

УДК 621.54+06

## Исследование зависимости энергетической эффективности технологии адсорбционной осушки сжатого воздуха от модификации алюмогеля

Т. Л. Риполь-Сарагоси

Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

**Для цитирования:** Риполь-Сарагоси Т. Л. Исследование зависимости энергетической эффективности технологии адсорбционной осушки сжатого воздуха от модификации алюмогеля // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 922–930. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-922-930

### Аннотация

**Цель:** представление результатов проведенных исследований по выявлению факторов влияния на энергозатратность процесса адсорбционной осушки сжатого воздуха при использовании в качестве адсорбента наиболее часто встречающихся модификаций алюмогеля при его осушке для последующего использования в пневмосистемах подвижного состава железных дорог. **Методика:** для определения энергозатратности процесса осушки сжатого воздуха при его подготовке для использования в пневмосистемах подвижного состава опробована методика расчета увеличения расхода энергии на валу электродвигателя компрессора, позволяющая оценить влияние на нее таких величин, как относительная влажность атмосферного воздуха, скорость прохождения сжатым воздухом адсорбента, высота слоя адсорбента в адсорбере, потери давления при прохождении адсорбента, его порозность, величина насыпной и кажущейся плотности, а также установить степень их влияния на энергозатратность процесса адсорбции для возможной корректировки самой методики расчета. **Методы:** использованы методы сравнения и анализа полученных результатов, а также их визуализации, которые легли в основу формирования выводов и рекомендаций по применению рассматриваемых видов алюмогеля. Установлено, какие расчетные формулы методики позволяют установить тенденцию в определении энергозатратности процесса осушки сжатого воздуха при использовании различных его видов. **Практическая значимость:** обоснована необходимость определения энергозатратности процесса осушки сжатого воздуха при использовании различных видов алюмогеля для выбора наиболее энергоэффективного варианта на стадии проектирования адсорбционной осушки. Полученные результаты при использовании аналитических выражений методики могут быть рекомендованы к практическому применению на стадии проектирования систем осушки сжатого воздуха.

**Ключевые слова:** сжатый воздух, адсорбция, энергоэффективность, энергозатратность, порозность, потери давления, адсорбент, алюмогели

Основной задачей любой отрасли российской промышленности сегодня является снижение затрат энергии при проведении технологических производственных процессов. Не исключение и осушка сжатого воздуха, осуществляемая для повышения безопасности, эффективности и надежности работы пневматических производственных систем, в том числе

и пневматических систем подвижного состава железных дорог Российской Федерации. Таким образом, материал статьи, посвященный определению возможностей снижения энергозатратности процесса адсорбционной осушки сжатого воздуха с использованием в качестве адсорбента алюмогеля нижеописанных модификаций, является актуальным.

Общеизвестным является факт значительных энергетических затрат на реализацию процесса адсорбционной осушки сжатого воздуха. При этом в работах автора [1–3] были проведены исследования по выявлению энергозатратности адсорбционной осушки сжатого воздуха не только на таких адсорбентах, как силикагель и цеолит, но и на нескольких их модификациях внутри каждого вида, отличающихся набором физических характеристик, свойственных данной модификации. Основной задачей было определение потерь давления при прохождении слоя адсорбента (его модификаций) определенной высоты и обусловленное этой потерей увеличение расхода энергии на валу локомотивного компрессора. Для такого адсорбента, как алюмогель, и четырех его наиболее используемых модификаций подобных исследований не проводилось.

Наиболее широко используемыми модификациями алюмогеля являются:

- Alumac 1,5–3 A;
- Alumac 2–5 D;
- Alumac AA-XR 101-CH;
- BASF F-200.

Выбор алюмогеля в качестве объекта исследования определяется его значительной, по сравнению с другими адсорбентами, адсорбционной поверхностью, большим объемом пор, что определило высокую адсорбционную способность данного адсорбента, высокой прочностью гранул к истиранию, а также возможностью производства его гранул в виде сфер. Это позволяет осуществлять равномер-

ную засыпку алюмогеля, что должно положительно сказаться на минимизации потерь давления при прохождении влажного сжатого воздуха через адсорбент даже при достаточно высоких скоростях его движения в адсорбере.

В табл. 1 представлены основные характеристики ранее упомянутых модификаций алюмогеля.

