

С.И. РЫМАРЬ, аспирант, НТУ “ХПИ”, Харьков

Ю.В. ГОНЧАРЕНКО, канд. физ.-мат. наук, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

В.Н. ГОРОБЕЦ, канд. физ.-мат. наук, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

Ф.В. КИВВА, д-р физ.-мат. наук, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

А.Л. КОВОРТНЫЙ, инженер, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

ОСОБЕННОСТИ СУШКИ СОРБЕНТОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Розглянута технологія підготовки сорбентів, що використовуються для регенерації трансформаторних масел.

Рассмотрена технология подготовки сорбентов, применяемых для регенерации трансформаторных масел.

The technology of preparation of sorbents used for regeneration of transformer oils is reviewed.

Введение. В течение последнего десятилетия проведены систематические исследования особенностей воздействия электромагнитных полей (ЭМП) на сорбенты разных классов, включая цеолиты и силикагели, широко применяемые в электроэнергетике для регенерации трансформаторных масел в силовых трансформаторах и переключателях тока.

Эти исследования проведены совместно ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины, ООО НПФ “Сетра ЛТД” и НТУ “ХПИ” в объеме, предусмотренном договором о научно-техническом сотрудничестве. Они направлены на подготовку сорбентов к использованию посредством безопасных и ресурсосберегающих технологий.

Предложена конструкция установки для подготовки сорбентов, содержащих воду в химически связанном и свободном состоянии. Описана технология их подготовки путем воздействия на них электромагнитного излучения ВЧ диапазона.

Анализ литературы. В электроэнергетике широко используют трансформаторы, в которых в качестве теплоотводящей и изолирующей сред используются трансформаторные масла [1]. В процессе эксплуатации в них образуются различные продукты окисления и обмена с окружающей средой, которые снижают их эксплуатационные характеристики и подлежат удалению. Одной из наиболее опасных примесей в трансформаторном масле является вода, которая проникает в масло при его контакте с атмосферой. Превышение содержания воды может приводить к

электрическому пробую, а одним из основных требований, предъявляемых к трансформаторным маслам, является их высокая электрическая прочность. В связи этим возникает вопрос замены масла на новое или восстановления его эксплуатационных характеристик путем регенерации. Удаление продуктов старения масла может производиться постоянно в процессе эксплуатации оборудования, либо периодически при достижении эксплуатационными характеристиками предельно допустимых значений. Наибольшее распространение для регенерации трансформаторных масел получили термосифонные фильтры и адсорберы. Принцип действия этих устройств основан на поглощении продуктов старения масел поверхностно-активными веществами – сорбентами [1].

В качестве сорбентов применяются природные и синтетические цеолиты и силикагели.

Наиболее широкое применение получили три метода подготовки сорбентов: выжигание в высокотемпературной печи (при $t = 400 - 600$ °С), продувка сухим горячим воздухом и сушка термовакуумным способом с использованием точечных нагревателей. Основными недостатками этих методов является большая длительность процесса и высокие затраты энергии.

Постановка задачи. При негерметичном хранении сорбентов в них проникает влага из окружающей среды, вследствие чего их сорбционная емкость значительно снижается. Представляется целесообразным изучить и реализовать на практике возможность восстановления их сорбционной емкости, а при возможности и ее увеличения наиболее экономичным с энергетической точки зрения способом. В связи с постоянным ростом цен на сорбенты (в том числе и цеолиты) и ужесточением экологического контроля при их утилизации возникает вопрос о высококачественной и энергоэффективной их регенерации.

Особенности поведения сорбентов в ЭМП. За последнее время возрос интерес к технологиям, которые основаны на взаимодействии электромагнитного поля с веществом [2 – 5]. Это обусловлено рядом преимуществ, возникающих при нагреве и сушке в электромагнитном поле (ЭМП).

В основу технологии положены частотные особенности диэлектрических свойств сорбентов, в частности, их действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, которые следуют из соотношений Крамерса-Кронига [6].

Так, во всём радиодиапазоне, включая СВЧ и КВЧ, воздействие электромагнитного поля на вещество является неионизирующим, а основные эффекты воздействия обусловлены поляризацией вещества и объемным рассеянием энергии ЭМП в веществе вследствие конечных значений комплексной диэлектрической проницаемости ϵ'_2 и ϵ''_2 . При таких условиях подводимая к веществу энергия ЭМП вследствие объемного рассеяния превращается в тепло, причём основными “мишенями”

воздействия является сорбент и влага, заполняющая поры сорбента. Передача тепла от сорбента к влаге и наоборот происходит за счёт теплопроводности. Нагрев поглощённой сорбентом влаги в электромагнитном поле ВЧ диапазона также обусловлен наличием токов проводимости и поляризацией её молекул.

