

О ГЛУБОКОЙ ОСУШКЕ ВОЗДУХА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К БОРТОВЫМ КИСЛОРОДОДОБЫВАЮЩИМ УСТАНОВКАМ

А.С. Сергунин¹, С.И. Симаненков², Н.Ц. Гатапова¹

*Кафедра «Технологические процессы и аппараты»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; kvider@cen.tstu.ru (1);
ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (2), г. Тамбов*

Ключевые слова и фразы: активный оксид алюминия; короткоцикловая безнагревная адсорбция; сорбент-осушитель; цеолит.

Аннотация: Описана созданная двухадсорберная установка, функционирующая на основе принципа короткоцикловой безнагревной адсорбции. Приведены и проанализированы результаты экспериментов по изучению влияния длительности цикла и соотношения давлений адсорбции и десорбции на глубину осушки воздуха.

С 2006 года российские боевые самолеты стали оснащаться бортовыми кислорододобывающими установками (БКДУ), которые обеспечивают дыхание экипажа из двух летчиков воздухом, обогащенным кислородом. В БКДУ используется технология короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА, в международной терминологии PSA – *Pressure Swing Adsorption*). В БКДУ применяется алюмосиликатный цеолит, который поглощает из воздуха преимущественно азот. При этом сорбция происходит при повышенном давлении газа, а десорбция производится обратной продувкой при пониженном давлении.

Пятилетняя эксплуатация БКДУ выявила ряд недостатков. Основными являются: падение производительности при эксплуатации в странах с тропическим климатом, приводящее к отказу по парциальному давлению кислорода; недостаточная начальная производительность, в частности во время «рулежки» самолета и при полетах на малых высотах в режиме «малый газ». Для повышения надежности и устойчивости работы БКДУ необходима модернизация сорбентов и условий их использования.

Причиной падения производительности БКДУ является неполнота регенерации сорбентов по воде, приводящая к «замоканию» цеолита. Экспериментальные данные для цеолита LiLSX по влиянию адсорбированной воды на адсорбцию азота показывают, что уже адсорбция 2 % масс. воды на 20 % уменьшает емкость по азоту, а при поглощении 7 % масс. воды литиевый цеолит практически полностью теряет способность к поглощению азота [1].

Допустимая влажность воздуха f , г/м³, может быть рассчитана по формуле

$$f = \frac{ma}{\tau V},$$

где m – масса цеолита, кг; a – допустимая адсорбция паров воды цеолитом, г/кг; τ – ресурс или время работы установки КБА, ч; V – подача воздуха, м³/ч (при нормальных условиях).

Если принять за допустимую адсорбцию 20 г воды на кг цеолита (2 % масс.), то при массе цеолита 3,6 кг, длительности работы БКДУ 3000 ч и подаче воздуха

15 м³/ч допустимая влажность воздуха будет равна всего 0,0016 г/м³, что соответствует температуре –74 °С по точке росы.

Для достижения глубокой осушки воздуха в адсорберах перед слоем цеолита размещают слой осушителя, также регенируемый обратной продувкой. При этом предпочтение отдается сорбентам-осушителям с теплотой адсорбции паров воды не более 14 ккал/моль, что обеспечивает высокую кинетику десорбции паров воды. Приемлемым осушителем является активный оксид алюминия, для которого теплота адсорбции воды составляет 12...14 ккал/моль при адсорбции 0,5...3 ммоль воды на 1 г сорбента (0,9...5,4 % масс.) [1]. Его доля от общего объема сорбентов должна составлять согласно расчетам [2] не менее 20 %.

В данной работе была экспериментально изучена динамическая активность по парам воды микросферического активного оксида алюминия АОК-63-11 и цеолита NaX в режимах адсорбции и десорбции. По результатам исследований в качестве сорбента-осушителя в процессах КБА целесообразно рекомендовать микросферический оксид алюминия (например, АОК-63-11), так как коэффициент массопередачи по парам воды в режиме адсорбции у него в 2,5–5 раз, в режиме десорбции в 2–4 раза выше, чем у цеолита NaX [3].

Совместно с конструкторским отделом и опытно-механическим цехом ОАО «Корпорация «Росхимзащита» были разработаны и изготовлены два адсорбера объемом 200 мл (рис. 1), что соответствует количеству осушителя в штатных адсорберах БКДУ.

Для обеспечения длительной работы бортовой кислорододобывающей установки давление подаваемого воздуха должно превышать давление воздуха, сбрасываемого из БКДУ, не менее чем в 3 раза [4]. Сокращение длительности цикла с 20 до 4 с, уменьшение размера гранул цеолита LiLSX и осушителя с 1 до 0,35 мм

позволяют повысить производительность БКДУ по кислороду в 5 раз или уменьшить массу сорбентов в 5 раз с 3,6 до 0,7 кг с сохранением производительности, рассчитанной на двух человек [4, 5]. В проведенных испытаниях значения давления на стадиях сорбции и десорбции составили 3...3,25 и 1 ата соответственно; длительность цикла установлена примерно 4 с.

