

**Ф.В. Кивва¹, В.Н. Горобец¹, М.И. Головка¹, С.М. Зотов¹,
Ю.В. Гончаренко¹, А.Л. Коворотный¹, А.И. Говорищев²**

¹ Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков,

² ООО НПФ «Сетра», 62371, с. Подворки, Дергачёвского р-на, Харьковской обл.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ СОРБЕНТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ



Описаны основные результаты выполнения инновационного проекта по разработке действующего экспериментального образца (макета) установки для регенерации сорбентов электромагнитным полем. Приведены основные технические характеристики и экономические показатели разработанной установки, а также сравнительные характеристики эффективности электромагнитной технологии регенерации сорбентов.

Ключевые слова: сорбент, регенерация, электромагнитное поле, высокая частота.

В электроэнергетической отрасли, в частности при обслуживании масляных трансформаторов, широко применяются сорбенты. Электрохимические и электрофизические свойства сорбентов, а также технологии их производства и регенерации рассмотрены в многочисленных литературных источниках, в том числе в специальных отчетах [1, 2], статьях [3], монографиях [4–6] и патентах.

В последнее время в связи с подорожанием сорбентов и ужесточением контроля над утилизацией отработанных сорбентов всё чаще ставится вопрос о качественной их регенерации. До недавних пор использовались три метода регенерации сорбентов: выжигание в высокотемпературной печи (при $t = 400\div 600$ °С), продувка сухим горячим воздухом и сушка термовакуумным способом с использованием точечных нагревателей. Основными недостатками этих методов является либо большое время регенерации (более 30 ч), либо коксова-

ние замасленного сорбента с потерей до 30 % его адсорбционной способности за один цикл регенерации [3].

Указанные недостатки удалось устранить с помощью технологии высокочастотного объемного нагрева электромагнитным полем (ЭМП), разработанной в Институте радиофизики и электроники (ИРЭ) НАНУ при выполнении НИР «Октан» [1] и «Икар» [2]. По результатам этих работ в ИРЭ НАНУ совместно с научно-производственной фирмой (НПФ) «Сетра ЛТД» был изготовлен экспериментальный макет, который прошёл лабораторные испытания в ИРЭ НАНУ и полигонные испытания в НПФ «Сетра ЛТД».

Позже для проведения испытаний в натуральных условиях на полигоне НПФ «Сетра ЛТД» и объектах облэнерго (подстанции, отдельные трансформаторы с масляной изоляцией и т.д.) в НПФ «Сетра ЛТД» совместно с ИРЭ НАНУ Украины была разработана и изготовлена установка регенерации и подготовки сорбента (БРПС). Установка БРПС-1 предназначена для предварительной подготовки и регенерации

сорбентов (цеолит, селикагель) без дополнительной их перезагрузки непосредственно в адсорберах установки МЦУ-7, предназначенной для регенерации трансформаторных масел.

Функционально установка БРПС-1, как и экспериментальный макет установки, состоит из двух частей: системы тепловой обработки (нагрева) сорбента, предназначенной для проведения термической десорбции, т.е. выделения поглощённого компонента (воды) из сорбента, и вакуумно-гидравлической системы, предназначенной для создания в системе форвакуума.

Технические характеристики, а также работа блоков и узлов установки описаны в работах [1–3].

В результате лабораторных испытаний в ИРЭ НАНУ и натурных испытаний на полигоне НПФ «Сетра ЛТД» (испытания проводились в летний период при температуре окружающей среды $10 \div 20$ °С) было отмечено:

- ✦ прокаливание сухих и чистых цеолитов в электромагнитном поле коротковолнового диапазона до температуры $300 \div 400$ °С увеличивает абсолютное значение их сорбционной емкости дополнительно на $10 \div 15$ % (сорбционная емкость цеолитов в исходном состоянии составляет $20 \div 25$ %);
- ✦ регенерацию цеолитов после их использования для сушки трансформаторного масла следует производить в интервале температур $50 \div 150$ °С при пониженном давлении (форвакуум, $p \cong 10^4$ Па);
- ✦ время регенерации цеолита при установленной мощности генератора $P = 1$ кВт и массе сорбента $m = 35 \div 40$ кг составляет $7 \div 8$ ч.

