

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 621.54

Исследование возможностей снижения энергоемкости адсорбционных процессов при высоких требованиях к влагосодержанию сжатого воздуха

Т. Л. Риполь-Сарагоси¹, А. А. Воробьев², А. А. Соболев², А. Н. Цыбульский²

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Риполь-Сарагоси Т. Л., Воробьев А. А., Соболев А. А., Цыбульский А. Н. Исследование возможностей снижения энергоемкости адсорбционных процессов при высоких требованиях к влагосодержанию сжатого воздуха // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 187-200. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-187-200

Аннотация

Цель: Исследование возможности снижения энергоемкости адсорбционных процессов при высоких требованиях к влагосодержанию сжатого воздуха. **Результаты:** Показано, что молекулярное сито RS-144M имеет наименьшую массу среди всех представленных адсорбентов благодаря своей низкой плотности, что позволяет снизить вес адсорбционной установки. **Практическая значимость:** Использование молекулярных сит, произведенных на основе цеолита, способствует снижению энергоемкости процесса осушки сжатого воздуха. Наиболее эффективным является молекулярное сито RS-144M. Оно позволяет осушать сжатый воздух до соответствия требованиям самых высоких классов чистоты по влаге, гарантируя при этом наименьшие энергозатраты.

Ключевые слова: Сжатый воздух, адсорбция, влагосодержание, молекулярное сито, энергозатраты, осушка.

Введение

Сжатый воздух является широко используемым технологическим энергоносителем на подвижном составе магистрального и промышленного транспорта, промышленных предприятиях и предприятиях железнодорожного транспорта. Как правило, сжатый воздух, поступающий в пневмосистемы подвижного состава магистрального и промышленного транспорта, а также системы УЗОТ ПТО

вагонных депо, содержит в своем составе взвешенные вещества, масло (при наличии поршневых компрессоров) и влагу. Наличие влаги в пневматических магистралях локомотивов как железнодорожного, так и промышленного подвижного состава опасно тем, что, попадая в приборы, управляющие процессами торможения, — воздухораспределители, при отрицательной температуре наружного воздуха замерзает, образуя ледяные пробки, закупоривающие калиброванные отверстия воздухораспределителей, что реально угрожает безопасности движения поездов [1]. В случае с локомотивами промышленного транспорта к проблемам, связанным с перемерзанием тормозных магистралей и приборов, добавляется проблема перемерзания разгрузочных магистралей и клапанов опрокидывания думпкаров, что приводит к снижению безопасности движения в карьерах, имеющих 40 ‰ уклоны и возникновению существенных финансовых затрат при обслуживании данного типа подвижного состава. Следовательно, качественная подготовка сжатого воздуха на подвижном составе железных дорог, предприятий железнодорожного и промышленного транспорта, особенно в части снижения его влагосодержания в соответствии с ГОСТ Р 53977—2010, 32202—2013 и ИСО 8573-3 является важнейшей задачей, решение которой позволит как повысить безопасность движения подвижного состава, так и снизить затраты на его внеплановые ремонты. Решение данного вопроса представлено в виде возможности использования трех основных технологий осушки сжатого воздуха, разработанных учеными Советского Союза и Российской Федерации, а именно технологии звуковой коагуляции [2], технологии термодинамической осушки [3], технологии адсорбционной осушки [4]. Технология звуковой коагуляции ввиду наличия дорогостоящего оборудования и сложности управления его работой не имела промышленного внедрения, технология термодинамической осушки сжатого воздуха была внедрена на серийно выпускаемых Днепропетровским электровозостроительным заводом грузовых, пассажирских локомотивах, а также локомотивах промышленного транспорта, пяти УЗОТ ПТО вагонных депо Северо-Кавказской железной дороги [5]. Широкие возможности внедрения получила технология адсорбционной осушки сжатого воздуха [6, 7]. Эффективность осушки сжатого воздуха при применении адсорбционной технологии выше, чем у предыдущих технологий, однако ее недостатком является высокая энергоемкость процесса, что не согласуется с приоритетами энергетической стратегии России до 2035, а именно — ее пунктов, касающихся перехода к энергосберегающим технологиям и энергоэффективной энергетике во всех отраслях промышленности [8]. Таким образом, актуальность представленных исследований, связанных с определением факторов влияния на энергоэффективность адсорбционной осушки сжатого воздуха для высоких классов чистоты при использовании в качестве адсорбента цеолита различных марок очевидна и представляет интерес для широкого круга специалистов.

