

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ БЛОКА КОМПЛЕКСНОЙ ОСУШКИ И ОЧИСТКИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ АК-1,5

А. В. Зиновьева

Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В статье рассмотрена возможность использования блока комплексной осушки и очистки с раздельной осушкой активной окисью алюминия и очисткой синтетическим цеолитом типа NaX в воздухоразделительной установке АК-1,5, а также представлены несколько схемных решений компоновки блока комплексной очистки. В результате проведенных расчетов была выбрана оптимальная схема. Выбранное техническое решение позволит сократить расход энергии на регенерацию адсорбентов, а за счет оптимальной геометрии адсорберов и минимальной цикличности процессов (адсорбции-регенерации-охлаждения) снизить гидравлическое сопротивление сжатого воздуха.

Ключевые слова: цеолит, активная окись алюминия, адсорбер, блок комплексной очистки, воздухоразделительная установка, оптимизация энергетических затрат, тепловой расчет.

Для цитирования: Зиновьева А. В. Снижение энергопотребления блока комплексной осушки и очистки воздухоразделительной установки АК-1,5 // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 4. С. 39–45. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-39-45. EDN: CJAABY.



© Зиновьева А. В., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

REDUCING ENERGY CONSUMPTION OF THE COMPLEX CLEANING UNIT OF THE AK-1.5 AIR SEPARATION PLANT

A. V. Zinovieva

Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article considers the possibility of using a complex drying and cleaning unit with separate drying with active aluminum oxide and cleaning with synthetic zeolite of the NaX type in the air separation unit AK-1.5, and also considers several circuit solutions for the layout of the complex cleaning unit. As a result of the calculations, the optimal scheme is selected. Such a technical solution will reduce energy consumption for the regeneration of adsorbents, and due to the optimal geometry of the adsorbents and minimal cyclicity of the processes (adsorption-regeneration-cooling) reduce the hydraulic resistance of compressed air.

Keywords: zeolite, active aluminum oxide, adsorber, complex cleaning unit, air separation unit, optimization of energy costs, thermal calculation.

For citation: Zinovieva A. V. Reducing energy consumption of the complex cleaning unit of the AK-1.5 air separation plant. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 4. P. 39–45. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-39-45. EDN: CJAABY.



© Zinovieva A. V., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Газообразные и жидкие продукты разделения воздуха, такие как кислород, азот, аргон, неон, криптон, ксенон, гелий высокой чистоты, широко применяются в различных областях промышленно-

сти, включая химическую. Для получения продуктов разделения воздуха высокой чистоты применяются воздухоразделительные установки криогенного типа высокого, среднего или низкого давления. Большинство таких функционирующих установок

были разработаны в XX в. Современные подходы экономики и производства, такие как повышение энергоэффективности, снижение воздействия на окружающую среду и цифровизация, предъявляют новые требования к технологическому процессу разделения продуктов на указанных воздуходелительных установках и поиску потенциала для повышения их эффективности.

В работах [1–9] описаны возможные способы модернизации воздуходелительных установок среднего давления, такие как оптимизация работы детандера, дополнительная установка источника холода (холодильной машины, дополнительного криогенного циркуляционного контура), повышение надежности компрессора, применение современных систем автоматизации, применение нового цеолитового наноструктурного адсорбента.

Следует отметить, что процесс получения азота и кислорода с помощью криогенных воздуходелительных установок среднего давления связан с существенными затратами, прежде всего энергетическими [1]. Одним из источников потерь холодопроизводительности и затрат электроэнергии в криогенных воздуходелительных установках является блок комплексной осушки и очистки воздуха. Рассмотрим этот блок очистки, входящий в состав криогенной воздуходелительной установки среднего давления АК-1,5, на возможность модернизации, которая приведет к снижению энергопотребления. Получаемые на установке азот и кислород, используются предприятием АО «Омский каучук» для собственных нужд. В данной установке применен блок комплексной осушки и очистки на основе синтетического цеолита типа NaX с нагревной регенерацией. В качестве регенерирующего газа используется аргонная фракция в количестве 20 % от перерабатываемого воздуха, являющаяся отбросным потоком для установки. Температура газа на входе при регенерации достигает 350–400 °С. Завершение процесса регенерации производится при достижении температуры регенерирующего газа на выходе 180–200 °С.

Постановка задачи

При определении наиболее потенциального способа модернизации блока комплексной осушки и очистки руководствовались тем, чтобы сократить энергопотребление без изменений режимов установки АК-1,5.

