от механических примесей,  
осаждающихся вместе с водой на стекле и смываемых на дно выделителя.

К недостаткам следует отнести необходимость источника высокого напряжения, наличие вращающихся деталей, снижающих надежность устройства, и необходимость периодического слива воды.

Еще один способ удаления влаги непосредственно из масла связан с использованием активированного алюминия. При этом способе осуществляется принудительная циркуляция масла через баки с активированным алюминием, который эффективно поглощает воду, растворенную в масле. Бак с активированным алюминием может подключаться последовательно с адсорбционным фильтром перед ним. Эффективность такого способа сушки

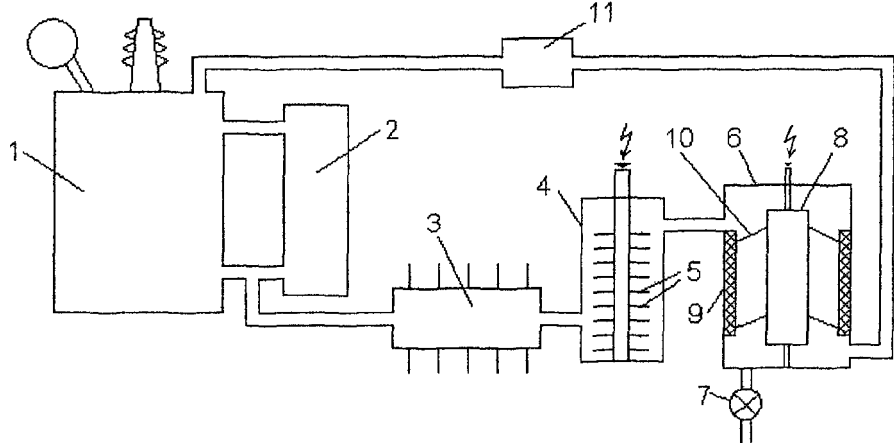


Рис. 1. Схема электростатического осушителя.

1-трансформатор; 2-охладитель; 3-дополнительный охладитель; 4-коагулятор; 5-игольчатые электроды; 6-выделитель; 7-выпуск воды; 8-ротор; 9-стекло; 10-полиэтиленовые лопасти; 11-фильтр.

достаточно велика. Общая стоимость сушки до 1,5 раза ниже, чем вакуумная. К недостаткам следует отнести также наличие движущихся деталей в насосе и необходимость периодической замены окиси алюминия.

В описанных осушителях происходит непосредственное выделение влаги из масла. Другим способом сушки масла является сушка с помощью удаления влаги из газа, находящегося в контакте с маслом. При контактировании масла с сухим газом влага, содержащаяся в масле, переходит в газ и вместе с ним удаляется из осушаемой среды. В некоторых случаях в качестве реагентного газа используют воздух, однако в этом случае вместе с осушкой масла происходит быстрое насыщение его кислородом, что приводит к интенсификации процессов окисления масла. Поэтому выгоднее использовать либо азот, либо инертные газы. В зависимости от способа смешения масла с газом различают установки барботажного, скрубберного и циркуляционного типов. На установках барботажного типа (см. рис. 2) газ нагнетается компрессором в нижнюю часть осушителя, где проходит через слой твердого влагопоглотителя, после чего направляется в газораспределитель, опущенный под слой осушаемого масла, например, в бак-расширитель трансформатора. Газораспределитель имеет большое количество отверстий, выходя из которых газ в виде большого количества пузырьков с сильно развитой поверхностью проходит через толщу масла, поглощая растворенную в нем влагу. Увлажненный газ, собравшийся над поверхностью масла, подается на вход компрессора.

Несмотря на очевидные достоинства и простоту описанного устройства, оно содержит движущиеся части (компрессор) и требует периодической смены осушителя. Еще более простое устройство, свободное от указанных недостатков, представляет собой термоэлектрический осушитель, схема которого показана на рис. 3. Принцип действия такого осушителя основан на вымораживании паров воды из воздуха, находящегося в баке-расширителе трансформатора, и смещении равновесного влагосодержания в системе масло-воздух в сторону воздуха. Воздух из бака расширителя за счет термосифонного потока циркулирует по замкнутому контуру, проходя через канал термоэлемента. Термоэлемент, действие которого основано на эффекте Пельтье с использованием металлических, а чаще полупроводниковых элементов, охлаждает стенки своего канала до температуры  $(-70)^{\circ}\text{C}$  и ниже. При этом влага, содержащаяся в проходящем воздухе, осаждается на стенках канала в виде изморози и льда. Осушенный воздух возвращается в бак-расширитель, где происходит его увлажнение за счет воды, растворенной в масле. Лед и изморозь периодически удаляются из канала путем нагревания его до температуры  $(+10)^{\circ}\text{C}$ , что осуществляется переключением направления тока. При этом вода собирается в нижней части канала и стекает по отводящей трубке. При последующем охлаждении остатки воды в нижней части канала замерзают и плотно закрывают отводящую трубку. Период нагрева длится несколько минут и повторяется 1-2 раза в сутки. Общее энергопотребление такого устройства составляет порядка 100 Вт. Достоинства такого метода очевидны: устройство не требует эксплуатационных затрат, отсутствуют движущиеся части, низка стоимость устройства и мала потребляемая энергия.

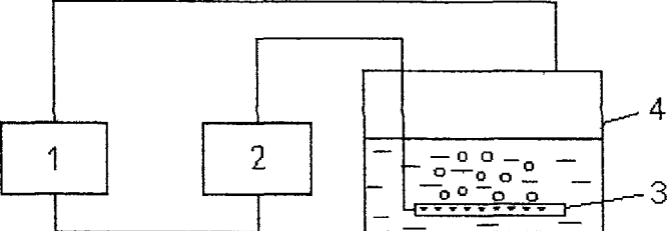


Рис. 2. Схема маслоосушителя барботажного типа.  
 1-компрессор; 2-осушитель; 3-газораспределитель; 4-бак с осушаемым маслом.

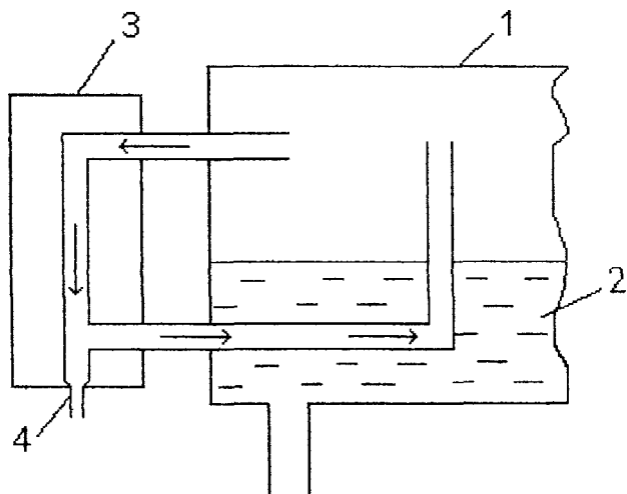


Рис. 3. Схема термоэлектрического осушителя.  
 1-бак расширитель; 2-масло; 3-термоэлемент; 4-трубка для слива воды.

### 3. МЕТОДЫ РЕГЕНЕРАЦИИ, СУШКИ И ДЕГАЗАЦИИ МАСЕЛ

В предыдущей главе были рассмотрены основные приемы поддержания характеристик масел на работающем оборудовании. Однако на практике существует большое количество оборудования, не охваченного описанными системами. Поэтому в процессе эксплуатации в масле накапливаются продукты старения и наблюдается ухудшение его эксплуатационных характеристик. При достижении ими предельно допустимых значений масло необходимо сливать и подвергать регенерации, а оборудование заливать свежим маслом. Перед заливкой в оборудование, а также при необходимости доливки масла в действующее оборудование (например, после отбора проб из маломасляного оборудования), масло должно быть подготовлено с целью снижения его влажности и общего газосодержания, так как в процессе длительного хранения не всегда удается избежать увлажнения и газонасыщения масла. В настоящей главе будут рассмотрены вопросы регенерации масла, слитого из оборудования, а также методы подготовки масла перед его заливкой.