Нагреваясь до критических значений при заданном давлении (рис. 1), вода, кроме расширения, начинает испаряться, мигрируя по микропорам сорбента до его поверхности и далее в направлении потока, создаваемого вакуумным насосом.

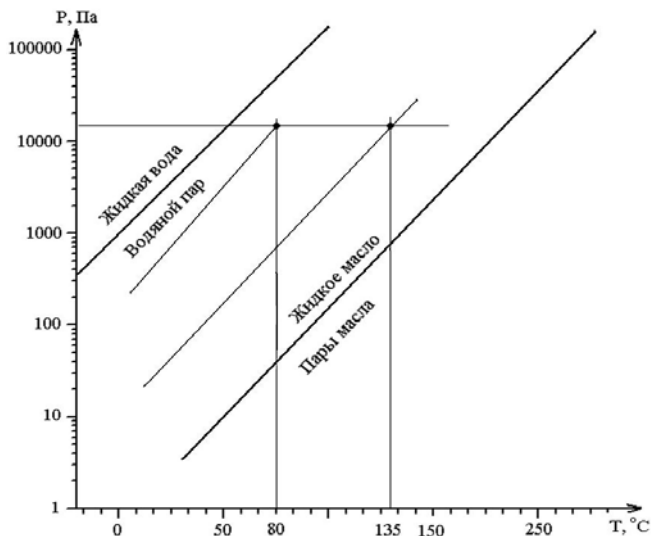


Рис. 1. Диаграмма вакуумной подготовки трансформаторных масел

Рассмотрение кинетики удаления влаги из объёма сорбента показывает, что вакуумная сушка в комбинации с объёмным нагревом сорбента в поле КВ диапазона обладает оптимальными свойствами по производительности процесса сушки и длительности сохранения адсорбционных свойств сорбентов.

Анализ диффузии воды в цеолитах [7] показывает, что предельная мощность ЭМП, используемая для нагревания цеолитов, не может быть слишком большой, поскольку размеры микропор в цеолитах конечны, а силы межмолекулярных связей в воде могут превосходить силы связи между водой и стенками пор цеолитов. Это означает, что в широком диапазоне температур (вплоть до $200 - 300$ $^{\circ}\text{C}$ и более) молекула воды движется по одному и тому же строго заданному структурой кристалла диффузионному пути, что порождает (при увеличении мощности ЭМП) градиенты давления, которые могут превосходить пределы механической

прочности цеолитов. Во-вторых, несмотря на относительно низкотемпературную подвижность, высокие температуры дегидратации сорбентов сохраняются. Природа высокотемпературного гидратированного состояния цеолитов объясняется “двухфазным” строением цеолитной воды. Оказалось, что диффузия молекул воды в цеолитных каналах не мешает некоторой части этих молекул быть жестко связанной в цеолитных каналах. При этом полная дегидратация имеет место при 300 °С и выше.

Выбор температурного режима подготовки и регенерации сорбентов. Выбор температурного режима десорбции цеолитов определяется снизу минимальной температурой, которая обеспечивает быстрое удаление адсорбата, и сверху – термической стойкостью сорбента и материала адсорбера. Кроме того, выбор температуры определяется условиями проведения процесса десорбции, а именно – величиной разрежения, создаваемого в адсорбере.

Для цеолитов минимальная температура, при которой возможно полное удаление адсорбата (в данном случае свободной воды), составляет 140 – 160 °С. При этом в сорбенте (цеолите) остаётся около 5 % влаги. Это химически связанная вода, которая испаряется при температурах 300 °С и выше.

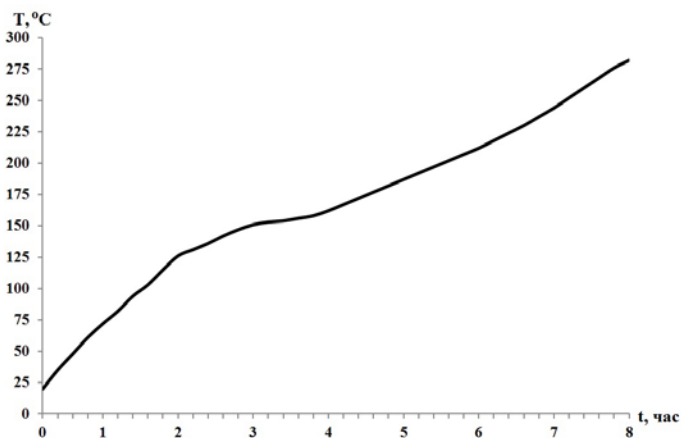


Рис. 2. Изменение температуры сорбента внутри адсорбера

Максимальная температура, которая определяется термической стойкостью цеолитов, составляет 500 – 600 °С. Они переносят продолжительный нагрев под разрежением при температуре 300 – 500 °С без заметных структурных изменений.