В работе [10] рассмотрены различные схемы комплексной и раздельной осушки и очистки с помощью синтетического цеолита типа NaX и активной окиси алюминия. Синтетический цеолит NaX используется для осушки поступающего в установку воздуха от присутствующей в потоке воздуха влаги, а активная окись алюминия — для очистки воздуха от двуокиси углерода, ацетилена и других углеводородов.

Также проанализированы параметры процессов очистки (адсорбции, регенерации и охлаждения) при различной длительности во времени и различном давлении регенерации. Отмечено, что расходы энергии на подогрев регенерирующего газа сокращаются в 2,7 раза за счет увеличения продолжительности цикла от 8 до 24 ч. и разделения процессов осушки от влаги и очистки от углекислого газа. В данном случае снижается температура регенерации участвующего в очистке цеолита. При использовании схемного решения с применением теплоты сжатия в компрессорной ступени детандер-ком-

прессорного агрегата воздуходелительной установки, установленной на потоке регенерирующего газа, и осушки с помощью активной окиси алюминия энергосбережения на регенерацию адсорбентов сокращаются на 60–85 %. Отмечено, что отказаться от электронагревателей нельзя, поскольку в описанном схемном решении требуется первичная регенерация адсорбентов при повышенной температуре.

Оценим целесообразность использования двухслойной засыпки шихт адсорбентов с активной окисью алюминия и синтетическим цеолитом NaX для блока очистки воздуходелительной установки среднего давления АК-1,5.

Как описано в работах [11, 12], в блоках комплексной очистки такого типа в составе эксплуатируемых современных зарубежных и отечественных воздуходелительных установок температура регенерирующего газа в штатном режиме на входе снижена до 150–170 °С, а температура окончания регенерации — до 90 °С. В результате существенно уменьшаются затраты на подогрев газа.

На производстве продуктов разделения воздуха применяются варианты компоновки блока комплексной очистки на основе работы двух или трех адсорберов. Хотя работа блока очистки непрерывна, она разбита на циклы, в которых реализуются режимы адсорбции, нагрева адсорбента, десорбции (регенерации), охлаждения адсорбента до рабочей температуры. Данные режимы осуществляются с заданным промежутком времени и поочередным переключением адсорберов. Принцип двухадсорберной схемы работы блока комплексной очистки представлен на рис. 1, трёхадсорберной схемы работы — на рис. 2. На указанных рисунках были приняты следующие условные обозначения: А1–А3 — адсорбер; ВО — влагоотделитель; К1–К24 — клапан запорный с электроприводом; МН1–МН3 — манометр-датчик давления; МР — мембрана разрывная; Т1–Т3 — термометр-терморегулятор; Ф — фильтр; ЭН — электроподогреватель газа.

Первая схема отличается простой системой управления и конструкцией, имеет небольшое значение капиталовложения на модернизацию блока очистки; вторая — малым расходом электроэнергии, затрачиваемым на регенерацию адсорбентов.

Рассмотрим два схемных решения работы блока очистки с двухшихтовой системой адсорбентов и проведем конструктивные, тепловые и энергетические расчеты по исходным данным воздуходелительной установки АК-1,5.

Методика расчета

В отличие от авторов [13] была взята упрощенная методика расчета блоков комплексной очистки, изложенная в [14]. Сначала проводились конструктивные расчеты по определению массогабаритных характеристик адсорбера, а также его трубопроводных коммуникаций и теплоизоляции. Далее проводились тепловые расчеты по определению количества тепла, необходимого для процесса регенерации адсорбента рассматриваемого блока очистки для двух вариантов компоновки (на основе работы двух или трех адсорберов). В итоге определялись удельные затраты энергии.

Теоретическое исследование осуществлялось по следующему алгоритму:

1. Определение массы адсорбентов по формуле

$$m_{oi} = \rho_B \cdot V_B \cdot \tau_{ac} \cdot \frac{C_i}{a_i}, \text{ кг}, \quad (1)$$

где ρ_B, V_B — плотность и объем очищаемого воздуха, приведенные к нормальным условиям; $\tau_{адс.}$ — время защитного действия адсорбента; c_i — концентрация примеси в очищаемом воздухе; a_i — динамическая активность адсорбента по примеси.