Анализ имеющихся исследований

Вопросами осушки сжатого воздуха в пневмосистемах подвижного состава занимались в Советском Союзе такие ученые, как И. Я. Виноходов — автор установки для осушения сжатого воздуха методом звуковой коагуляции, Ю. Н. Головач — автор и разработчик систем осушки сжатого воздуха с помощью адсорбции влаги силикагелем и древесными опилками, а также Л. Ф. Риполь-Сарагоси — предложивший систему осушки сжатого воздуха с помощью жалюзийных сепараторов, встроенных в резервуары на УЗОТ ПТО вагонных депо [9]. Адсорбционная осушка сжатого воздуха может быть реализована при использовании адсорбентов различных видов, таких как: силикагель, цеолит, алюмогель, активированный уголь [10]. Как выявлено в работах [11, 12], энергетические затраты на проведение адсорбционной осушки сжатого воздуха связаны как с физическими свойствами самих адсорбентов, которые определяют величину падения давления при прохождении сжатым воздухом адсорбционного слоя, так и со скоростью движения сжатого воздуха, величиной относительной влажности атмосферного воздуха, поступающего на сжатие в компрессор, а также иными факторами влияния, определенными как в работах автора, так и других исследователей. В работах различных авторов, датируемых 70–80 годами прошлого столетия, а также работах [13, 14], связанных с изучением энергозатратности адсорбционной осушки сжатого воздуха, был рассмотрен в качестве фактора влияния исключительно способ засыпки адсорбента-силикагеля. Исследований с выявлением иных факторов влияния и других адсорбентов до 2018 года не проводилось. Начало их можно датировать результатами, представленными в работе [10]. Следовательно, определение в ходе аналитических исследований широкого спектра факторов влияния на энергозатратность процесса осушки сжатого воздуха, как и расширение списка представленных адсорбентов, несомненно, представляет научный интерес для широкого круга специалистов. Сама по себе осушка сжатого воздуха является процессом энергоемким вследствие неизбежности потерь энергии при его проведении. Как было установлено [10, 15], возникающие в процессе адсорбционной осушки энергетические потери связаны не только с гидравлическими потерями, но и с физическими свойствами адсорбента, относительной влажностью атмосферного воздуха и др. [16].

Таким образом, представленный в статье материал исследований, связанный с определением энергетических затрат на проведение процесса адсорбционной осушки для второго и первого классов чистоты, в соответствии с нормативными документами актуален, обладает признаками новизны и является вкладом в разработку энергоэффективных технологий.

Обсуждение

Среди наиболее распространенных адсорбентов, широко используемых в процессах осушки сжатого воздуха, можно выделить четыре — активированный уголь, силикагель, алюмогель, цеолиты.

Очевидно, что для выбора марки исследуемого адсорбента с целью определения его энергетической эффективности первоначально сформулируем критерии выбора. К ним относятся:

- получаемая точка росы и класс чистоты сжатого воздуха после осушки;
- насыпная плотность и размер пор;
- влагоемкость;
- порозность;
- стоимость.

Для аналитического сравнения свойств наиболее применяемых в промышленности видов адсорбентов составим таблицу их характеристик. Безусловно, для обоснованного выбора исследуемого адсорбента необходимо проанализировать перечень их физических характеристик, представленных в табл. 1.

Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет отметить, что среди наиболее используемых адсорбентов на сети железных дорог можно выделить силикагель, алюмогель, цеолиты и активные угли. Очевидно также, что по своим теплофизическим характеристикам наибольшее предпочтение при использовании их в технологиях адсорбционной осушки сжатого воздуха можно отдать цеолитам. Именно они и произведенные на их основе молекулярные сита широко применяются в качестве адсорбентов, например, благодаря способности к высокой избирательной адсорбции веществ по размеру и форме молекул.

Для исследования вопроса о выборе наиболее энергоэффективной марки цеолита с точки зрения энергозатрат при проведении процесса осушки сжатого воздуха были выбраны следующие адсорбенты:

- синтетический цеолит NaA;
- синтетический цеолит Ka-CO;
- молекулярное сито RS-CMS;
- молекулярное сито RS-144M.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные характеристики адсорбентов

Вид адсорбента	Силикагель	Алюмогель	Цеолит	Активный уголь
Характеристика				
Температура точки росы, °С	От –40 до –70	Выше –40	От –60 до –90	—
Насыпная плотность, кг/м ³	500–800	450–800	600–800	300–600
Температура регенерации, °С	140–200	170–320	190–320	200–350
Влагоемкость, %	40–50	35–45	50–60	30–40
Объем пор, см ³ /г	0,3–1,2	0,4–0,7	0,4–1,0	0,67–1,0

ТАБЛИЦА 2. Основные характеристики исследуемых цеолитов и молекулярных сит

Вид адсорбента	Цеолит NaA	Цеолит Ka-CO	MC RS-CMS	MC RS-144M
Характеристика				
Размер пор, Å	4	3	3,5–4	3
Насыпная плотность, кг/м ³	850 ± 50	850 ± 50	650 ± 50	500 ± 50
Влагоемкость, %	58	58,5	56	64

Основные характеристики данных цеолитов и произведенных на их основе молекулярных сит приведены в табл. 2.

Исходя из данных, приведенных в табл. 2, очевидно, что молекулярное сито RS-144M обладает наименьшей насыпной плотностью и наиболее высоким значением влагоемкости. Примерно одинаковое значение насыпной плотности у двух исследуемых марок цеолитов, но при этом они отличаются значениями влагоемкости и размерами пор. Наименьшей влагоемкостью обладает молекулярное сито RS-CMS, но при этом имеет значение насыпной плотности ниже, чем у цеолитов.

У каждого из этих адсорбентов есть свои преимущества и недостатки.