Как было показано в главе 1, все методы регенерации и подготовки масла направлены на удаление из него вредных продуктов окисления и различного рода примесей. При этом различают методы чисто физической очистки, при которых не меняется химический состав масла, и методы физикохимической очистки, при которых из масла удаляются низко- и высокомолекулярные продукты окисления масел. К физическим методам очистки относятся: сепарация в вакуумных центрифугах, фильтрация через механические фильтры, вакуумная сушка и дегазация. Методы физикохимической очистки включают в себя перколяционную и контактную очистку с помощью крупно- и мелкопористых сорбентов, а также щелочную и кислотную очистку. Рассмотрим более подробно вышеперечисленные методы.

При образовании в масле или при попадании в него извне различного рода примесей, включающих эмульгированную влагу, механические примеси, коагулированные высокомолекулярные продукты окисления масла и др., происходит снижение пробивного напряжения, увеличение  $tg\delta$  и других характеристик. В этом случае для восстановления масла может использоваться метод центробежной сепарации, основанный на разделении веществ, имеющих разную плотность. При вращении цилиндрического сосуда с жидкостью, поверхность жидкости принимает форму воронки, а при больших скоростях вращения глубина воронки делается значительно больше глубины сосуда и жидкость, обнажая дно, переходит на стенки. Если во вращающийся барабан подавать смесь, состоящую из масла, твердых частиц и воды, то под действием центробежной силы смесь будет двигаться вдоль барабана и одновременно радиально по направлению к боковой стенке. Твердые частицы образуют на стенках осадок, вода - внешнее кольцо, масло - внутреннее кольцо. При очистке масла пользуются тарельчатыми центрифугами. Внутри барабана такой центрифуги помещается пакет из большого числа тарелок - усеченных конусов из тонкого листового металла, имеющих несколько отверстий по окружности. Эмульсия разделяется центробежной силой в тонких слоях (0,5-1,5 мм) между тарелками, что ускоряет разделение. Тяжелая и легкая жидкости выводятся из барабанов на разных уровнях. В зависимости от степени увлажнения масла, барабан центрифуги может работать в режиме кларификации, при котором незначительные количества воды и механические примеси выделяются из масла и собираются в грязевике барабана; и режиме пурификации: когда при большом влагосодержании масла (более 0,5%) вода отводится из барабана непрерывно. Интенсивность процессов сепарации повышается с увеличением температуры,

однако, если центрифуга работает при атмосферном давлении, происходит интенсивное насыщение масла воздухом при повышении температуры выше 70°C наблюдается интенсификация процессов окисления масла. Поэтому в последнее время используются центрифуги, в которых процессы сепарации проводятся под вакуумом. Необходимо учитывать, что в центрифугах без вакуума выделяется лишь эмульгированная влага, поэтому нецелесообразно использование центрифуги в замкнутом контуре, так как в этом случае производительность по мере удаления из масла влаги резко падает. Достоинство метода состоит в том, что при очистке масла от механических примесей не используются дополнительных элементов и веществ, способных вносить в масло собственные примеси. К недостаткам следует отнести сложность самого технологического оборудования, его настройки, необходимость частой очистки, что в конечном итоге приводит к низкой производительности.

Эффективное удаление механических примесей, а также эмульгированной и частично растворенной воды можно производить с помощью фильтр-прессов, в которых масло пропускается через пористую среду, задерживающую воду и механические загрязнения. Выбор фильтрующей среды зависит от характера подлежащих удалению примесей. Для очистки трансформаторных масел применяется мягкий картон, обладающий большой гигроскопичностью. Он хорошо адсорбирует влагу из масла, однако плохо задерживает уголь и тонкий шлам и засоряет масло волокнами бумаги. Поэтому листы мягкого картона чередуют с листами плотного и мелкопористого, задерживающего мелкие механические примеси. Скорость фильтрации зависит от площади фильтра, избыточного давления масла, его вязкости и толщины фильтрующего слоя. Необходимо отметить, что использование целлюлозных фильтрующих элементов приводит к попаданию в отфильтрованное масло волокон целлюлозы. Волокна целлюлозы являются наиболее опасным видом механических примесей, поскольку имеют значительную длину (до нескольких сотен микрон) и повышенную по сравнению с маслом влажность. Наличие в масле волокон целлюлозы снижает пробивное напряжение, увеличивает диэлектрические потери. В то же время принятая в энергетике методика определения содержания механических примесей в масле (ГОСТ 6370-83) не позволяет дифференцировать механические примеси. Поэтому при обработке масла фильтр-прессами с целлюлозными фильтрующими элементами может возникнуть ситуация, когда происходит удаление из масла мелких (с размерами 2-20 мкм) тяжелых примесей (металлическая или кремниевая пыль, тонкий шлам и др.) и одновременно увеличивается содержание волокон целлюлозы. Общее содержание механических примесей (ГОСТ 6370-83) при этом снижается, а эксплуатационные характеристики ухудшаются. Поэтому в последнее время для фильтрации масла все большее распространение получают пористые полимерные фильтры или щелевые суперфильтры, а для определения концентрации механических примесей - счетчики частиц в масле, позволяющие дифференцировать концентрацию примесей по размерным группам. Пористые полимерные материалы имеют гораздо меньшую склонность к вымыванию, по сравнению с целлюлозными материалами, а наиболее совершенные из них имеют лабиринтообразную конфигурацию пор с уменьшающимся диаметром. Такие материалы поглощают механические примеси в широком диапазоне их размеров и сравнительно медленно теряют пропускную способность. В качестве характеристик фильтров принято использовать интегральные спектры концентрации механических примесей по размерным группам на входе и выходе фильтра. Для примера на рис. 4 приведена характеристика фильтра Ultipor<sup>R</sup> серии 9680 фирмы PALL.

# Общее количество частиц

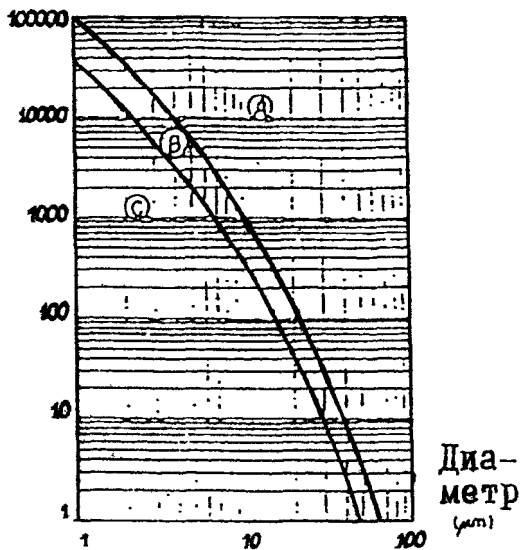


Рис. 4. Качество трансформаторного масла относительно содержания частиц



Наиболее эффективным методом сушки и дегазации масла является термовакуумная обработка, в которой различают две стадии. На первой стадии масло вспенивается под вакуумом и происходит интенсивный выход газов и паров воды из большой поверхности масляной пленки, разделяющей пузырьки в объеме этих пузырьков. На второй стадии прекращения пенообразования скорость выхода газов и влаги из толщи масла уменьшается на несколько порядков, а количество оставшихся в масле газа и влаги составляет 10-40 % от первоначального. Для увеличения скорости удаления газов и влаги на второй стадии используют специальные меры, суть которых сводится к увеличению поверхности раздела между масляной и газовой фазой и уменьшением толщины слоя масла. Наиболее распространенными в силу технической простоты долгое время были конструкции, в которых происходило растекание масла тонким слоем по большим поверхностям. К ним относятся дегазирующие устройства с использованием плоских пластин, кольцами Рашига и др. Анализ выделения газа в таких системах показал, что скорость извлечения зависит от размеров растекателя, коэффициента диффузии газа (зависящего от температуры масла), плотности и вязкости масла, а также от толщины его слоя.

Известны также конструкции, в которых реализуется мелкодисперсное распыление масла в вакуумную полость при помощи механических форсунок. При мелкодисперсном распылении с помощью форсунок типа форсунок Кертинга удается достичь размеров распыления капель масла на уровне десятков микрон. Последующее совершенствование форсунок позволило создать ультразвуковые форсуноки, обеспечивающие дисперсность до 10 мкм. Скорость обработки масла при использовании форсунок оказывается в 5-7 раз выше, чем на растекателях.

В последнее время появились конструкции, в которых используются форсунки, обеспечивающие тонкопленочное распыление масла с толщиной пленки на уровне нескольких микрон. Использование таких форсунок позволило увеличить скорость обработки масла до 20 л/мин на каждую форсунку.