2. Вычисление диаметра адсорбера и высоты слоя шихт адсорбентов по формулам:

$$D_{адс.} = \sqrt{\frac{V_B \cdot \rho_{ва}}{v_{адс.}} \cdot \frac{4}{\pi}}, \quad (2)$$

$$H_{адс.} = \sum_i \frac{m_{oi}}{\rho_{oi}} \cdot \frac{4}{\pi D_{адс.}^2}, \quad (3)$$

где $\rho_{ва}$ — плотность воздуха при условии адсорбции; $v_{адс.}$ — скорость фильтрации воздуха при очистке, которая принимается близкой к оптимальной на основе опытных данных; ρ_{oi} — насыпная плотность адсорбента указанного типа.

3. Вычисление толщины адсорбера [15], после чего вычисляются массогабаритные характеристики адсорбера, трубопроводных коммуникаций и теплоизоляции.

4. Определение необходимого количества регенерирующего газа на основе уравнений теплового баланса режимов регенерации и охлаждения.

Уравнения для определения количества регенерирующего газа в режиме регенерации и охлаждения в общем виде имеют следующий вид

$$\Phi = \sum_j Q_{рег_j} \cdot \frac{V_B}{\rho_{ф} \cdot c_{p_{ф}} \cdot \Delta T_{рег} \cdot \tau_{рег}}, \quad (4)$$

$$\Phi = - \sum_j Q_{охл_j} \cdot \frac{V_B}{\rho_{ф} \cdot c_{p_{ф}} \cdot \Delta T_{охл} \cdot \tau_{охл}}, \quad (5)$$

где $Q_{рег_j}$ — составляющие количества тепла, затрачиваемые в процессе регенерации; $Q_{охл_j}$ — составляющие количества тепла, отводимые регенерирующим газом в процессе охлаждения; $\rho_{ф}, c_{p_{ф}}$ — плотность при нормальных условиях и те-

плоемкость регенерирующего газа; $\Delta T_{рег}, \Delta T_{охл}$ — среднее изменение температуры регенерирующего газа (на входе и выходе) в процессе регенерации и охлаждения; $\tau_{рег}, \tau_{охл}$ — продолжительность регенерации и охлаждения.

При этом справедливы следующие дополнительные равенства:

— для схемы работы с двумя адсорберами

$$\tau_{адс} = \tau_{рег} + \tau_{охл} + 2\tau_p + \tau_{п.р.}; \quad (6)$$

— для схемы работы с тремя адсорберами

$$\tau_{адс} = 0,5\tau_{п.р.} + \tau_p + \tau_{рег} = \tau_{охл} + \tau_p + 0,5\tau_{п.р.}; \quad (7)$$

где $\tau_{п.р.}$ — продолжительность параллельной работы; τ_p — время на сброс или подъем давления в адсорбере.

Совместное решение уравнений (4–7) позволяет определить минимальное количество регенерирующего газа.

5. Определение количества тепла, подведенного к блоку комплексной осушки и очистки за период регенерации адсорбента по следующим формулам:

— для схемы работы с двумя адсорберами

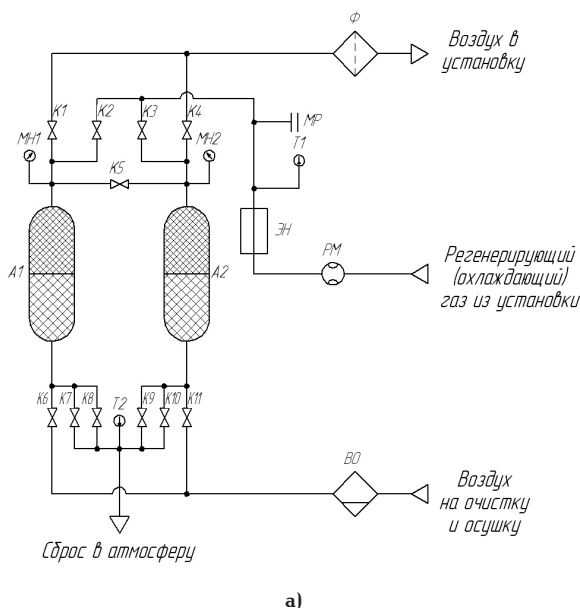
$$Q_{БКО} = \rho_{ф} \cdot c_{p_{ф}} \cdot \Phi \cdot \Delta T_{рег}, \quad (8)$$