Расчеты по определению энергозатрат на привод компрессора при использовании каждого из представленных адсорбентов произведем по алгоритму [16], в котором конечное влагосодержание d_k принимается в зависимости от класса чистоты сжатого воздуха по ГОСТ Р ИСО 8573-1—2016. Для 2-го класса — 0,01 г/м³ (точка росы –40 °C).

Аэродинамическое сопротивление Δp слоя адсорбента с учетом влияния межгранульного пространства определяется по формуле:

$$\Delta p = 9,81 \cdot w^2 \cdot H \cdot \varepsilon,$$

где ε — порозность слоя адсорбента;

w — скорость движения сжатого воздуха через адсорбер м/сек;

H — высота слоя адсорбента в адсорбционной колонне, м.

Наличие в формуле величины порозности позволяет учесть влияние пустот между гранулами, входящих в значение насыпной плотности адсорбента, на потери скорости движения сжатого воздуха. На основе знания потерь, определяемых по величине аэродинамического сопротивления, рассчитываются потери мощности на привод компрессора ΔN [16].

Фрагмент расчета Δp и ΔN в программе Excel представлен на рис. 1.

Результаты расчетов характеристик, названных выше, при изменении скорости движения потока от 0,2 до 0,5 м/с и относительной влажности от 50 до 100 % для цеолита NaA, цеолита KA-CO, молекулярного сита RS-144M и MC-CMS рассчитаны и визуализированы в виде гистограмм, представленных на рис. 2, 3. Анализ полученных данных показал, что минимальные затраты энергии на привод

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Цеолит NaA					Цеолит Ka-CO				
2	Расход влажного сж. воздуха Q , л/мин; м ³ /с	750	0,75	0,0125		Расход влажного сж. воздуха Q , л/мин; м ³ /с	750	0,75	0,0125
3	Начальное влагосодержание C_0 , г/кг	3,6564923	33,4825			Начальное влагосодержание C_0 , г/кг	3,65649	33,4825	
4	Конечное влагосодержание C_1 , г/кг	0,01	(по классу чистоты)			Конечное влагосодержание C_1 , г/кг	0,01	(по классу чистоты)	
5	Время адсорбции t , мин	60				Время адсорбции t , мин	60		
6	Динамическая влагоемкость, A_d	0,58				Динамическая влагоемкость, A_d	0,585		
7	Масса адсорбента, M , кг	282,91751				Масса адсорбента, M , кг	280,499		
8	Объем адсорбента, V_c , м ³	0,3328441				Объем адсорбента, V_c , м ³	0,33		
9	Насыпная и кажущаяся плотности, кг/м ³	850	1240			Насыпная и кажущаяся плотности, кг/м ³	850	1360	
10	Диаметр колонны, D , м	0,1902365				Диаметр колонны, D , м	0,20489	(одинаков для всех)	
11	Скорость движения газов, w , м/с	0,2				Скорость движения газов, w , м/с	0,2		
12	Толщина слоя, H , м	11,72				Толщина слоя, H , м	10,01		
13	Доля свободного пространства	0,3145161				Доля свободного пространства	0,375		
14	Сопротивление, ΔP , бар	1,446				Сопротивление, ΔP , бар	1,474		
15	Затраты мощности на привод ΔN , Вт	2832,7214				Затраты мощности на привод ΔN , Вт	2881,37		
16	$\lg(p_2+\Delta P/p_1)$	0,9266489	8,446			$\lg(p_2+\Delta P/p_1)$	0,92806	8,4735	
17	Влажность, %	50				Влажность, %	50		
MC RS-144M					MC RS-CMS				
20	Расход влажного сж. воздуха Q , л/мин; м ³ /с	750	0,75	0,0125		Расход влажного сж. воздуха Q , л/мин; м ³ /с	750	0,75	0,0125
21	Начальное влагосодержание C_0 , г/кг	3,6564923	33,4825			Начальное влагосодержание C_0 , г/кг	3,65649	33,4825	
22	Конечное влагосодержание C_1 , г/кг	0,01	(по классу чистоты)			Конечное влагосодержание C_1 , г/кг	0,01	(по классу чистоты)	
23	Время адсорбции t , мин	60				Время адсорбции t , мин	60		
24	Динамическая влагоемкость, A_d	0,64				Динамическая влагоемкость, A_d	0,56		
25	Масса адсорбента, M , кг	256,39399				Масса адсорбента, M , кг	293,022		
26	Объем адсорбента, V_c , м ³	0,4661709				Объем адсорбента, V_c , м ³	0,4508		
27	Насыпная плотность, кг/м ³	550	600			Насыпная плотность, кг/м ³	650	840	
28	Диаметр колонны, D , м	0,204891	аков для всех)			Диаметр колонны, D , м	0,20489	аков для всех)	
29	Скорость движения газов, w , м/с	0,2				Скорость движения газов, w , м/с	0,2		
30	Толщина слоя, H , м	14,15				Толщина слоя, H , м	13,68		
31	Доля свободного пространства	0,0833333				Доля свободного пространства	0,22619		
32	Сопротивление, ΔP , бар	0,463				Сопротивление, ΔP , бар	1,214		
33	Затраты мощности на привод ΔN , Вт	965,14664				Затраты мощности на привод ΔN , Вт	2412,48		
34	$\lg(p_2+\Delta P/p_1)$	0,87	7,4626			$\lg(p_2+\Delta P/p_1)$	0,91456	8,2142	
35	Влажность, %	50				Влажность, %	50		

Рис. 1. Фрагмент полученных результатов определения аэродинамического сопротивления и потерь мощности компрессора при адсорбции влаги из сжатого воздуха на различных марках цеолита

компрессора получены при использовании молекулярного сита RS-144M, а максимальные — у цеолита КА-СО.

