

УДК 621.039.57

*С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, Б.А. АЛЕКСЕНКО, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ***ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ ВЛАГИ С ПОВЕРХНОСТИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИТ**

Проведене практичне експериментальне дослідження впливу мікрохвильового випромінювання на процес десорбції вологи з поверхневого шару молекулярних сит, що використовуються в адсорбційних осушувачах стислого повітря. У зв'язку з широким розповсюдженням технологій, які потребують якісного стислого повітря, що використовується у сучасному промисловому виробництві, зазначена технологія потребує вдосконалення з метою підвищення якості продукції, що виробляється, і зниження виробничих витрат підприємств. Результат проведеного дослідження показав застосовність енергії мікрохвильового випромінювання з метою регенерації молекулярних сит в пристроях підготовки повітря адсорбційного типу.

**Ключові слова:** осушувач, стисле повітря, вологовміст, мікрохвильове випромінювання, адсорбція, регенерація.

Проведено практическое экспериментальное исследование влияния воздействия микроволнового излучения на процесс десорбции влаги с поверхностного слоя молекулярных сит, используемых в адсорбционных осушителях сжатого воздуха. В связи с широким распространением технологий, нуждающихся в качественном сжатом воздухе, используемом в современном промышленном производстве, указанная технология нуждается в совершенствовании с целью повышения качества производимой продукции и снижения производственных затрат предприятий. Результат проведенного исследования показал применимость энергии микроволнового излучения с целью регенерации молекулярных сит в устройствах подготовки воздуха адсорбционного типа.

**Ключевые слова:** математичне моделювання, дисперсні композити, метод згладжених частинок SPH.

A practical experimental study of the effect of microwave radiation on the process of moisture desorption from the surface layer of molecular sieves used in the adsorption compressed air dryers. Due to the wide spread of technology, requiring high-quality compressed air that is used in modern industrial production, said the technology needs to be improved in order to increase product quality and reduce production costs of enterprises. The result of the study showed the applicability of microwave energy to regenerate the molecular sieves, used in adsorption dryers.

**Keywords:** dryer, compressed air, moisture, microwave radiation, adsorption, regeneration.

**Введение.** Как было показано [1], осушенный сжатый воздух является необходимым в промышленности не только как источник энергии, но и как компонент используемый в различных технологических процессах.

В настоящей публикации будет рассмотрено применение микроволнового излучения с целью десорбции влаги с поверхности молекулярных сит в процессе получения осушенного сжатого воздуха.

**Анализ последних исследований и литературы.** Обзор работ и исследований по поставленной тематике свидетельствует о том, что основное внимание разработчиков и производителей оборудования воздухоподготовки уделяется разработкам методов повышения производительности и снижения энергопотребления оборудования, носящих экстенсивный характер. При этом, проблеме интенсификации процесса десорбции молекулярных сит, разработке новых технологий, помимо известной общепринятой продувки осушенным или прогретым воздухом, уделяется недостаточно внимания как в области теоретических исследований, так и в области практического использования [5]. Основное внимание разработчиков осушающего оборудования с нагревной регенерацией приковано к такой важной, с точки зрения энергосбережения, проблеме как рекуперация тепловой энергии, используемой в процессе десорбции. Также инженеры стремятся к максимальному снижению непроизводительных затрат тепловой энергии на нагрев сопутствующих элементов оборудования, вплоть до перенесения источника нагрева непосредственно в полость адсорбционных колонн.

Между тем, применение альтернативных источников энергии может стать серьезной альтернативой общепринятым технологиям регенерации адсорбентов.

**Целью** настоящей статьи является изучение характера влияния микроволнового излучения на процесс десорбции влаги с поверхности молекулярного сита.

**Постановка проблемы.** Повышение требований к качеству сжатого воздуха, используемого в современном производстве, диктует острую необходимость совершенствования конструкции осушителей адсорбционного типа, с целью повышения их производительности и надежности при параллельном снижении уровня энергопотребления.

В настоящей работе рассматривается проблема подготовки воздуха с использованием адсорбционных осушителей, использующих новую технологию регенерации, показывается необходимость применения дополнительных источников энергии с целью интенсификации процесса регенерации адсорбента, экспериментально прослеживается зависимость интенсивности десорбции влаги с поверхности молекулярных сит, а также определяются основные направления улучшения конструкции промышленных адсорбционных осушителей.

