

УДК 621.54+06

## Исследование факторов влияния на срок службы силикагелей

Т. Л. Риполь-Сарагоси<sup>1</sup>, Д. А. Мальцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

<sup>2</sup>ООО НПО «Турбулентность — ДОН», Российская Федерация, 344068, Ростов-на-Дону, а/д Ростов-на-Дону-Новошахтинск, 1-й км, стр. 6/8

**Для цитирования:** Риполь-Сарагоси Т. Л., Мальцев Д. А. Исследование факторов влияния на срок службы силикагелей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1035–1044. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1035-1044

### Аннотация

**Цель:** Представить результаты исследования, посвященного анализу влияния температуры и относительной влажности атмосферного воздуха, поступающего в компрессор на сжатие, а также требуемого класса его чистоты после адсорбционной осушки. Определить степень воздействия данных параметров на срок службы адсорбента марки КСКГ для решения вопроса о целесообразности его применения.

**Методика:** Для определения степени влияния физических параметров атмосферного и сжатого воздуха, а также нормативного класса чистоты воздуха на выходе из компрессора на срок службы адсорбента была апробирована методика расчета длительности эксплуатации адсорбента с учетом указанных факторов. **Методы:** В работе использованы методы сравнения и анализа полученных результатов с их последующей графической визуализацией, которая впоследствии легла в основу сформулированных выводов и рекомендаций по обоснованию возможности использования исследуемого адсорбента по критерию «длительность срока эксплуатации». **Практическая значимость:** Результаты представленных исследований позволяют обоснованно осуществлять выбор адсорбента для использования его в технологии адсорбционной осушки с последующим применением в пневмосистемах подвижного состава железнодорожного транспорта и на предприятиях железнодорожной отрасли. Это позволит реализовать программу по снижению ресурсоемкости и снизить отрицательное воздействие на окружающую среду за счет уменьшения объемов захоронения отработанных ресурсов.

**Ключевые слова:** Ресурсосбережение, сжатый воздух, атмосферный воздух, срок эксплуатации, окружающая среда, адсорбция, адсорбент.

Как правило, срок службы любых адсорбентов зависит от многих факторов. Выделим из них три основных: температура поступления атмосферного воздуха в компрессор, относительная влажность атмосферного воздуха на входе в компрессор и требуемая влажность осушенного сжатого воздуха после адсорбционной осушки в адсорбере в соответствии с принятыми нормативными документами.

Помимо сказанного выше, определенное влияние на срок службы адсорбентов могут оказывать

химические факторы, такие как наличие агрессивных сред как в сжатом воздухе, так и в адсорбенте, которые способствуют разрушению последнего, в значительной степени снижая его влагоемкость. Наличие капельной влаги в сжатом воздухе также снижает влагоемкость, а значит, эффективность адсорбента, приводя к снижению его срока службы.

Исключение здесь могут составлять только алюмогели марки Д, которые демонстрируют достаточную устойчивость к воздействию

капельной влаги, однако при высокой влажности 90–100 % способны разрушаться. Последствием такого разрушения будет снижение их влагоемкости и срока службы.

Рассматривая такой фактор влияния на величину срока службы адсорбентов, как температура сжатого воздуха на входе в адсорбер, можно предположить существование их взаимобратного воздействия: чем выше температура входа, тем меньше срок службы адсорбента.

Особенно увеличение температуры входа сжатого воздуха в адсорбер, а значит, и увеличение температуры самого адсорбента в ходе адсорбционной осушки, оказывает влияние на изменение объема гранул адсорбента, приводя к их движению, увеличению сил трения, истиранию и разрушению. Это, в свою очередь, способствует снижению эффективности адсорбента как влагопоглотителя.

Безусловно, решение проблемы увеличения срока службы адсорбента при снижении влияния всех вышеописанных факторов или любого из них позволило бы повысить надежность работы адсорбционной установки за счет увеличения времени между техническими осмотрами, связанными с заменой адсорбционной засыпки из-за утраты влагопоглощающей способности, а также снизить отрицательное воздействие на окружающую среду при уменьшении количества подлежащего захоронению адсорбента.

Задача исследований, представленных в данной статье и направленных на решение проблемы ресурсосбережения в различных отраслях промышленности (в том числе на предприятиях железнодорожного транспорта и в пневмосистемах подвижного состава железных дорог, использующих сжатый воздух в качестве рабочего тела), согласуется с положениями Энергетической стратегии России до 2030 г. в области энергоресурсосбережения. Этим определяется актуальность представляемых в работе результатов исследований.