Существует еще один метод быстрого выделения газа и влаги из толщи масла, основанный на ультразвуковой кавитации. При этом методе в толщу масла, находящегося под вакуумом, помещается ультразвуковой вибратор, который обеспечивает образование вакуумных микропузырьков, со стенок которых происходит интенсивное газо- и влаговыделение внутрь пузырька. Далее пузырьки всплывают на поверхность масла, удаляя из толщи газы и влагу. На сегодняшний день этот метод находится в стадии разработки, поэтому привести его количественные характеристики не представляется возможным, однако проведенные оценки показывают, что эффективность его не хуже рассмотренных выше методов.

Таковы основные методы очистки масла от различного рода механических примесей, влаги и газов, растворенных в масле. В процессе эксплуатации происходит не только загрязнение, но и термоокислительное старение масла, степень которого достаточно хорошо коррелирована с кислотным числом. По степени старения отработанные масла делятся на три группы. К первой группе относятся масла, кислотное число которых не превышает 0,25 мг КОН на 1 г масла. Ко второй группе относятся масла с повышенной степенью старения, кислотное число которых лежит в пределах 0,25-0,5 мг КОН. И к третьей группе относятся сильно окисленные масла с кислотным числом, превышающим 0,5 мг КОН на 1 г масла.

Как видно из табл. 4 масла первой группы имеют кислотное число, превосходящее предельно допустимую величину только для силовых трансформаторов. Для остального оборудования они еще могут эксплуатироваться. Масла первой группы восстанавливаются до первоначальных

свойств регенерацией с помощью контактной или (и) перколяционной очистки сорбентами. В первом случае используют адсорберы, наполненные мелкопористыми сорбентами, во втором - крупнопористыми. Возможно восстановление масел первой группы методом щелочной очистки: отработанное масло нагревают и перемешивают в щелочной мешалке с 5 %-ным водным раствором тринатрийфосфата или 2-3 %-ным раствором едкого натра. Смесь отстаивается и после удаления щелочного раствора масло подвергается обработке в центрифуге. После этого масло перекачивается в другую мешалку, в которой промывается горячей водой и отстаивается. Промытое масло обезвоживается сначала в центрифуге, а затем высушивается под вакуумом или с помощью цеолитов. Метод щелочной очистки в силу трудоемкости в последнее время применяется сравнительно редко.

При регенерации сильно окислившихся масел второй и третьей группы использование очистки сорбентами приводит к быстрому их загрязнению, поэтому эти масла лучше восстанавливать с использованием серной кислоты по схемам: "кислота-земля", "кислота-щелочь-земля". При реализации схемы "кислота-земля" в масло добавляют 0,5-2 % (в зависимости от степени окисления) концентрированной серной кислоты и перемешивают мешалкой 30-40 мин, после чего отстаивают масло и спускают кислый гудрон. Для осаждения остатков кислого гудрона и нейтрализации его добавляют 2-3 % отбеливающей земли и снова перемешивают масло 30 мин. После отстоя и спуска кислого гудрона и отбеливающей земли масло через фильтр-пресс перекачивают в бак для окончательной очистки его отбеливающей землей. В нагретое до температуры 70-80 °С масло добавляют 6-10 % отбеливающей земли, перемешивают его 50-60 мин и дают отстояться, после чего масло пропускается через фильтр-пресс или центрифугу. Этим методом можно восстанавливать масла с кислотным числом до 0,8-1 мг КОН на 1 г масла.

Рассмотренные методы регенерации и подготовки масла используются, как правило, не самостоятельно, а в комплексе, поскольку каждый из методов наиболее эффективно удаляет из масла лишь часть продуктов окисления или загрязнения. При комплексной обработке масла организуется технологическая схема, включающая те или иные методы очистки в зависимости от конкретного состояния масла. В некоторых случаях очистка масла может производиться без слива его из основного оборудования. В этом случае бак основного оборудования включается в технологическую схему и происходит очистка масла в режиме циркуляции. Пример технологической схемы для регенерации масла силового трансформатора крупнопористым адсорбентом показан на рис. 5. В некоторых случаях, учитывая длительность технологических процессов регенерации, допускается проводить их на работающем оборудовании при условии соблюдения герметичности и требований техники безопасности.

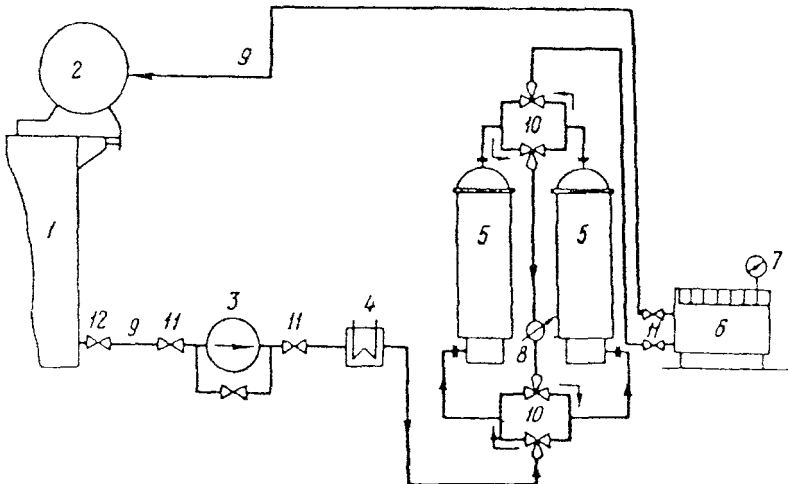


Рис. 5. Технологическая схема регенерации трансформаторного масла крупнопористым адсорбентом непосредственно в оборудовании.

1-бак трансформатора; 2-расширитель; 3-маслонасос; 4-подогреватель; 5-адсорберы с крупнопористым адсорбентом; 6-фильтр тонкой очистки (фильтр-пресс); 7-манометр; 8-расходомер; 9-подсоединительные трубопроводы (шланги); 10-трехходовые краны; 11-вентили; 12-нижний боковой кран трансформатора.

#### 4. ОБОРУДОВАНИЕ И УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ И ПОДГОТОВКИ МАСЕЛ

Данная глава посвящена более подробному описанию конкретных технологических установок, используемых при регенерации и подготовке трансформаторных масел для заливки их в оборудование или обработке масел в самом оборудовании.

Для реализации метода центробежной сепарации наибольшее распространение получили центрифуги Полтавского турбомеханического завода. Основные технические характеристики выпускаемых центрифуг приведены в таблице 5. Принципиальная схема центрифуги ПСМ 1-3000 показана на рис. 6, а эскиз барабана - на рис. 7. При сборке центрифуги на кларификацию устанавливается нижняя тарелка, не имеющая отверстий и верхняя тарелка - кларификатор. При сборке на пурификацию нижняя тарелка не ставится, а вместо кларификатора устанавливается разделительное кольцо.

Для механической фильтрации примесей используются рамные фильтры-прессы того же завода, технические характеристики которых приведены в табл. 6. В табл. 7 даны характеристики фильтровальных материалов, используемых в фильтр-прессах.