**Материалы исследований.** В ходе проводимого исследования протекание процесса десорбции оценивается по такому параметру как остаточное влагосодержание в слое подопытного вещества после воздействия микроволнового излучения.

Исследование проводится с использованием испытательного стенда с техническими характеристиками, указанными в приложении (см. прил. 2.) Процесс протекает в радионепрозрачной камере объемом 30 дм<sup>3</sup> с использованием стандартной частоты 2450 МГц [2], генерируемой магнетроном OM75P.

Воздействию микроволнового излучения подвергается слой адсорбирующего вещества сухой массой 150 г., при глубине засыпки 2 см.

© С.С. Добротворский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская, 2017

Испарение десорбируемой влаги из ёмкости, содержащей адсорбирующее вещество, происходит с поверхности площадью 85 см<sup>2</sup>. Последующее удаление влаги из полости камеры осуществляется при помощи продувки камеры осевым вентилятором производительностью 1,5 м<sup>3</sup>/мин.

Влагосодержание молекулярного сита, как основной параметр, характеризующий его способность к дальнейшей адсорбции, возможно наиболее точно оценить лишь косвенно, по снижению влажности воздуха, продуваемого через адсорбирующее вещество, по причине того, что выпускаемые датчики измерения влажности предназначены для работы в отбегаяющих датчик газообразных средах. Непосредственное же внедрение чувствительного элемента датчика влажности в структуру адсорбирующего вещества не представляется возможным из-за: 1] физической особенности характера процесса адсорбции, происходящего непосредственно в микропористой структуре на поверхности молекулярного сита, 2] неизбежной погрешности показаний интегрированного датчика при прямом контакте с микропористой структурой молекулярного сита и, что самое основное, 3] невозможности при помощи интегрированного чувствительного элемента контролировать влагосодержание всего объема испытываемого вещества в целом.

Исходя из вышеприведенных соображений, авторами принято решение об использовании силикагеля-индикатора, позволяющего визуально оценить протекание процесса десорбции во всём объеме испытываемого вещества, с некоторым ущербом точности определения влажности. Так, в качестве испытываемого вещества применен силикагель КСШГ индикаторный, ГОСТ 8984-75, позволяющий визуально контролировать процесс десорбции в режиме реального времени. Содержание влаги в слое в конкретный момент времени оценивается и фиксируется по изменению окраса индикаторного силикагеля путем сопоставления его цвета с цветом, указанным в Процентной цветовой шкале оценки (см. рис. 1.). Процентная цветовая шкала оценки отображает уровень насыщения влагой силикагеля индикаторного с расчетной влагоемкостью 27 % при относительной влажности 60 %.

Оценка эффективности осушки силикагеля с использованием микроволновой энергии рассчитывается как отношение (1) тепловой энергии, используемой для процесса испарения воды к тепловой энергии, вырабатываемой магнетроном в процессе сушки.

$$\eta = \frac{m_w \times \lambda_w}{P \times t} \quad (1)$$

где  $\eta$  – эффективность (%);  $P$  - мощность (Вт);  $m_w$  – масса испаренной влаги (кг),  $\lambda_w$  Удельная теплота парообразования/конденсации воды (2257 кДж/кг),  $t$  – время (ч).

По условиям эксперимента процессы предварительной адсорбции и десорбции протекают при нулевой компрессии, относительная влажность продувочного воздуха на входе составляет 55 ... 60 % и в процессе исследования дополнительно не снижается, ко-

лебания температуры продувочного воздуха на входе в камеру находятся в пределах +23 ... +26 °С.

Мощность микроволнового излучения [4] в процессе эксперимента изменяется в пределах 20 ... 100 %, от максимальной, что составляет 180 ... 900 Вт по методу измерения выходной мощности МЭК-705.

