

*А.А. Ермаков, Е.И. Акулинин*

## ТЕХНОЛОГИИ КОРОТКОЦИКЛОВОЙ БЕЗНАГРЕВНОЙ АДСОРБЦИИ ПОЛУЧЕНИЯ КИСЛОРОДА ИЗ ВОЗДУХА\*

Основным типом адсорбционных процессов, наиболее широко используемых в промышленности, являются процессы периодического действия, в которых адсорбер с неподвижным слоем адсорбента после окончания стадии очистки или разделения, определяемого исчерпыванием емкости адсорбента, переключается на стадию десорбции [1]. В случае если изотерма адсорбтива на адсорбенте не предельно крута, открывается возможность для проведения стадии регенерации без подвода тепла – только путем снижения давления и (или) продувки газа частью очищенного потока. Этот принцип регенерации положен в основу короткоцикловых безнагревных адсорбционных установок (КБА или по зарубежной терминологии *PSA – pressure swing adsorption*).

Технология короткоцикловой безнагревной адсорбции находит широкое применение в таких процессах, как осушка, получение высокочистых газов, разделение двух- или трехкомпонентных газовых смесей и, в частности, для получения кислорода и азота из воздуха. Так, по утверждению авторов [2], если 10 – 15 лет назад методом КБА получали 5 % мирового производства кислорода, то в 2004 г. уже 20 % и этот показатель продолжает расти.

В качестве основных достоинств установок КБА, обуславливающих их широкое применение для получе-

---

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. С.И. Дворецкого.

ния кислорода, можно указать: низкие энергозатраты; большую гибкость при изменениях диапазона производительности и чистоты кислорода; возможность получение кислорода при низких (безопасных) давлениях; возможность полной автоматизации технологических процессов.

В установках для производства кислорода из воздуха методом КБА используется известный факт, что азот адсорбируется алюмосиликатными молекулярными ситами (цеолитами) существенно больше, чем кислород [3, 4].

Для отделения азота от кислорода воздух сначала сжимают, а затем пропускают через адсорбер, получая на выходе относительно чистый кислород [5]. Регенерацию адсорбента проводят при атмосферном давлении или вакууме. Для напорных схем КБА (*PSA*) производственный газ извлекают при давлении выше атмосферного, а стадия регенерации слоя адсорбента протекает при атмосферном давлении. При вакуумных схемах КБА (*VSA – vacuum swing adsorption*) производственный газ получают при атмосферном давлении, а регенерацию слоя адсорбента проводят при пониженном давлении. В случае смешанных схем, так называемые установки вакуумно-напорной короткоцикловой безнагревной адсорбции (*VPSSA – vacuum pressure swing adsorption*), производственный газ получают при повышенном относительно атмосферного давлении, а регенерация протекает при пониженном относительно атмосферного давлении.

Применение последней схемы позволяет снизить энергозатраты на адсорбционное разделение за счет того, что давление в системе колеблется вблизи атмосферного. Отсутствие больших давлений обуславливает также высокую безопасность данных установок. Поэтому открываются возможности создания малогабаритных установок КБА и применения их в таких отраслях, где раньше это было невозможно. Одной из возможных областей применения таких установок является создание портативных дыхательных аппаратов.

Для портативных установок КБА важнейшим показателем являются энергозатраты установки. Поэтому для таких установок наиболее перспективным является применение многоадсорберных схем *VPSSA* с выравниванием давлений между адсорберами. Применение схем с выравниванием давлений позволяет значительно сократить энергозатраты на основную операцию – подъем давления в адсорбере.

Рассмотрим подробнее схему организации процесса в четырехадсорберной установке *VPSSA* с выравниванием давлений.

Циклограмма работы одного (первого) адсорбера данной установки представлена на рис. 1. Стадии в каждом последующем адсорбере относительно предыдущего смещены на одну четверть. На стадии *a* происходит адсорбция азота при давлении адсорбции и продуцируется кислород. Стадии *b* и *в* – стадии выравнивания давлений между первым и третьим и первым и вторым адсорберами соответственно. Как видно из рис. 1, выравнивание происходит по верху, т.е. чистым сухим потоком. На стадии *г* адсорбер соединяется с вакуум-насосом и происходит десорбция азота и паров воды из адсорбента. На стадии *д* осуществляется промывка частью чистого сухого потока, выходящего из третьего адсорбера, в котором протекает адсорбция. На стадиях *e* и *жс* осуществляется подъем давления в адсорбере путем уравнивания его со вторым и третьим адсорберами. На стадии *з* происходит окончательный подъем давления компрессором до давления адсорбции.