Наибольшее распространение для реализации вакуумной сушки и дегазации в энергетике получили передвижные установки УРТМ-200М, УВМ-1, УВМ-2. Установки УВМ-1 и УВМ-2 производства Харьковского завода предназначены для сушки, дегазации, очистки от механических примесей, азотирования и нагрева трансформаторного масла, заливаемого в силовые трансформаторы и другое электротехническое оборудование. Они оборудованы электроподогревателями, масляными и вакуумными насосами, фильтрами тонкой очистки. Технические характеристики установок представлены в таблице 8. В настоящее время эти установки сняты с производства и дегазационные установки в России серийно не выпускаются. Некоторые энергосистемы самостоятельно изготавливают технологическое оборудование с использованием вакуумных насосов и агрегатов, технические характеристики представлены в табл. 9. Существует ряд разработок небольших отечественных фирм, которые могут поставлять установки для вакуумной обработки по индивидуальным заказам, а также импортное оборудование. Среди высокопроизводительных установок, рассчитанных на обработку большого количества масла, наибольший интерес из отечественных представляет разработка фирмы "Элмосервис ЛТД", а из импортного оборудования - передвижные установки серии VH фирмы "Микафил". Принципиальная схема этих установок показана на рис. 8. В установках используются негигроскопичные фильтровальные патроны с большим сроком службы. Фильтрующие элементы состоят из неволокнистого материала и в зависимости от требований обладают толщиной очистки 5 или 1 мкм. Дегазация происходит в баке-дегазаторе с использованием колец Рашига, однако специальным выбором геометрических размеров обеспечивается повышенная эффективность дегазации и обезвоживания и минимальное пенообразование. Установки имеют по два вакуумных насоса одинаковой производительности, которые могут работать на разные объемы, например, на бак-дегазатор и бак трансформатора. Нагревательные элементы проложены в защитных трубах и отделены от масла, что обеспечивает безопасное, постепенное нагревание масла. Общая теплопроизводительность разделена на несколько независимых друг от друга ступеней нагрева с управлением от электронного регулятора температуры. Основные технические характеристики установок серии VH приведены в табл. 10. Там же приведены характеристики установки, разработанной и изготовленной

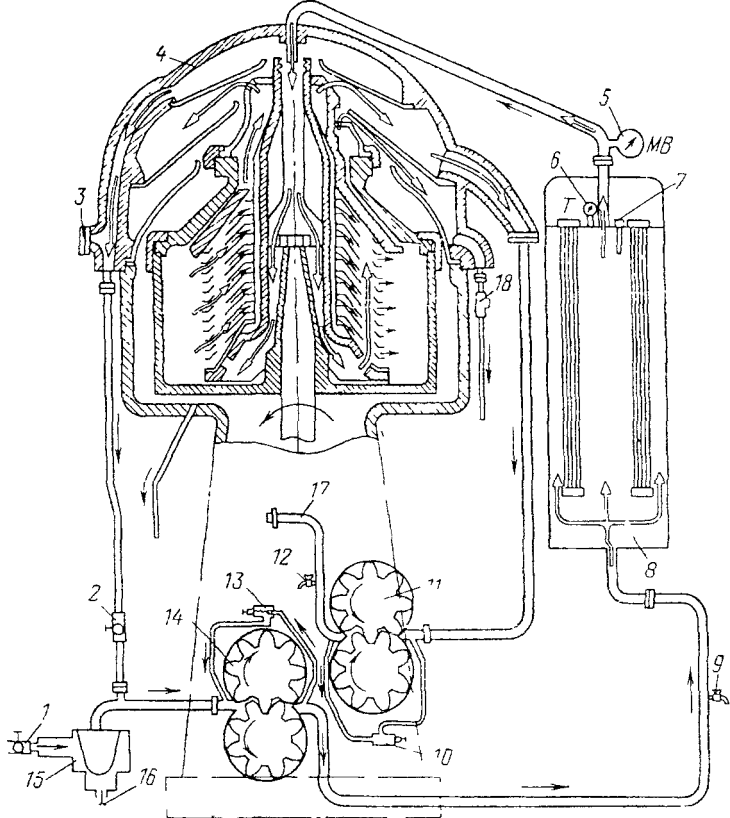


Рис. 6. Принципиальная схема центрифуги ПСМ 1-3000.

1-кран муфто-пробковый 1 1/4"; 2-вентиль 3/4"; 3-смотровое окно; 4-маслосборник; 5-мановакуумметр; 6-термометр дистанционный; 8-электроподогреватель; 9-пробноспускной краник; 10-редукционный клапан; 11-насос шестеренчатый; 12-пробноспускной краник; 13-редукционный клапан; 14-насос шестеренчатый; 15-фильтр грубой очистки, 16-пробка спускная; 17-выходной кран; 18-указатель отсепарированной воды.

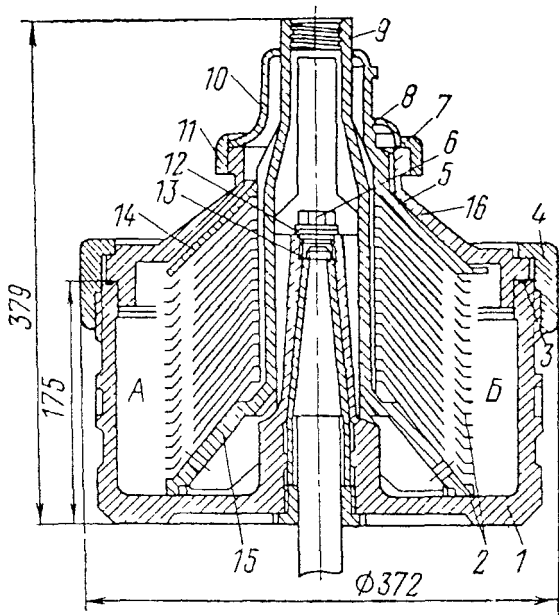


Рис. 7. Барабан.

1-корпус барабана; 2-тарелка средняя с шипиками; 3-кольцо уплотнительное большое; 4-гайка большая; 5-горловина-пурификатор; 6-пробка; 7-гайка малая; 8-кольцо регулирующее; 9-дискодержатель; 10-горловина-кларификатор; 11-кольцо уплотнительное малое; 12-шайба медная; 13-гайка специальная; 14-тарелка-кларификатор верхняя; 15-тарелка-кларификатор нижняя; 16-крышка барабана.

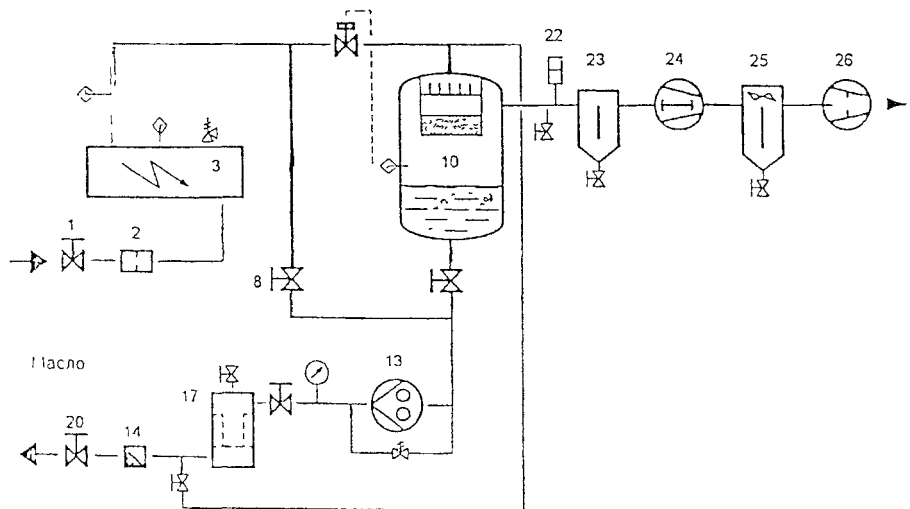


Рис. 8. Фрагмент принципиальной схемы установки серии VN фирмы "Микафил".

1-входной масляный клапан; 2-фильтр грубой очистки; 3-маслонагреватель; 8-байпасный клапан; 10-резервуар-дегазатор; 13-падающий насос; 14-обратный клапан; 17-микрофильтр; 20-выходной масляный клапан; 22-измерительная трубка Пирани; 23-сепаратор; 24-насос Рутса; 25-конденсатор с воздушным охлаждением; 26-пластинчатый насос.

фирмой "Элмосервис ЛТД". Как видно из сравнения характеристик, установленная фирма "Элмосервис ЛТД" обеспечивает практически те же характеристики, что и VH-121, однако имеет несколько меньший вес. В установке используются модульные электронагреватели из электрокерамики по 50 кВт в модуле. Удельная мощность, выделяемая нагревателями в режиме максимального нагрева не превышает  $1 \text{ Вт/см}^2$ . Управление нагревателями либо ручное, либо автоматическое при помощи микропроцессорного прецизионного регулятора. В баке дегазатора впервые применено эффективное разбрызгивание масла при помощи специальных форсунок, работающих в акустическом режиме. Применение форсунок позволило избежать фазы пенообразования масла при вводе его в вакуумную систему, а также отказаться от традиционных насадок с кольцами Рашига.

Самостоятельный интерес представляют малогабаритные передвижные установки небольшой производительности, предназначенные для заливки (или доливки) маломасляного оборудования: высоковольтных вводов, измерительных трансформаторов.