По результатам испытаний БРПС-1 в промышленных условиях получено ряд положительных отзывов от организаций энергетической отрасли Украины. При этом в отзывах были отмечены некоторые недостатки установки, выявленные в процессе промышленных испытаний, и пожелания потребителей. Основные недостатки выявлены в процессе эксплуатации установки при низкой температуре, т.к. понижение температуры окружающей среды приводит

к увеличению теплового излучения с поверхности адсорбера, что в свою очередь ведёт к увеличению длительности процесса регенерации и нарушению равномерности нагрева внутри адсорбера. Кроме того, отмечены факты выхода из строя вакуумных насосов. Вакуумные насосы типа ВН-461М или АВЗ-20, используемые в предлагаемой технологии регенерации сорбентов, критичны к наличию паров влаги в откачиваемом воздухе. Влага попадает в вакуумное масло, что приводит к выходу насоса из строя.

Целью инновационного проекта является создание и внедрение энергосберегающих технологий, природоохранных и ресурсоохранных мероприятий, которые позволяют решить конкретные практические вопросы в электроэнергетике: сократить время регенерации и увеличить срок службы сорбентов.

Содержанием данной работы является усовершенствование и модернизация установки БРПС-1 с учётом замечаний, выявленных в процессе промышленных испытаний.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ СОРБЕНТОВ

По результатам проведенного анализа отмеченных недостатков и пожеланий потребителей, а также в соответствии с техническим заданием (ТЗ) на выполнение инновационного проекта было проведено ряд работ по модернизации экспериментального образца (макета) по следующим направлениям:

- ✦ увеличение мощности генератора;
- ✦ улучшение теплоизоляции адсорбера;
- ✦ улучшение защиты вакуумного насоса от попадания водяных паров.

В результате проведенных работ был разработан и изготовлен экспериментальный образец (макет) установки БРПС-2 для регенерации сорбента (рис. 1). Экспериментальный образец прошёл лабораторные испытания в ИРЭ НАНУ и натурные испытания на полигоне НПФ «Импульс».

Установка БРПС-2 разработана в двух модификациях: вариант 1 — установка предна-



Рис. 1. Экспериментальный образец (макет) установки для регенерации сорбента БРПС-2

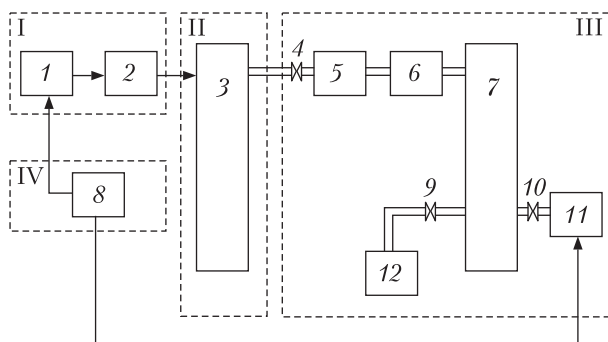


Рис. 2. Структурная схема установки БРПС-2: 1 – генератор ВЧ, 2 – согласующее устройство, 3 – адсорбер, 4 – входной вентиль, 5 – индикатор визуального контроля, 6 – контрольный теплообменник, 7 – ресивер, 8 – пульт управления, 9 – сливной вентиль, 10 – выходной вентиль, 11 – насос

значена для работы совместно с установкой для регенерации масла МЦУ-7 с двумя адсорберами вместимостью по 35 кг каждый и вариант 2 – для работы с автономно установленным адсорбером вместимостью 180 кг. Эти варианты по исполнению отличаются только конструкцией адсорберов и вакуумными насосами: в первом варианте установлен насос типа ВН-461М, во втором варианте – АВЗ-

20Д, который отличается от ВН-461М большей производительностью.

Экспериментальная установка БРПС-2 функционально состоит из четырёх частей: генератора высокой частоты (I), адсорбера (II), вакуумно-гидравлической системы (III) и пульта управления (IV). Структурная схема установки приведена на рис. 2. Принцип действия установки БРПС-2 не отличается от принципа действия установки БРПС-1.