Условия проведения процесса десорбции накладывают свои ограничения на выбор оптимальной температуры. В первую очередь необходимо учитывать степень разреженности, создаваемую внутри

адсорбера, а также тот факт, что цеолит находится в масляной среде. При больших температурах происходит сначала испарение воды, затем масла, а также его коксование на гранулах цеолита, что ведёт к понижению адсорбционной емкости. Оптимальный рабочий диапазон находится между кривыми испарения воды и масла (рис. 1).

Одним из основных факторов, определяющих длительность регенерации, является время нагрева сорбента до заданной температуры.

С одной стороны – для увеличения скорости нагрева требуется увеличение мощности нагревателей, с другой – существуют ограничения по механическим свойствам цеолитов: скорость нагрева не должна превышать 5 – 6 °С/мин.

Равномерность температурного поля внутри адсорбера в первую очередь определяется скоростью нагрева сорбента. Все применяемые ранее нагреватели для нагрева сорбентов достаточно больших объемов (30 – 50 кг) представляют собой точечные нагреватели. Тепло от локально нагретого сорбента, непосредственно прилегающего к нагревателю, поступает к участкам, удалённым от нагревателя. Теплопередача в системе сорбент-масло происходит за счёт теплопроводности самих частиц сорбента и масла между этими частицами. Так как теплопроводность этих материалов достаточно низкая, между центральными и периферийными участками создаётся большой температурный градиент (десятки градусов). Увеличение мощности нагрева, которое необходимо для уменьшения времени выхода устройства на рабочий режим, приводит к тому, что температурный градиент внутри адсорбера превышает предельно допустимые изменения температуры, тем самым, накладывая ограничения на увеличение скорости нагрева сорбента.

Перечисленные выше факторы имеют важное значение для проведения качественной подготовки сорбентов. При этом они зачастую вступают в противоречие между собой. Решить эти противоречия призвана технология объёмного нагрева сорбента с помощью ЭМП.

Установка по подготовке сорбентов. Установка по подготовке и регенерации сорбентов [8 – 10] функционально состоит из четырёх частей: генератора высокой частоты (I), адсорбера (II), вакуумно-гидравлической системы (III) и пульта управления (IV), ее функциональная схема приведена на рис. 3. Установка состоит из следующих основных узлов: генератора высокой частоты 1 с блоком питания 2, адсорбера 3, индикатора визуального контроля 5, контрольного теплообменника 6, ресивера, конструктивно связанного с теплообменником, 7, блока управления 8 вакуумного насоса 11 и сборника конденсата 12, а также вентилей 4, 9, 10. Установка по подготовке сорбентов предназначена для удаления влаги из адсорбера. Адсорбер функционально размещается отдельно или в составе маслоочистительной цеолитовой установки МЦУ-7.

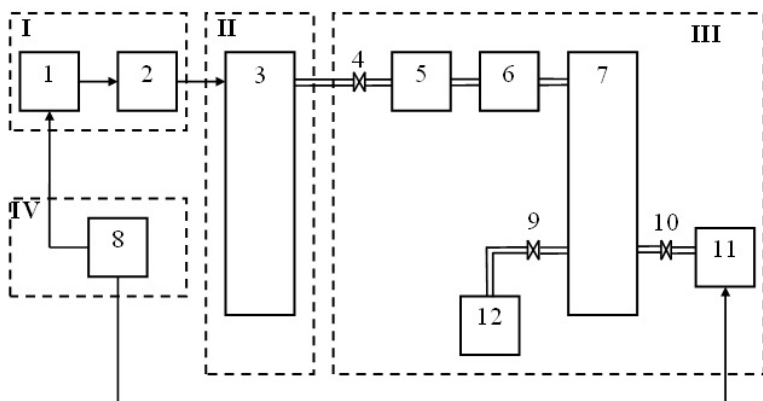


Рис. 3. Функциональная схема установки

На рис. 4 показан временной ход процесса подготовки сорбента. Рост отраженной мощности связан с изменением суммарной комплексной диэлектрической проницаемости системы сорбент-вода вследствие удаления влаги.

