

Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОСУШКИ СЖАТОГО ВОЗДУХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕОЛИТОВ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с исследованием энергоёмкости процессов осушки сжатого воздуха с применением различных марок цеолитов. Выполнен анализ теплофизических свойств рассматриваемых адсорбентов, определены условия проведения процессов адсорбции в виде задания диапазонов изменения скоростей движения сжатого воздуха через адсорбер, диапазона изменения относительной влажности атмосферного воздуха с учетом определенного класса чистоты сжатого воздуха в соответствии с нормативным документом. На основании полученных результатов, визуализированных в виде гистограмм, проведен анализ энергоэффективности рассматриваемых марок цеолитов, сформулированы выводы.

Ключевые слова: энергоэффективность, цеолит, сжатый воздух, атмосферный воздух, порозность, энергозатраты, компрессор, гистограмма.

Для цитирования: Риполь-Сарагоси, Т. Л. Исследование энергоэффективности процессов осушки сжатого воздуха с использованием цеолитов различных марок / Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 132–138. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_132.

Введение

В настоящее время в практике осушки сжатого воздуха в качестве адсорбентов используются цеолиты и молекулярные сита. Предпочтение этим типам адсорбентов отдается благодаря их высокой избирательной способности к адсорбции и уникальной способности к дифференциации поглощаемых молекул по размерам и форме. Однако следует отметить, что, если для таких адсорбентов, как силикагель и алюмогель, проводились исследования по определению энергетических затрат на реализацию процесса адсорбции влаги из сжатого воздуха [1], то для широко используемых марок цеолитов подобные исследования отсутствуют.

Следовательно, проведение исследований, направленных на определение энергетических затрат на привод компрессора при использовании цеолитов в качестве адсорбентов влаги из сжатого воздуха при различных скоростях его движения и различных относительных влажностях атмосферного воздуха является актуальным [2–3].

Материалы и методы

Для определения выбора наиболее энергетически обоснованной марки цеолита произведём расчёт энергозатрат на привод поршневого компрессора при производстве сжатого воздуха, отправляемого на осушку в адсорберы, заполненные различными марками цеолитов, и проанализируем полученные результаты [4]. В качестве компрессора был выбран поршневой компрессор СБ4/Ф-500.LB75 белорусского производителя Remeza. Рабочие характеристики данного компрессора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Рабочие характеристики компрессора СБ4/Ф-500.LB75

Тип компрессора	Поршневой
Производительность (вход/выход), л/мин	950/760
Рабочее давление, бар	9/7
Мощность двигателя, кВт	5,5
КПД компрессора	0,7
КПД привода	0,8

При проведении расчетов были рассмотрены варианты использования различных марок цеолитов при следующих условиях: относительная влажность атмосферного воздуха изменялась в пределах

от 50 до 100 %, скорость движения потока осушаемого воздуха через адсорбер изменялась в пределах от 0,2 до 0,5 м/с. Расчеты проводились для третьего класса чистоты сжатого воздуха в соответствии с ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005. Расчёт энергозатрат на привод компрессора ΔN при использовании цеолитов в качестве сушильного агента производился по формуле [5]

$$\Delta N = \frac{k_3 \cdot G \cdot 2,3 \cdot 10^3 \cdot P_1 \cdot \left[\lg \left(\frac{P_2 + \Delta P}{P_1} \right) - \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right]}{102 \cdot \eta_k \cdot \eta_n} \cdot 10^3,$$

где k_3 – коэффициент запаса (принимается равным 1.15); G – расход сжатого воздуха, м³/с; P_1 – атмосферное давление, бар; P_2 – давление воздуха на выходе из компрессора, бар; ΔP – аэродинамическое сопротивление слоя адсорбента (с учетом влияния межгранульного пространства, бар; η_k – коэффициент полезного действия компрессора; η_n – коэффициент полезного действия привода.