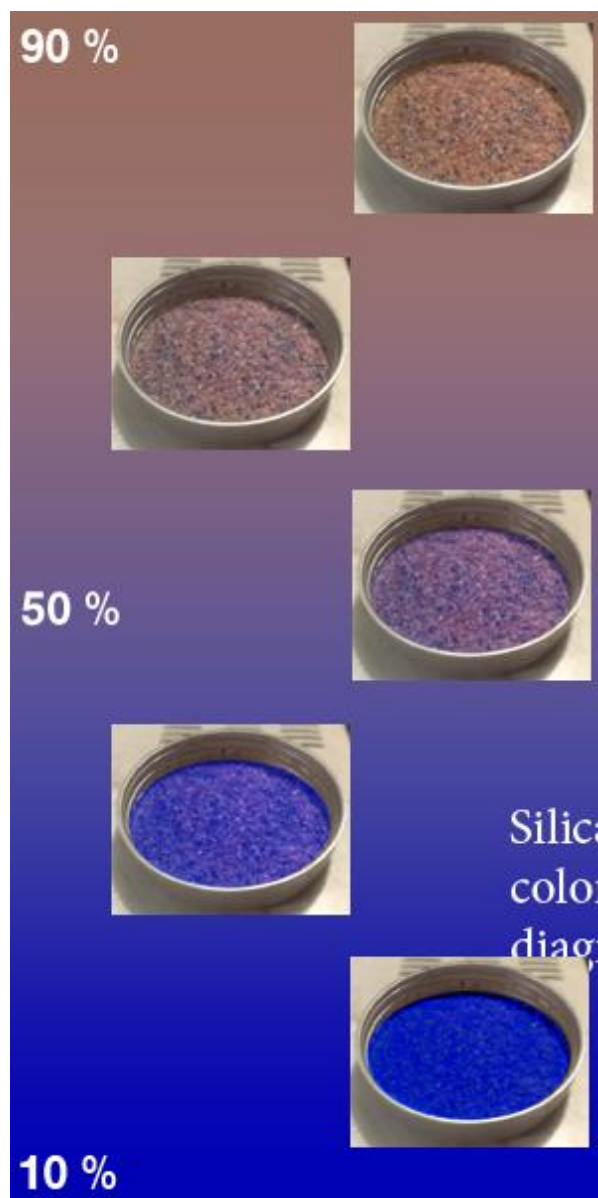


Рис. 1 – Процентная цветовая шкала оценки и сопоставление образцов испытываемого материала на цветовое соответствие.

**Результаты исследования.** В результате проведенного эксперимента опытно подтверждена возможность и целесообразность использования микроволнового излучения в процессе десорбции влаги с поверхностного слоя молекулярных сит.

Установлена зависимость интенсивности протекания процесса десорбции от времени воздействия и уровня мощности воздействующего на адсорбент микроволнового излучения, графически представленная на графике (рис. 1.).

Результаты исследования, полученные с использованием процентной цветовой шкалы оценки хоро-

шо, коррелируются с результатами взвешивания массы испытуемого материала в ходе эксперимента (прил. 1., рис.2) с интервалом 30 сек.

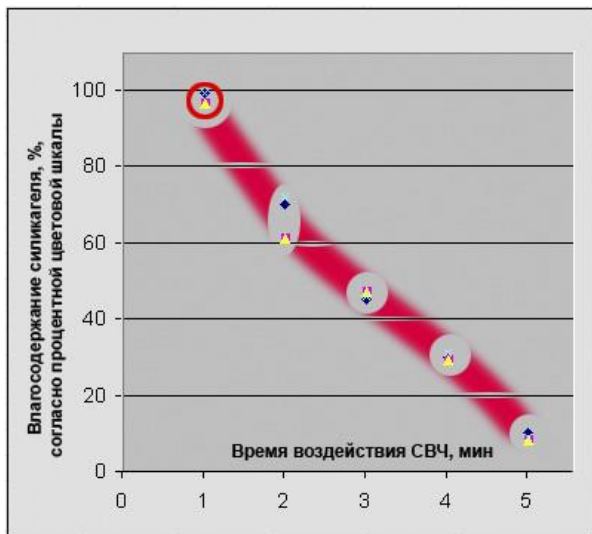


Рис. 2 – Зависимость интенсивности протекания процесса десорбции от времени воздействия СВЧ

В ходе изучения зависимости влияния мощности воздействующего микроволнового излучения на время десорбции адсорбента до уровня влажосодержания не менее 10 % по визуальной оценке в соответствии с процентной цветовой шкалой оценки, установлена прямая линейная зависимость времени сушки адсорбента от уровня мощности микроволнового излучения, воздействующего на испытуемое вещество (рис. 3).