Для проведения испытаний работы адсорберов был использован стенд, схема которого показана на рис. 2. Два адсорбера, снаряженных активным оксидом алюминия АОК-63-11, взвешивались на весах с погрешностью ±0,5 г и монтировались на установку. Сжатый воздух через блок увлажнения 7, нагреватель 11 и электромагнитный клапан К1 (13) подавался в адсорбер 1 (16), работающий в режиме сорбции. Осушенный воздух через электромагнитный клапан К3 (20) и ротаметр 25 выбрасывался в атмосферу. Температура по точке росы в продуцируемой смеси контролировалась прибором ИВГ-1 27. Часть газовой смеси на выходе адсорбера 1 (16) через обратные клапаны 17, 28, ротаметр 29 направлялась на продувку адсорбера 2 (31). Через полуцикл происходило автоматическое переключение электромаг-

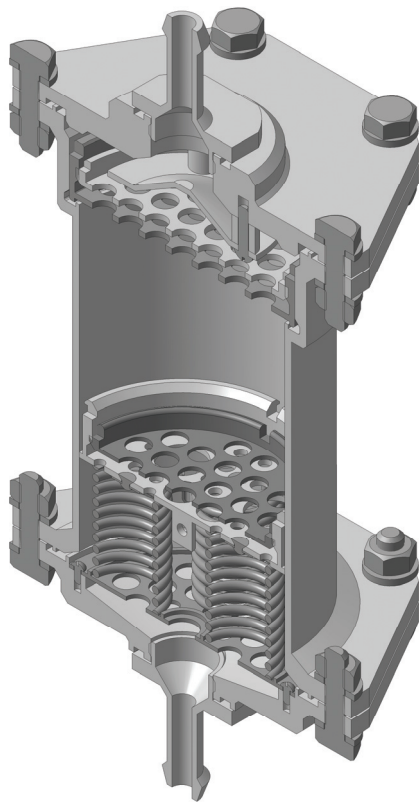


Рис. 1. Адсорбер (200 мл)

