

Ссылка на статью

// Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация.

МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Электрон. журн. 2017. № 03. С. 46–54.

DOI: [10.7463/aplts.0317.0000062](https://doi.org/10.7463/aplts.0317.0000062)

Представлена в редакцию: 04.05.2017

Исправлена: 18.05.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 629.78.08

## Метод и программа расчета процессов тепло- и массопереноса при адсорбционном осушении сжатого воздуха

Козлов В.В.<sup>1</sup>, Шадрин В.С.<sup>1,\*</sup>,  
Рахманов М.А.<sup>1</sup>

\* [y\\_miler15@mail.ru](mailto:y_miler15@mail.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Предложена динамическая математическая модель процессов тепло и массопереноса при адсорбционном осушении сжатого воздуха. Представлены результаты численного моделирования процессов и расчета динамики температурного поля адсорбционной колонны с учетом теплоты сорбции.

**Ключевые слова:** адсорбционное осушение; математическая модель; сжатый воздух

---

Вопросы осушения воздуха в процессе его компримирования является актуальной технологической задачей для современной компрессорной техники.

Известны два основных способа осушения воздуха: конденсационный и адсорбционный. На базе этих способов разрабатываются и находят широкое применение различные аппараты – осушители сжатого воздуха.

Настоящая статья посвящается вопросам проектирования адсорбционных осушителей в части моделирования процессов и разработки метода расчета динамики сорбции и регенерации адсорбента.

Большинство известных методов расчета адсорбционных аппаратов построено на использовании эмпирических зависимостей кинетики адсорбции [1,3,5], которые позволяют укрупненно рассчитать массу адсорбента, время защитного действия по заданной нагрузке осушения и, кроме того, расход потока для регенерации адсорбента.

С развитием техники осушения сжатого воздуха на этапе проектирования все чаще возникает задача численного моделирования динамических процессов сорбции-регенерации.

Динамическая задача, по мнению таких авторитетных авторов как Кельцев, Ветошкин, Шумяцкий, Матвейкин, Дубинин и др. [1,2,4,8,11] не имеет аналитического решения и может быть решена только с помощью численных методов.

Основой настоящей работы является разработанный численный метод и программа расчета динамики тепло- и массопереноса при адсорбционном осушении сжатого воздуха.

За основу принимается упрощенная физическая модель кинетики сорбции, которая предполагает, что внутри гранулы адсорбента в любой момент времени имеет место полное выравнивание таких параметров, как температура и содержание влаги, т.е. параметры теплопроводности и диффузии внутри гранул адсорбента несравнимо выше аналогичных параметров на поверхности гранул. Известно, что уравнение аддитивных сопротивлений влагопереносу из потока осушаемого воздуха внутрь гранулы адсорбента имеет две составляющие [11]:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\beta_{\text{внеш}}} + \frac{1}{\beta_{\text{внутр}}} \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент массопередачи;

$\beta_{\text{внутр}}$  - кажущийся внутренний коэффициент массоотдачи;

$\beta_{\text{внеш}}$  - коэффициент массоотдачи из потока к поверхности адсорбента.

Таким образом, если принять допущение физической модели, то  $\beta_{\text{внутр}} = \infty$ , а  $K = \beta_{\text{внеш}}$ .

Следующее допущение: справедливость полной аналогии процессов тепло- и массопереноса из потока осушаемого воздуха к поверхности адсорбента. Такое допущение позволяет отдельно рассматривать теплоперенос и влагоперенос к поверхности адсорбента, используя при этом известное соотношение Льюиса для связи между коэффициентами теплоотдачи и влагоотдачи из потока осушаемого воздуха к поверхности адсорбента [5, 6, 10]

$$Le = \frac{\alpha}{\beta} c_p$$

При полной аналогии процессов критерий  $Le$  можно принять равным 1:

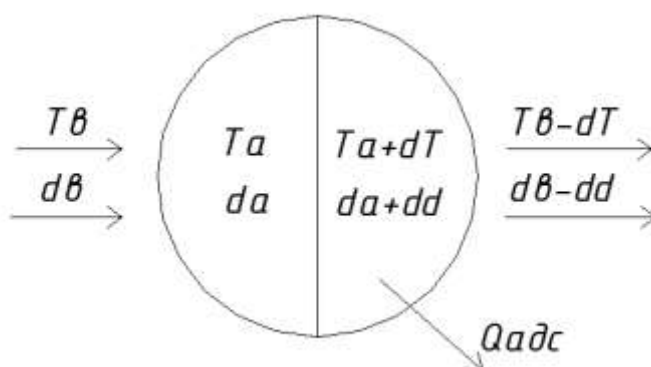


Рис. 1. Физическая модель кинетики адсорбции на границе гранулы.