Исходя из формулы определения потерь давления, за счет возникающего аэродинамического сопротивления при прохождении через различные марки цеолитов следует, что чем меньше произведение высоты колонны и порозности слоя, тем ниже должны быть значения данных сопротивлений. Однако результаты произведенных расчетов показывают, что величины аэродинамических сопротивлений не всегда имеют прямую зависимость от высоты слоя и порозности. При этом порозность зависит только от насыпной и кажущейся плотности адсорбента и является величиной постоянной, она задана характеристиками адсорбента. А высота слоя зависит от нескольких показателей, один из которых, это масса адсорбента. Масса адсорбента связана с его адсорбционной емкостью, которая стоит в знаменателе формулы ее определения. То есть для определения высоты слоя адсорбента и его порозности необходимо задействовать различные физические величины. Высота слоя и порозность определяются в соответствии с [17]. Порозность будет тем меньше, чем меньше насыпная плотность, а масса тем меньше, чем больше адсорбционная емкость. Учитывая все вышесказанное, получаем, что в формуле расчета аэродинамических сопротивлений при значении порозности меньше примерно 0,15 влияние высоты слоя адсорбента на величину аэродинамического сопротивления при прохождении сжатого воздуха через адсорбционную колонну незначительно.

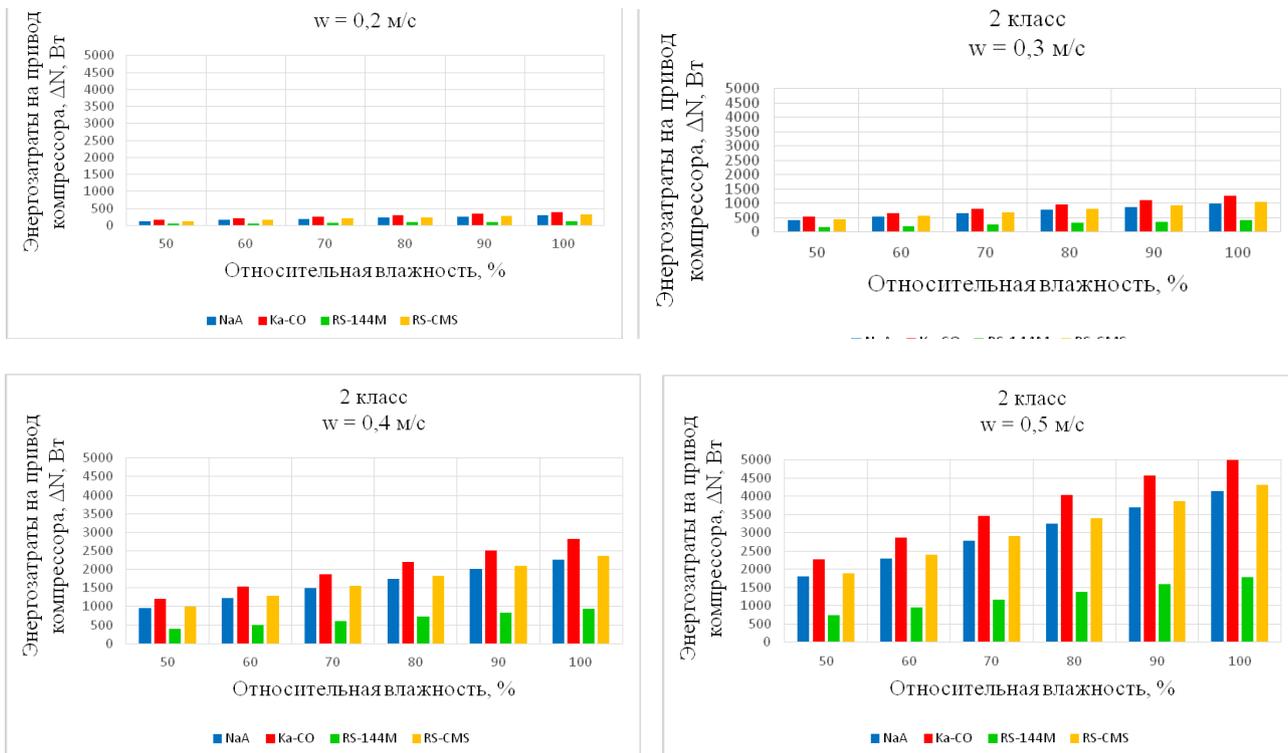


Рис. 2. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида цеолита и относительной влажности атмосферного воздуха (2-й класс частоты)