## Объект исследования

Объектом исследования выбран силикагель марки КСКГ как одна из марок силикатных гелей, отличающихся высокой прочностью. При этом КСКГ — это крупнопористый гранулированный силикагель.

Исследования по определению зависимости срока службы силикагеля от температуры окружающей среды и ее относительной влажности будут проведены для температур наружного воздуха  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  как наиболее опасных, особенно при работе тормозных приборов пневмосистем подвижного состава железных дорог. Изменение относительной влажности наружного воздуха будет исследовано в пределах от 50% до 100%. Очевидно также, что требуемое на выходе из адсорбера содержание влаги в осушенном сжатом воздухе, соответствующее определенному классу чистоты [1, 2], будет также влиять на срок службы адсорбента.

Представим ниже алгоритм расчета срока службы выбранного для исследования адсорбента [3–6].

Определим концентрацию влаги в паровоздушном потоке  $C_s$ , соответствующую условию насыщения по формуле [3]:

$$C_s = \frac{P_s M}{RT_1}, \quad (1)$$

где  $P_s$  — давление насыщенного пара воды, мм рт. ст.;

$M$  — молекулярная масса воды, г/моль;

$R$  — газовая постоянная, равная 62,36 мм рт. ст. · л/(К · моль);

$T_1$  — температура воздуха на входе в компрессор, К.

$$C_s = \frac{3,17 \cdot 18,01}{62,36 \cdot 268} = 0,0034 \text{ кг/м}^3 = 3,4 \text{ г/м}^3.$$

Концентрация влаги в воздухе на выходе компрессора:

$$C_{s1} = \frac{P_s M}{RT_2} 0,6, \quad (2)$$

где  $T_2$  — температура сжатого воздуха на выходе компрессора. Тогда получим:

$$C_{s1} = \frac{55,3 \cdot 18,01}{62,36 \cdot 313} 0,6 = 30,6 \text{ г/м}^3.$$

Относительная концентрация влаги в поступающем воздухе равна:

$$C = \frac{C_{s1}}{C_s};$$

$$C = \frac{31}{3,4} = 8,96.$$

Определим коэффициент, который является отношением поверхностного натяжения данного адсорбата и адсорбата стандартного вещества. Этот коэффициент называется коэффициентом аффинности и обозначается как  $\beta$ . Принято стандартным веществом считать бензол, в этом случае коэффициент аффинности определяется по формуле:

$$\beta = \frac{\Pi}{\Pi_{ст}}, \quad (3)$$

где  $\Pi$  и  $\Pi_{ст}$  — параворы воды и бензола.

В нашем случае ТОЗМ (теория объемного заполнения микропор) предполагает использовать ингредиенты параворов по Сегдену. Паравор бензола  $\Pi_{ст} = 207,1$ . Паравор воды  $\Pi = 192,3$  [3, 7, 8].

Следовательно, коэффициент аффинности в нашем случае будет равен:

$$\beta = \frac{192,3}{207,1} = 0,93.$$

Согласно уравнению ТОЗМ (уравнение Дубинина — Радушкевича) [5], равновесная величина адсорбции влаги  $X$  будет определена по представленной ниже формуле:

$$X(C_0) = W \cdot \rho \cdot e \left[ -B \left( \left( \frac{T_1}{\beta} \right)^2 \lg \left( \frac{C_s}{C} \right)^2 \right) \right], \quad (4)$$

где  $W$  — предельный объем микропор в адсорбенте, см<sup>3</sup>/г. Для силикагеля КСКГ равна 0,85 см<sup>3</sup>/г;

$B$  — структурная константа адсорбента, равна  $3,35 \cdot 10^{-6}$  [6];

$T_1$  и  $C$  — условия опытов, для которых ищут значение  $X$ ;

$\rho$  — плотность адсорбата в адсорбированной фазе, г/см<sup>3</sup>.

В данном случае  $\rho = 0,998$  г/см<sup>3</sup> [7].

Далее, для определения срока службы адсорбента, необходимо определить предельную возможность слоя адсорбента ПВ<sub>с</sub>.