Основные характеристики компрессора, используемого для производства сжатого воздуха для пневмосистем электровозов производства НЭВЗ, представлены в табл. 2.

Далее согласно алгоритму, представленному в [2–8], определим величины, которые позволят рассчитать потери мощности на привод компрессора для различных видов алюмогелей с последующим их представлением в табл. 3. Актуальные параметры поступающего от компрессора в адсорбер сжатого воздуха, необходимые для определения потерь мощности на его привод, были рассчитаны при минимально возможной скорости движения 0,2 м/с, относительной влажности 50% и 3-м классе чистоты, согласно нормативному документу [9].

Основываясь на знании скоростей движения сжатого воздуха через адсорбер, изменяющихся в диапазоне от 0,2 до 0,5 м/с при изменении относительной влажности всасываемого в компрессор воздуха в диапазоне от 50 до 100%, рассчитаем энергозатратность и визуализируем результаты на гистограммах (рис. 1–4). Требуемый класс осушки сжатого воздуха соответствует нормативному документу [9].

ТАБЛИЦА 1. Основные характеристики исследуемых алюмогелей

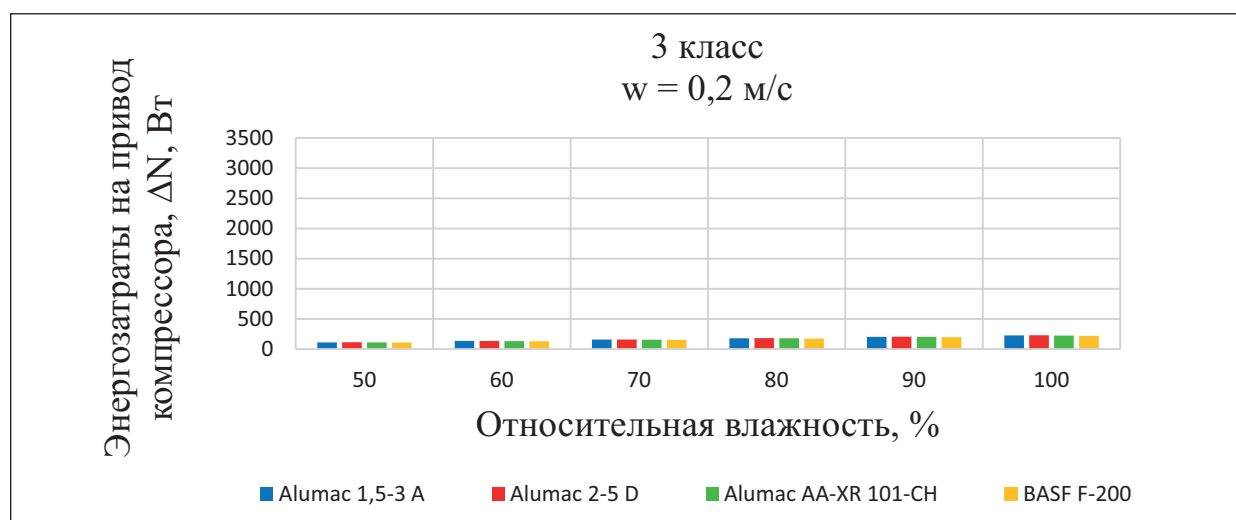
Вид адсорбента	Alumac 1,5–3 A	Alumac 2–5 D	Alumac AA-XR 101-CH	BASF F-200
Суммарный объем пор, см <sup>3</sup> /г	0,44	0,44	0,48...0,5	0,5
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	800...880	780...860	740...880	769
Влагоемкость, %	37,5	39	44	42

ТАБЛИЦА 2. Рабочие характеристики локомотивного компрессора

Компрессор ВУ-3,5/10-1450	
Тип компрессора	Поршневой
Производительность (вход/выход), л/мин	1750
Рабочее давление, бар	10
Мощность двигателя, кВт	29
КПД компрессора	0,7
КПД привода	0,8