— для схемы работы с тремя адсорберами

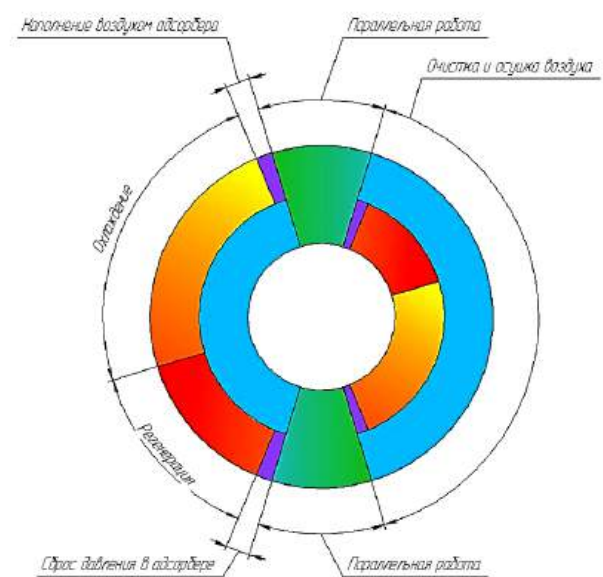
$$Q_{БКО} = \rho_{ф} \cdot c_{p_{ф}} \cdot \Phi \cdot \Delta T_{рег} - \frac{\sum_j Q_{охл_j}}{\tau_{рег} \cdot V_B}, \quad (9)$$

где $\frac{\sum_j Q_{охл_j}}{\tau_{рег} \cdot V_B}$ — составляющая рекуперированного тепла при последовательном прохождении регенерирующим газом охлаждаемого и регенерируемого адсорберов.

6. Вычисление удельных затрат энергии на регенерацию адсорбента в блоке комплексной осушки и очистки по формуле



а)



б)

Рис. 1. Схема работы блока комплексной осушки и очистки с двумя адсорберами:
а — принципиальная схема; б — циклограмма работы
Fig. 1. Operation diagram of the complex drying and cleaning unit with two adsorbers:
а — schematic diagram; б — work cycle diagram

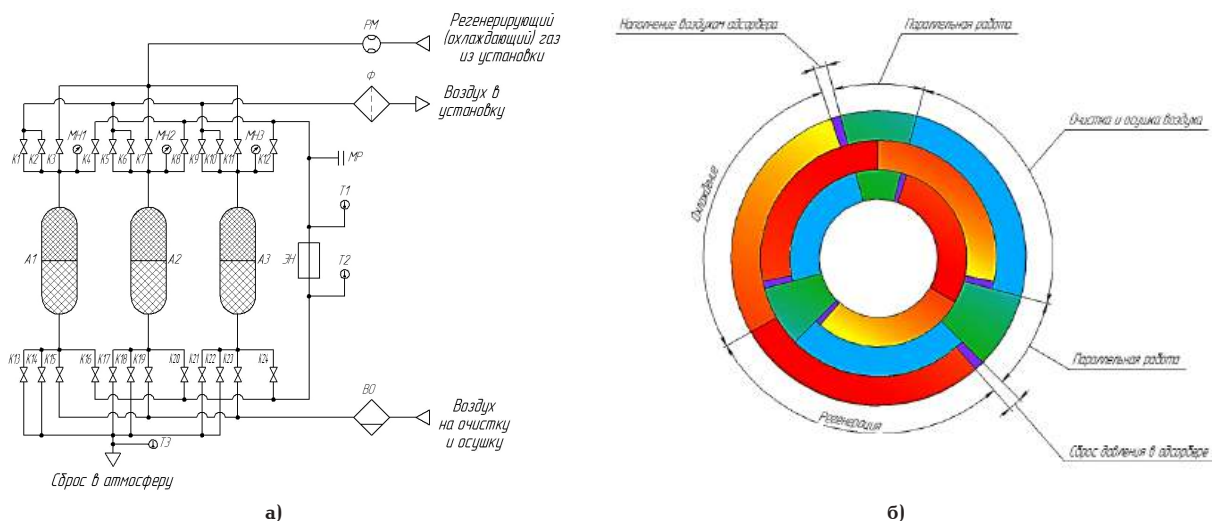


Рис. 2. Схема работы блока комплексной осушки и очистки с тремя адсорберами:
а — принципиальная схема; б — циклограмма работы
Fig. 2. Operation diagram of the complex drying and cleaning with three adsorbers:
а — schematic diagram; б — work cycle diagram