Среди этих установок наиболее перспективными представляются установки HSP 181, HVAC 124, производство фирмы "PALL" и установка ДЗУ-25М производства фирмы "Электрум". Принципиальная схема установки HSP 181 представлена на рис. 9, а установки HVAC 124 на рис. 10. Основной принцип действия установок состоит в следующем. В баке-дегазаторе создается постоянное разрежение. Воздух, поступающий через воздушный фильтр и выпускную дроссельную заслонку, расширяется в несколько раз, снижая соответственно в несколько раз свою относительную влажность, и отбирает влагу и газ из масла. Для обеспечения большой площади контакта между маслом и воздухом в установке HSP 181 используется быстро вращающаяся тарелка, на которую попадает масло и за счет центробежной силы разносится к ее краям, где толщина масляного слоя значительно уменьшается, а на краях тарелки происходит разбрызгивание мельчайших капель масла. В установке HVAC 124 используется конструкция с традиционными кольцами Рашига. Помимо системы дегазации в установках используются эффективные механические фильтры, позволяющие снижать содержание частиц, превосходящих 2 мкм, примерно в 200 раз. Внешний вид установок показан на рис. 11, а технические характеристики приведены в таблице 11. Там же приведены технические характеристики установки ДЗУ-25М фирмы "Электрум". Сравнение характеристик показывает, что по основным показателям установки ДЗУ-25М превосходят HSP и HVAC. Принципиальная схема установки ДЗУ-25М приведена на рис. 12. Улучшение технологических характеристик достигается за счет применения специального масляного насоса и форсунки, создающей сверхтонкослойный поток масла в баке-дегазаторе. Объем бака составляет 25 л. Время обработки масла с исходным влагосодержанием до 40 г/т не превышает 15 мин. Высокое давление на выходе установки обеспечивает заливку объектов практически на любой высоте. Внешний вид установки показан на обложке пособия.

Интересная с точки зрения принципа газо- и влаговыделения из масла дегазационная установка разработана в г. Братске. В ней используется принцип ультразвуковой кавитации, описанный в главе 3. Установка работает при нормальной температуре масла. Изготовление установки осваивает АО "ОКБА" в г. Ангарске, поэтому технические характеристики ее в настоящее время не определены.

Для реализации методов физико-химической регенерации используют обычно адсорберы, заполняемые соответствующими сорбентами, через которые производится прокачка масла. Эти устройства собираются в энергосистемах самостоятельно. Существуют также промышленные цеолитовые установки, технические характеристики которых приведены в табл. 12, а показатели синтетических и природных цеолитов в табл. 13.



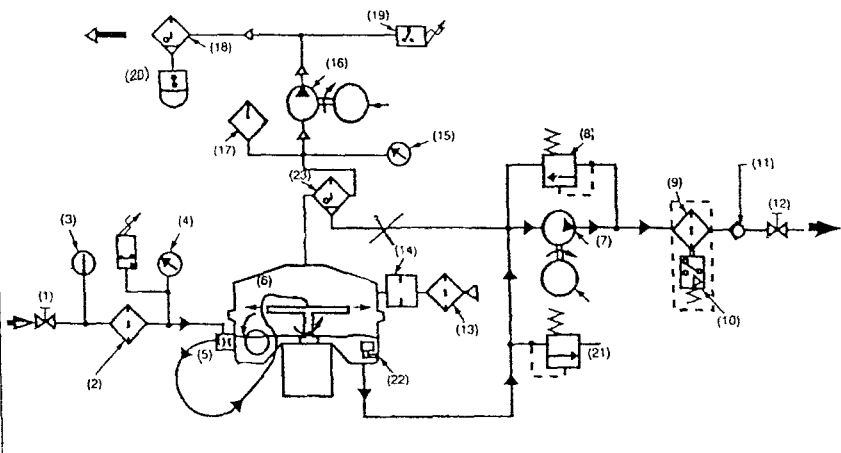


Рис. 9. Принципиальная схема установки HSP 181.

1-впускной шариковый кран с резьбой 1" BSP; 2-сетчатый 100 мкм - фильтр на входе; 3-входной термометр, масляный; 4-входной манометр, масляный; 5-поплавковый клапан; 6-вращающаяся тарелка (под ней (2M) - мотор, вращающий тарелку; 7-рециркуляционный насос; 8-ограничительный клапан; 9-обратный фильтр (выходной); 10-индикатор перепада давления (переключатель); 11-обратный клапан; 12-выпускной шариковый кран с резьбой 3/4" BSP; 13-воздушный фильтр; 14-впускная заслонка (дроссель); 15-датчик вакуума (вакуумметр); 16-вакуумный насос; 17-масленка вакуумного насоса; 18-коалесцентный фильтр; 19-индикатор коалесцентного фильтра; 20-емкость для конденсата; 21-предохранительный клапан; 22-выключатель установки при минимальном уровне масла; 23-отделитель масляных паров.

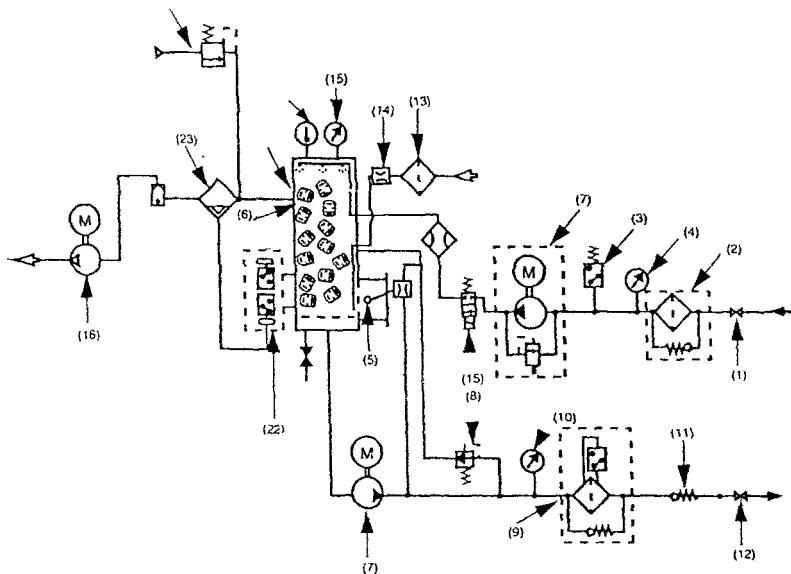


Рис. 10. Принципиальная схема установки HVAC 124.

1-впускной шариковый кран; 2-входной фильтр; 3-вакуумный выключатель; 4-входной манометр; 5-поплавковый клапан; 6-многоэтажная компоновка для стекания масла в вакуумной камере; 7-впускной насос; 8-ограничительный клапан; 9-обратный фильтр; 10-манометр обратного потока; 11-обратный клапан; 12-выпускной шариковый кран; 13-воздушный фильтр; 14-впускная заслонка (дроссель); 15-вакуумметр; 16-вакуумный насос с коалесцентным фильтром; 17-магнитный клапан; 18-вакуумный регулятор; 19-термометр вакуумной башни; 20-выпускной (спускной) кран; 21-смотровое окошко; 22-переключатель уровня масла (выключатель при низком уровне); 23-отделитель масляных паров.

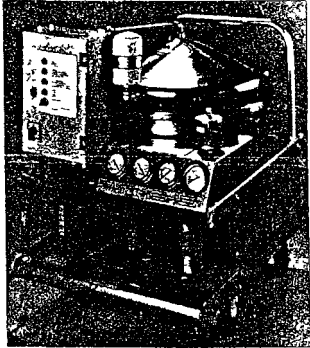
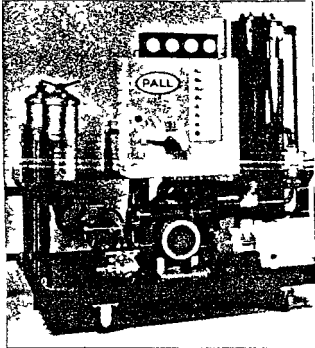


Рис. 11 Внешний вид установок HSP 181 и HVAC 124.