Предельная возможность слоя МС (массообмена) определяется следующим образом:

$$\text{ПВ}_c = \frac{X(C_0) \cdot \rho_n \cdot 10^3}{C_s - C_0}, \quad (5)$$

где  $\rho_n$  — насыпная плотность адсорбента, г/м<sup>3</sup>;

$C_0$  — конечное влагосодержание, принимается в зависимости от класса чистоты сжатого воздуха по DIN ISO 8573-1. Для 1-го класса чистоты влагосодержание составляет 0,0028 г/м<sup>3</sup> (точка россы  $-70$  °С), 2-го — 0,119 г/м<sup>3</sup> (точка россы  $-40$  °С) и 3-го класса — 0,884 г/м<sup>3</sup> (точка россы  $-20$  °С).

$$\text{ПВ}_c = \frac{0,953 \cdot 400 \cdot 10^3}{3,4 - 0,119} = 1,16 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Количество воздуха, которое может осушить слой адсорбента, определим как

$$G_{\text{осуш}} = \text{ПВ}_c \cdot V, \quad (6)$$

где  $V$  — объем слоя адсорбента, 1 м<sup>3</sup>:

Таблица 1. Исследование срока службы силикагеля марки КСКГ в зависимости от класса чистоты, влажности атмосферного воздуха (50–100 %) и температурных условий

Класс чистоты		1 класс			2 класс			3 класс		
Влажность, %	Срок службы	–5° С	0° С	5° С	–5° С	0° С	5° С	–5° С	0° С	5° С
50	Часов	2518	1643	1077	2702	1726	1115	5210	2584	1453
	Дней	105	68	45	113	72	46	217	108	61
60	Часов	2007	1308	856	2128	1362	881	3524	1877	1091
	Дней	84	54	36	89	57	37	147	78	45
70	Часов	1657	1078	704	1742	1116	722	2626	1457	864
	Дней	69	45	29	73	47	30	109	61	36
80	Часов	1404	912	595	1466	940	608	2073	1181	710
	Дней	58	38	25	61	39	25	86	49	30
90	Часов	1213	787	513	1260	809	523	1700	987	599
	Дней	51	33	21	53	34	22	71	41	25
100	Часов	1064	690	449	1101	707	457	1434	843	516
	Дней	44	29	19	46	29	19	60	35	22

$$G_{\text{осуш}} = 1,16 \cdot 10^5 \cdot 1 = 115\,633,5 \text{ м}^3.$$

Далее срок службы адсорбента рассчитаем по формуле:

$$A = \frac{G_{\text{осуш}}}{G}; \quad (7)$$

$$A = \frac{115\,633,5}{105} = 1101,3 \text{ ч.}$$

В табл. 1 представлены результаты расчета срока службы адсорбента марки КСКГ при различных параметрах: изменяющейся относительной влажности атмосферного воздуха в заданных пределах, указанных температурах и содержании влаги в осушенном воздухе, соответствующем 1-му классу чистоты.

Проведем графическую визуализацию (рис. 1) по результатам, представленным в табл. 1.

### Обсуждение

Полученные по результатам расчетов графические зависимости позволяют определить влияние вышеуказанных факторов на срок службы адсорбента. Так, в пределах требуемого класса

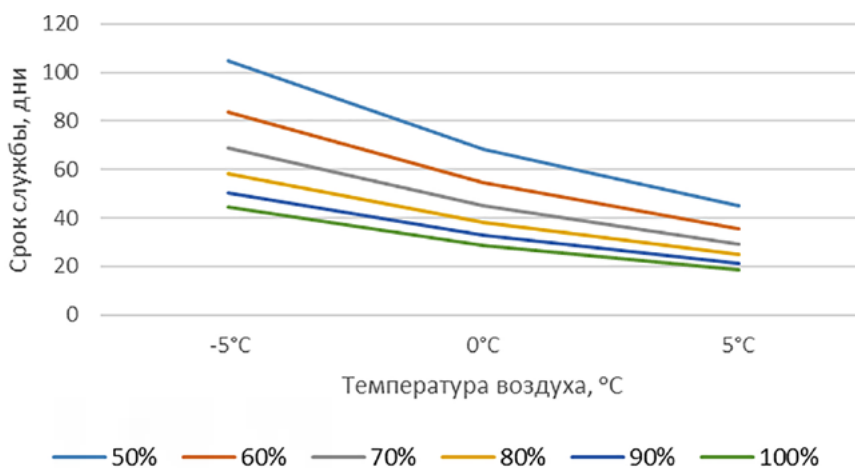
чистоты по влаге выходящего из адсорбера сжатого воздуха при 50%-й влажности атмосферного воздуха и изменении его температуры от –50 до +50 °С уменьшение срока службы адсорбента составляет 57,1 %, а при 100%-й влажности и аналогичном изменении температур уменьшение срока службы составляет 56,8 %. Это говорит об адекватности полученных результатов расчета, лежащих в пределах погрешности.