Рассмотрим удельный поток влаги из потока воздуха к поверхности адсорбента (см.рис.1)

$$m = \beta_{\text{внеш}}(d_{\text{в}} - d_a)f_a \quad (2)$$

где  $d_B$  - влагосодержание потока воздуха;

$d_a$  - равновесное влагосодержание воздуха в пограничном слое у поверхности гранул сорбента;

$f_a$  – площадь гранулы адсорбента.

Удельный тепловой поток воздуха к поверхности адсорбента:

$$q = \alpha(t_B - t_a)f_a \quad (3)$$

Описание кинетики сорбции завершает уравнение изотерм [12] сорбции для влажного воздуха для выбранного сорбента:

$$a = f(t_a, d_a) \quad (4)$$

Численный метод и программа расчета динамики сорбции в колонне осушителя основываются на системе дифференциальных уравнений первого порядка для одномерного неизотермического течения осушаемого воздуха в колонне послойно вдоль оси X (см. рис.2).

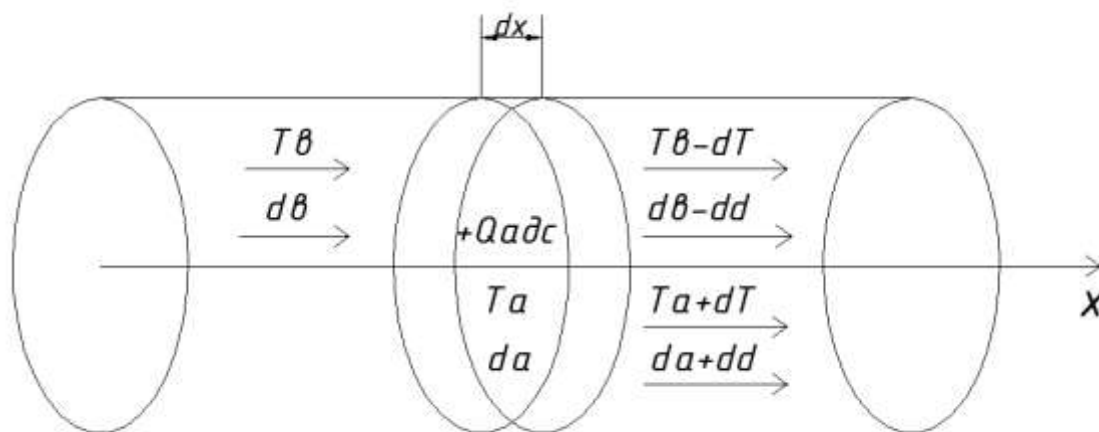


Рис. 2. Физическая модель динамики адсорбции в адсорбционной колонне.

Для каждого слоя адсорбента толщиной  $dx$  принимаются следующие допущения:

1. Все свойства сорбента равномерно распределены по всему слою  $dx$ ;
2. Параметры температуры  $t_a$  и влажности  $d_a$  одинаковы в пределах слоя в каждый момент времени  $\tau$ .
3. Скорость воздушного потока неизменна вдоль всей колонны по оси X.

Таким образом, уравнение переноса влаги:

$$G_B \frac{dd_B}{dx} = \beta(d_B - d_a)f_{пр} \quad (6)$$

$$\rho_{нас} * \frac{dd_a}{d\tau} = \beta * (d_B - d_a)f_{пр} \quad (7)$$

Уравнения сохранения энергии:

$$c_p G_B \frac{dt_B}{dx} = \alpha(t_B - t_a)f_{пр} \quad (8)$$

$$\frac{dt_a}{d\tau} = \frac{\alpha*(t_B - t_a)f_{пр} + k*dd_a}{S_{sl}*(C_{адс}* \rho_{нас} + C_B*m_B)} \quad (9)$$

где  $G_B$  - массовый расход воздуха;  $m_B$  - поток влаги к адсорбенту;  $C_p$  - удельная теплоемкость воздуха;  $C_{адс}$  - удельная теплоемкости адсорбента;  $C_B$  - удельная теплоемкость воды;  $\rho_{нас}$  - насыпная плотность адсорбента;  $k$  - удельная теплота адсорбции.