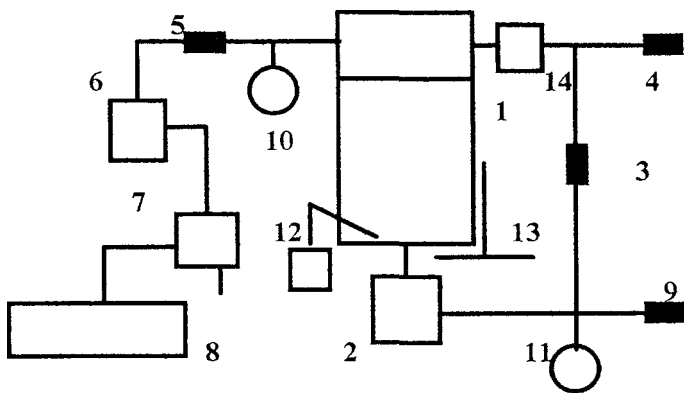


Рис. 12. Принципиальная схема установки ДЗУ-25М.

1-бак-дегазатор; 2-масляный насос; 3,4,5,9,17-система вентилей; 6-конденсатор; 7-влагомаслоотделитель; 8-вакуумный насос; 10-вакуумметр; 11-манометр, 12-термосигнализатор; 13-нагреватель; 14-фильтр тонкой очистки масла в режиме автономной циркуляции; 15-входной фильтр грубой очистки; 16-выходной фильтр тонкой очистки фирмы PALL.

Марки отечественных трансформаторных масел и преимущественные сферы их применения

Марка масла ГОСТ (ТУ)	Источник нефти	Способ очистки	Групповой состав углеводородов		Оборудование
			насыщенные	ароматические	
ТК <sub>п</sub> ТУ 38.101.890-81	анастасиевская бакинская сахалинская	кислотная	81	19	Силовые трансформаторы напряжением до 500 кВ включительно.
		кислотная	59	41	
		кислотная	88	12	
Т-750 ГОСТ 982-80	анастасиевская	кислотно-щелочная с контактной доочисткой	83	17	Силовые трансформаторы и реакторы, измерительные трансформаторы тока и напряжения, маслонаполненные вводы напряжением до 1150 кВ включительно.
		бакинская	то же с карбамидной депарафинизацией	86	
Т-1500 ГОСТ 982-80	бакинская	то же с карбамидной депарафинизацией	86	14	
ТА <sub>п</sub> ТУ 38.101.0281	анастасиевская	адсорбционная	74	26	Силовые трансформаторы напряжением до 500 кВ включительно.
ТС <sub>п</sub> ГОСТ 10121-76	западно-сибирские	селективная, низкотемпературная депарафинизация контактная или гидроочистка	91	9	то же до 220 кВ включительно.
ТК ТУ 38.101.1025-85	западно-сибирские	гидрокрекинг, каталитическая депарафинизация	—	—	Силовые трансформаторы и реакторы напряжением до 1150 кВ включительно.

## Требования действующих ГОСТ и ТУ к качеству отечественных трансформаторных масел

Показатель	Марка и значение показателя качества масла							Наименование нормативно-технического документа
	ГК ТУ 38.101.1025-85	ГБ ТУ 38.401.657-85	Т-1500 ГОСТ 982-80	Т-750 ГОСТ 982-80	ТК <sub>н</sub> ТУ 38.101.890-81	ТА <sub>н</sub> ТУ 38.101.281-80	ТС <sub>н</sub> ГОСТ 10121-76	
Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с (сСт): при 50°С, не более при -30°С, не более	9 1200	9 1500	8 1600	8 1600	9 1500	9 —	9 1300	ГОСТ 33-82
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла, не более	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	ГОСТ 5985-79
Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже	135	135	135	135	135	135	150	ГОСТ 6356-75
Содержание водо- растворимых кислот и щелочей	—	—	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	—	Отсутствие	ГОСТ 6307-75
Содержание механи- ческих примесей	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	ГОСТ 6370-83
Температура выстаива- ния, °С, не ниже	-45	-45	-45	-55	-45	-50	-45	ГОСТ 20287-74
Зольность, %, не более	—	—	—	—	—	0,005	0,005	ГОСТ 1461-75
Натровая проба, оптическая плот- ность, не более	—	—	0,4	0,4	0,4	—	0,4	ГОСТ 19296-73
Прозрачность при 5°С	—	—	Выдерживает	Выдерживает	—	—	Прозрачно	ГОСТ 982-80
Испытание корро- зионного воздействия на пластинки из меди марки М1 или М2 по ГОСТ 859-78	Выдерживает	Выдерживает	—	Выдерживает	Выдерживает	—	—	ГОСТ 2917-76

Показатель	Марка и значение показателя качества масла							Наименование нормативно-технического документа
	ГК ТУ 38.101.1025-85	ГБ ТУ 38.401.657-85	Т-1500 ГОСТ 982-80	Т-750 ГОСТ 982-80	ТК <sub>n</sub> ТУ 38.101.890-81	ТА <sub>n</sub> ТУ 38.101.281-80	ТС <sub>n</sub> ГОСТ 10121-76	
Тангенс угла диэлектрических потерь, град, не более, при 90 °С	0,5	0,5	0,5	0,5	2,2	0,5	1,7	ГОСТ 6581-75
Стабильность против окисления по ГОСТ 981-75:								
масса летучих кислот, мг КОН на 1 г, не более	0,04	0,05	0,05	0,005	0,008	0,008	0,005	ГОСТ 981-75
массовая доля осадка, %, не более	0,015	0,01	Отсутствие	Отсутствие	0,01	0,008	Отсутствие	
кислотное число окисленного масла, мг КОН на 1 г масла, не более	0,10	0,10	0,2	0,2	0,10	0,05	0,1	
условия процесса окисления	155 °С, 14 ч 50 мл/мин O <sub>2</sub>	150 °С, 16 ч 50 мл/мин O <sub>2</sub>	130 °С, 30 ч 50 мл/мин O <sub>2</sub>	130 °С, 30 ч 50 мл/мин O <sub>2</sub>	120 °С, 14 ч 200 мл/мин O <sub>2</sub>	120 °С, 14 ч 200 мл/мин O <sub>2</sub>	120 °С, 14 ч 200 мл/мин O <sub>2</sub>	
Стабильность против окисления, метод МЭК, индукционный период, ч, не более	150	120	—	—	—	—	—	Публикация МЭК № 474
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> , не более	895	895	885	895	895	898	857	ГОСТ 3900-85
Цвет на калориметре ЦНТ, единицы ЦНТ, не более	1	1	1,5	1	—	—	1	ГОСТ 20284-74
Содержание серы, %, не более	—	—	—	—	—	—	0,6	ГОСТ 19121-73
Содержание ионола, %, не менее	0,25-0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	—

Предельно допустимые значения показателей качества трансформаторного масла, подготовленного и залитого в электрооборудование

Наименование	Значение показателя качества трансформаторного масла до заливки в электрооборудование	Значение показателя качества трансформаторного масла после заливки в электрооборудование	Наименование нормативно-технического документа
Пробивное напряжение, кВ, не менее, для трансформаторов, аппаратов и вводов напряжением:			ГОСТ 6581-75
до 15 кВ	30	25	
св. 15 кВ до 35 кВ	35	30	
от 60 до 150 кВ	60	55	
от 220 кВ до 500 кВ	60	55	
750 кВ	70	65	
1150 кВ	70	70	
Массовое влагосодержание, % (г/т), не более для:			ГОСТ 7822-75
трансформаторов с пленочной или азотной защитой	0,001(10)	0,001(10)	
для трансформаторов без специальных защит	0,0020(20)	0,0025(25)	
Тангенс угла диэлектрических потерь, %, не более, при 90°С			ГОСТ 6581-75
до 500 кВ вкл.	2,2	2,6	
750 кВ	0,5	0,7	
1150 кВ	0,5	0,5	
Кислотное число, мг КОН/г масла, не более			ГОСТ 5985-79
до 500 кВ вкл.	0,02	0,02	
св. 500 кВ	0,01	0,01	
Содержание растворимых кислот и щелочей	Отсутствие	Отсутствие	ГОСТ 6307-75
Содержание механических примесей, % массы (г/т), не более			ГОСТ 6370-83
до 750 кВ вкл.	Отсутствие	Отсутствие	
силовые трансформаторы 1150 кВ	0,0005(5)	0,0005(5)	РТМ 34-70-653-83
Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже	135	135	ГОСТ 6356-75
Газосодержание, % объема, не более (для герметичного электрооборудования)	0,1	0,2	Инструкция завода-изготовителя
<p>ПРИМЕЧАНИЯ: 1. Проба трансформаторного масла для определения значения <math>\tan\delta</math> дополнительной обработке не подвергается. 2. Проверку газосодержания масла допускается производить абсорпиметрами, установленными в дегазационных установках или в лаборатории хроматографическим методом.</p>			