Ниже представлена табл. 1, в которой даны результаты расчета срока службы адсорбента для различных классов чистоты, при вышеуказанном изменении относительной влажности и температуры атмосферного воздуха.

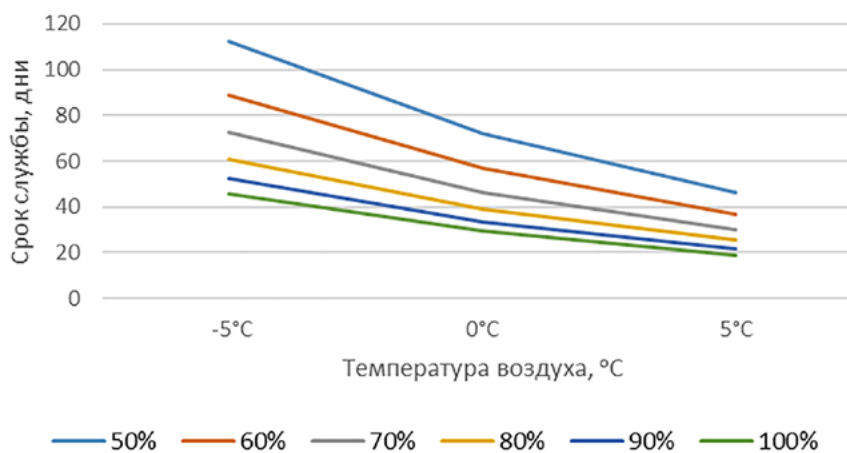
Ниже проведем графическую визуализацию (рис. 1–3) полученных и представленных в табл. 1 результатов, на основании которых можно сделать следующие выводы:

- С увеличением влажности и температуры всасываемого из атмосферы в компрессор воздуха, его сжатия и осушки в адсорбере (адсорбент КСКГ) срок службы адсорбента уменьшается.

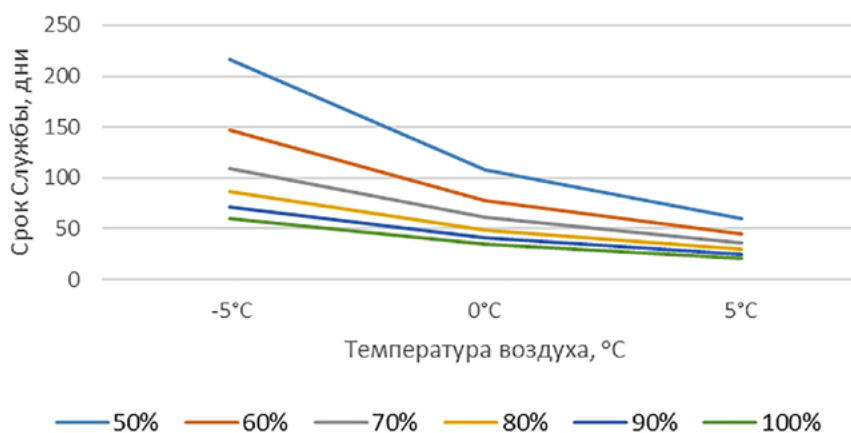
- Процент снижения срока службы для требований 1-го класса чистоты по содержанию влаги в сжатом воздухе при увеличении влагосодер-



**Рис. 1.** График зависимости срока службы силикагеля марки КСКГ от относительной влажности и температуры атмосферного воздуха в соответствии с требованиями 1-го класса чистоты



**Рис. 2.** График зависимости срока службы силикагеля марки КСКГ от относительной влажности и температуры атмосферного воздуха в соответствии с требованиями 2-го класса чистоты



**Рис. 3.** График зависимости срока службы силикагеля марки КСКГ от относительной влажности и температуры атмосферного воздуха в соответствии с требованиями 3-го класса чистоты

жания и снижении температуры атмосферного воздуха составляет от 58 % до 57 %. Для второго класса чистоты и аналогичных изменениях параметров атмосферного воздуха это снижение составляет 59–58 %, а для 1-го класса чистоты — 72–64 %.