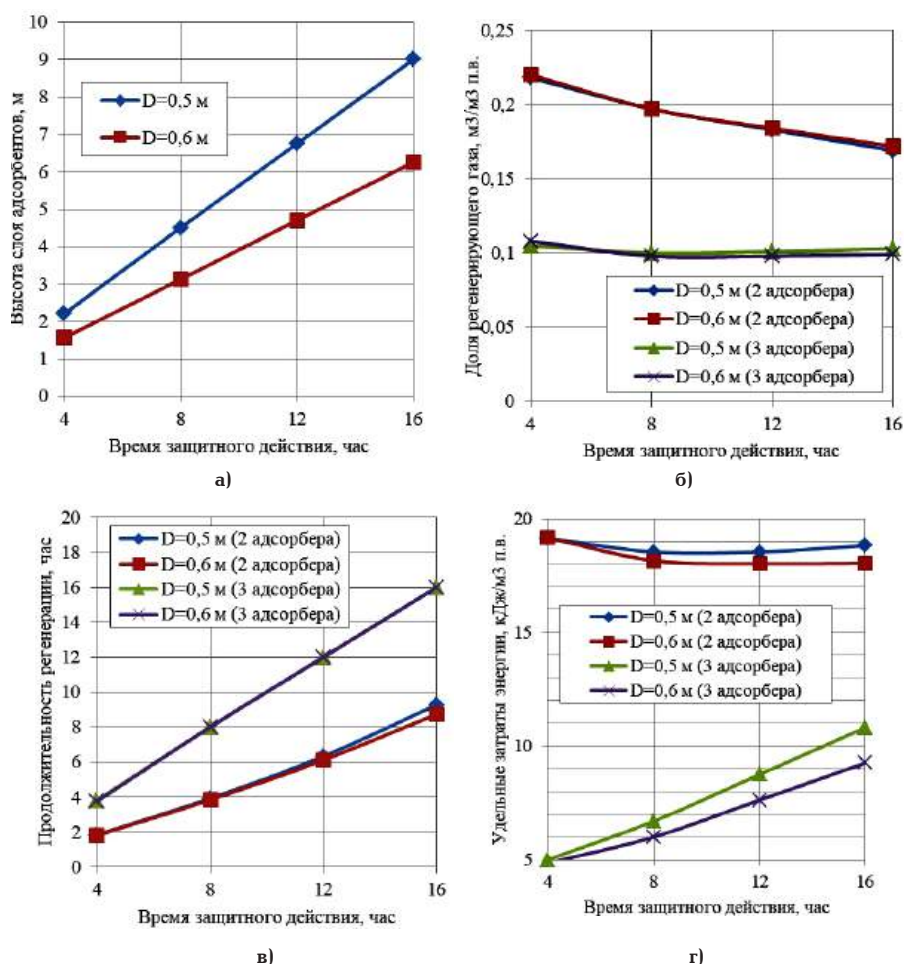


Рис. 3. Результаты расчетов блока комплексной осушки и очистки для различных вариантов компоновки блока комплексной очистки:
а — зависимость высоты слоя адсорбента от времени защитного действия адсорбента;
б — зависимость доли регенерирующего газа от времени защитного действия адсорбента; в — зависимость продолжительности регенерации от времени защитного действия адсорбента; г — зависимость удельных затрат энергии от времени защитного действия адсорбента

Fig. 3. Results of calculations of the complex cleaning and drying unit for various options of the complex cleaning unit:
а — dependence of the height of the adsorbent layer on the time of the protective action of the adsorbent; б — dependence of the proportion of regenerating gas on the time of protective action of the adsorbent; в — dependence of the duration of regeneration on the time of protective action of the adsorbent; г — dependence of specific energy consumption on the time of protective action of the adsorbent

$$I_{\text{БКО}} = \frac{q_{\text{БКО}}}{3600} \cdot \frac{\tau_{\text{рег}}}{\tau_{\text{адс}}} . \quad (10)$$

Результаты и обсуждение

В результате теоретических расчетов по приведенному выше алгоритму были получены зависимости для двух вариантов компоновки блока очистки по двухадсорберной и трёхадсорберной схемам работы на диаметры (0,5 и 0,6 м): высота слоя адсорбента от времени защитного действия адсорбента; доля регенерирующего газа от времени защитного действия адсорбента; продолжительность регенерации от времени защитного действия адсорбента; удельные затраты энергии от времени защитного действия адсорбента (рис. 3).

Было принято время защитного действия адсорбента в диапазоне от 4 до 24 ч. и кратное четырем часам для учета сменной работы операторов.