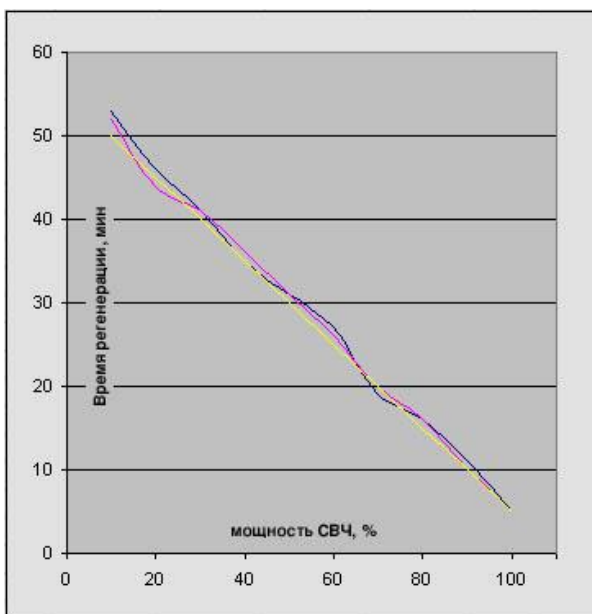


Рис. 3 – Зависимость времени десорбции адсорбента от мощности воздействующего микроволнового излучения

**Практические разработки.** В настоящее время в мировой практике неизвестны конструкции адсорбционных осушителей, использующих энергию микро-

волнового излучения на этапе удаления влаги из адсорбента.

Как указано [1], в практике постройки адсорбционных осушителей используются методы регенерации путем обдува его предварительно нагретым, либо предварительно осушенным воздухом [4]. При этом энергия, необходимая для осуществления процесса регенерации тратится на повышение влагоёмкости продувочного воздуха и, во-первых, технологически ограничена и не может быть значительно увеличена с целью интенсификации процесса регенерации; и, во-вторых, (в случае использования способа горячей регенерации) не может быть стопроцентно использована по назначению, из-за возникновения дополнительных энергозатрат по разогреву продувочных воздуховодов и прочих сопутствующих элементов оборудования.

Применение микроволнового излучения с целью десорбции влаги с поверхности молекулярных сит позволяет избежать непроизводительных затрат энергии в силу воздействия микроволнового излучения непосредственно на молекулы десорбируемой влаги.

Таким образом, как показано в [1] об особенностях практического использования оборудования, целью повышения эффективности работы адсорбционных осушителей, улучшения их массогабаритных характеристик, в том числе, для использования в мобильных агрегатах, требуется повышение интенсивности регенерации заданного объема адсорбирующего вещества.

Проведенный эксперимент практически доказывает возможность достижения поставленной цели путем внесения дополнительных видов энергии на этапе регенерации, и, в частности, путем использования энергии микроволнового излучения в качестве основной.

Следует отметить, что работы в этом направлении носят экспериментальный характер и осушители, в конструкции которых используются дополнительные или альтернативные виды энергии на этапе регенерации, в настоящее время на отечественных производственных предприятиях не внедряются [5].

**Выводы.** Результат проведенного исследования показывает применимость энергии микроволнового излучения с целью регенерации молекулярных сит в устройствах подготовки воздуха адсорбционного типа.

Проведенный эксперимент открывает перспективу для дальнейших исследований воздействия микроволнового излучения на процесс десорбции молекулярных сит в условиях, максимально приближенных к практическим, и к созданию действующего инновационного образца промышленного оборудования.