Требования к качеству эксплуатационных трансформаторных масел

Показатель качества масла	Наименование нормативно-технического документа	Место проведения испытания (П-производство Л-лаборатория)	Группа оборудования	Предельно допустимое значение показателя качества масла
Пробивное напряжение, кВ	ГОСТ 6581-75	П и Л	Трансформаторы, аппараты, вводы напряжением: до 15 кВ вкл. от 15 кВ до 35 кВ вкл. от 60 кВ до 150 кВ вкл. от 220 кВ до 500 кВ вкл. 750 кВ 1150 кВ	20 25 35 45 55 65
Содержание механических примесей, % массы (г/г) -визуально	—	П	Электрооборудование до 750 кВ вкл.	Отсутствие
Кислотное число, мг КОН/г масла	РТМ 34-70-653-83	Л	Силовые трансформаторы 1150 кВ вкл.	0,0015(15)
Содержание водорастворимых кислот, мг КОН/г масла	ГОСТ 5985-79	П и Л	Силовые трансформаторы свыше 630 кВ А, измерительные трансформаторы 110 кВ и выше, маслонаполненные вводы	0,1 0,25
Содержание водорастворимых кислот, мг КОН/г масла	Приложение 1 настоящих Методических указаний	П и Л	То же	0,014 (0,03 для негерметичных вводов до 500 кВ вкл.)
Температура вспышки в закрытом тигле (ТВЗТ), °С	ГОСТ 6356-75	П и Л	Силовые трансформаторы свыше 630 кВ А, измерительные трансформаторы 110 кВ и выше, маслонаполненные вводы	Снижение не более чем на 6°С в сравнении с предыдущим анализом
Тангенс угла диэлектрических потерь, %, при 90°С	ГОСТ 6581-75	Л	Силовые, измерительные трансформаторы, вводы напряжением: 110-150 кВ вкл. 220-500 кВ вкл. 750 кВ 1150 кВ	15 10 5 4



Показатель качества масла	Наименование нормативно-технического документа	Место проведения испытания (II-производство Л- лаборатория)	Группа оборудования	Предельно допустимое значение показателя качества масла
Влагосодержание, % массы (г/г)	ГОСТ 7822-75	Л	Для трансформаторов с азотной и пленочной защитой	0,002(20)
	ГОСТ 1547-84	П	Для трансформаторов без специальных средств защиты с системой охлаждения М и Д	Отсутствие (качественно)
Газосодержание, % объема	Инструкция завода-изготовителя оборудования	П и Л	Для трансформаторов с пленочной защитой	2
Растворимый шлак (потенциальный осадок)	Приложение 2 настоящих Методических указаний	Л	Силовые трансформаторы 220 кВ и выше при КЧ свыше 0,10 мг КОН/г масла	Отсутствие (отсутствием считается содержание менее 0,01 % массы)
Определение содержания антиокислительной присадки	Приложение 3 настоящих Методических указаний	Л	В основном негерметичных трансформаторов 110 кВ и выше, а также для оборудования с вместимостью маслосистемы 10 т и более	Не менее 0,1 % массы
<p>ПРИМЕЧАНИЯ: 1. Кислотное число масла можно определять также по ГОСТ 11362-76 (СТ СЭВ 5025-85) методом потенциометрического титрования. 2. Для трансформаторов 110-150 кВ мощностью 60 МВА и более, 220-500 кВ включительно всех мощностей, реакторов 500 кВ и выше, трансформаторов напряжением 110-150 кВ мощностью менее 60 МВА СН блоков 300 МВт и выше, масло которых контролируется хроматографическим методом, температура вспышки может не определяться.</p>				

## Технические характеристики промышленных центрифуг

Характеристика	ПСМ1-3000	ПСМ2-4	СМ1-3000	СМ2-4
	ТУ 34-38-8509-83	ТУ 34-38-10217-81	ТУ 34-8518-73	ТУ 34-38-11043-86
Номинальная производительность (при температуре обрабатываемого масла 60°C) при очистке методом, м <sup>3</sup> /ч:				
кларификации	3	4	3	4
пурификации	2	3	2	3
Максимальное содержание механических примесей в масле (при исходном содержании механических примесей до 0,08%), не более:				
после одного цикла очистки	—	0,005	—	0,005
после двух циклов очистки	0,005	—	0,005	—
Максимальное содержание влаги в масле после одного цикла очистки при исходном содержании воды до 1% массы, не более, %	0,08	0,05	0,08	0,05
Содержание масла в отходах воды, % (мг/л), не более	1,0	1,0(30)	1,0	1,0
Электрическая прочность изоляционного масла, осушенного за один цикл (при исходном 20 кВ), кВ, не менее	—	50	—	—
Температура нагрева масла в электроподогревателе, °С	25	35	25	30
Наименьшее количество масла, которое можно очистить на установке, м <sup>3</sup>	0,22	0,3	0,22	0,3
Количество разделительных тарелок, шт.	56	88	56	88
Установленная (потребляемая) мощность, кВт:				
сепаратора	5,5/5,1	5,5/5,1	5,5/5,1	5,5/5,1
электроподогревателя	36/36	57,6/57,6	36/36	57,6/57,6
вакуум-насоса	0,55/0,50	0,55/0,50	—	—
общая	42,05/41,6	63,6/63,2	41,5/41,1	63,1/62,7
Габаритные размеры, мм:				
длина	1800	1830	1200	1500
ширина	1200	1300	1225	1146
высота	1780	1528	1395	1225
Масса машины, кг	1100	1100	710	672

Технические характеристики рамных фильтр-прессов

Характеристика	ФП2-3000	ФП1-4-4	ФПР-2, 2-315/16У
	ТУ 34-38-10612-83	ТУ 34-38-11103-86	ТУ 26-01-54-75
Номинальная производительность по трансформаторному маслу, м <sup>3</sup> /ч	3	4	3
Площадь фильтрации, м <sup>2</sup>	1,8	2,0	2,2
Наибольшее рабочее давление фильтрации, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,4(4)	0,5(5)	0,45(4,5)
Объем рамного пространства, л/м <sup>3</sup>	17(0,017)	20(0,02)	14(0,014)
Количество рам, шт.	16	19	11
Содержание механических примесей в масле после трех циклов его обработки (при исходном содержании механических примесей от 0,01 до 0,03% массы), не более, % массы	0,005	0,0004	—
Установленная мощность (потребляемая) электродвигателя, кВт	1,7/1,3	2,2/2,0	4,0
Фильтровальный материал	фильтровальный картон ГОСТ 6722-75	фильтровальная бумага ДРКБ ТУ81-04-178-78	фильтровальный картон ГОСТ 6722-75
Габаритные размеры, мм			
длина	1000	1480	1700
ширина	572	605	760
высота	982	840	1120
Масса, кг	215	270	530

Таблица 7

Характеристики фильтрованных материалов

Характеристика	Фильтровальный технический картон ГОСТ 6722-75	Бумага фильтровальная ДРКБ ТУ 81-04-178-78	Материал фильтровальный для масел ТУ 81-04-519-78
Основа	Целлюлоза	целлюлоза с добавкой виола	вискозно-штапельное волокно
Относительное сопротивление продавливанию, кг/см <sup>2</sup> , не менее	1,14	2,5	—
Толщина, мм	0,6-1,0	0,6	1,2
Тонкость фильтрации (в один слой), размеры частиц, мкм, более	20-25	20	10
Время фильтрования, с, не более	—	5,0	5,0
Капиллярная впитываемость в среднем по двум направлениям, мм, не менее	51	—	—
Масса 1 м <sup>2</sup> , г	275	240	250
Плотность, г/см <sup>3</sup>	—	0,25	—
Влажность, %, не более	6	—	—
Ширина листа, мм	—	550±5	830±5

Технические характеристики передвижной установки вакуумной обработки трансформаторного масла типа УВМ

Характеристика	УВМ-1 (ТУ 34431347-78)	УВМ-2 (ТУ 341111066-86)
Подача, м <sup>3</sup> /ч, не менее	1,9	3,6
	—	9,36
		(при перекатке и нагреве)
Объемное газосодержание масла после вакуумной обработки, %, не более	0,1	0,1
Влагосодержание масла после вакуумной обработки, % массы (г/г), не более	0,001	0,001
	(10)	(10)
Тонкость фильтрации, м (мкм)	2·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-6</sup>
	(20)	(5)
Объемное содержание азота в масле после азотирования, %	8±0,5	8±0,5
Мощность нагревателя, кВт	90±5	170±5
Температура масла, °С:		
в процессе вакуумирования	50-60	55-60
при прогреве трансформатора	—	85
Остаточное давление при дегазации масла, Па (мм рт. ст.)	66,6	266
	(0,5)	(2)
Потребляемая мощность, кВт	100	195
Габаритные размеры, мм	4380*2350*2625	4150*2250*2350
Масса, кг	5300	5400

Таблица 9.