Из рис. 3а видно, что высота слоя адсорбента зависит от диаметра самого адсорбера и от времени защитного действия адсорбента. Высота слоя адсорбента в адсорбере блока очистки установки АК-1,5 для диаметра адсорбера 0,5 м примерно в 1,4 раза выше, чем для диаметра адсорбера 0,6 м. Диаметры адсорберов были определены с учётом условия допустимых скоростей фильтрации потока воздуха, поступающего на осушку и очистку. Высота слоя адсорбента увеличивается в 1,3–2 раза при условии увеличения времени работы адсорбера до переключения на режим регенерации.

При определении доли регенерирующего газа для схем работы блока очистки установки АК-1,5 с двумя и тремя адсорберами результаты показали, что для трёхадсорберной схемы работы блока понадобится значительно меньшее количества газа, идущего на регенерацию адсорбента, по сравнению с двухадсорберной схемой работы блока (рис. 3б) — в 1,73–2 раза.

В данном случае для сохранения режима эксплуатации воздухоразделительной установки среднего давления АК-1,5 для двухадсорберной схемы работы блока потребуется поддерживать время защитного действия адсорбера на уровне 8 ч. или более, а для трёхадсорберной схемы работы блока — 4 ч. или более (см. рис. 3б). В обоих случаях это возможно за счет увеличения продолжительности регенерации (рис. 3в) [16].

Расчеты на рис. 3в показали, что для двухадсорберной схемы работы блока время регенерации будет меньше времени защитного действия адсорбента в 1,8–2,2 раза, а для случая трёхадсорберной схемы работы они будут равны.

Расчеты удельного расхода энергии, затрачиваемого на регенерацию адсорбента в блоке комплексной очистки и осушки, для схем работы блока очистки с двумя и тремя адсорберами показали, что удельный расход энергии для трёхадсорберной схемы работы блока меньше, чем для двухадсорберной схемы работы блока (рис. 3г). Это может быть объяснено тем, что в трёхадсорберной схеме работы блока тепло, направляемое от охлаждаемого адсорбера, может быть применено частично для нагрева регенерирующего газа. Благодаря чему удельный расход энергии, который затрачивается на проведение регенерации, меньше по сравнению со схемой работы с двумя адсорберами.

При определении, какая схема подключения адсорберов в блоке комплексной очистки и осушки предпочтительней, помимо удельных затрат энер-

гии необходимо учитывать гидравлическое сопротивление таких схемных решений. Так, например, блок комплексной очистки и осушки, построенный по трёхадсорберной схеме работы, имеет гидравлическое сопротивление, более чем в два раза большее по сравнению с двухадсорберной схемой работы. Кроме того, указанная схема значительно сложнее в управлении и конструктивно по сравнению с двухадсорберной схемой работы, поэтому при создании блока по трёхадсорберной схеме работы целесообразно предусматривать полную автоматизацию процесса переключения адсорберов и поддержания технологических параметров процессов адсорбции, регенерации, охлаждения. В совокупности все это приводит к увеличению капиталовложений в модернизацию блока.

Выводы и заключение

В работе блок очистки с раздельной осушкой активной окисью алюминия и очисткой синтетическим цеолитом NaX был предложен для воздухоразделительной установки среднего давления АК-1,5. В исследовании были рассмотрены варианты по двухадсорберной и трёхадсорберной схеме работы блока. Проведенные расчеты показали, что удельный расход энергии, приходящийся на электроподогреватель для трёхадсорберной схемы работы блока, меньше в 1,67–4,26 раза по сравнению с удельным расходом энергии для двухадсорберной схемы работы [17].