ТАБЛИЦА 3. Потери мощности на привод компрессора для различных видов алюмогелей

Характеристика	Alumac 1,5-3 А	Alumac 2-5 D	Alumac AA-XR 101-CH	BASF F-200
1	2	3	4	5
$d_0$ , г/м <sup>3</sup>	25,336			
$d_k$ , г/м <sup>3</sup>	0,884			
$M_a$ , кг	6,83	6,57	5,82	6,1
$V_a$ , м <sup>3</sup>	0,0085	0,0084	0,0078	0,0079
$\rho_r$ , кг/м <sup>3</sup>	2,88			
$D$ , м	0,273			
$H$ , м	0,15	0,14	0,13	0,14
$\varepsilon$	0,5	0,51	0,54	0,52
$\Delta p$ , бар	0,029	0,029	0,028	0,028
$\Delta N$ , Вт	111,6	112,8	110,5	107,7



**Рис. 1.** Зависимость энергетических затрат на привод компрессора при реализации процесса адсорбции на различных видах алюмогеля от относительной влажности атмосферного воздуха и скорости движения сжатого воздуха

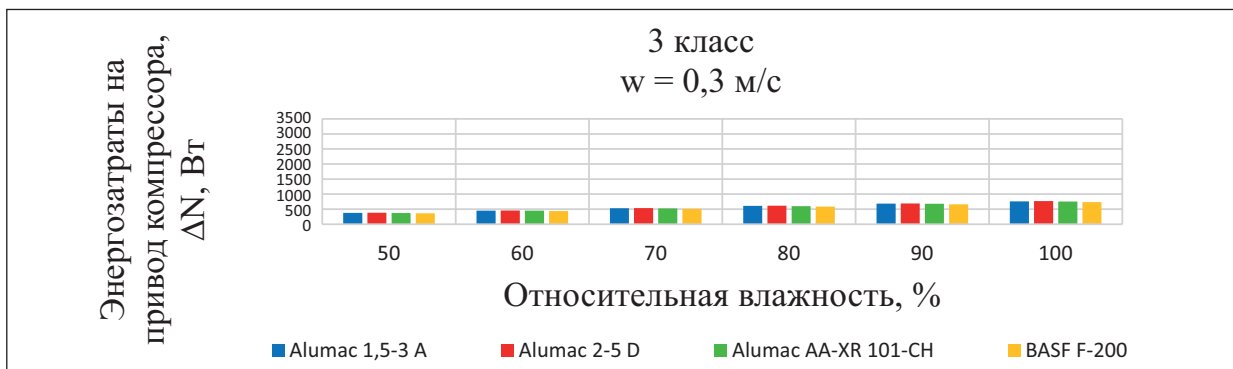


Рис. 2. Зависимость энергетических затрат на привод компрессора при реализации процесса адсорбции на различных видах алюмогеля от относительной влажности атмосферного воздуха и скорости движения сжатого воздуха

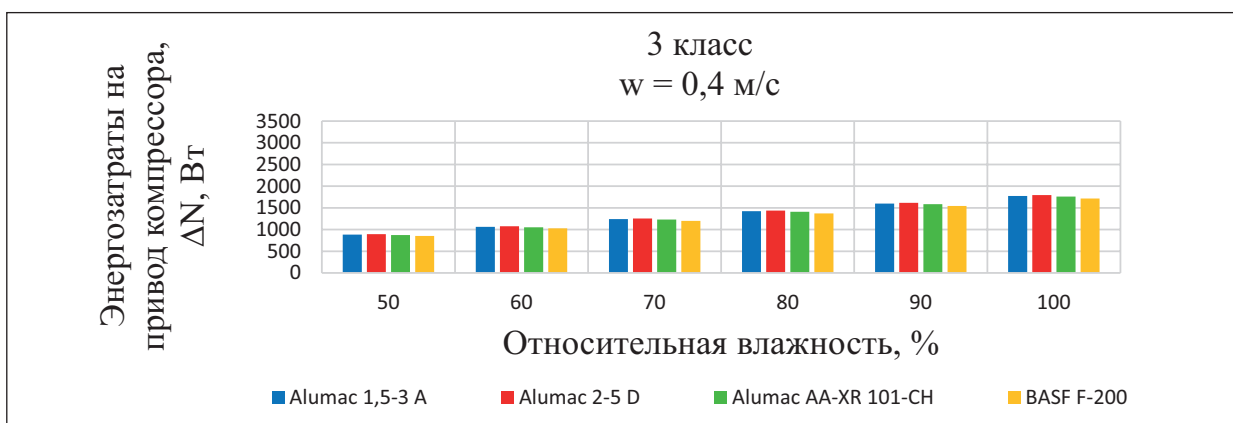


Рис. 3. Зависимость энергетических затрат на привод компрессора при реализации процесса адсорбции на различных видах алюмогеля от относительной влажности атмосферного воздуха и скорости движения сжатого воздуха