$f_{пр}$  - приведенная к X условная площадь гранул слоя.

На рисунке 3 представлена блок-схема программы расчета циклов адсорбции и регенерации адсорбента.

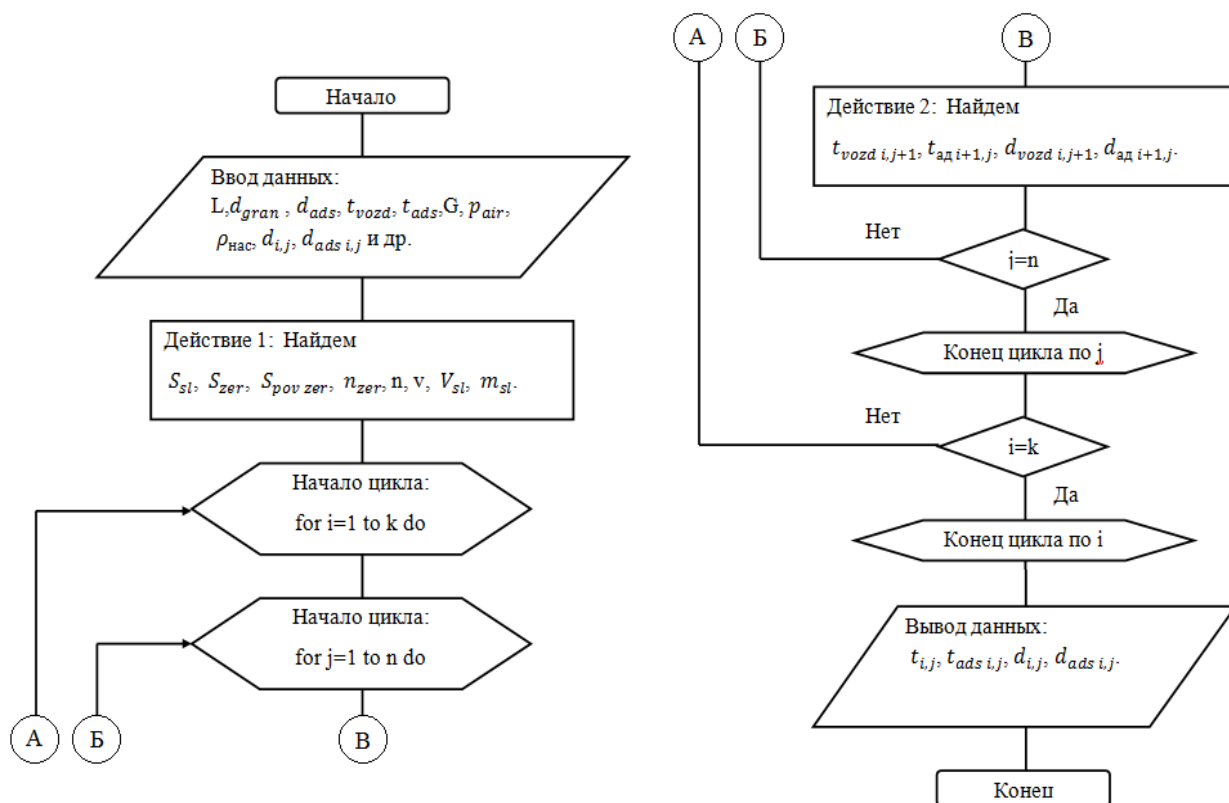
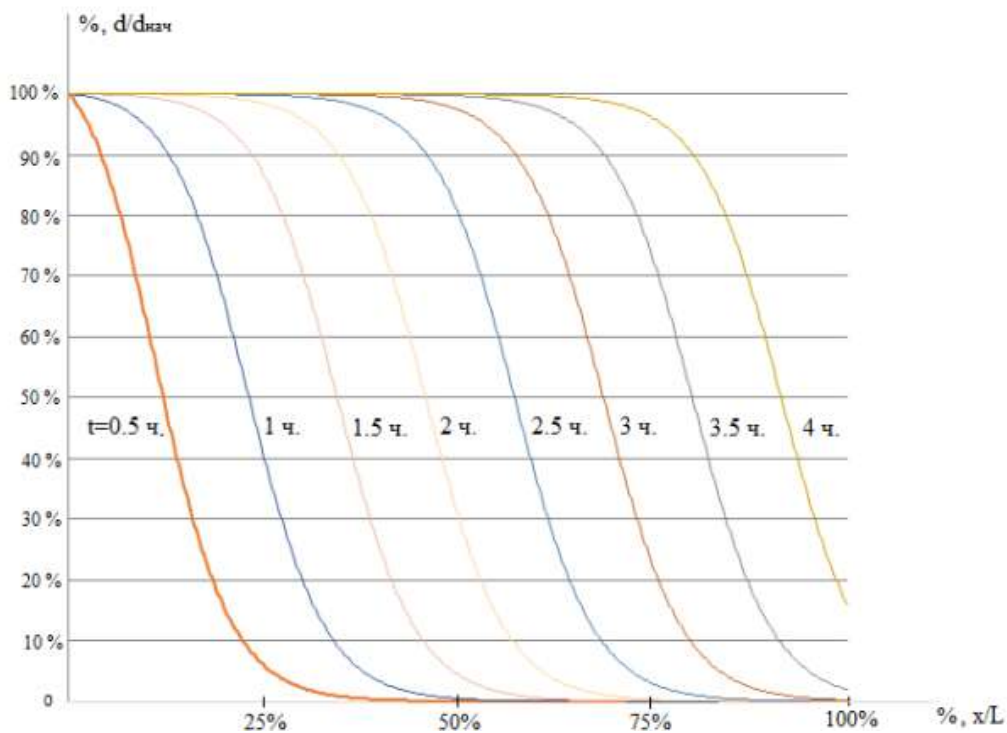