Технические характеристики вакуумных насосов и агрегатов

Характеристика	Марка насоса и агрегата				
	2ДВН-500	АВЗ-90	АВР-150	НВЗ-150	НВЗ-100Д
Подача, л/с	500	90	150	160	100
Предельное остаточное давление, Па (мм рт. ст.):					
полное без газобалласта	0,5(3,75·10 <sup>-3</sup> )	6,7(5·10 <sup>-2</sup> )	6,7·10 <sup>1</sup> (5·10 <sup>-3</sup> )	6,7(5·10 <sup>-2</sup> )	6,7·10 <sup>1</sup> (5·10 <sup>-3</sup> )
полное с газобалластом	—	400(3)	—	400(3)	6,7(5·10 <sup>-2</sup> )
Тип форвакуумного насоса	НВЗ-50Д	—	НВЗ-20	—	—
Рабочая жидкость и ее объем, л	—	ВМ-4, ВМ-6 ГОСТ 23013-78	—	ВМ-4, ВМ-6 ГОСТ 23013-78	ВМ-4, ВМ-6 ГОСТ 23013-78
		14		28	20
Вид охлаждения (расход воды, м <sup>3</sup> /ч)	воздушное	водяное (0,6)	воздушное	водяное (1,3)	водяное (1,3)
Габаритные размеры, мм	1340*600*850	1000*630*1060	896*444*1165	1175*874*1164	1175*874*1164
Масса, кг	560	600	295	970	1000

Технические характеристики дегазационных установок фирм "Микафил" и "Элмосервис ЛТД"

Характеристика	VH-061	VH-121	VH-201	Элмосервис
Производительность по маслу, л/ч: во время подготовки масла во время сушки трансформаторов	3000 6000	6000 12000	10000 20000	6000 12000
Конечный вакуум в резервуаре-дегазаторе во время последнего прохода масла, мбар	0,6	0,6	0,6	0,5
Теплопроизводительность, кВт/ на число ступеней	75/3	150/3	250/4	150/3
Общая потребляемая мощность, кВт, около	85	170	278	—
Производительность вакуумных насосов при откачке, м <sup>3</sup> /ч	2x60	2x120	2x250	2x144
Максимальный расход масла при сушке, т/на трансформатор	22-25	65-70	100-120	—
Гарантированные данные:				
1) подготовленного за один проход масла на выходе установки (при содержании в масле перед подготовкой: воды-50 частей на миллион и воздуха-10 объемных %)				
остаточное содержание воды	<6	<6	<6	<8
остаточное содержание воздуха	<0,5	<0,5	<0,5	<0,07
2) подготовленного за несколько проходов масла на выходе установки				
остаточное содержание воды	<3	<3	<3	—
остаточное содержание воздуха	<0,1	<0,1	<0,1	—
Масса (вес)				
Нетто, кг, около	1450	2300	3300	2000

Технические характеристики малогабаритных дегазационных установок

Характеристика	HSP-181	HVAC-124	ДЗУ-25М
*Производительность, л/мин	11	75	1,5
Рабочий вакуум, мбар	200	330	0,13
Температура масла, °С	63	75	60
Давление на выходе, бар	4,8	6	16
Давление на входе, бар	0,34-1,4	до 2	0,13-4
Мощность главного нагревателя, кВт	0,75	5,3	1,0
Мощность мотора вращения тарелки, кВт	0,56	—	—
Общая потребляемая мощность, кВт	2,9	8,3	1,6
Остаточное газосодержание после обработки, % объема	0,3	0,5	0,1
Остаточное влагосодержание после обработки, г/г	13	17	7
Габаритные размеры, мм	864x700x864	1950x915x1640	900x900x700
Вес без масла, кг	159	830	110

\* Производительность установок HSP и HVAC указана за 1 цикл

Таблица 12.

Технические характеристики цеолитовых установок

Характеристика	БЦ 77-1100	ЩУ (НО-71)
	ТУ 34-43-1090-78	ТУ 34-3096-73
Номинальная подача при электрической прочности масла, м <sup>3</sup> /ч:		
до 20 кВ	1,1	1,6
выше 20 кВ	—	2,5
Рабочее давление, МПа	0,1-0,25	—
Потребляемая мощность, кВт:		
подогревателя	24	—
электродвигателя насоса	1,5	—
Масса, кг	780	1585 (без учета фургона)
Габаритные размеры, мм:		
длина	1710	5800
ширина	1370	2375
высота	1865	3220

Физико-химические показатели синтетических и природных цеолитов

Показатель	Синтетический цеолит			Природный цеолит Грузинский ПЦГ-2 ТУ 113-12-127-82
	Na A-2MШ (ГОСТ 5.1290-72)	Na A без связующих веществ (ТУ 95-400-81)	Na A со связующими веществами (ТУ 38-10281-75)	
Химический состав	—	$0,9\text{Na}_2\text{O}\times\text{Al}_2$	$\text{O}_3\times 1,9\text{SiO}_2$	$0,6-1,2[\text{Na}_2\text{O}\times(1-2)]\text{Al}_2\text{O}_3\times(6-10)\text{SiO}_2$
Насыпная масса, г/см <sup>3</sup> , не менее (непросушенного цеолита)	0,97	0,97	0,97	0,94
Внешний вид	гранулы сферической или овальной формы	твердые розовые зерна		зерна неправильной формы
Водостойкость гранул, %, не менее	99,5	90	80	—
Виброизнос, %, не более	0,15	0,15	0,15	1,0
Предельная влагоемкость в динамических условиях:	92,0	—	—	50
мг/см <sup>3</sup> , не менее	20	17-18	17-18	10-12
масса, %				
Влагоемкость в статических условиях:	135,0	—	—	—
мг/см <sup>3</sup> , не менее	7	7	7	6
масса, %, не менее				
Механическая прочность на раздавливание, кг/мм <sup>2</sup> , не менее	1,8	1,6	1,2	—
Щелочность водной вытяжки, рН	8,5-10,5	8,5-10,5	8,5-10,5	9,6
Потери при прокаливании, %, не более	5,0	5,0	5,0	15
Эффективный диаметр входных окон, м	4,0-10 <sup>-10</sup>	4,0-10 <sup>-10</sup>	4,0-10 <sup>-10</sup>	(3,8-4,2)·10 <sup>-10</sup>
Механическая прочность, %	76-90	86-90	86-90	90-92
Фракционный состав, мм	1,5-3,0	2-4	3-5	5-10
Массовая доля глинопилолита, %, не менее	—	—	—	70

## Список литературы

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел. - РД 34.43.105-89.
3. Маневич Л.О. Осушка масла цеолитами и дегазация. - М.: Энергия, 1980.
4. Лизунов С.Д. Сушка и дегазация изоляции трансформаторов высокого напряжения. - М.: Энергия, 1971.
5. Джуварлы Ч.М., Иванов К.И., и др. Электроизоляционные масла. - М.: Гостоптехиздат, 1963.
6. Ванин Б.В., Смоленская Н.О., Соколов В.В. Теоретический анализ процесса обработки трансформаторного масла на растекателе деггазирующего устройства. - Электротехника, № 6, 1988.



# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Физико-химические свойства масел в эксплуатации.....	4
2. Методы поддержания характеристик масла в эксплуатации.....	8
3. Методы регенерации, сушки и дегазации масел.....	14
4. Оборудование и установки для регенерации и подготовки масел.....	20
Приложение.....	28
Список литературы.....	40