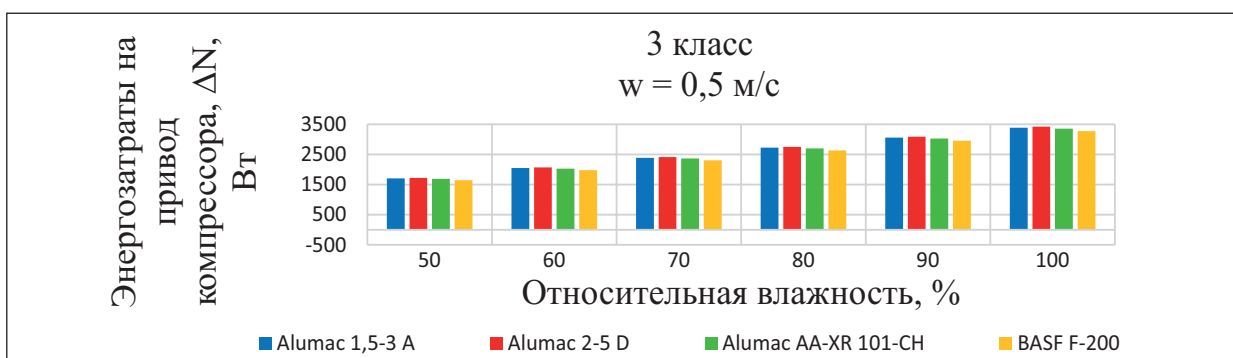


Рис. 4. Зависимость энергетических затрат на привод компрессора при реализации процесса адсорбции на различных видах алюмогеля от относительной влажности атмосферного воздуха и скорости движения сжатого воздуха

Актуальные параметры поступающего от компрессора в адсорбер сжатого воздуха, необходимые для определения потерь мощности на его привод, были рассчитаны при минимально возможной скорости движения 0,2 м/с, относительной влажности 50% и 3-м классе чистоты, согласно выбранным модификациям алюмогеля. Результаты представлены в табл. 4.

Расчет для вышеописанного режима работы компрессора показал, что разница в потерях энергии при прохождении сжатого воздуха через слой адсорбента, высота которого меняется незначительно, для наиболее энергоэффективного (BASF F-200) и наименее эффективного (Alumac 2–5 D) в представленной выборке адсорбентов составляет 4,5% за принятое расчетное время работы компрессора. Это указывает на преимущество алюмогеля BASF F-200 перед другими видами по критерию «энергоэффективность». Проведем анализ наметившихся тенденций изменения энергозатратности при адсорбции влаги из сжатого воздуха в пневмосистемах подвижного состава на четырех марках алюмогеля.

Из очевидных факторов влияния стоит отметить относительную влажность всасываемого

воздуха и скорость прохождения сжатого воздуха через слой адсорбента. Чем выше относительная влажность, тем больше энергии будет затрачиваться на осушку сжатого воздуха вне зависимости от марки алюмогеля. При этом тенденция определения наиболее и наименее энергоэффективного вида при изменении относительной влажности сжатого воздуха и скорости его движения для требуемого 3-го класса чистоты после осушки сохраняется. Это алюмогель BASF F-200 — самый энергоэффективный и Alumac 2-5 D — самый энергозатратный соответственно.