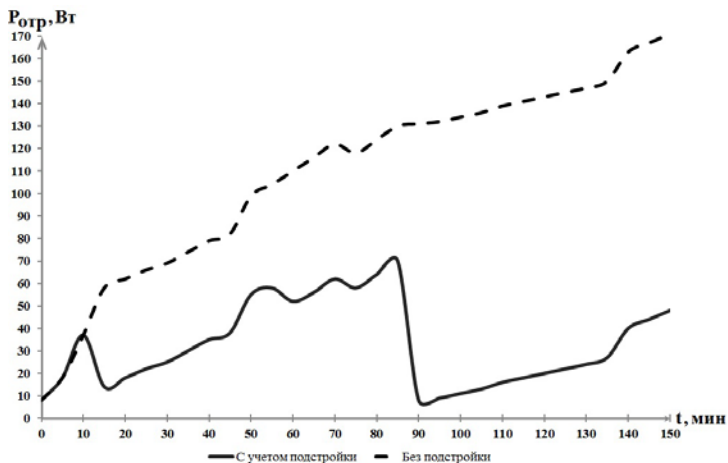


Рис. 4. Временной ход процесса подготовки сорбента

Практические результаты. Исследования по подготовке сорбента с помощью СВЧ нагрева показали, что СВЧ ($f = 2450$ МГц) нагрев недостаточно эффективен для подготовки цеолита. При заданной конструкции адсорбера и заданных объемах сорбента происходит локальный перегрев вблизи ввода, который не позволял достигнуть низкого

градиента температуры. Поэтому для достижения равномерного нагрева всего объема сорбента рабочая частота была существенно уменьшена и составила $f = 13,65$ МГц.

Усовершенствованная установка по подготовке и регенерации сорбентов разработана в двух модификациях: вариант 1 – установка предназначена для работы совместно с установкой для регенерации масла МЦУ-7 с двумя адсорберами вместимостью 35 кг каждый и вариант 2 – для работы с автономно установленным адсорбером вместимостью 180 кг.

Выводы. Таким образом, проведенные исследования и разработка установки для подготовки сорбентов с учетом предложенных изменений [8 – 10] позволили решить конкретные практические вопросы в технологии подготовки сорбентов:

- применение описанной технологии позволяет восстановить сорбционную емкость цеолитов (сорбционная емкость цеолитов в исходном состоянии составляет 20 – 25 %);

- прокаливание сухих и чистых цеолитов в электромагнитном поле коротковолнового диапазона до температуры 300 – 400 °С увеличивает абсолютное значение их сорбционной емкости дополнительно на 10 – 15 %;

- установка может быть использована в широком диапазоне температур (диапазон внешних температур, при котором возможна эксплуатация установки, расширился в область низких температур до –10 °С).

Список литературы: 1. *Монастырский А.Е.* Регенерация, сушка и дегазация трансформаторного масла. Учебное пособие. – С-Петербург, 1997. – с. 42. 2. *Кивва Ф.В., Горобец В.Н., Зотов С.М. и др.* Новые технологии обработки сорбентов // Новини енергетики. – 2003. – № 1 – 2. – С. 26 – 31. 3. *Головко М.И., Гончаренко Ю.В., Горобец В.Н. и др.* Установка для регенерации сорбентов в электромагнитном поле // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 5(59). – С. 49 – 51. 4. *Кивва Ф.В., Горобец В.Н., Головко М.И. и др.* Устройство для регенерации сорбентов электромагнитным полем // Наука та інновації. – 2010. – Т. 6, № 3. – С. 12 – 19. 5. Отчет по НИР “Октан”. Разработка и изготовление устройства для ускоренной регенерации сорбента. Научный руководитель д.ф.-м.н. Ф.В. Кивва. – Х.: ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины, 2002. – 101 с. 6. *Забиякин Ю.Е.* Проверка дисперсионных соотношений Крамерса-Кронига в широком интервале температур // Оптика и спектроскопия. – 1968. – Т. 24. – С. 828 – 829. 7. *Габуда С.П.* Связанная вода. Факты и гипотезы. – Новосибирск: Наука, 1982. – 158 с. 8. ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ № 55254. Пристрій для сушіння сипучих дисперсних матеріалів. 9. ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ № 55348. Пристрій для сушіння сипучих дисперсних матеріалів. 10. ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ № 56705. Пристрій для сушіння сипучих дисперсних матеріалів.

Поступила в редколлегию 31.05.2011