Рассмотрим те детали и узлы установки, которые непосредственно были модернизированы при выполнении инновационного проекта.

ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ (ВЧ)

Генератор ВЧ, разработанный и изготовленный в результате выполнения инновационного проекта, является модернизированным вариантом генератора установки БРПС-1. Модернизация генератора была необходима в первую очередь для сокращения времени разогрева адсорбера при отрицательных температурах окружающей среды и поддержания равномерного прогрева сорбента в процессе регенерации. По своему функциональному назначению модернизированный генератор не отличается от прототипа. Основным отличием является параллельное включение генераторных тетродов ГУ-84Б в выходном каскаде, что позволило получить выходную мощность $2 \div 2,2$ кВт.

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ АДСОРБЕРА

Как уже отмечалось, основные проблемы с теплоизоляцией адсорбера возникают при отрицательных температурах. Первым шагом к решению этой проблемы является улучшение теплоизоляции адсорбера с помощью высококачественных теплоизоляционных материалов.

Минеральная вата URSA, используемая для теплоизоляции разработанного адсорбера, обладает всеми свойствами, необходимыми для качественной теплоизоляции. Она предназначена для тепло- и звукоизоляции ограждающих конструкций зданий, а также трубопроводов, промышленного оборудования, теплообменных

аппаратов и т.д. при температуре изолируемых поверхностей от -60°C до $+320^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,035 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Для повышения механической прочности и уменьшения теплового излучения верхний теплоизолирующий слой изготовлен из слоя фольгированной ваты URSA.

Теплоизоляция с помощью минеральной ваты позволила значительно уменьшить тепловое излучение адсорбера с поверхности. Но поскольку кожух адсорбера изготовлен из стали и имеет непосредственный контакт с рамой и согласующим устройством, то отток тепла остаётся ещё значительным, что в первую очередь влияет на равномерность теплового поля непосредственно вблизи внешней оболочки адсорбера.

Решением этой задачи, кроме увеличения мощности генератора, является применение активной теплоизоляции, т.е. нагрев поверхности адсорбера с помощью электронагревателей, непосредственно расположенных на поверхности адсорбера, и поддержание температуры поверхности адсорбера в пределах заданной, которая является установившейся температурой для регенерации определенного типа сорбента при форвакууме $p \cong 10^4 \text{ Па}$.

ЗАЩИТА ВАКУУМНОГО НАСОСА ОТ ПОПАДАНИЯ ВОДЯНЫХ ПАРОВ

Недостатком методики создания форвакуума, применяемой в установке БРПС-1, является тот факт, что пары влаги, поступающие в теплообменник, не полностью конденсируются. Несконденсированная часть паров вместе с воздухом через теплообменник попадает в вакуумный насос. Вакуумные насосы типа ВН — 461М или АВЗ-20Д — критичны к наличию влаги в удаляемом воздухе. Влага, смешиваясь с вакуумным маслом, уменьшает плотность масла, что приводит к выходу из строя насоса.

Для улучшения защиты вакуумного насоса от водяных паров предложена следующая методика.

Между насосом 11 и теплообменником 6 вводится промежуточный ресивер 7 (см. рис. 2),

совмещённый с теплообменником, объём которого соизмерим с объёмом адсорбера. На первом этапе создания форвакуума в системе при закрытом входном и открытом выходном вентилях создаётся необходимое давление в ресивере. Затем (при закрытом выходном и открытом входном вентилях) давления в адсорбере и ресивере выравниваются, в результате чего происходит отток паров влаги из адсорбера в теплообменник и их конденсация. Через некоторое время (1÷2 мин), необходимое для полного окончания этого процесса, входной вентиль закрывается, и при открытом выходном вентиле повторяется процесс откачки воздуха из ресивера. Таким образом, в результате практически полной конденсации паров влаги в теплообменнике пары в насос не поступают. Периодичность повторения этого цикла зависит от влажности сорбента и уточняется в процессе регенерации в каждом конкретном случае. Сконденсированная влага из теплообменника через вентиль 9 поступает в сборник конденсата 12, где осуществляется сбор и интегральный контроль испарённой влаги.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ БРПС-2

Экспериментальная установка БРПС-2, разработанная и изготовленная в результате выполнения инновационного проекта, обладает рядом преимуществ по сравнению со своим прототипом. Сравнительные характеристики установок БРПС-1 и БРПС-2 приведены в табл. 1.