Определим в процентном отношении степень влияния энергоэффективности алюмогелей при изменении относительной влажности атмосферного воздуха. Для 3-го класса чистоты при скорости 0,2 м/с и относительной влажности 100% она составляет 4,5%. А для аналогичных значений требуемого класса чистоты и относительной влажности 100%, но при повышении скорости до 0,5 м/с энергоэффективность составит 4,4%, что говорит о сохранении величины влияния выбранных характеристик на энергоемкость процесса адсорбции в пределах одного класса чистоты. При этом если мы

ТАБЛИЦА 4. Потери мощности на привод компрессора для различных видов алюмогелей

Характеристика	Alumac 1,5–3 A	Alumac 2–5 D	Alumac AA-XR 101-CH	BASF F-200
1	2	3	4	5
$d_0, \text{г/м}^3$	25,336			
$d_k, \text{г/м}^3$	0,884			
$M_a, \text{кг}$	6,83	6,57	5,82	6,1
$V_a, \text{м}^3$	0,0085	0,0084	0,0078	0,0079
$\rho_r, \text{кг/м}^3$	2,88			
$D, \text{м}$	0,273			
$H, \text{м}$	0,15	0,14	0,13	0,14
$\varepsilon$	0,5	0,51	0,54	0,52
$\Delta p, \text{бар}$	0,029	0,029	0,028	0,028
$\Delta N, \text{Вт}$	111,6	112,8	110,5	107,7

рассмотрим степень изменения энергозатрат в численном выражении, то увидим, что для 3-го класса чистоты при 100%-ной относительной влажности и скорости 0,2 м/с она составляет 93,3% как для менее энергозатратного алюмогеля, так и для более энергозатратного. Полученные расчетные данные говорят о том, что наибольшее влияние на расход энергии при проведении адсорбционных процессов осушки сжатого воздуха оказывает скорость его движения через адсорбент. Было бы неверным не учитывать влияние величины порозности адсорбента на его энергозатратность при прохождении через него сжатого воздуха. Данная зависимость была установлена с использованием алгоритма [2] и представлена на рис. 5.

Анализ представленных выше зависимостей согласуется с выявленной ранее тенденцией: энергозатратность рассматриваемых марок адсорбентов зависит от их порозности, однако эта зависимость ввиду незначительной разности в ее величинах для исследуемых видов алюмогелей не превышает 6,2% между самым большим и самым маленьким значением при использовании самого энергоэффектив-

ного и самого энергозатратного алюмогеля. Однако эта зависимость существует и должна быть учтена при формировании рекомендаций по приоритетам использования того или иного вида адсорбента в пределах одной группы. Важно, что тенденция при определении наиболее и наименее энергоэффективного адсорбента сохранена.

Таким образом, на основании представленного выше пошагового анализа факторов влияния для рассмотренных модификаций алюмогеля наиболее энергоэффективным и рекомендуемым к промышленному применению является алюмогель марки BASF F-200.

Ввиду высокой энергетической затратности адсорбционного процесса осушки сжатого воздуха и принятия более жестких требований в соответствии с нормативными документами по требуемому классу осушки сжатого воздуха для вновь выпускаемых локомотивов железнодорожного транспорта дальнейшие исследования будут направлены на изучение тенденций ее изменения для требований осушки сжатого воздуха в соответствии с 2-м и 1-м классом чистоты.

