

**В.И. Файнштейн\*, Н.А. Пуртов, Л.В. Максимова, В.Я. Шкадов**

ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

\*e-mail: vladlenf@yandex.ru

## ОСОБЕННОСТИ ОСУШКИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ КОРОТКОЦИКЛОВОЙ АДсорбЦИИ

*Метод короткоциклового адсорбции (КЦА), при использовании которого исключается нагрев адсорбента при регенерации, нашёл широкое применение, в том числе и для осушки газов. Расчётные исследования показали, что при осушке методом КЦА на активной окиси алюминия накапливается значительное количество влаги, которое во много раз превышает влагу, поступающую в адсорбер за полуцикл. Накопление в слое адсорбата в количествах, заметно превышающих цикловую нагрузку, характерно и для других процессов КЦА. Установлено, что при осушке воздуха методом КЦА адсорбционные характеристики углеродных молекулярных сит близки к аналогичным показателям активной окиси алюминия.*

**Ключевые слова:** Короткоцикловая адсорбция (КЦА). Осушка газов. Активная окись алюминия. Углеродные молекулярные сита. Температура в слое.

**V.I. Fainshtein, N.A. PurtoV, L.V. Maksimova, V.Ya. Shkadov**

## FEATURES AIR DRYER BY METHOD OF PRESSURE SWING ADSORPTION

*The method of pressure swing adsorption (PSA), at which use adsorbent heating is excluded at regeneration, has found wide application, including for drying gases. Calculations researches have shown that at the drying method of PSA on the active alumina accumulates a significant amount of moisture, which many times over exceeds moisture arriving in an adsorber in a half-cycle of an adsorber. Accumulation in the adsorbate layer in quantities, is appreciable exceeding cyclic loading, is characteristic and for other processes PSA. It is established that at the drying air by method PSA adsorption characteristics of carbon molecular sieves are close to similar indicators of active aluminum oxide.*

**Keywords:** Pressure swing adsorption (PSA). Dehydration of gases. Active aluminum oxide. Carbon molecular sieves. Temperature in a layer.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Метод короткоциклового адсорбции (КЦА или PSA), предложенный С.В. Скарстром [1], нашёл широкое применение. При его использовании исключается нагрев адсорбента во время регенерации. Промышленные установки осушки воздуха, работающие по этому методу, выпускаются в настоящее время многими зарубежными и российскими фирмами. Создаются также многочисленные установки КЦА для разделения воздуха, очистки водорода и природного газа.

В [2] изложены результаты работ, выполненных в МХТИ им. Менделеева по осушке воздуха на мелкопористом силикагеле в КЦА-установке. Позднее было установлено, что в результате длительной работы в условиях КЦА после многократно повторяющихся циклов «адсорбция-десорбция» адсорбционные характеристики силикагеля заметно ухудшаются, и он измельчается. В [3] отмечается, что при осушке газовых потоков с помощью силикагеля КСМ пылеобразование в результате малой гидротермальной ста-

бильности может достигать 0,5 масс. % в сутки. В связи с этим в современных установках осушки воздуха, работающих по методу КЦА, применяются только имеющие более высокую гидротермальную стабильность модифицированные силикагели и активная окись алюминия.

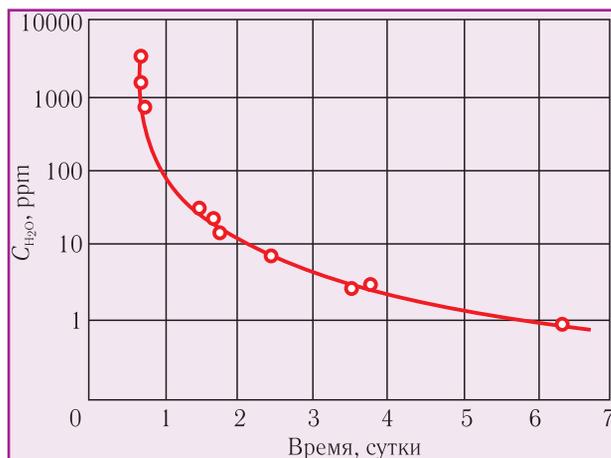
Известно, что КЦА-установки осушки газов начинают выдавать осушенный газ надлежащего качества только через значительное время после их пуска (см. рис. 1).