Таким образом, очевидно, что наибольшее влияние на срок службы адсорбента оказывает требуемая величина влагосодержания в сжатом воздухе после прохождения им адсорбционной осушки, которая соответствует определенному классу чистоты [1].

В вышепредставленных результатах, связанных с определением факторов влияния на срок службы адсорбента — силикагеля марки КСКГ, установлено, что наибольшее влияние из трех рассматриваемых факторов имеет класс чистоты. При этом стоит отметить, что результаты по определению срока службы адсорбента предусматривали безостановочную работу компрессора, а именно продолжительность его включения (ПВк), равную 100 %, что в эксплуатационных режимах на подвижном составе железных дорог и в режиме эксплуатации пневматических систем предприятий практически исключено.

Следовательно, целесообразным является рассмотрение реальных режимов работы компрессора для обеспечения сжатым воздухом, например, пневмосистем подвижного состава железных дорог. Именно для этих режимов работы следует определять срок службы адсорбента.

Согласно [9, 10], для предотвращения перегрева компрессора и преждевременного выхода из строя режим его работы устанавливают повторно-кратковременным, а именно:

- ПВк под нагрузкой — не более 50 %;
- оптимальный — ПВк — 20 %.

Рассчитаем срок службы адсорбента при оптимальном режиме с ПВк 20 % и максимально возможном с ПВк 50 %. Данные проведенных расчетов представлены в табл. 2.

Графическая визуализация представленных в таблице результатов расчета изображена на рис. 4–6.

Здесь стоит отметить, что снижение продолжительности включения компрессора приводит к увеличению срока службы адсорбента. Это происходит по причине значительного уменьшения расхода сжатого воздуха, проходящего через адсор-

Таблица 2. Срок службы силикагеля марки КСКГ с ПВк = 20 % и ПВк = 50 %

Класс чистоты		1-й класс			2-й класс			3-й класс		
Влажность, %	Срок службы	-5° С	0° С	5° С	-5° С	0° С	5° С	-5° С	0° С	5° С
ПВк 20 %										
50	Дней	524	342	224	563	360	232	1085	538	303
60	Дней	418	272	178	443	284	183	734	391	227
70	Дней	345	225	147	363	233	150	547	304	180
80	Дней	292	190	124	305	196	127	432	246	148
90	Дней	253	164	107	263	168	109	354	206	125
100	Дней	222	144	94	229	147	95	299	176	108
ПВк 50 %										
50	Дней	210	137	90	225	144	93	434	215	121
60	Дней	167	109	71	177	114	73	294	156	91
70	Дней	138	90	59	145	93	60	219	121	72
80	Дней	117	76	50	122	78	51	173	98	59
90	Дней	101	66	43	105	67	44	142	82	50
100	Дней	89	57	37	92	59	38	119	70	43

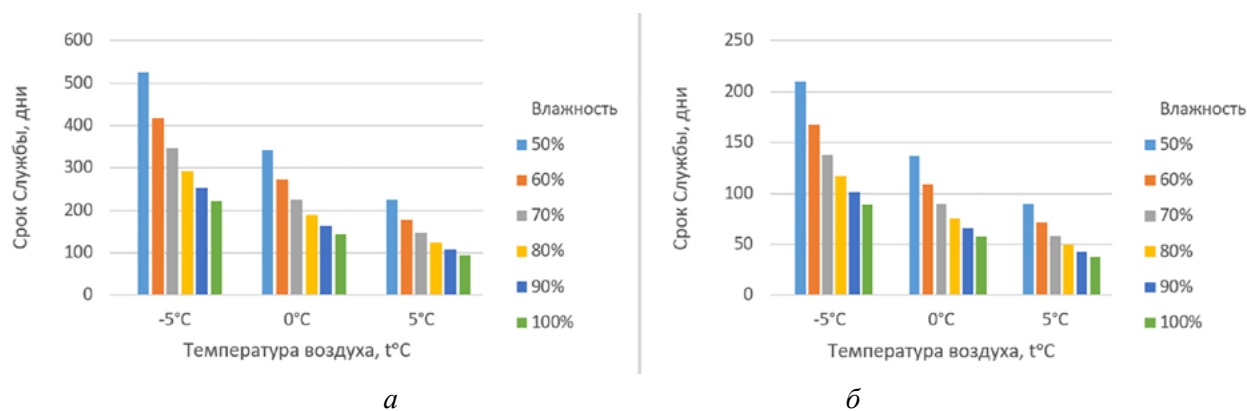


Рис. 4. Срок службы силикагеля марки КСКГ для 1-го класса чистоты при ПВк = 20 % (а) и ПВк = 50 % (б)