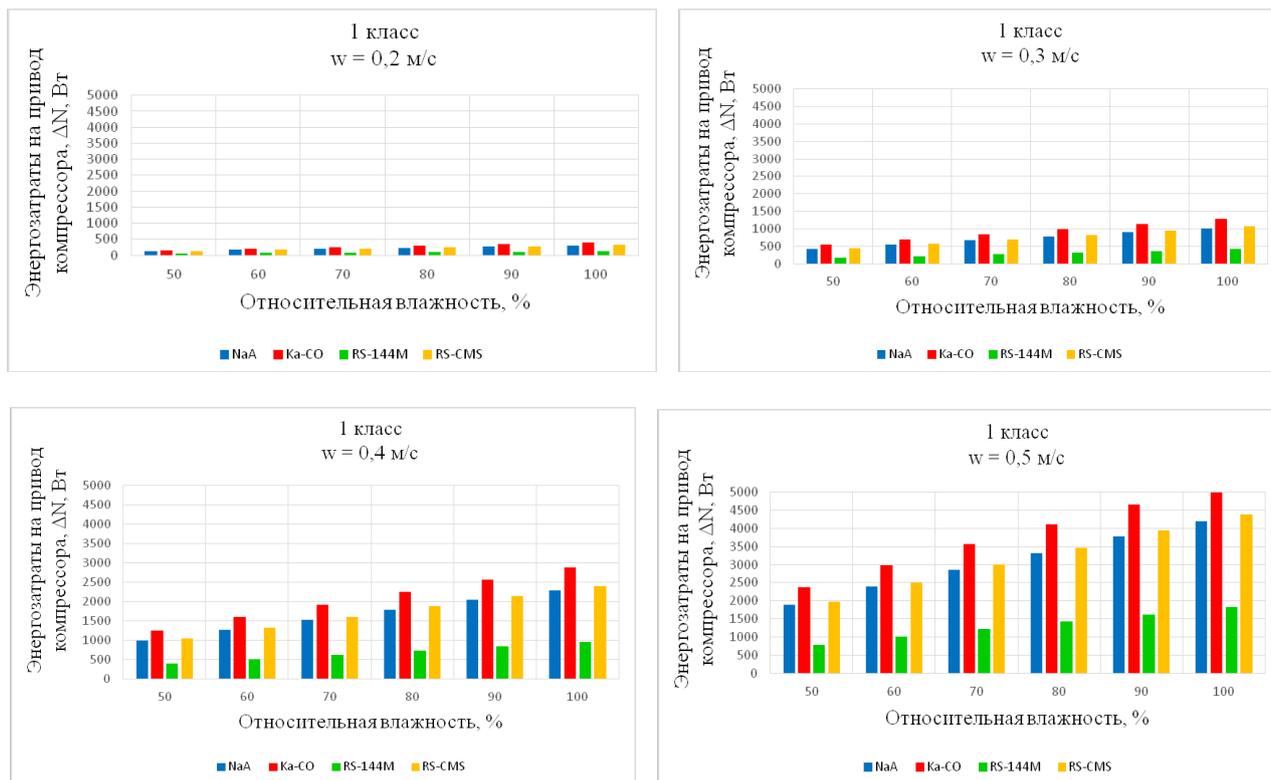


Рис. 3. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида цеолита и относительной влажности атмосферного воздуха (1 класс частоты)

При увеличении значения порозности выше 0,15 на величину аэродинамического сопротивления начинает оказывать существенное влияние высота слоя адсорбента. Для уточнения результатов и получения определенной тенденции произведем аналогичные расчеты при разных скоростях движения воздуха (от 0,2 до 0,5 м/с), классах чистоты (с 1-го по 2-й) и относительной влажности воздуха (от 50 до 100 %) (рис. 2, 3).

Анализ полученных результатов

На приведенных выше графиках отчетливо видно, что наименьшие затраты на привод компрессора обеспечивает использование в качестве адсорбента молекулярного сита RS-114M. Такое различие значений потребляемой энергии при использовании различных марок цеолитов объясняется влиянием величины порозности, которая входит в зависимость определения потерь давления при движении сжатого воздуха через колонну адсорбера.

Зависимость потерь энергии на привод компрессора при использовании в качестве осушителей сжатого воздуха исследуемых видов адсорбента для первого и второго классов чистоты при скорости движения воздуха 0,3 м/с (как наиболее часто используемой при движении сжатого воздуха через адсорбер) и относительной влажности воздуха 50 % представлена на рис. 4.