Рис. 3. Блок-схема программы расчета циклов адсорбции и регенерации адсорбента.

Для решения системы уравнений (5)–(6) была разработана компьютерная программа. Алгоритм основан на численном решении с помощью ядра программы Delfi [12].

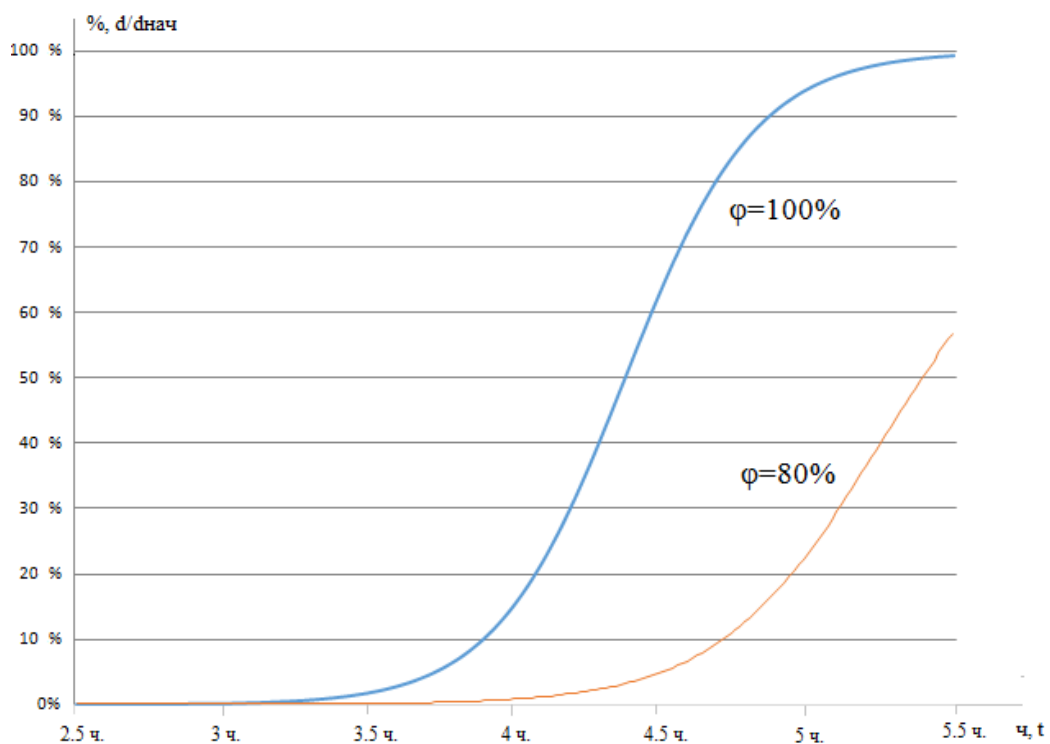
Пользователю необходимо ввести следующие исходные данные (начальные и граничные условия): расход воздуха, влажность (начальная концентрация паров воды), высоту слоя адсорбента, диаметр колонны, насыпную плотность адсорбента, порозность слоя адсорбента, средний диаметр частиц сорбента, начальную температуру адсорбента, давление воздуха.