Как было сказано выше, основными преимуществами БРПС-1 по сравнению с другими установками для регенерации сорбентов являются повышение качества регенерируемого сорбента и возможность проведения процесса регенерации сорбента без нарушения непрерывности технологического цикла, т.е. без пересыпания. Эти преимущества имеют большое значение в первую очередь при проведении процесса регенерации в полевых условиях непосредственно возле трансформато-

ров, за частую при неблагоприятных погодных условиях. Поэтому полевые испытания экспериментальной установки БРПС-2 проводились на открытой площадке при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 3 приведены графики изменения температуры сорбента внутри адсорбера для БРПС-1 и БРПС-2 (температура окружающей среды $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно).

Как видно из графиков, скорость роста температуры в адсорбере модернизированной установки значительно выше, чем в прототипе. Для того чтобы установка вышла на начало режима интенсивного испарения влаги ($70\div 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) установке БРПС-2 понадобилось меньше времени, чем установке БРПС-1. Это обусловлено как увеличением мощности генератора до 2 кВт, так и применением ленточных электронагревателей для подогрева корпуса адсорбера. Уменьшение скорости роста температуры через 1 ч и через 3,5 ч (кривая 2) обусловлено отключением ленточных электронагревателей. Отключение электронагревателей

может происходить в двух режимах работы: автоматический — при достижении определённой температуры поверхности адсорбера и ручной — когда оператор считает, что прирост температуры внутри адсорбера превышает допустимый. Температура отключения для каждого случая индивидуальна, зависит от типа сорбента, его состояния (промасленный или новый) и т.д. Более предпочтительным является автоматический режим. Если по какой-то причине температура поверхности адсорбера падает ниже установленной величины, происходит автоматическое включение электронагревателей. Такой режим работы электронагревателей обеспечивает более равномерное распределение температуры внутри адсорбера, особенно при отрицательных температурах окружающей среды.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ СОРБЕНТОВ

Представляется целесообразным рассмотреть сравнительные характеристики технологий и устройств, предназначенных для регене-

Сравнительные характеристики установок БРПС-1 и БРПС-2

Таблица 1

№ пор.	Характеристика	БРПС-1	БРПС-2
1	Объём сорбента, обрабатываемого за один цикл, кг, не более	35	40 (180)
2	Время одного цикла регенерации, ч, не более	8	6 (16)
3	Выходная мощность генератора, кВт, не менее	1	2
4	Мощность ленточного электронагревателя, кВт	—	4
5	Рабочая частота генератора, МГц	13,56	13,56
6	Время непрерывной работы генератора, ч, не менее	20	20
7	Температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$	$0\dots+30$	$-10\dots+30$
8	Потребляемая мощность, кВт, не более	3	8
9	Количество циклов регенерации сорбента	≥ 12	≥ 12
10	Толщина защитного теплового экрана адсорбера, см	1	5
11	Давление в адсорбере, Па	$9,8 \cdot 10^3$	$9,8 \cdot 10^3$
12	Питание установки — трёхфазная сеть переменного тока		
	напряжение, В	380	380
	частота, Гц	50	50
13	Габаритные размеры, м, не более*	$2,0 \times 1,0 \times 1,70$	$1,35 \times 0,9 \times 1,68$
14	Масса, кг, не более	860	340

*Весо-габаритные параметры установок указаны без учёта адсорберов.

рации сорбентов, применяемых в электроэнергетике. Эта задача возникает в связи с высокой стоимостью сорбентов (как естественных, так и искусственных), а также сравнительно низкой производительностью традиционно известных способов сушки (воздушно-солнечный, гелио-комбинированной, с конвективным энергоподводом и др.) [4, 7, 8].

Рассмотрим количественные характеристики установок, используемых для регенерации сорбентов:

- ✦ ПС-1 (установка подготовки сорбента);
- ✦ БРПС-1 (блок регенерации и подготовки сорбента) и БРПС-2.