Список источников / References

1. Лавренченко Г. К., Плесной А. В. Снижение удельного энергопотребления воздухоразделительных установок среднего давления и малой тоннажности // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2013. № 8. С. 29–34. EDN: REDBOZ.
2. Lavrenchenko G. K., Plesnoy A. V. Snizheniye udel'nogo energopotrebleniya vozdukhorazdelitel'nykh ustanovok srednego davleniya i maloy tonnazhnosti [Reducing specific energy consumption of medium -pressure and small-tonnage air separation plants]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013. No. 8. P. 29–34. EDN: REDBOZ. (In Russ.).
3. Бумагин Г. И., Сорокин В. Н., Рогольский Е. И. Модернизация воздухоразделительных установок среднего давления типа К-0,4, АК-1,5 и др. // Омский научный вестник. 2008. № 3 (70). С. 91–95. EDN: TLTSFR.
4. Bumagin G. I., Sorokin V. N., Rogal'skiy E. I. Modernizatsiya vozdukhorazdelitel'nykh ustanovok srednego davleniya tipa K-0,4, AK-1,5 i dr. [Modernization of air-separation units of average pressure K-0.4, AK-1.5, etc.]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2008. No. 3 (70). P. 91–95. EDN: TLTSFR. (In Russ.).
5. Castle W. F. Air separation and liquefaction: recent developments and prospects for the beginning of the new millennium. *International Journal of Refrigeration*. 2002. Vol. 25, no. 1. P. 158–172. DOI: 10.1016/S0140-7007(01)00003-2.
6. Zhu Y., Legg S., Laird C. D. Optimal design of cryogenic air separation columns under uncertainty. *Computers Chemical Engineering*. 2010. Vol. 34, no. 9. P. 1377–1384. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2010.02.007.
7. Zhu Y., Legg S., Laird C. D. Optimal operation of cryogenic air separation systems with demand uncertainty and contractual obligations. *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 66. P. 953–963. DOI: 10.1016/j.ces.2010.11.039.
8. Аллаяров У. Э., Макулов Р. Р., Абдрахманов Н. Х. [и др.]. Повышение надежности компрессорного оборудования установки воздухоразделения // Электронный научный жур-

нал Нефтегазовое дело. 2021. № 5. С. 19–33. DOI: 10.17122/ogbus-2021-5-19-33. EDN: YVDBEQ.

Allayarov U. E., Makulov R. R., Abdrakhmanov N. Kh. [et al.]. Povysheniye nadezhnosti kompressornogo oborudovaniya ustanovki vozdukhorazdeleniya [Improving the reliability of compressor equipment for air separation units]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftgazovoye delo. Oil and Gas Business*. 2021. No. 5. P. 19–33. DOI: 10.17122/ogbus-2021-5-19-33. EDN: YVDBEQ. (In Russ.).

7. Навасардян Е. С., Мохов К. В. Тенденция развития современных систем автоматического регулирования технологических процессов воздухоразделительных установок. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2017. № 3 (63). С. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-3-1597. EDN: YHEUOZ.

Navasardyan E. S., Mokhov K. V. Tendentsiya razvitiya sovremennykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya tekhnologicheskikh protsessov vozdukhorazdelitel'nykh ustanovok [Trends in developing modern automated control systems of technological process in air separation units]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. Engineering Journal: Science and Innovation*. 2017. No. 3 (63). P. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-3-1597. EDN: YHEUOZ. (In Russ.).

8. Матюх А. С., Демчук В. О., Баскаков И. В. Разработка проекта системы автоматического управления рабочими процессами в блоке комплексной очистки и осушки транспортёрной ВРУ // Проблемы совершенствования машин, оборудования и технологий в агропромышленном комплексе: материалы междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2019. С. 262–265. EDN: XVIRVG.

Matyukh A. S., Demchuk V. O., Baskakov I. V. Razrabotka proyekta sistemy avtomaticheskogo upravleniya rabochimi protsessami v bloke kompleksnoy oчитки i osushki transportabel'noy VRU [Problems with improving machines, equipment, and technologies in the agro-industrial complex]. *Problemy Sovershenstvovaniya Mashin, Oborudovaniya i Tekhnologiy v Agropromyshlennom Komplekse*. Voronezh, 2019. P. 262–265. EDN: XVIRVG. (In Russ.).

9. Фастов И. С., Фастов С. А. Высокоэффективный цеолитный наноструктурированный адсорбент для осушки воздуха в криогенных ВРУ // Технические газы. 2013. № 1 (2013). С. 69–72. EDN: RPXUTZ.

Fastov I. S., Fastov S. A. Vysokoeffektivnyy tseolitnyy nanostrukturirovanny adsorbent dlya osushki vozdukh v kriogennykh VRU [High zeolitic nanostructured an adsorbent for air dryer in cryogenic ASU]. *Tekhnicheskiye Gazy*. 2013. No. 1 (2013). P. 69–72. EDN: RPXUTZ. (In Russ.).

10. Лавренченко Г. К., Копытин А. В., Швеи С. Г. Оптимизация узла осушки и очистки воздуха воздухоразделительной установки высокого давления с целью снижения энергопотребления // Технические газы. 2006. № 1. С. 28–33. EDN: SBDQLF.

Lavrenchenko G. K., Kopytin A. V., Shvets S. G. Optimizatsiya uzla osushki i oчитки vozdukh v vozdukhorazdelitel'noy ustanovki vysokogo davleniya s tsel'yu snizheniya energopotrebleniya [Manufactures of air separation products: analysis of condition and prospects of perfection]. *Tekhnicheskiye Gazy*. 2006. No. 1. P. 28–33. EDN: SBDQLF. (In Russ.).