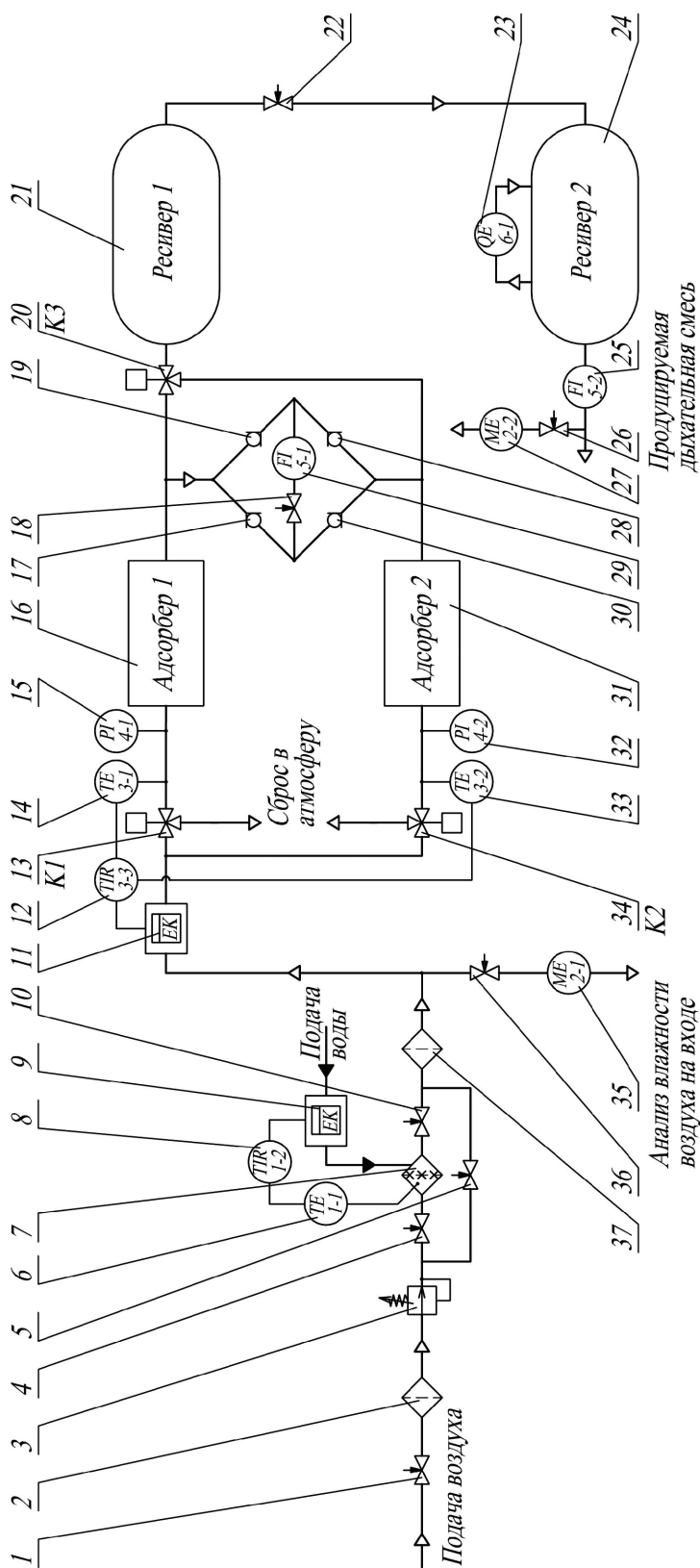


Рис. 2. Принципиальная схема двухадсорберной установки КБА:

1, 4, 5, 10, 18, 22, 26, 36 – вентиль регулирующий; 2, 37 – фильтр воздуха; 3 – стабилизатор давления; 6, 14, 33 – датчик температуры; 7 – блок увлажнения; 8, 12 – терморегулятор; 9, 11 – нагреватель; 13, 20, 34 – трехходовой электромагнитный клапан; 15, 32 – манометр; 16, 31 – адсорбер; 17, 19, 28, 30 – обратный клапан; 21, 24 – ресивер; 25, 29 – ротаметр; 23 – газоанализатор кислорода; 27 – измеритель влажности газов ИВГ-1; 35 – психрометр

нитных клапанов К1, К2 и К3: адсорбер 2 переходил в режим сорбции, а адсорбер 1 – в режим десорбции. Далее процесс циклически повторялся. Адсорберы примерно через каждые 5...6 ч отсоединялись от установки и взвешивались для определения количества накопленной в сорбенте влаги.

Испытания проводились на температурно-влажностных режимах, приведенных в табл. 1. В таблице 2 представлены экспериментальные данные, полученные в наиболее критическом для обеспечения ресурса режиме с максимальными температурой (60...70 °С) и влажностью (15...18 г/м³).

Таблица 1

Режимы работы БКДУ при различных температурах и влажностях подаваемого воздуха

Высота полета, км	0...11	0...5	0...5	0...5	0...2	0...2
Температура окружающей среды, °С	5...50	20...60	10...30	10...35	25...45	30...45
Температура воздуха на входе БКДУ, °С	40...60	40...60	40...70	40...70	60...70	60...70
Влажность воздуха на входе БКДУ, г/м ³	0...3	3...6	6...9	9...12	12...15	15...18
Относительное время работы БКДУ, %	25	30	30	10	4	1

Таблица 2

Экспериментальные данные влияния длительности цикла и соотношения давлений на глубину осушки воздуха

Время, ч	Длительность цикла, с	Давления P_a/P_d , ати	Температура на входе, °С	Влажность на входе, г/м ³	Температура по точке росы на выходе $t_{т.р.}$, °С	Расход на промывку, л/мин	Отбор осушенного воздуха, л/мин	Массы адсорберов m_1/m_2 , г
<i>Пара адсорберов, снаряженных активным оксидом алюминия (2 × 180 см³ АОК-63-11)</i>								
0		2,25/0	60...65	7,7	-50			1043/1051
0,4		2,25/0	69...72	10,0	-62			–
1,3		2,25/0	64...66	16,0	-68			–
2,4	4,4	2,25/0	64...67	18,1	-71	20	20	–
3		2,25/0	66...70	18,5	-72			–
4,8		2,3/0	65...70	19,5	-74			–
6,4		2,25/0	65...69	18,1	-75			–
7,7		2,25/0	65...70	21,1	-76			1043/1051
<i>Пара адсорберов, снаряженных активным оксидом алюминия и спиральями из нержавеющей стали в качестве инерта (2 × 60 см³ АОК-63-11 + 120 см³ инерта)</i>								
0		2,15/0	52...56	14,7	-50			1061/1081
0,8		2,25/0	65...70	15,3	-58			–
2,3		2,22/0	66...70	15,3	-64			–
2,8	4,3	2,25/0,1	64...67	15,5	-66	20	20	–
3,5		2,25/0,2	64...69	16,6	-69			–
4,3		2,25/0,2	66...69	17,2	-72			–
5,3		2,25/0,2	66...69	17,2	-74			1061/1082

Отсутствие привеса адсорберов после испытаний при вышеуказанных условиях дало возможность уменьшить объем активного оксида алюминия до 60 мл, поскольку для глубокой осушки воздуха доля осушителя от общего объема сорбентов в портативных установках КБА должна составлять 20...50 % [2]. Оставшееся пространство заполнялось 120 мл инерта – спиралью из нержавеющей стали (см. табл. 2).