Для сравнения рассмотрим основные энергетические характеристики технологий, реализуемых в установках. Заметим, что приведенные расчеты сугубо ориентировочные, поскольку процессы преобразования энергии электромагнитного поля в тепло, нагревания гетерогенных смесей, испарения и т.д. являются нестационарными и зависят от многих факторов естественного и искусственного происхождения. Цель нашего рассмотрения — сравнительные характеристики различных технологий, направленных на энергосбережение и улучшение качества выпускаемой продукции. Применительно к технологии регенерации сорбентов — это возможность длительного сохранения высокой адсорбционной емкости сорбентов и, соответственно, повышение количества циклов регенерации без существенной потери

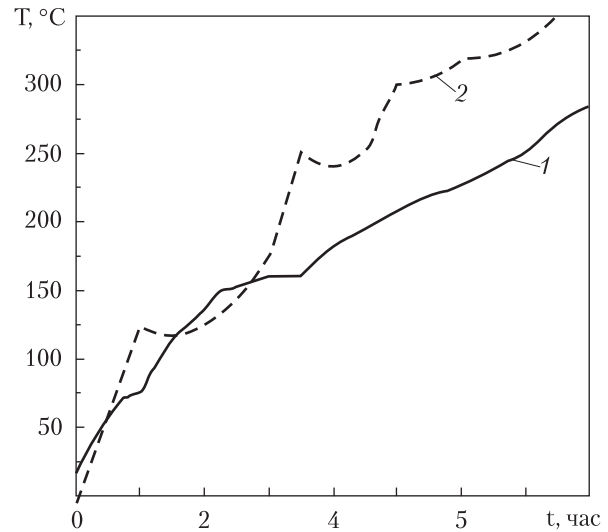


Рис. 3. Изменение температуры сорбента внутри адсорбера: 1 — для БРПС-1 (сплошная линия), 2 — для БРПС-2 (пунктирная)

емкости, что в конечном итоге также может быть выражено в энергосбережении или, соответственно, экономическом эффекте от внедрения технологии.

Проведем сравнительные расчеты применительно к массе регенерируемого сорбента $m = 100$ кг. Будем учитывать экономический эффект от сбережения затраченной электроэнергии, а также экономии средств на закупку сорбента, емкость которого примем одинаковой для всех рассмотренных случаев, ($C = 20\%$). Стоимость электроэнергии — 0,4 грн/(кВт·час), сорбента — 25 грн/кг.

Таблица 2

Сравнительные характеристики эффективности установок ПС-1, БРПС-1 и БРПС-2

№ пор.	Наименование показателя	ПС-1	БРПС-1	БРПС-2
1	Масса увлажненного сорбента, кг	100	100	100
2	Общие затраты энергии, МДж	1200	247	172
3	Время обработки сорбента, ч	40	8	6
4	КПД, %	4	18	26
5	Количество циклов регенерации	2	12	12
6	Экономический эффект от экономии электроэнергии, грн	База (0)	110	157

Сравнение проведём по следующим параметрам:

- ✦ общее энергопотребление \mathcal{E}_n для высушивания сорбента $\mathcal{E}_n = P \cdot t$, Дж, где P — установленная мощность, кВт; t — время, необходимое для высушивания насыщенного сорбента, ч;
- ✦ время обработки сорбента, ч;
- ✦ КПД установки $\eta = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_n}$, где $\mathcal{E}_1 = q \cdot m$; Дж —

энергия, которая расходуется на испарение воды; $q = 2256$ кДж/кг — удельная теплота парообразования; m — масса воды;

- ✦ количество циклов регенерации;
- ✦ экономический эффект от экономии электроэнергии, грн.

В пересчете на 100 кг увлажненного сорбента обобщенные энергетические показатели сведены в табл. 2.