Целью настоящей работы является изучение и совершенствование системы осушки воздуха в азотных КЦА-установках.

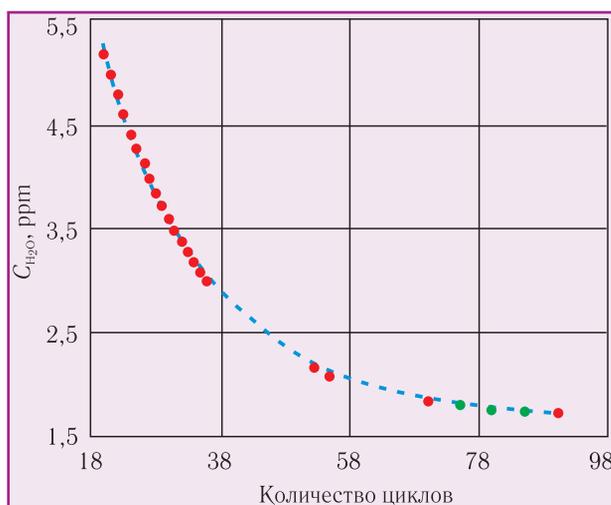
### 2. ОСУШКА ВОЗДУХА НА АКТИВНОЙ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ

В ОАО «Криогенмаш» на специально созданном стенде исследован процесс осушки воздуха на различных адсорбентах в условиях КЦА. Адсорбер, в котором изучался указанный процесс, имел кольцевую

форму (наружный диаметр 0,195 м; внутренний — 0,096 м; высота слоя 1,05 м) с подачей газа в осевом направлении. Объём сорбента в одном адсорбере — 22,6 дм<sup>3</sup>. Опыты проводились при продолжительности полуцикла от 45 до 5 мин и максимальном рабочем давлении 5,2 ати.



**Рис. 1.** Изменение влажности осушенного газа  $C_{H_2O}$  в период выхода на режим КЦА-установки с силикагелем в качестве адсорбента [2]



**Рис. 2.** Равновесное содержание влаги  $C_{H_2O}$  после слоя активной окиси алюминия при продолжительности полуцикла 10 мин: ● — опытные точки; — — аппроксимация; ● — расчётные значения

Установлено, что на активной окиси алюминия в режиме КЦА при продолжительности полуцикла 30-45 мин и относительной доле продувки около 20 % может быть получена глубина осушки на уровне 2 ppm и ниже, но для измерения действительного содержания влаги необходима продолжительная подготовка (продувка) коммуникаций и пробоотборных трубок.

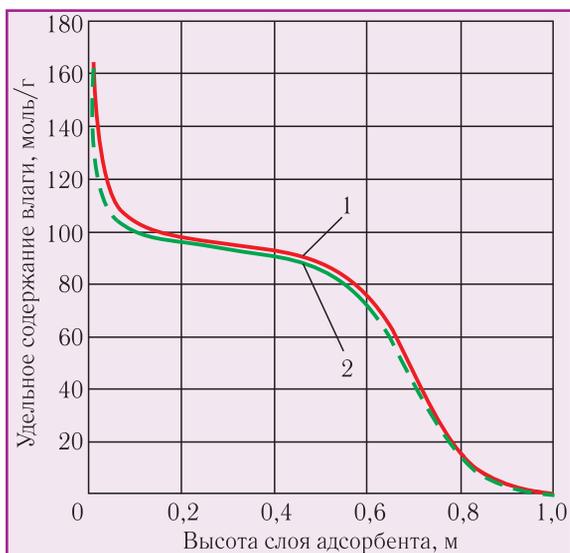
Чистота осушенного газа после адсорберов, соответствующая заданным требованиям, достигалась только после весьма длительной непрерывной работы стенда, что следует из рисунков 2 и 3. Это обуславливалось продолжительным периодом достижения равновесного состояния адсорберов и систем из-

мерения влажности (пробоотборных трубок и влагомера). Этот период составлял несколько десятков циклов работы адсорберов. Однако при включении стенда после перерывов в работе содержание паров воды за слоем оксида алюминия всегда почти на порядок превышало концентрации, достигнутые накануне (см. рис. 3), и было тем выше, чем продолжительнее перерыв.