Результаты расчётов характеристик, приведённых выше, при минимально возможной скорости движения потока 0,2 м/с и относительной влажности 50 % для цеолита NaA, цеолита KA-CO, молекулярного сита RS-144M, молекулярного сита RS-CMS представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчёта энергозатрат на привод компрессора при использовании различных видов цеолитов

Характеристика	Цеолит NaA	Цеолит KA-CO	MC RS-144M	MC RS-CMS
1	2	3	4	5
d_0 , г/м ³	0,19			
d_k , г/м ³	0,09			
M_a , кг	7,75	7,68	7,02	8,02
V_a , м ³	0,009	0,009	0,012	0,012
ρ_r , кг/м ³	2,2			
D , м	0,204			
H , м	0,28	0,27	0,39	0,37
ε	0,29	0,375	0,083	0,226
ΔP_2 , бар	0,032	0,04	0,013	0,033
ΔN , Вт	68,05	86,70	27,27	71,47

В табл. 2 d_0 – абсолютная влажность наружного воздуха при указанных выше параметрах, г/м³; d_k – влажность воздуха на выходе из адсорбера для обозначенного выше класса чистоты, г/м³; M – масса адсорбента, кг; V_a – объем адсорбера, м³; ρ_r – плотность адсорбента, кг/м³; D – диаметр адсорбера, м²; H – высота слоя адсорбента, м.

Обсуждение

Расчёт на первом режиме работы показал, что наименьшие затраты энергии на привод компрессора получаются при использовании молекулярного сита RS-144M, а наибольшие – при использовании цеолита марки KA-CO. Для определения тенденции изменения затрат энергии на осуществление процесса адсорбции при меняющихся скоростях движения сжатого воздуха и относительных влажностях атмосферного воздуха в обозначенных пределах произведём аналогичные расчёты при скоростях движения воздуха, изменяющихся в пределах от 0,2 до 0,5 м/с, третьем классе чистоты и относительной влажности атмосферного воздуха, изменяющейся от 50 до 100 %. На основании полученных расчётных величин, приведённых ранее [6–9], построим гистограммы зависимости изменения энергозатрат на привод компрессора от изменения скорости движения сжатого воздуха и изменения относительной влажности атмосферного воздуха при соблюдении требований к его качеству, характерных для третьего класса чистоты, в соответствии с приведённым выше нормативным документом. Полученные результаты представлены на рис. 1, а–г.