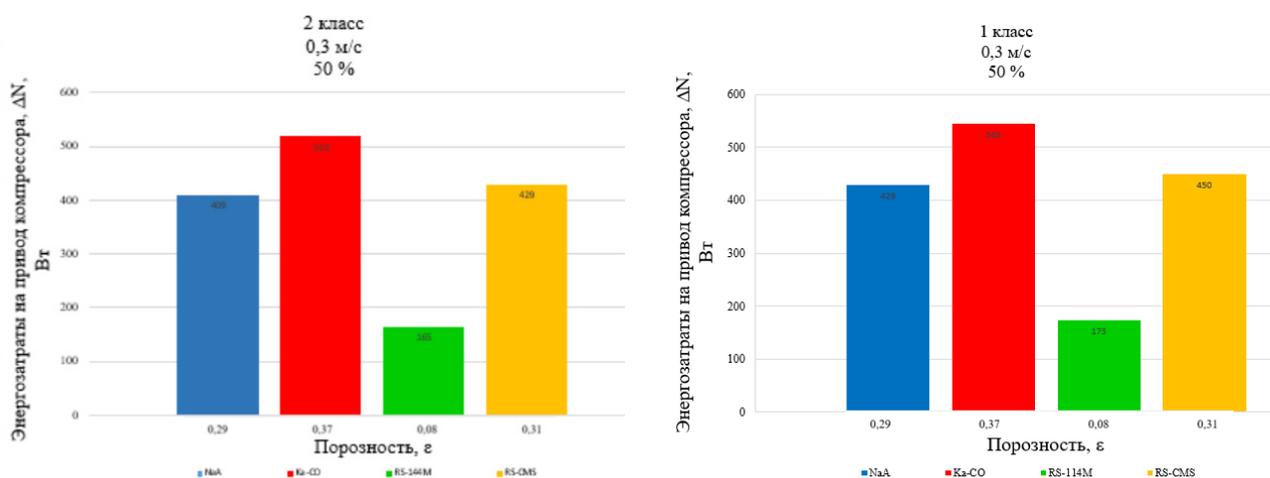


Рис. 4. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида цеолита и значения порозности

Таким образом, с повышением класса чистоты сжатого воздуха происходит увеличение энергозатрат на адсорбционную осушку сжатого воздуха. При низких значениях порозности высота слоя не оказывает заметного влияния на гидравлические сопротивления.

Выводы и рекомендации

1. Молекулярное сито RS-144M имеет наименьшую массу среди всех представленных адсорбентов благодаря своей низкой плотности, что позволяет снизить вес адсорбционной установки.

2. Наименьший объем и высоту адсорбционной засыпки в колонне имеют цеолиты NaA и Ka-CO, после него следуют молекулярные сита.

3. Применение молекулярных сит, в частности сита RS-144M, в качестве адсорбента в адсорбционных процессах осушки сжатого воздуха целесообразно, так как:

– обеспечивает одинаковую скорость движения сжатого воздуха по всей высоте адсорбционной колонны за счет 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.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Библиографический список

1. Балон Л. В. Применение технологии механической осушки сжатого воздуха на подвижном составе железных дорог / Л. В. Балон, Т. Л. Риполь-Сарагоси // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: IV Международная научно-техническая конференция, Новочеркасск, 17–19 июня 2003 года. — Новочеркасск, 2003. — С. 350–352.

2. Виноходов И. Я. Исследование осушения сжатого воздуха на локомотивах способом звуковой коагуляции: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Ростов-на-Дону: Рост. ин-т инженеров ж.-д. транспорта, 1973. — 22 с.

3. Риполь-Сарагоси Т. Л. Повышение безопасности движения подвижного состава при использовании главных резервуаров с жалюзийными сепараторами на локомотивах / Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: тезисы 65 Международной научно-практической конференции, Днепропетровск, 19–20 мая 2005 года. — Днепропетровск: Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, 2005. — С. 55–56.

4. Головач Ю. Н. Пневмоавтоматика локомотивов / Ю. Н. Головач, И. В. Скогорев, В. О. Кубил. — Новочеркасск: Геликон, 2006, 276 с.

5. Пат. №2514871. Резервуар для осаждения и удаления влаги из сжатых газов / Т. Л. Риполь-Сарагоси.

6. Головач Ю. Н. Исследование и разработка устройств для предотвращения замерзания влаги в пневматических магистралях электроподвижного состава железнодорожного транспорта: дисс. ... канд. техн. наук / Ю. Н. Головач. — Новочеркасск, 1979. — 191 с.
7. Редин А. Л. Совершенствование устройств осушки сжатого воздуха для тормозных систем подвижного состава железных дорог: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. Л. Редин. — М., 2010. — 24 с.
8. Распоряжение от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».
9. Риполь-Сарагоси Л. Ф. Совершенствование технологии подготовки сжатого воздуха для зарядки и опробования тормозов в пунктах технического обслуживания вагонов: дисс. ... канд. техн. наук / Л. Ф. Риполь-Сарагоси. — Ростов-на-Дону, 2007. — 189 с.
10. Риполь-Сарагоси Л. Ф. Пути снижения энергоемкости 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. — Т. 1. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. — С. 360–363.
11. Риполь-Сарагоси Т. Л. Формирование критериев выбора адсорбента для осушки сжатого воздуха / Т. Л. Риполь-Сарагоси, М. А. Гладких // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–02 марта 2023 года. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. — С. 155–158.
12. Риполь-Сарагоси Т. Л. Анализ энергоэффективности различных схем адсорбционной осушки сжатого воздуха на подвижном составе / Т. Л. Риполь-Сарагоси, М. А. Гладких // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 06–07 октября 2020 года. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. — С. 81–83.
13. Редин А. Л. Совершенствование устройств осушки сжатого воздуха для тормозных систем подвижного состава железных дорог: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Л. Редин; Моск. гос. ун-т путей сообщения (МИИТ). — М., 2010. — 279 с.
14. Риполь-Сарагоси Л. Ф. Исследование энергоэффективности адсорбентов / Л. Ф. Риполь-Сарагоси, А. А. Клименко // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 20–22 апреля 2020 года. Т. 2. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. — С. 176–180.
15. Риполь-Сарагоси Л. Ф. Обоснование выбора технологии регенерации адсорбента с позиций энергоэффективности / Л. Ф. Риполь-Сарагоси, А. В. Потапов // Транспорт: наука, образование, производство: труды Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 25–27 апреля 2022 года. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2022. — С. 352–356.