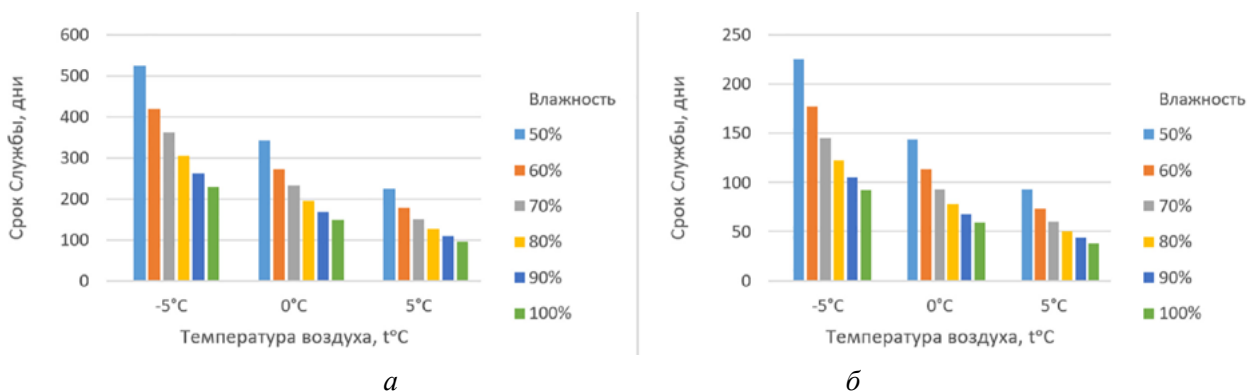


Рис. 5. Срок службы силикагеля марки КСКГ для 2-го класса чистоты при ПВк = 20 % (а) и ПВк = 50 % (б)

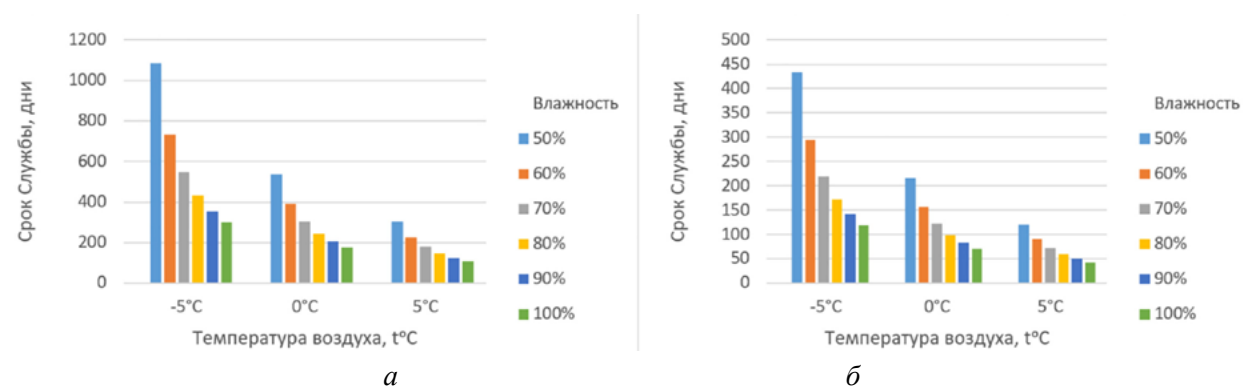


Рис. 6. Срок службы силикагеля марки КСКГ для 3-го класса чистоты при ПВк = 20 % (а) и ПВк = 50 % (б)

бер, и, следовательно, к уменьшению количества влаги, подлежащей поглощению адсорбентом.

Очевидно, что реальная работа компрессора для оптимальных режимов и даже режимов движения подвижного состава под нагрузкой значительно увеличит срок службы силикагеля марки КСКГ.

При этом ранее посчитанные проценты изменения срока службы адсорбента при различных величинах параметров влияния остаются практи-

чески неизменными, что подтверждает адекватность полученных результатов.

## Выводы

На основании анализа результатов, полученных при проведении исследований по определению факторов влияния на срок службы адсорбента — силикагеля марки КСКГ, установлено, что ими являются:

- относительная влажность атмосферного воздуха;
- температура атмосферного воздуха;
- требуемый класс чистоты сжатого воздуха;
- продолжительность включения компрессора.