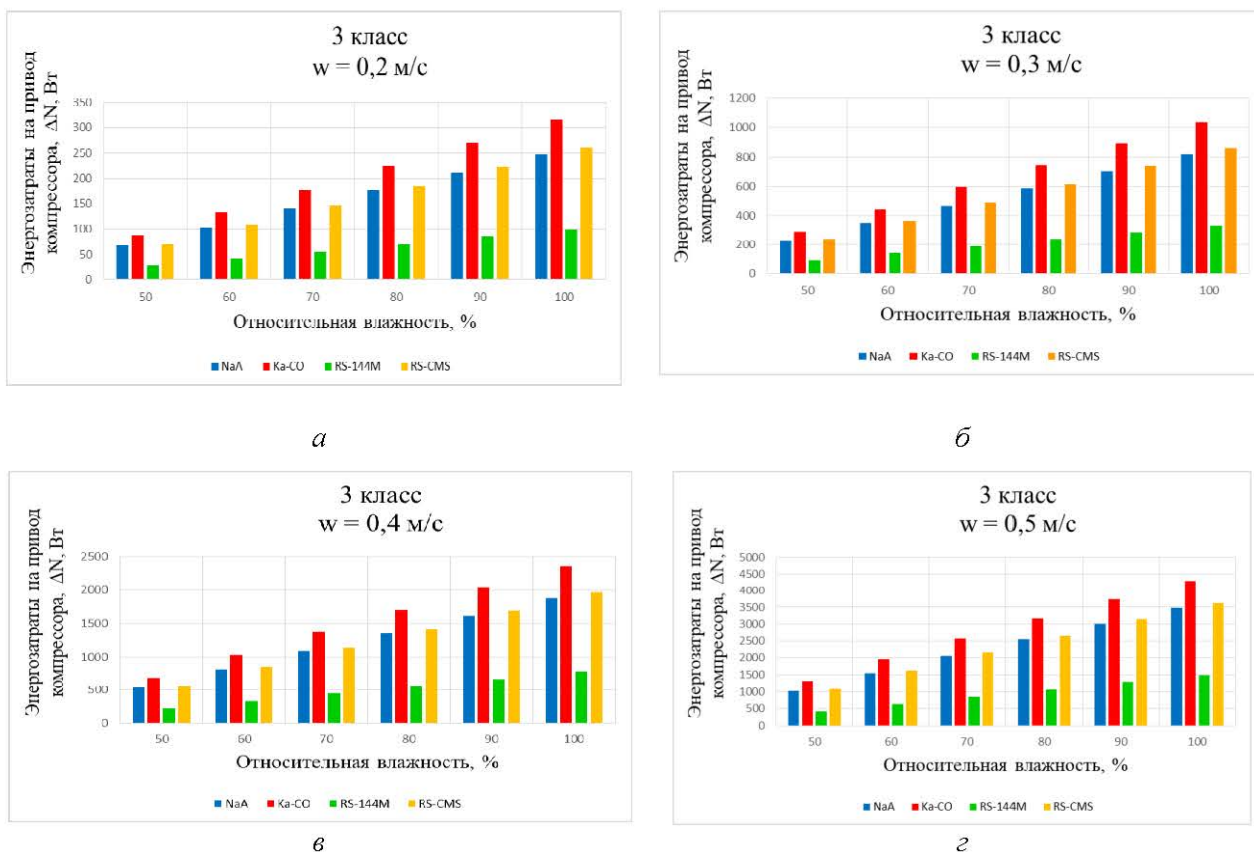
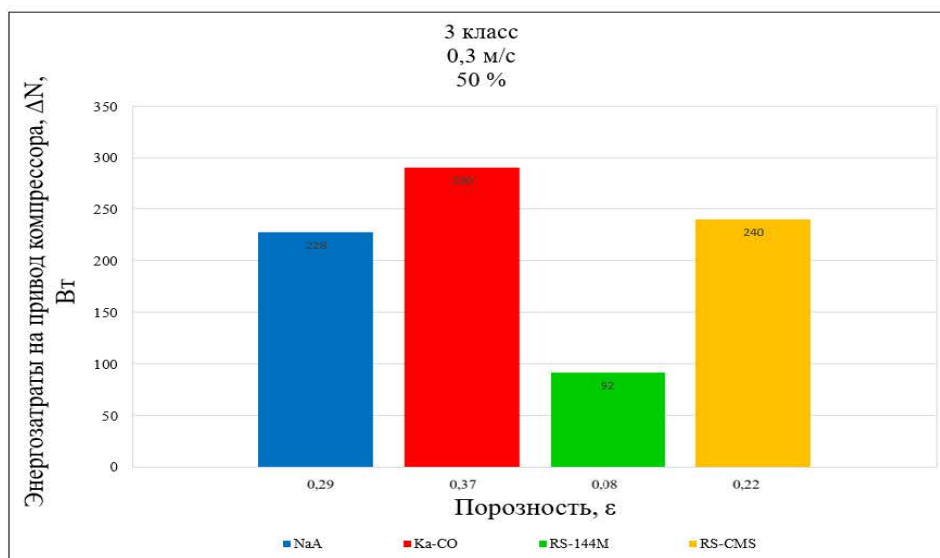


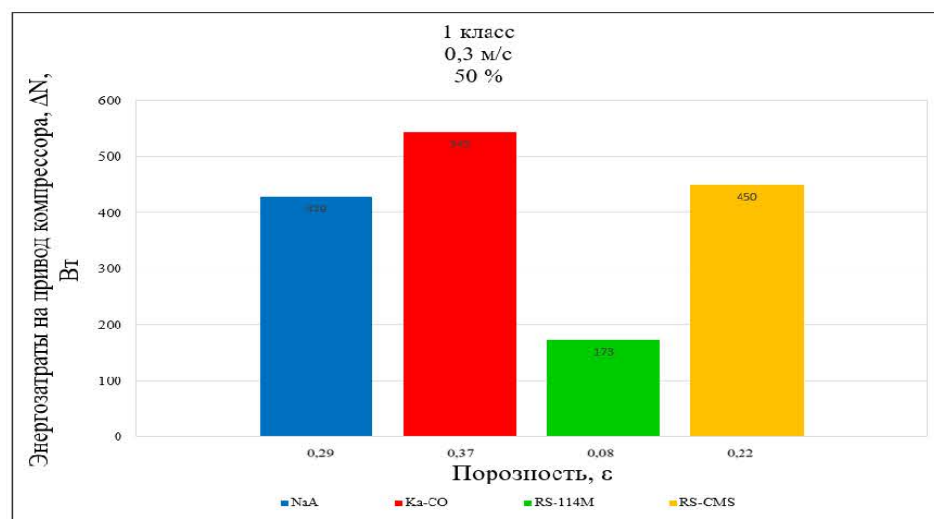
Рис. 1. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида цеолита и относительной влажности атмосферного воздуха