С учетом нестационарности процессов теплообмена между источником и веществом, веществом и стенкой адсорбера, адсорбером и защитным тепловым экраном, защитным экраном и поверхностной полированной пленкой, уменьшающей потери тепла на излучение и др. нетрудно заметить, что достигнуты существенные результаты не только по энергосбережению, но и по другим показателям, влияющим на экономическую эффективность применяемых технологий. Экономический эффект от экономии за счёт увеличения количества циклов регенерации масла одним и тем же сорбентом составляет около 1000 грн на 100 кг сорбента.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования и разработка действующего экспериментального образца (макета) установки для регенерации сорбентов позволили решить следующие конкретные практические вопросы в технологии регенерации трансформаторных масел и сорбентов:

- ✦ время регенерации сорбента в модернизированной установке (БРПС-2) по сравнению с прототипом (БРПС-1) сокращено с 8

до 6 ч. (при этом диапазон внешних температур, при котором возможна эксплуатация установки, расширился в область низких температур до -10 °С);

- ✦ проведенные мероприятия по теплоизоляции адсорбера (как пассивной, так и активной) привели к улучшению качества регенерируемого сорбента в широком диапазоне температур, что в конечном итоге привело к увеличению срока службы сорбента.

Практическим результатом завершённой работы является модернизированный экспериментальный образец (макет) установки, обладающий, на наш взгляд, всеми признаками устройств, пригодных для промышленного применения.

Как свидетельствуют многочисленные заявки на приобретение ВЧ-технологий регенерации масел и сорбентов, они будут востребованными реальными секторами промышленности не только сегодня, но и в обозримом будущем.

Работа выполнялась в рамках инновационного проекта «Устройство для регенерации сорбентов электромагнитным полем» в соответствии с Распоряжением Президиума НАН Украины от 25 апреля 2009 г. в ИРЭ НАНУ в период с 5.05 2009 г. по 31.12.2009 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Отчет по НИР «Октан».* Разработка и изготовление устройства для ускоренной регенерации сорбента // ИРЭ НАН Украины. — 2002. — 101 с.
2. *Отчет по НИР «Икар».* Исследования электромагнитных полей в средах с поглощением и частотной дисперсией с неявно выраженными границами слоев. Книга 3. Исследование взаимодействия мощных ЭМП с сорбентами // ИРЭ НАН Украины. — 2006. — 57 с.
3. *Кивва Ф.В., Горбеев В.Н., Головки М.И. и др.* Новые технологии обработки сорбентов // Новини енергетики. — 2003. — №1–2. — С. 26–31.
4. *Кельцев Н.В.* Основы адсорбционной техники. — М.: Химия, 1984. — 590 с.
5. *Фролов Ю.П.* Курс коллоидной химии. — М.: Химия, 1998. — 333 с.
6. *Монастырский А.Е.* Регенерация, сушка и дегазация трансформаторного масла. Учебное пособие. — СПб, 1997. — 42 с.

7. *Jacques Thierry*. Microwave: Industrial, Scientific and Medical Applications // Artech House, 1986. — 660 p.
8. *Ястребов О.И.* Применение техники СВЧ в целлюлозно-бумажном производстве. — М.: Лесная промышленность, — 1977. — 150 с.

Ф.В. Ківва, В.М. Горобець, М.І. Головка, С.М. Зотов, Ю.В. Гончаренко, О.Л. Коворотний, О.І. Говорищев

ПРИСТРІЙ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦІЇ СОРБЕНТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ

Описано основні результати виконання інноваційного проекту по розробці експериментального зразка (макета) установки для регенерації сорбентів електромагнітним полем. Наведені основні технічні характеристики та економічні показники розробленої установки, а також порівняльні характеристики ефективності електромагнітної технології регенерації сорбентів.

Ключові слова: сорбент, регенерація, електромагнітне поле, висока частота.

F.V. Kivva, V.N. Gorobets, M.I. Golovko, S.M. Zotov, Yu.V. Goncharenko, A.L. Kovorotniy, A.I. Govorischev

EQUIPMENT FOR SORBENT REGENERATION IN THE ELECTROMAGNETIC FIELD

The main results of innovative project on development of operating experimental equipment (model) for sorbent regeneration using electromagnetic field are described. The main technical characteristics and economic indicators of the equipment and also the comparative characteristics of electromagnetic technology of sorbent regeneration are shown.

Key words: sorbent, regeneration, electromagnetic field, high frequency.

Надійшла до редакції 09.03.10