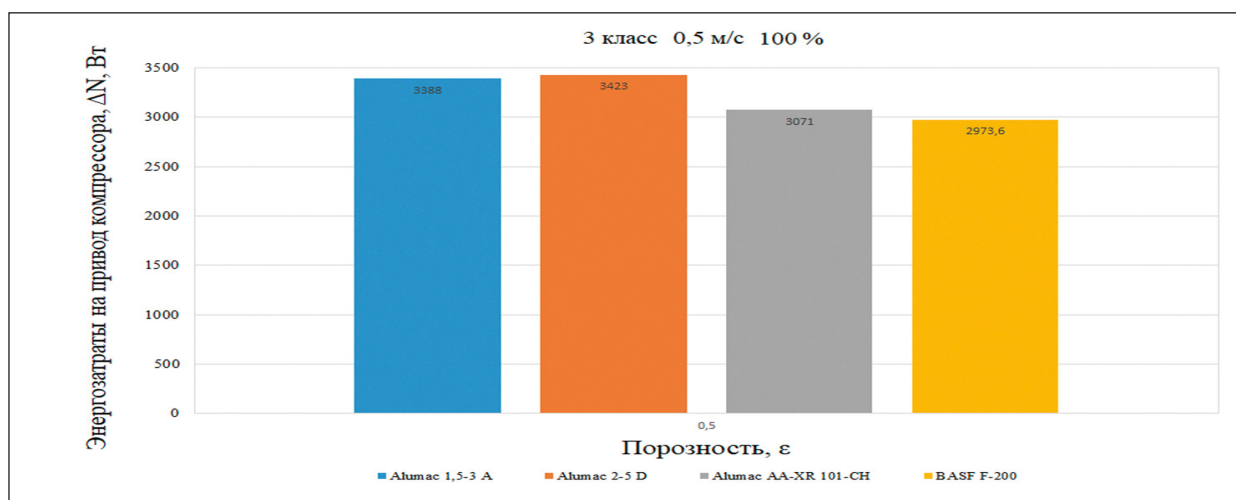


Рис. 5. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида алюмогеля и значения порозности

### Библиографический список

1. Исследование возможностей снижения энергоемкости адсорбционных процессов при высоких требованиях к влагосодержанию сжатого воздуха / Т.Л. Риполь-Сарагоси [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 4. С. 187–200. DOI: 10.20295/2223–9987-2023-4-187-200. EDN JDFVAY.

2. Риполь-Сарагоси Т. Л., Риполь-Сарагоси Л.Ф. Исследование энергоэффективности процессов осушки сжатого воздуха с использованием цеолитов различных марок // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (90). С. 132–138. DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_132. EDN YNVRLT.

3. Перспективы использования адсорбционных технологий для подготовки газа к транспорту / С. Ю. Кондауров [и др.] // Газовая промышленность. 2010. № 10 (651). С. 52–55. EDN MUZACF.

4. Катализатор гидроочистки, содержащий подложку, полученную из алюмогеля, и способ получения такого катализатора: патент № 2663667 С2 Российская Федерация, МПК В01J 23/24, В01J 23/74, В01J 23/82. № 2015125559 / А. Додэн, Э. Девер, М. А. Лелиа; заявл. 26.11.2013; опубл. 08.08.2018; заявитель ИФП ЭНЕРЖИ НУВЕЛЛЬ. EDN QKJVFS.

5. Сравнительные адсорбционные свойства термохимически модифицированных кремнеземных сорбентов и алюмогеля / В.П. Горшунова [и др.] //

Химия, новые материалы, химические технологии: внутривуз. сб. науч. тр. Вып. 1. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2011. С. 81–86. EDN NRSCUV.

6. Кожевникова И. В., Сафиуллина Т. Р., Зенитова Л. А. Промышленные отходы силикагеля, цеолита и алюмогеля как основная составляющая полиуретановых композиционных материалов // Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. (Нижекамск, 5–7 апреля 2016 года). Нижекамск: ПАО «Нижекамскнефтехим», 2016. С. 56. EDN WIPOZP.

7. Влияние заправки на кристаллизацию  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в алюмогелях / А. В. Галахов [и др.] // Новые огнеупоры. 2014. № 2. С. 48–50. EDN RWQRED.

8. Порошки  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> из аморфного алюмогеля / А. В. Галахов [и др.] // Неорганические материалы. 2015. Т. 51, № 3. 248 с. DOI: 10.7868/S0002337X15030045. EDN TGWARP.

9. ГОСТ 32202-2013. Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава.

Дата поступления: 26.06.2024

Решение о публикации: 14.09.2024

### Контактная информация:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — докт. техн. наук, профессор; ripol-saragosi@mail.ru

## Dependence study energy efficiency of adsorption drying technology of compressed air on modification of aluminogel

T. L. Ripol-Saragosi

Rostov State Transport University, 2, Square of the Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, Rostov-on-Don, 344038, Russia

**For citation:** Ripol-Saragosi T. L. Dependence study energy efficiency of adsorption drying technology of compressed air on modification of aluminogel // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 922–930. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-922-930