16. 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(90). — С. 132–138. — DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_132.

17. 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 // Бултеровские сообщения. — 2013. — Т. 36. — № 10. — С. 141–145.

Дата поступления: 25.10.2023

Решение о публикации: 10.11.2023

Контактная информация:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — д-р техн. наук, проф.; ripol-saragosi@mail.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru

СОБОЛЕВ Александр Албертович — канд. техн. наук, доц.; a89213194387@yandex.ru

ЦЫБУЛЬСКИЙ Артем Николаевич — аспирант; artemavatar@mail.ru

Study of the Possibilities of Reducing the Energy Intensity of Adsorption Processes with High Requirements for the Moisture Content of Compressed Air

T. L. Ripoll-Saragosi¹, A. A. Vorobyev², A. A. Sobolev², A. N. Tsybulsky²

¹Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Ripoll-Saragosi T. L., Vorobyev A. A., Tsybulsky A. N. Study of the Possibilities of Reducing the Energy Intensity of Adsorption Processes with High Requirements for the Moisture Content of Compressed Air. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 187-200. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-187-200

Summary

Purpose: Study of the possibility of reducing the energy intensity of adsorption processes with high requirements for the moisture content of compressed air. **Results:** It has been shown that the molecular sieve RS-144M has the lowest weight among all the adsorbents represented due to its low density, which makes it possible to reduce the weight of the adsorption unit; the smallest volume and height of adsorption filling in the column have zeolites NaA and Ka-CO, followed by molecular sieves; due to the release of the molecular sieve RS-144M in the form of a powder the size of the working pores of 3Å, it has a low bulk density and the smallest intergranular spaces, which provides a low value of porosity of the granules, a total of 8.3% of the total fill volume. **Practical significance:** The use of molecular sieves produced on the basis of zeolite helps to reduce the energy capacity of the compressed air drying process. The most effective is the molecular

sieve RS-144M. It allows you to dry compressed air to meet the requirements of the highest moisture purity classes, while guaranteeing the lowest energy consumption. The remaining adsorbents will also allow the compressed air to be dried to the desired purity grade, but will have an energy consumption greater than that of the RS-144M, making their use not always expedient.

Keywords: Compressed air, adsorption, moisture content, molecular sieve, energy consumption, drying.

References

1. Balon L. V., Ripol'-Saragosi T. L. *Primenenie tekhnologii mekhanicheskoy osushki szhatogo vozdukha na podvizhnom sostave zheleznykh dorog* [Application of technology for mechanical drying of compressed air on railway rolling stock]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektropodvizhnogo sostava: IV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, Novochoerkassk, 17–19 iyunya 2003 goda* [State and prospects for the development of electric rolling stock: IV International Scientific and Technical Conference, Novochoerkassk, June 17–19, 2003]. Novochoerkassk, 2003, pp. 350–352. (In Russian)

2. Vinokhodov I. Ya. *Issledovanie osusheniya szhatogo vozdukha na lokomotivakh sposobom zvukovoy koagulyatsii: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Study of compressed air drying on locomotives using the sound coagulation method: abstract. diss. ... cand. tech. Sci.]. Rostov-on-Don: Rost. in-t inzhenerov zh.-d. transporta Publ., 1973, 22 p. (In Russian)

3. Ripol'-Saragosi T. L., Ripol'-Saragosi L. F. *Povyshenie bezopasnosti dvizheniya podvizhnogo sostava pri ispol'zovanii glavnykh rezervuarov s zhalyuziynymi separatorami na lokomotivakh* [Increasing traffic safety of rolling stock when using main tanks with louvered separators on locomotives]. *Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta: tezisy 65 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Dnepropetrovsk, 19–20 maya 2005 goda* [Problems and prospects for the development of railway transport: abstracts 65 International scientific and practical conference, Dnepropetrovsk, May 19–20, 2005]. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovskiy natsional'nyy universitet zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazaryana Publ., 2005, pp. 55–56. (In Russian)

4. Golovach Yu. N., Skogorev I. V., Kubil V. O. *Pnevmoavtomatika lokomotivov* [Pneumatic automation of locomotives]. Novochoerkassk: Gelikon Publ., 2006, 276 p. (In Russian)

5. Ripol'-Saragosi T. L. *Rezervuar dlya osazhdeniya i udaleniya vlagi iz szhatykh gazov* [Reservoir for sedimentation and removal of moisture from compressed gases]. Patent RF, no. 2514871. (In Russian)