На приведенных выше графиках отчетливо видно, что наименьшие затраты на привод компрессора обеспечивает использование в качестве сушильного агента (адсорбента) молекулярного сита RS-144M. Такое различие значений объясняется влиянием величины порозности в формуле расчета потерь давления при движении сжатого воздуха через колонну адсорбера. Как уже говорилось ранее, порозность учитывает влияние пустот между гранулами и зависит от соотношения насыпной и кажущейся плотностей. Чем меньше разница между этими двумя характеристиками, тем меньше значение порозности. Иными словами, чем меньше пустот между гранулами и чем плотнее засыпан слой адсорбента, тем меньше затрат электроэнергии потребуется на адсорбционную осушку сжатого воздуха.

Представим данную зависимость в виде гистограмм (рис. 2, а, б), на которых отображена зависимость потерь мощности на привод компрессора от порозности слоя адсорбента для 1-го и 3-го классов чистоты при скорости движения воздуха 0,3 м/с и относительной влажности воздуха 50 %.



а



б

Рис. 2. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида цеолита и значения его порозности

Из приведённых гистограмм отчётливо видна тенденция увеличения энергозатрат с увеличением скорости движения потока, относительной влажности атмосферного воздуха и требуемого класса его очистки. Анализируя данные, приведённые в табл. 1, и гистограммы, представленные на рис. 1 и 2, можно сделать следующие выводы:

- молекулярное сито RS-144M имеет наименьшую массу среди представленных адсорбентов благодаря своей низкой плотности, что позволяет облегчить вес всей засыпки адсорбера;
- наименьший объём и высоту имеют колонны, использующие цеолиты NaA и Ka-CO, после них следуют молекулярные сита;

- в связи с выпуском молекулярного сита RS-144M в виде порошка с размером рабочих пор 3Å данный адсорбент обладает самой низкой насыпной плотностью и имеет очень незначительные межгранульные пространства, что обеспечивает низкое значение порозности гранул, всего 8,3 %, что гораздо ниже, чем у других марок. Данный фактор также влияет на глубину осушки сжатого воздуха: чем ниже значение порозности, тем более глубокую осушку сжатого воздуха будет гарантировать адсорбент. А размер рабочих пор идеально подходит для выборочной адсорбции молекул воды;

- наименьшие значения аэродинамического сопротивления также наблюдаются у молекулярного сита RS-144M. Несмотря на то что в формуле расчёта сопротивления присутствует высота ко-

лонны, которая у RS-144M не самая низкая, большое влияние на потери мощности оказывает порозность слоя. Невысокие значения аэродинамического сопротивления обеспечивают равномерное продвижение потока сжатого воздуха, что гарантирует равномерное и качественное его осушение;

– наименьшие значения затрат энергии на привод компрессора отмечаются у адсорбента молекулярное сито марки RS-144M. Полученные значения энергозатрат рассчитаны за период одного часа работы адсорбционной установки. С учетом того что адсорбционные установки работают практически без остановок, кажущиеся незначительными расчётные величины потерь за год накапливаются в тысячи потраченных впустую киловатт энергии. Следовательно, использование молекулярного сита RS-144M является наиболее экономически и энергетически выгодным.

Выводы

Применение молекулярных сит, в частности сита RS-144M, в качестве сушильного агента в адсорбционных процессах осушки сжатого воздуха перспективно и целесообразно, так как:

– обеспечивает равномерную скорость движения сжатого воздуха по всей высоте адсорбционной колонны за счёт низкой насыпной плотности и порозности слоя;

– позволяет произвести глубокую, избирательную осушку сжатого воздуха за счет высокой адсорбционной емкости и размера пор, соответствующего размеру молекул воды;

– форма выпуска молекулярного сита в виде активированного порошка позволяет проводить плотную укладку слоя в колонне и тем самым снижать гидравлические сопротивления при прохождении сжатого воздуха через слой адсорбента, как следствие будут снижены расходы на потребляемую электроэнергию;

– обеспечивает наименьшие расходы адсорбента, а, следовательно, низкие материальные затраты;

– благодаря сочетанию вышеописанных свойств молекулярное сито RS-144M имеет преимущества при использовании в качестве адсорбента в процессах осушки сжатого воздуха и может применяться в различных технологических процессах, связанных с повышением его качества.