В результате испытаний впервые была показана возможность использования активного оксида алюминия для глубокой осушки воздуха в режиме КБА не только при обычных, но и при повышенных температурах (до +70 °С). Показательно, что при влагосодержании подаваемого воздуха свыше 15 г/м³ и повышенной температуре +70 °С привес адсорберов составил не более 1 г за 40 ч испытаний, а выходная влажность – около –74 °С по точке росы.

Выводы:

- для повышения производительности и устойчивости работы БКДУ в качестве сорбента-осушителя целесообразно использовать микросферический оксид алюминия вместо цеолита NaX;
- кроме того, сокращение длительности цикла с 20 до примерно 4 с при соотношении давлений адсорбции и десорбции $P_a/P_d \geq 3$ позволяет уменьшить объем влагопоглотителя в 3 раза с сохранением необходимой степени осушки.

Список литературы

1. Пат. 7,717,981 B2 США, Int. Cl. B01D 53/02. Performance Stability in Shallow Beds in Pressure Swing Adsorption Systems / Matthew James LaBuda, Timothy Christopher Golden, Roger Dean Whitley, assignee Air Products and Chemicals, Inc. – № 542948 ; заявл. 04.10.2006 ; опубл. 18.05.2010. – 13 с.
2. Пат. 7,037,358 B2 США, Int. Cl. B01D 53/047. PSA with Adsorbents Sensitive to Contaminants / Matthew L. Babicki, Bowie G. Keefer, Andrea C. Gibbs, Alberto I. Iacava, Frank Fitch, assignee The BOC Group, Inc., QuestAir Technologies Inc. – № 021751 ; заявл. 11.12.2001 ; опубл. 02.05.2006. – 50 с.
3. Сергунин, А.С. Исследование динамики десорбции паров воды из цеолита NaX и активного оксида алюминия / А.С. Сергунин, С.И. Симаненков // Сб. тр. конф. «Составляющие научно-технического прогресса». – Тамбов : ООО «Тамбовпринт», 2009. – С. 131–132.
4. Пат. 6,551,384 B1 США, Int. Cl.⁷ B01D 53/047. Medical Oxygen Concentrator / Mark William Ackley, Guoming Zhong, assignee Praxair Technology, Inc. – № 897960 ; заявл. 05.07.2001 ; опубл. 22.04.2003. – 13 с.
5. Пат. WO 2010/129329 A2, Int. Cl. B01D 53/047. Miniature Oxygen Concentrators and Methods / Siew-Wah Chai, Sircar Shivaji, Kothare Mayuresh V., applicant Lehigh University – № 173352 ; заявл. 28.04.2009 ; опубл. 11.11.2010. – 23 с.

On Deep Air Drying for On-Board Oxygen-Producing Equipment

A.S. Sergunin¹, S.I. Simanenkov², N.Ts. Gatapova¹

*Department "Processes and Devices", TSTU; kvidep@cen.tstu.ru (1);
OAO "Corporation "Roskhimzaschita"(2), Tambov*

Key words and phrases: active aluminum oxide; drying sorbent; short-cycle pressure swing adsorption; zeolite.

Abstract: The paper describes the developed dual adsorption device, functioning on the basis of short-cycle pressure swing adsorption. We present and analyze the results of experiments on the effect of the cycle duration and the ratio of adsorption and desorption pressure on the depth of air drying.

Über das tiefen Trocknen der Luft in bezug auf die bordlichen sauerstoffgewinnenden Anlagen

Zusammenfassung: Es ist die geschaffene Zweiadsorberanlage, die auf Grund des Prinzips der kurzzyklischen nichterwärmenden Adsorption funktioniert, beschrieben. Es sind die Ergebnisse der Experimente nach Erlernen der Einwirkung der Dauer des Zyklus und des Verhältnisses der Drücke der Adsorption und der Desorption auf die Tiefe des Lufttrocknens angeführt und analysiert.

Sur un assèchement profond de l'air conformément aux installations à bord d'extraction de l'oxygène

Résumé: Est décrite une installation à deux adsorptions fonctionnant à la base du principe de l'adsorption du cycle court sans chauffage. Sont cités et analysés les résultats des expériences sur l'étude de l'influence de la durée du cycle et la relation de la pression de l'adsorption et de la désorption sur la profondeur de l'assèchement de l'air.

Авторы: *Сергунин Александр Сергеевич* – аспирант кафедры «Технологические процессы и аппараты»; *Симаненков Станислав Ильич* – кандидат технических наук, научный консультант отдела химии и новых химических технологий, ОАО «Корпорация «Росхимзащита»; *Гатапова Наталия Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы и аппараты», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Коновалов Виктор Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы и аппараты», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