Приложение 1 – Масса испытуемого материала при проведении 4-х экспериментов

Масса испытуемого материала, г, в ходе экспериментов					
Время, мин	Эксперимент №				
	I	II	III	IV	
0	0:00	193	193	195	194
1	0:30	189	189	191	189
2	1:00	185	184	187	185
3	1:30	180	180	182	181
4	2:00	176	176	178	177
5	2:30	172	172	174	172

## Продолжение прилож. 1

6	3:00	168	167	169	168
7	3:30	163	163	165	164
8	4:00	159	159	161	159
9	4:30	155	154	156	155
10	5:00	151	150	152	151

## Приложение 2 – Параметры установки, использованной при проведении эксперимента

Характеристики испытательного стенда		
Параметр		Значение
1	Частота излучаемая	2450 МГц
2	Мощность максимальная	1 кВт
3	Диапазон регулировки мощности	10 ... 100
4	Производительность вентилятора	1,5 м³/мин
5	Объем камеры	35 дм³
6	Протокол связи с ПК	RS232
7	Параметры электропитания	220в AC

## Список литературы

1. Добровольский С.С. Аспекты применения адсорбционных осушителей для обеспечения сжатым воздухом оборудования плазменной резки. // С.С. Добровольский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – Вып.1149. – С. 73-77.

2. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации тепловых процессов/ Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. – Саратов: Изд. Саратов. ун-та, 1983. – 140 с.
3. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот: пер. с англ. / Г. Пюшнер. — М.: Энергия, 1968. — 312 с.
4. Мельгунов, М.С. Короткоцикловая безнагревная адсорбция / М.С. Мельгунов // Промышленный катализ в лекциях / под общ. ред. А.С. Носкова. – М., 2009. – Вып. 8. – С. 62–105.
5. Липа А.И. Кондиционирование воздуха. Основы и теории. Современные технологии обработки воздуха. Изд. второе, перераб., доп., Одесса: ОГАХ. Издательство «Издательство ВМВ», 2010 – 607 с, ил.

## Bibliography (transliterated)

1. *Dobrovolskiy S.S. Aspekty primeneniya adsorbtsionnykh osushiteley dlya obespecheniya szhatyim vozduhom oborudovaniya plazmennoy rezki.* Kharkov: NTU «KhPI», 2014. Print.
2. *Arhangel'skiy Yu.S. Sverhvyisokochastotnyye nagrevatelnyye ustanovki dlya intensifikatsii teplovykh protsessov/ Yu.S. Arhangel'skiy, I.I. Devyatkin.* Saratov: Izd. Sarat. un-ta, 1983. 140 p.
3. *Pyushner G. Nagrev energiyey sverhvyisokikh chastot: per. s angl.* G. Pyushner. Moscow. Energiya, 1968. 312 p..
4. *Melgunov, M.S. Korotkotsiklovaya beznagrevnaya adsorbtsiya. Promyshlennyy kataliz v lektsiyah / pod obsch. red. A.S. Noskova.* Moscow, 2009. Vol 8. PP. 62–105.
5. *Lipa A.I. Konditsionirovanie vozduha. Osnovy I teorii. Sovremennyye tehnologii obrabotki vozduha.* Izd. vtoro, pererab., dop., Odessa: OGAN. Izdatelstvo: «Izdatelstvo VMV», 2010 – 607p..

Поступила (received) 05.03.17

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Влияние микроволнового излучения на интенсивность процесса десорбции влаги с поверхности молекулярных сит/ С.С. Добровольский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239) – С. 26–29. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Вплив мікрохвильового випромінювання на інтенсивність процесу десорбції вологи з поверхні молекулярних сит/ С.С. Добровольський, Б.О. Алексенко, Л.Г. Добровольська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 17 (1239) – С. 26–29. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Influence of microwave radiation on the intensity of the moisture desorption from the surface of the molecular sieves / S. Dobrovolskiy, B. Aleksenko, L. Dobrovolska // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 17 (1239). – P. 26–29. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Добровольський Сергій Семенович** - доктор технічних наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел. : (057) -720-66-25; e-mail: sдобро@mail.ru.

**Добровольский Сергей Семенович** – доктор технических наук, профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: sдобро@mail.ru.

**Dobrovolsky Sergey Semenovich** - Doctor of Technical Sciences, Professor of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: sдобро@mail.ru.

**Алексенко Борис Александрович** - аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

**Алексенко Борис Александрович** – аспірант Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

**Aleksenko Boris Aleksandrovich** – postgraduate of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

**Добровольська Людмила Георгіївна** - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

**Добровольская Людмила Георгиевна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

**Dobrovolskaya Lyudmila Georgiyevna** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.