После завершения расчета программа выдает таблицы значений изменений температуры воздуха и адсорбента по длине рассматриваемого объекта (адсорбера), а также изменение влагосодержания воздуха и адсорбента. Данные значения можно представить в виде графических зависимостей влагосодержания воздуха вдоль координаты X во времени, т.е. в виде движущегося вдоль X во времени фронта влагосодержания воздуха (Рис.4).



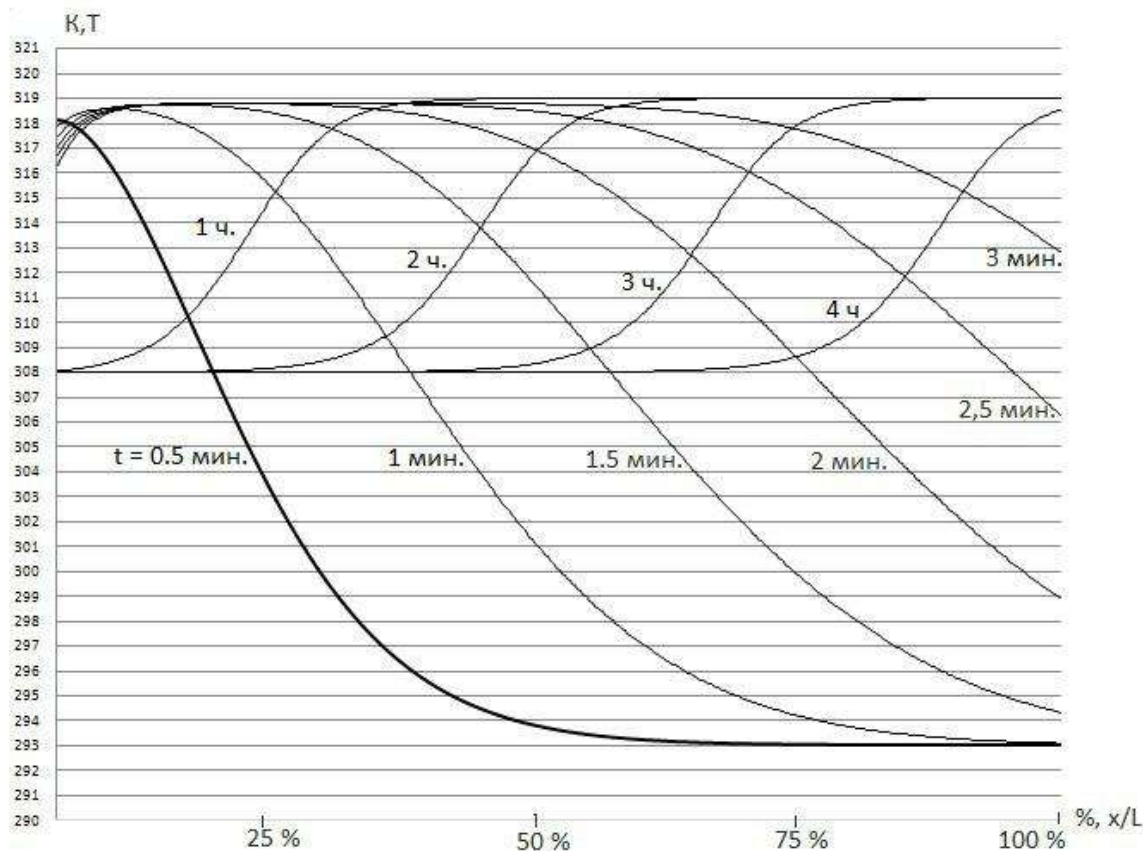
**Рис.4** Изменение влагосодержания воздуха по длине адсорбера в течение цикла работы адсорбера.