Исследования показали, что с увеличением относительной влажности атмосферного воздуха и его температуры срок службы адсорбента уменьшается. С повышением требований по классу чистоты к осушаемому в адсорбере сжатому воздуху срок его службы также уменьшается. Снижение времени работы компрессора, выражающееся в уменьшении ПВк, увеличивает срок службы силикагеля КСКГ.

Таким образом, рассчитанные в работе величины срока службы силикагеля марки КСКГ сопоставимы с данными производителей, что позволяет рекомендовать его к промышленному применению на подвижном составе железных дорог и предприятиях железнодорожного транспорта.

### Список источников

1. ГОСТ 32202—2013. Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава. — М.: Стандартинформ, 2013.
2. Риполь-Сарагоси Т. Л. Снижение энергоемкости 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. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021. — Т. 2. — С. 83–86.
3. Шумяцкий Ю. И. Адсорбционные процессы: учебное пособие / Ю. И. Шумяцкий. — М.: Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2005.
4. Дубинин М. М. Адсорбционные свойства и структура силикагелей и алюмогелей / М. М. Дубинин, А. Г. Зуев // Доклады Академии наук СССР. Физическая химия. — 1949. — Т. LXIX. — № 2.
5. 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.
6. Гаврилова Н. Н. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных: учебное пособие / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. — 132 с.
7. Горшунова В. П. Сравнительные адсорбционные свойства термохимически модифицированных кремнеземных сорбентов и алюмогеля / В. П. Горшунова, А. В. Рылков, О. В. Чибисова, В. А. Небольсин // Химия, новые материалы, химические технологии: внутривузовский сборник научных трудов. — Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2011. — Вып. 1. — С. 81–86.
8. Кожевникова И. В. Промышленные отходы силикагеля, цеолита и алюмогеля как основная составляющая полиуретановых композиционных материалов / И. В. Кожевникова, Т. Р. Сафиуллина, Л. А. Зенитова // Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии: материалы IX международной научно-практической конференции, Нижнекамск, 05–07 апреля 2016 года. — Нижнекамск: ПАО «Нижнекамскнефтехим», 2016. — С. 56.
9. ГОСТ 10393—2014. Компрессоры, агрегаты компрессорные с электрическим приводом и установки компрессорные с электрическим приводом для железнодорожного подвижного состава. — М.: Стандартинформ, 2015.
10. Смаглюков Д. А. Устройство и эксплуатация электровагона ЭП20: учебное пособие / Д. А. Смаглюков. — М.: ОАО «Российские железные дороги», 2015. — 360 с.

Дата поступления: 21.07.2025

Решение о публикации: 06.08.2025

### Контактная информация:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — д-р техн. наук, проф.; [ripol-saragosi@mail.ru](mailto:ripol-saragosi@mail.ru)

МАЛЬЦЕВ Дмитрий Алексеевич — инженер; [dmitrimalzev2000@gmail.com](mailto:dmitrimalzev2000@gmail.com)



## Assessment of the Factors Affecting the Service Lifespan of Silica Gel

T. L. Ripol-Saragosi<sup>1</sup>, D. A. Maltsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Rostov State Transport University, 2, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

<sup>2</sup> LLC NPO Turbulence-DON, 1st km, Building 6/8, Rostov-on-Don-Novoshakhtinsk Road, Rostov-on-Don, 344068, Russian Federation

**For citation:** Ripoll-Saragosi T. L., Maltsev D. A. Assessment of the Factors Affecting the Service Lifespan of Silica Gel // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1035–1044. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1035-1044

### Summary

**Purpose:** To present the results of research conducted to analyze the influence of temperature and relative humidity of the atmospheric air entering the compressor system, as well as the required purity class after adsorption drying on the service lifespan of the KSKG brand adsorbent. To determine the feasibility of their use. **Methodology:** In order to ascertain the extent to which the selected physical parameters of atmospheric and compressed air and its statutory purity class at the compressor outlet influence the adsorbent service lifespan, a methodology for calculating the adsorbent lifespan was tested, considering the above-mentioned factors. **Methods:** The results obtained were compared and analyzed. Following this, the results were graphically visualized. Subsequent conclusions and recommendations have been formulated to substantiate the potential use of the adsorbent under study according to the criterion of “service lifespan”. **Practical significance:** The findings of the aforementioned studies provide a solid foundation for the selection of an adsorbent that is optimally suited for utilization in adsorption drying technology, particularly within pneumatic systems employed in railway rolling stock and railway industry enterprises. This selection will empower the implementation of a programme aimed at enhancing resource conservation and mitigating the adverse environmental impact by decreasing the amount of waste generated from used resources.