ное количество влаги, накапливающейся на адсорбенте. Это было выявлено в результате расчётов. Количество «остаточной влаги» (то есть влаги, остающейся на сорбенте после окончания десорбции), как показывают расчёты, может в десятки раз превышать количество влаги, поступающей в адсорбер за полуцикл. Накопление влаги в адсорбере до стационарного уровня происходит при реализации значительного числа циклов адсорбция-десорбция.

Расчётное распределение влаги по слою сорбента в начале и конце стадии «адсорбция» приведено на рис. 4. При этом количество остаточной влаги зависит от доли продувки, определяющей также и чистоту осушенного газа (см. рисунки 5 и 6).



**Рис. 4.** Распределение в слое адсорбента (активная окись алюминия) удельного количества влаги при доле продувки 21 % в конце процессов адсорбции (1) и десорбции (2)

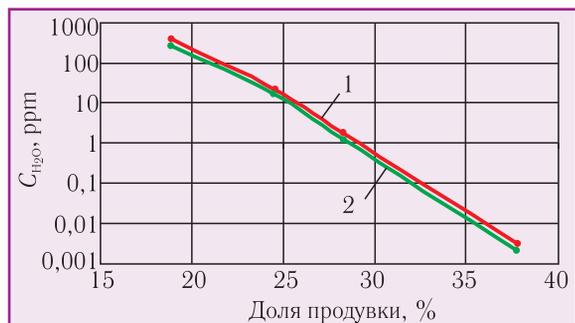


**Рис. 5.** Относительное количество влаги, находящейся на оксиде алюминия, от доли продувки

Остаточная влага находится на сорбенте в состоянии динамического равновесия. Её количество постоянно изменяется в зависимости от расхода продувки, содержания влаги в очищаемом воздухе, его температуры и продолжительности работы в стационарных условиях при этих параметрах.

Такая адсорбционная система очень чувствительна к любым колебаниям расхода очищаемого воздуха,

расхода продувки и температурного режима, которые могут приводить к значительному ухудшению степени осушки воздуха. Поэтому для надёжной глубокой осушки воздуха в промышленных системах необходимо работать с расходами продувки более высокими, чем расчётные, и надёжно исключать возможность заметных изменений температурного режима.



**Рис. 6.** Влияние доли продувки на глубину осушки, ppm: 1 — максимальное содержание влаги; 2 — среднее содержание влаги в осушенном газе

Наблюдаемый в КЦА-осушителях длительный период выхода адсорберов в стационарно-циклический режим работы обусловлен тем, что такой режим достигается только после формирования в адсорбционном слое на стадиях «адсорбция» и «десорбция» соответствующих ему фронтов изменения концентрации влаги по длине слоя в сорбенте и в газе. При этом количество влаги, которое должно накопиться в слое для достижения режима, близкого к стационарно-циклическому, в десятки раз превышает количество влаги, вносимое осушаемым газом за полуцикл работы адсорбера. Продолжительность такого процесса в значительной степени зависит от начальных условий в слое сорбента.

Расчёты показывают, что в других процессах КЦА на адсорбенте в конце стадии «десорбция» также находится относительно большое количество адсорбата (см. таблицу). Это должно заметно влиять на динамические характеристики таких процессов и, в первую очередь, сказываться на периоде времени, необходимом для установления стационарных цикловых показателей после пуска установок или изменения условий их работы, что подтверждают проведённые эксперименты.

Следует обратить внимание на то, что для указанных процессов характерно заметное изменение температуры сорбента на всех стадиях, обусловленное адсорбцией и десорбцией компонентов воздуха. На рис. 7 приведена циклограмма изменения температуры в слое цеолита в адсорбере экспериментального стенда на высоте 0,33 и 0,66 высоты слоя.