Выходная характеристика адсорбера, представляющая из себя изменение влагосодержания воздуха на выходе при неизменных во времени входных параметрах температуры и влажности в течение цикла адсорбции, изображена на рис.5.



**Рис.5** Изменение влагосодержания воздуха на выходе из осушителя за период цикла адсорбции.

Практическое значение на стадии проектирования для расчета полного цикла "сорбция - десорбция - охлаждение - поднятие давления" представляет возможность расчета динамики температурных полей адсорбционной колонны. Разработанная программа позволяет послойно рассчитывать изменение температуры адсорбента во времени. Пример расчета температурного поля изменяющегося послойно во времени представлен на рисунке 6.



**Рис.6** Изменение температуры адсорбента по длине адсорбера во времени.

Сопоставление полученных результатов с данными многих теоретических работ, посвященных исследованиям динамики процессов, дает качественную корреляцию разработанной численной и теоретических моделей, что косвенно подтверждает адекватность выполненного моделирования [1,4,5,11].

### Выводы

На основе термодинамического подхода разработаны физическая и математическая модели адсорбции для расчета динамических неизотермических процессов в аппаратах адсорбционного осушения. Представленные результаты расчетов подтверждают возможность проводить анализ динамики процессов тепло и массопереноса в колонне осушителя в режиме адсорбции влаги при различных начальных и граничных условиях, в том числе и изменяющихся в рамках цикла работы осушителя.

## Список литературы

1. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. 2-е изд. М.: Химия, 1984. 591 с.
2. Серпионова Е.Н. Промышленная адсорбция газов и паров: учебное пособие. [2-е изд.]. М.: Высш. школа, 1969. 414 с.
3. Мозговой С.В. Исследование процессов тепло- и массообмена при очистке газовых смесей в адсорбционных установках: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2001. 133 с.
4. Матвейкин В.Г., Путин С.Б., Скворцов С.А., Толстошеин С.С. Математическое моделирование процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа в системе жизнеобеспечения условно-замкнутого объема // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. 2011. № 3(34). С. 64-71.
5. Хейфец Л.И., Предтеченская Д.М., Павлов Ю.В., Окунев Б.Н. Моделирование динамических эффектов в слоях адсорбентов. 1. Простой метод оценки теплопроводности слоя композитного адсорбента воды ( $\text{CaCl}_2$ , импрегнированный в поры силикагельной матрицы) // Вестник Моск. ун-та. Сер.: Химия. 2006. Т. 47. № 4. С. 274–277.
6. Козлов В.В. Повышение эффективности осушки воздуха в системах термостатирования. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988.
7. Weininger J.L., Schneider W.G. Thermal conductivity of granular beds filled with compressed gases // Industrial and Engineering Chemistry. 1951. Vol. 43. No. 5. Pp. 1229–1233. DOI: [10.1021/ie50497a061](https://doi.org/10.1021/ie50497a061)
8. Дубинин М.М. Физико-химические основы сорбционной техники. М.; Л.: Гос. хим.-техн. изд-во, 1932. 381 с.
9. Santos J.C., Portugal A.F., Magalhães F.D., Mendes A. Simulation and optimization of small oxygen pressure swing adsorption units // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2004. Vol. 43. No. 26. Pp. 8328-8338. DOI: [10.1021/ie049701I](https://doi.org/10.1021/ie049701I)
10. Zhang X.J., Sumathy K., Dai Y.J., Wang R.Z. Parametric study on the silica gel-calcium chloride composite desiccant rotary wheel employing fractal BET adsorption isotherm // Intern. J. of Energy Research. 2005. Vol. 29. No. 1. Pp. 37-51. DOI: [10.1002/er.1035](https://doi.org/10.1002/er.1035)
11. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты газоочистки: учебное пособие. Пенза: Изд-во Пензен. гос. ун-та, 2006. 228 с.
12. Бобровский С.И. Delphi 7: учеб. курс. М.; СПб.: Питер, 2003. 735 с.



## Method and Program to Calculate Heat and Mass Transfer Processes During Adsorption Drying of Compressed Air

V.A. Kozlov<sup>1</sup>, V.S. Shadrin<sup>1,\*</sup>, M.A. Rakhmanov<sup>1</sup>

\* [v\\_miler15@mail.ru](mailto:v_miler15@mail.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** adsorption drying; mathematical model; compressed air

---

With development of compressed air drying equipment, the task of numerical modeling of dynamic sorption-regeneration processes is increasingly emerging at the design stage. The dynamic problem has no analytical solution and can be solved only by numerical methods.