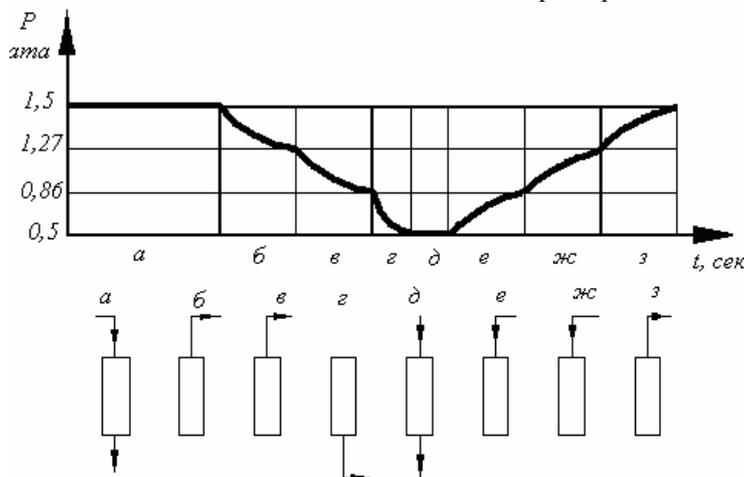


Рис. 1 Циклограмма работы и стадии адсорбции первого адсорбера в четырехадсорберной установке *VPSSA* для концентрирования кислорода

Отметим, что если бы не было стадий выравнивания давлений, давление в адсорбере после промывки пришлось бы повышать с 0,5 до 1,5 ата. В данном случае оно повышается с 1,33 до 1,5 ата, что позволяет значительно сэкономить расход энергии.

Расчет адиабатической мощности, затрачиваемой на подъем давления, можно провести согласно [4] по уравнению (1)

$$P = \frac{W}{t} = P_1 V_1 \left( \frac{k}{1-k} \right) \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] C, \quad (1)$$

где  $P$  – адиабатическая мощность, Вт;  $W$  – адиабатическая работа, Дж;  $t$  – время адсорбционно-десорбционного цикла, с;  $P_1$  – атмосферное давление;  $P_2$  – давление адсорбции или десорбции;  $k$  – константа, для воздуха равна 1,4;  $V_1$  – объемный расход при атмосферном давлении, л/мин;  $C$  – переводной коэффициент, принимается равным 0,114871 Вт/( $psia \cdot$ л/мин)), где 1 ата = 14,4  $psia$  по [4].

Сравнение схем двухадсорберной установки  $PSA$  без выравнивания давлений между адсорберами и описанной установки  $VPSA$  при производительности 2 л/мин по 90 %-ному кислороду со степенью извлечения равной 50 % и давлении адсорбции 5 ата (72  $psia$ ), давлении десорбции 1 ата (14,4  $psia$ ), дает следующие цифры. Адиабатическая мощность двухадсорберной установки  $PSA$  без выравнивания давления составит 74 Вт. В рассмотренной четырехадсорберной установке с двумя операциями выравнивания давления адиабатическая мощность составит 17,4 Вт.

На основании имеющихся литературно-патентных данных [1 – 5] и проведенных расчетов можно утверждать, что современный технический уровень позволяет создать портивную установку концентрации кислорода со следующими характеристиками:

Энергозатраты .....	не более 75 Вт
Масса .....	не более 5...6 кг
Производительность установки .....	2...3 л/мин
Время непрерывной работы до перезарядки аккумулятора .....	4...6 ч
Шумовые характеристики .....	не более 42...45 дБ
Срок службы .....	не менее 3-х лет

Работа выполнена в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002 – 2006 гг., шифр РИ-16.0/ 008/223.

#### Список литературы

- 1 Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники. 2-е изд., перераб. и доп. / Н.В. Кельцев. М. : Химия, 1984. 592 с.
- 2 Kulish, S. Rapid cycle swing adsorption oxygen concentration method and apparatus / S. Kulish, P.S. Robert // United State Patent. 1998. № 5,827,358. Int. Cl. B 01 D 53/047.
- 3 Серпионова, Е.Н. Промышленная адсорбция газов и паров / Е.Н. Серпионова. М. : Высшая школа, 1969. 414 с.
- 4 Appel, W.S. Portable oxygen concentration system and method of using the same / W.S. Appel, D.P. Winter, B.K. Sward, M. Sugano, E. Salter, J.A. Bixby // United State Patent. 2004. № 6,691,702. Int. Cl. B 01 D 128/202.26.
- 5 Акулов, А.К. Моделирование разделения бинарных газовых смесей методом адсорбции с колеблющимся давлением : дис. ... д-ра техн. наук / А.К. Акулов. СПб., 1996. 304 с.