11. Rege S. U., Yang R. T., Buzanowski M. A. Sorbents for air prepurification in air separation. *Chemical Engineering Science*. 2000. Vol. 55, no. 21. P. 4827–4838. DOI: 10.1016/S0009-2509(00)00122-6.

12. Орешкин А. Н., Борзенко Н. А., Липа В. И. [и др.]. Автоматическое обеспечение энергосберегающих режимов работы блоков комплексной очистки воздуха воздухоразделительных установок. *Технические газы*. 2015. № 6. С. 71–77. EDN: VBRLJN.

Oreshkin A. N., Borzenko N. A., Lipa V. I. [et al.]. Avtomaticheskoye obespecheniye energosberegayushchikh rezhimov raboty blokov kompleksnoy oчитки vozdukh v

vozdukhorazdelitel'nykh ustanovok [System of automatic implementation of energy saving modes of integrated treatment units operation in air-separation plants]. *Tekhnicheskiye Gazy*. 2015. No. 6. P. 71–77. EDN: VBRLJN. (In Russ.).

13. Горенштейн И. В., Копытин А. В., Власюк В. А., Лавренченко Г. К. Методика расчёта блоков комплексной очистки и осушки воздуха воздухоразделительных установок // Технические газы. 2003. № 2. С. 39–44. EDN: SIJKVN.

Gorenshteyn I. V., Kopytin A. V., Vlasjuk V. A., Lavrenchenko G. K. Metodika rascheta blokov kompleksnoy oчитки i osushki vozdukh v vozdukhorazdelitel'nykh ustanovok [Method for calculating complex cleaning and air dehumidification units of air separation plants]. *Tekhnicheskiye Gazy*. 2003. No. 2. P. 39–44. EDN: SIJKVN. (In Russ.).

14. Головки Г. А. Криогенное производство инертных газов. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение, 1983. 416 с.

Golovko G. A. Kriogennoye proizvodstvo inertnykh gazov [Cryogenic production of inert gases]. 2nd ed., revised and completed. Leningrad, 1983. 416 p. (In Russ.).

15. ГОСТ 34233.2–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. Введ. 01–08–2018. Москва: Стандартинформ, 2018. 53 с.

GOST 34233.2–2017. Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Raschet tsilindricheskikh i konicheskikh obechayek, vypuklykh i ploskikh dnishch i kryshek [Vessels and apparatuses. Standards and methods for strength calculation. Calculation of cylindrical and conical shells, convex and flat bottoms and covers]. Moscow, 2018. 53 p. (In Russ.).

16. Зиновьева А. В., Котова Н. В., Лоджанская В. О. Модернизация блока комплексной очистки воздухоразделительной установки АК-1,5 // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. С. 70–71. EDN: XEKNJL.

Zinov'yeva A. V., Kotova N. V., Lodzhanskaya V. O. Modernizatsiya bloka kompleksnoy oчитки vozdukhorazdelitel'noy ustanovki AK-1,5 [Modernization of the AK-1.5 air separation unit]. *Tekhnika i Tekhnologiya Neftekhimicheskogo i Neftgazovogo Proizvodstva*. Omsk, 2016. P. 70–71. EDN: XEKNJL. (In Russ.).

17. Зиновьева А. В. К вопросу модернизации блока комплексной очистки воздухоразделительной установки АК-1,5 // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. Омск: Омский государственный технический университет, 2025. С. 72–73. EDN: IWQTRX.

Zinov'yeva A. V. K voprosu modernizatsii bloka kompleksnoy oчитки vozdukhorazdelitel'noy ustanovki AK-1,5 [To the problem of the modernization of the AK-1.5 air separation unit]. *Tekhnika i Tekhnologiya Neftekhimicheskogo i Neftgazovogo Proizvodstva*. Omsk, 2025. P. 72–73. EDN: IWQTRX. (In Russ.).

ЗИНОВЬЕВА Анастасия Владимировна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 6823-1344

AuthorID (РИНЦ): 176944

Адрес для переписки: zav55tok@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 12.08.2025; одобрена после рецензирования 13.10.2025; принята к публикации 24.10.2025.

ZINOVIEVA Anastasia Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 6823-1344

AuthorID (RSCI): 176944

Correspondence address: zav55tok@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 12.08.2025; approved after reviewing 13.10.2025; accepted for publication 24.10.2025.