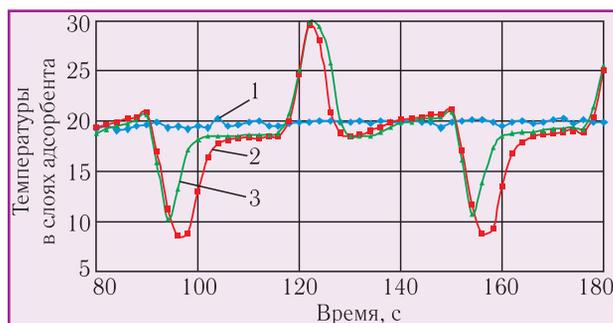
### 3. ОСУШКА ВОЗДУХА НА УГЛЕРОДНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИТАХ

В широко используемых в настоящее время установках получения азота методом КЦА на углеродных молекулярных ситах (УМС) предусматривается обя-

Относительное количество компонентов, остающееся в адсорберах после регенерации в различных процессах КЦА

Процесс	Продолжительность полуцикла, мин	Сорбент	Компонент	Относительное количество компонентов, остающихся на сорбенте после регенерации при работе в условиях КЦА (% от количества компонентов, находящихся на сорбенте в конце стадии «адсорбция»)
Разделение воздуха	1	Цеолит NaX	азот	до 12
			кислород	до 44
	1	УМС	кислород	до 15
			азот	до 78
Осушка воздуха	45	Активная окись алюминия	влага	до 90
Очистка от CO <sub>2</sub>	30	Цеолит NaX	CO <sub>2</sub>	до 70

зательная предварительная двухступенчатая осушка воздуха. Эта осушка выполняется сначала путём охлаждения сжатого воздуха до температуры 3–5 °С, что обеспечивает снижение точки росы до –16––20 °С, и затем дополнительной его осушкой в слое активной окиси алюминия, располагаемом непосредственно в адсорберах установки КЦА перед слоем УМС.



**Рис. 7.** Изменение температуры в слое цеолита NaX при очистке воздуха от CO<sub>2</sub> в режиме КЦА (продолжительность полуцикла 30 мин, относительная доля продувки 56 %), °С: 1 — температура входящего воздуха; 2, 3 — температуры в слоях адсорбента, составляющих 0,33 и 0,66 высоты слоя, соответственно

Основная особенность условий работы такой адсорбционной системы осушки заключается в очень малой продолжительности цикла (всего 1–2 мин) и регенерации сорбента при температурах, близких к температуре адсорбции, путём его продувки достаточно чистым газом.

Экспериментальные и расчётные исследования процесса осушки в адсорберах, заполненных УМС или активной окисью алюминия, показали:

При осушке воздуха в режиме КЦА на УМС с продолжительностью полуцикла 5 мин и одинаковом расходе продувочного газа достигается практически та же глубина осушки, что и на активной окиси алюминия. При этом стационарно-циклическое состояние наступает только после непрерывной работы адсор-

бера в постоянном режиме в течение нескольких десятков циклов.

В слое УМС, как и на активной окиси алюминия, накапливается и постоянно находится достаточно большое количество влаги, во много раз превышающее количество влаги, удаляемой из осушаемого газа в течение цикла работы адсорбера.

В условиях работы адсорберов азотной установки КЦА расчётное соотношение парциальных давлений кислорода и влаги в слое УМС и активной окиси алюминия составляет не менее 500. При таких соотношениях парциальных давлений, исходя из имеющегося опыта, остаточная после слоя активной окиси алюминия влага практически не должна влиять на работу слоя УМС при производстве азота. Этого можно ожидать и в слое УМС, если исключить слой активной окиси алюминия на входе в адсорбер.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что углеродные молекулярные сита в КЦА-установках обеспечивают эффективность осушки воздуха близкую к эффективности его осушки на активной окиси алюминия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Skarstrom C.W. Method and apparatus for fractionating gaseous mixtures by adsorption (US Pat. 2944627, 1960).
2. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. — М.: Химия, 1976. — 510 с.
3. Исследование сушки воздуха новыми композитными сорбентами «соль в пористой матрице»/ Ю.И. Аристов, М.М. Токорев, И.В. Конюг и др.// Современные подходы к исследованию и описанию процессов сушки пористых тел. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. — С. 180–189.
4. Cavenati S., Grande C.A., Rodrigues A.E. Separation of CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mixtures by layered pressure swing adsorption for upgrade of natural gas// Chemical Engineering Science. — 2006. — V. 61. — P. 3893–3906.