**Keywords:** Resource conservation, compressed air, atmospheric air, service lifespan, environment, adsorption, adsorbent.

### References

1. GOST 32202—2013. *Szhatyy vozdukh pnevmaticheskikh sistem zheleznodorozhnogo podvizhnogo sastava* [Compressed air of pneumatic systems of railway rolling stock]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian)

2. Ripol'-Saragosi T. L., Gladkikh M. A. Snizhenie energoemkosti protsessy adsorbtsii pri ispol'zovanii kompozitnykh adsorbentov [Reducing the energy intensity of the adsorption process using composite adsorbents]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Rostov-na-Donu, 19–21 aprelya 2021 goda* [Transport: science, education, production: collec-

tion of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 19–21, 2021]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2021, vol. 2, pp. 83–86. (In Russian)

3. Shumyatskiy Yu. I. *Adsorbtsionnye protsessy: uchebnoe posobie* [Adsorption processes: textbook]. Moscow: Rossiyskiy khimiko-tehnologicheskii universitet im. D. I. Mendeleeva Publ., 2005. (In Russian)

4. Dubinin M. M., Zuev A. G. Adsorbtsionnye svoystva i struktura silikageley i alyumogeley [Adsorption properties and structure of silica gels and alumina gels]. *Doklady Akademii nauk SSSR. Fizicheskaya khimiya* [Reports of the

Academy of Sciences of the USSR. Physical chemistry]. 1949, vol. LXIX, Iss. 2. (In Russian)

5. Ripol'-Saragosi T. L. Issledovanie zavisimosti energeticheskoy effektivnosti tekhnologii adsorbtsionnoy osushki szhatogo vozdukha ot modifikatsii alyumogelya [Study of the dependence of the energy efficiency of compressed air adsorption drying technology on alumina modification]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2024, vol. 21, Iss. 4, pp. 922–930. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-922-930. (In Russian)

6. Gavrilova N. N., Nazarov V. V. *Analiz poristoy struktury na osnove adsorbtsionnykh dannykh: uchebnoe posobie* [Analysis of porous structure based on adsorption data: textbook]. Moscow: RKhTU im. D. I. Mendeleeva Publ., 2015, 132 p. (In Russian)

7. Gorshunova V. P., Ryl'kov A. V., Chibisova O. V., Nebol'sin V. A. Sravnitel'nye adsorbtsionnye svoystva termokhimicheski modifitsirovannykh kremnezemnykh sorbentov i alyumogelya [Comparative adsorption properties of thermochemically modified silica sorbents and alumina]. *Khimiya, novye materialy, khimicheskie tekhnologii: vnutrivuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Chemistry, new materials, chemical technologies: intra-university collection of scientific papers]. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2011, Iss. 1, pp. 81–86. (In Russian)

8. Kozhevnikova I. V., Safullina T. R., Zenitova L. A. Promyshlennyye otkhody silikagelya, tseolita i alyumogelya kak osnovnaya sostavlyayushchaya poliuretanovykh kom-

pozitsionnykh materialov [Industrial waste of silica gel, zeolite and alumina as the main component of polyurethane composite materials]. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy innovatsionnogo razvitiya neftekhimii: materialy IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 05–07 aprelya 2016 goda* [Current state and prospects of innovative development of petrochemical industry: materials of the IX International Scientific and Practical Conference, 05–07 April 2016]. Nizhnekamsk: PAO “Nizhnekamskneftekhim” Publ., 2016, p. 56. (In Russian)

9. *GOST 10393–2014. Kompresory, agregaty kompressornyye s elektricheskim privodom i ustanovki kompressornyye s elektricheskim privodom dlya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Compressors, compressor units with electric drive and compressor installations with electric drive for railway rolling stock]. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian)

10. Smaglyukov D. A. *Ustroystvo i ekspluatatsiya elektrovoza EP20: uchebnoe posobie* [Design and operation of EP20 electric locomotive: textbook]. Moscow: OAO “Rossiyskie zheleznyye dorogi” Publ., 2015, 360 p. (In Russian)

Received: July 21, 2025

Accepted: 06.08.2025

**Author's information:**

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

Dmitriy A. MALTSEV — Engineer;

dmitrimalzev2000@gmail.com