На основании приведенных выше аргументов можно утверждать, что использование молекулярных сит способствует снижению энергоёмкости процесса осушки сжатого воздуха. Наиболее эффективным является молекулярное сито RS-144M. Его использование позволяет осушать сжатый воздух до требуемых классов чистоты с наименьшими энергетическими затратами. Остальные адсорбенты также позволяют осушить сжатый воздух до требуемого класса чистоты, однако будут иметь энергозатраты в несколько раз больше, чем RS-144M, что делает их применение нецелесообразным.

Список литературы

1 Воробинская, Л. И. Актуальные проблемы экологической политики на железнодорожном транспорте / Л. И. Воробинская, В. А. Финоченко // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» («ТрансПромЭк-2019») : труды Международной научно-практической конференции, 90-летию Ростовского государственного университета путей сообщения посвящается, Ростов-на-Дону, 24–26 октября 2019 года. Том 1. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 92–95. – ISBN 978-5-88814-994-2.

2 Риполь-Сарагоси, Т. Л. Снижение энергоёмкости процесса адсорбции при использовании композитных адсорбентов / Т. Л. Риполь-Сарагоси, М. А. Гладких // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2021 года. Том 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 83–86. – ISBN 978-5-907295-41-4.

References

1 Vorobinskaya, L. I. Actual problems of environmental policy in railway transport / L. I. Vorobinskaya, V. A. Finochenko // Collection OF scientific papers «Actual problems and prospects of development of transport, industry and economy of Russia» («TransPromEk-2019») : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, October 24–26, 2019. Volume 1. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – P. 92–95. – ISBN 978-5-88814-994-2.

2 Ripol-Saragosi, T. L. Reduction of the energy intensity of the adsorption process when using composite adsorbents / T. L. Ripol-Saragosi, M. A. Gladkikh // Transport: science, education, production: collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 19–21, 2021. Volume 2. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 83–86. – ISBN 978-5-907295-41-4.

3 Роль энергосбережения в современных условиях / И. А. Эстрин, И. А. Соколенко, В. Е. Мамутов, Д. С. Володин // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 24–25 февраля 2022 года. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – С. 97–101. – ISBN 978-5-907295-64-3.

4 Ripol-Saragosi, T. Investigation adsorption process energy capacity reducing possibility by composite adsorbents implement / T. Ripol-Saragosi, L. Ripol-Saragosi // Journal of Physics : Conference Series, Vladivostok, 2021. – P. 012022. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012022.

5 Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Пути снижения энергоёмкости процессов подготовки сжатого воздуха / Л. Ф. Риполь-Сарагоси, А. В. Борисенко // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. Том 1. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 360–363. – ISBN 978-5-88814-986-7.

6 Устюшкينا, А. И. Исследование адсорбционных характеристик различных адсорбентов / А. И. Устюшкينا // Студенческая научная весна : Тезисы докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 175-летию Н. Е. Жуковского, Москва, 01–30 апреля 2022 года. – Москва : Издательский дом «Научная библиотека», 2022. – С. 24–25. – ISBN 978-5-907497-55-9.

7 Luferschik, Ya. S. Analysis of modern adsorbents to identify the most effective one / Ya. S. Luferschik, M. A. Avdeeva // Modern Science. – 2016. – No. 12. – P. 38–41. – EDN XKQIRZ.

8 Патент № 2564407 С1 Российская Федерация, МПК В01D 15/18, С07С 7/12. Улучшение энергетической эффективности адсорбционного разделения : № 2014122862/04 : заявл. 21.09.2012 : опубл. 27.09.2015 / С. Д. Фрей, Л. Х. Петтенгиль, М. Р. Ван Де Котте. – EDN ZFKSGD.