The paper presents a numerical method and a program developed to calculate dynamics of heat and mass transfer during adsorption drying of compressed air.

As a basis, a simplified physical model of sorption kinetics is used which assumes that inside the granules of the adsorbent there is a complete equalization of parameters such as temperature and moisture content at any time. The parameters of thermal conductivity and diffusion inside the adsorbent granules are incomparably higher than similar parameters on the surface of granules.

Based on the thermodynamic approach, a physical and a mathematical model of adsorption have been developed to calculate dynamic non-isothermal processes in adsorption drying apparatuses. The presented results of calculations confirm the possibility to analyze dynamics of heat and mass transfer processes in the dryer column in the moisture adsorption mode under various initial and boundary conditions, including those that vary within the drying cycle.

### References

1. Kel'tsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoj tekhniki* [Principles of adsorption technology]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Khimiia Publ., 1984. 591 p. (in Russian).
2. Serpionova E.N. *Promyshlennaia adsorbtsiia gazov i parov* [Industrial adsorption of gases and vapors]: a textbook. [2<sup>nd</sup> ed.]. Moscow: Vysshiaia Shkola Publ., 1969. 414 p. (in Russian).
3. Mozgovoj S.V. *Issledovanie protsessov teplo- i massoobmena pri ochistke gazovykh smesej v adsorbtsionnykh ustanovkakh* [Research of processes of heat and mass transfer in the purification of gas mixtures in adsorption installations. Cand. diss.]. Moscow, 2001. 133 p. (in Russian).



4. Matvejkin V.G., Putin S.B., Skvortsov S.A., Tolstoshein S.S. Mathematical modeling of the process of adsorption concentration of carbon dioxide in the life support system of conditionally closed volume. *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki* [Questions of Modern Science and Practice], 2011, no. 3(34), pp. 64-71 (in Russian).
5. Kheifets L.I., Predtechenskaia D.M., Pavlov Yu.V., Okunev B.N. Simulation of dynamic effects in adsorbent beds. 1. Simple method for estimating heat conductivity of composite water adsorbent bed (CaCl<sub>2</sub> impregnated into pores of silica gel matrix). *Moscow Univ. Chemistry Bulletin*, 2006, vol. 61, no.4, pp. 31-35.
6. Kozlov V.V. *Povyshenie effektivnosti osushki vozdukha v sistemakh termostatirovaniia* [Improving the efficiency of the drying air temperature control systems. Abstract]. Moscow: MVTU Publ., 1988 (in Russian).
7. Weininger J.L., Schneider W.G. Thermal conductivity of granular beds filled with compressed gases. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1951, vol. 43, no. 5, pp. 1229–1233. DOI: [10.1021/ie50497a061](https://doi.org/10.1021/ie50497a061)
8. Dubinin M.M. *Fiziko-khimicheskie osnovy sorbtsionnoj tekhniki* [Physico-chemical bases of sorption technology]. Moscow; Leningrad: Goskhimtekhizdat Publ., 1932. 381 p. (in Russian).
9. Santos J.C., Portugal A.F., Magalhães F.D., Mendes A. Simulation and optimization of small oxygen pressure swing adsorption units. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, vol. 43, no. 26, pp. 8328-8338. DOI: [10.1021/ie049701I](https://doi.org/10.1021/ie049701I)
10. Zhang X.J., Sumathy K., Dai Y.J., Wang R.Z. Parametric study on the silica gel-calcium chloride composite desiccant rotary wheel employing fractal BET adsorption isotherm. *Intern. J. of Energy Research*, 2005, vol. 29, no. 1, pp. 37-51. DOI: [10.1002/er.1035](https://doi.org/10.1002/er.1035)
11. Vetoshkin A.G. *Protsessy i apparaty gazoochistki* [Processes and equipment for gas cleaning]: a textbook. Penza: Penza State Univ. Publ., 2006. 228 p. (in Russian).
12. Bobrovskij S.I. *Delphi 7: uchebnyj kurs* [Delphi 7: Learning course]. Moscow; S.Petersburg: Piter Publ., 2003. 735 p. (in Russian).