### Abstract

**Purpose:** to provide the results of the conducted research to identify factors influencing the energy consumption of the process of adsorption drying of compressed air when using the most common modifications of aluminogel as an adsorbent during its drying for subsequent use in pneumatic systems of railway rolling stock. **Methodology:** to determine the energy consumption of the compressed air drying process when preparing it for use in pneumatic systems of rolling stock, a method for calculating the increase in energy consumption on the shaft of the compressor electric motor has been tested, allowing to assess the effect on it of such values as relative humidity of atmospheric air, the rate of passage of the adsorbent by compressed air, the height of the adsorbent layer in the adsorber, pressure loss during the passage of the adsorbent, its porosity, bulk and apparent density, and also to establish the degree of their influence on the energy consumption of the adsorption process for possible adjustment of the calculation method itself. **Methods:** methods of comparison and analysis of the results obtained, as well as their visualization, were used, which formed the basis for the formation of conclusions and recommendations on the use of the types of aluminum gel under consideration. It has been established which calculation formulas of the methodology allow us to establish a trend in determining the energy consumption of the compressed air drying process when using its various types. **Practical significance:** the necessity of determining the energy consumption of the compressed air drying process when using various types of aluminogel to select the most energy-efficient option at the design stage of adsorption drying is substantiated. The results obtained using analytical expressions of the methodology can be recommended for practical application at the design stage of compressed air drying systems design.

**Keywords:** compressed air, adsorption, energy efficiency, energy consumption, porosity, pressure losses, adsorbent, aluminogels

### References

1. Issledovanie vozmozhnostej snizheniya energoemkosti adsorbcionnyh processov pri vysokih trebovaniyah k vlagosoderzhaniyu szhatogo vozduha / T.L. Ripol'-Saragosi [i dr.] // Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. 2023. No. 4. S. 187–200. DOI: 10.20295/2223–9987-2023-4-187-200. EDN JDFVAY. (In Russian)

2. Ripol'-Saragosi T.L., Ripol'-Saragosi L. F. Issledovanie energoeffektivnosti processov osushki szhatogo vozduha s ispol'zovaniem ceolitov razlichnyh

marok // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2023. No. 2(90). S. 132–138. DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_132. EDN YNVRLT. (In Russian)

3. Perspektivy ispol'zovaniya adsorbcionnyh tekhnologij dlya podgotovki gaza k transportu / S. Yu. Kondaurov [i dr.] // Gazovaya promyshlennost'. 2010. No. 10(651). S. 52–55. EDN MUZACF. (In Russian)

4. Katalizator gidroochistki, sodержashchij podlozhku, poluchennuyu iz alyumogelya, i sposob



polucheniya takogo katalizatora: patent No. 2663667 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK B01J 23/24, B01J 23/74, B01J 23/882. No. 2015125559 / A. Doden, E. Dever, M. A. Lelia; zayavl. 26.11.2013; opubl. 08.08.2018; zayavitel' IFP ENERZHI NUVELL'. EDN QKJVFS. (In Russian)

5. Sravnitel'nye adsorbcionnye svoystva termohimicheski modificirovannyh kremnezemnyh sorbentov i alyumogelya / V.P. Gorshunova [i dr.] // Himiya, novye materialy, himicheskie tekhnologii: vnutrivuz.sb. nauch. tr. Vyp. 1. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2011. S. 81–86. EDN NRSCUV. (In Russian)

6. Kozhevnikova I. V., Safullina T. R., Zenitova L. A. Promyshlennye othody silikagelya, ceolita i alyumogelya kak osnovnaya sostavlyayushchaya poliuretanovyh kompozicionnyh materialov // Sovremennoe sostoyanie i perspektivy innovacionnogo razvitiya neftekhimii: materialy IX Mezhdunar.nauch.-prakt. konf. (Nizhnekamsk, 5–7 aprelya 2016 goda).

Nizhnekamsk: PAO "Nizhnekamskneftekhim", 2016. S. 56. EDN WIPOZP. (In Russian)

7. Vliyanie zatravki na kristallizaciyu  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v alyumogelyah / A.V. Galahov [i dr.] // Novye ogneupory. 2014. No. 2. S. 48–50. EDN RWQRED. (In Russian)

8. Poroshki -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> iz amorfnoho alyumogelya / A. V. Galahov [i dr.] // Neorganicheskie materialy. 2015. T. 51, No. 3. S. 248. DOI: 10.7868/S0002337X15030045. EDN TGWARP. (In Russian)

9. GOST 32202-2013. Szhatyj vozduh pnevmaticheskikh sistem zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. (In Russian)

Received: 26.06.2024

Accepted: 14.09.2024

**Author's information:**

Tatiana L. RIPOL-SARAGOSI — PhD in Engineering, Professor; ripol-saragosi@mail.ru