9 Пузырев, И. С. Темплатный синтез и сорбция паров воды пористыми силикагелями с высокой удельной площадью поверхности / И. С. Пузырев, Е. П. Собина, С. В. Медведевских // Butlerov Communications. – 2013. – Том 36. – № 10. – С. 141–145. – ISSN 2074-0212.

3 The role of energy saving in modern conditions / I. A. Estrin, I. A. Sokolenko, V. E. Mamutov, D. S. Volodin // Energy of transport. Actual problems and tasks: collection of scientific papers of the VI International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, February 24–25, 2022. – Rostov-on-Don : RSTU, 2022. – P. 97–101. – ISBN 978-5-907295-64-3.

4 Ripol-Saragosi, T. Investigation adsorption process energy capacity reducing possibility by composite adsorbents implement / T. Ripol-Saragosi, L. Ripol-Saragosi // Journal of Physics : Conference Series, Vladivostok, 2021. – P. 012022. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012022.

5 Ripol-Saragosi, L. F. Ways to reduce the energy intensity of compressed air preparation processes / L. F. Ripoll-Saragosi, A. V. Borisenko // Transport : science, education, production: collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23–26, 2019. Volume 1. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – P. 360–363. – ISBN 978-5-88814-986-7.

6 Ustyushkina, A. I. Investigation of the adsorption characteristics of various adsorbents / A. I. Ustyushkina // Student Scientific Spring : Abstracts of the All-Russian Student Conference dedicated to the 175th anniversary of N. E. Zhukovsky, Moscow, April 01–30, 2022. – Moscow : Publishing House «Scientific Library», 2022. – P. 24–25. – ISBN 978-5-907497-55-9.

7 Luferschik, Ya. S. Analysis of modern adsorbents to identify the most effective one / Ya. S. Luferschik, M. A. Avdeeva // Modern Science. – 2016. – No. 12. – P. 38–41. – EDN XKQIRZ.

8 Patent No. 2564407 C1 Russian Federation, IPC B01D 15/18, C07C 7/12. Improvement of the energy efficiency of adsorption separation : No. 2014122862/04 : application 21.09.2012 : publ. 27.09.2015 / S. D. Frey, L. H. Pettengil, M. R. Van De Cotte. – EDN ZFKSGD.

9 Puzyrev, I. S. Template synthesis and sorption of water vapor by porous silica gels with a high specific surface area / I. S. Puzyrev, E. P. Sobina, S. V. Medvedevskikh // Butlerov Communications. – 2013. – Vol. 36. – No. 10. – P. 141–145. – ISSN 2074-0212.

T. L. Ripol-Saragosi, L. F. Ripol-Saragosi

INVESTIGATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF COMPRESSED AIR DRYING PROCESSES USING VARIOUS BRAND ZEOLITES

Abstract. The paper considers issues related to the study of the energy intensity of the drying processes of compressed air using various grades brand zeolites, analyzes the thermo-physical properties of the adsorbents under consideration, determines the conditions for the

adsorption processes in the form of setting ranges of changes in the speeds of compressed air through the adsorber, the range of changes in the relative humidity of atmospheric air using certain class of compressed air purity in accordance with the normative a document. Based on the obtained results, visualized in the form of histograms, an analysis of the energy efficiency of the brand zeolites under consideration is carried out. The conclusions are formulated.

Keywords: energy efficiency, zeolite, compressed air, atmospheric air, porosity, energy consumption, compressor, histogram.

For citation: Ripol-Saragosi, T. L. Investigation of the energy efficiency of Compressed Air Drying processes using various brand zeolites / T. L. Ripol-Saragosi, L. F. Ripol-Saragosi // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 132–138. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_132.

Сведения об авторах

Риполь-Сарагоси Татьяна Леонидовна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте»,

доктор технических наук, профессор,
e-mail: Ripol-saragosi@mail.ru

Риполь-Сарагоси Леонид Францискович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,

кандидат технических наук, доцент,
e-mail: ripol-saragosi@mail.ru

Information about the authors

Ripoll-Saragosi Tatiana Leonidovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Heat Power Engineering on Railway Transport»,

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: Ripol-saragosi@mail.ru

Ripol-Saragosi Leonid Franciskovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Car and Cars Facilities»,

Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: ripol-saragosi@mail.ru