6. Golovach Yu. N. *Issledovanie i razrabotka ustroystv dlya predotvrashcheniya zamerzaniya vlagi v pnevmaticheskikh magistralyakh elektropodvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Research and development of devices to prevent moisture freezing in pneumatic lines of electric rolling stock of railway transport: diss. ... cand. tech. Sciences]. Novochoerkassk, 1979, 191 p. (In Russian)

7. Redin A. L. *Sovershenstvovanie ustroystv osushki szhatogo vozdukha dlya tormoznykh sistem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog: avtoref. disc. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of compressed

air drying devices for brake systems of railway rolling stock: abstract. diss. ...cand. tech. Sciences]. Moscow, 2010, 24 p. (In Russian)

8. *Rasporyazhenie ot 9 iyunya 2020 g. № 1523-r "Ob utverzhdenii Energeticheskoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda"* [Order № 1523-r dated June 9, 2020 "On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period until 2035"]. (In Russian)

9. Ripol'-Saragosi L. F. *Sovershenstvovanie tekhnologii podgotovki szhatogo vozdukha dlya zaryadki i oprobvaniya tormozov v punktakh tekhnicheskogo obsluzhivaniya vagonov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the technology of preparing compressed air for charging and testing brakes at car maintenance points: diss. ...cand. tech. Sciences]. Rostov-on-Don, 2007, 189 p. (In Russian)

10. Ripol'-Saragosi L. F., Borisenko A. V. *Puti snizheniya energoemkosti protsessov podgotovki szhatogo vozdukha* [Ways to reduce the energy intensity of compressed air preparation processes]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov, Rostov-na-Donu, 23–26 aprelya 2019 goda* [Transport: science, education, production: collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23–26, 2019]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2019, vol. 1, pp. 360–363. (In Russian)

11. Ripol'-Saragosi T. L., Gladkikh M. A. *Formirovanie kriteriev vybora adsorbenta dlya osushki szhatogo vozdukha* [Formation of criteria for choosing an adsorbent for drying compressed air]. *Energetika transporta. Aktual'nye problemy i zadachi: sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Rostov-na-Donu, 01–02 marta 2023 goda* [Transport Energy. Current problems and tasks: collection of scientific papers of the VII International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, March 01–02, 2023]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2023, pp. 155–158. (In Russian)

12. Ripol'-Saragosi T. L., Gladkikh M. A. *Analiz energoeffektivnosti razlichnykh skhem adsorbtsionnoy osushki szhatogo vozdukha na podvizhnom sostave* [Analysis of the energy efficiency of various schemes for adsorption drying of compressed air on rolling stock]. *Energetika transporta. Aktual'nye problemy i zadachi: sbornik nauchnykh trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Rostov-na-Donu, 06–07 oktyabrya 2020 goda* [Transport Energy. Current problems and tasks: collection of scientific papers of the IV International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, October 06–07, 2020]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2020, pp. 81–83. (In Russian)

13. Redin A. L. *Sovershenstvovanie ustroystv osushki szhatogo vozdukha dlya tormoznykh sistem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improvement of compressed air drying devices for brake systems of railway rolling stock: dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Moscow: Mosk. gos. un-t putey soobshcheniya (MIIT) Publ., 2010, 279 p. (In Russian)

14. Ripol'-Saragosi L. F., Klimenko A. A. *Issledovanie energoeffektivnosti adsorbentov* [Study of the energy efficiency of adsorbents]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov, Rostov-na-Donu, 20–22 aprelya 2020 goda* [Transport: science, education, production: collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 20–22 2020]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2020, vol. 2, pp. 176–180. (In Russian)

15. Ripol'-Saragosi L. F., Potapov A. V. Obosnovanie vybora tekhnologii regeneratsii adsorbenta s pozitsiy energoeffektivnosti [Justification for the choice of adsorbent regeneration technology from the standpoint of energy efficiency]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Rostov-na-Donu, 25–27 aprelya 2022 goda* [Transport: science, education, production: proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don on-Don, April 25–27, 2022]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2022, pp. 352–356. (In Russian)

16. Ripol'-Saragosi T. L., Ripol'-Saragosi L. F. Issledovanie energoeffektivnosti protsessov osushki szhatogo vozdukha s ispol'zovaniem tseolitov razlichnykh marok [Study of the energy efficiency of compressed air drying processes using zeolites of various grades]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University]. 2023, Iss. 2(90), pp. 132–138. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_132. (In Russian)

17. Puzyrev I. S., Sobina E. P., Medvedevskikh S. V. Templatnyy sintez i sorbtsiya parov vody poristymi silikagelyami s vysokoy udel'noy ploshchad'yu poverkhnosti [Template synthesis and sorption of water vapor by porous silica gels with a high specific surface area]. *Butlerovskie soobshcheniya* [Butlerov Communications]. 2013, vol. 36, Iss. 10, pp. 141–145. (In Russian)

Received: October 25, 2023

Accepted: November 10, 2023

Author's information:

Tatyana L. RIPOLL-SARAGOSI — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ripol-saragosi@mail.ru

Alexander A. VOROBYEV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor;
79219751198@yandex.ru

Alexander A. SOBOLEV — PhD in Engineering, Associate Professor; a89213194387@yandex.ru

Artem N. Tsybul'sky — Postgraduate Student; artemavatar@mail.ru