

УДК 621.65, 621.6.02, 621.52

Удаление загрязненного воздуха вакуумной установкой с ветвлением

Н.Л. Великанов, В.А. Наумов

Калининградский государственный технический университет

Polluted air removal by a vacuum system with branching

N.L. Velikanov, V.A. Naumov

Kaliningrad State Technical University

Вакуумные установки широко используют для удаления промышленного и бытового мусора. Чаще всего применяют схемы с одним воздухозаборным каналом. Они более просты в исполнении, для них существуют апробированные расчетные схемы. В условиях производства встречаются воздухозаборные системы с несколькими ветвями (каналами), которые могут иметь разные длины, диаметры и материал изготовления. Разработаны физическая и математическая модели работы импульсно-вакуумной системы удаления загрязненного воздуха, имеющей разветвленный трубопровод. Система снабжена низковакуумным насосом и приемной камерой. Работа происходит в три этапа. Газодинамические процессы приняты адиабатными. Приведены математические модели процессов, происходящих на этих этапах. Даны примеры расчетов. При определении массового расхода газовой смеси использован квазистационарный подход, известное решение для дозвукового адиабатного течения газовой смеси в канале постоянного сечения. Задача Коши решена численным методом. Анализ полученных результатов показал, что при снижении доли водорода конечная масса загрязненного воздуха в приемной камере уменьшается, а время ее заполнения увеличивается.

EDN: CJJUBA, <https://elibrary/cjjuba>

Ключевые слова: воздухозаборный канал, вакуумно-импульсная установка, газовая смесь, гидравлическое сопротивление

Vacuum systems are widely applied in the industrial and household waste removal. Schemes with a single air intake duct are most often used. They are simpler in implementation, and there are proven computation schemes for them. In the production conditions, the air intake systems with several channels (branches) are applied having different lengths, diameters, and manufacture materials. Physical and mathematical models of the vacuum-pulse system operation in removing the contaminated air with a branched pipeline are developed. The system is equipped with a low-vacuum pump and the receiving chamber. Operation is divided into three stages. Gas-dynamic processes are assumed to be adiabatic. The paper provides mathematical models of the processes at these stages. It presents the computation examples. When determining the mass flow rate of gas, the paper uses the quasi-stationary approach, i.e. the known solution for a subsonic adiabatic gas flow in the channel with the constant cross section. The Cauchy problem is solved numerically. Analysis of the obtained results shows that with a decrease in the hydrogen proportion, the contaminated air final mass in the receiving chamber decreases, and the time of filling the chamber is increasing.

EDN: CJJUBA, <https://elibrary/cjjuba>

Keywords: air intake channel, vacuum-pulse system, gas mixture, hydraulic resistance

Загрязнение воздуха — основная проблема, с которой сталкиваются промышленные предприятия в процессе производства. Борьба с этим загрязнением является важной задачей, так как оно оказывает вредное воздействие на окружающую среду и живые организмы.

Для снижения уровня загрязняющих веществ, образующихся в воздухе и водных источниках, можно использовать методы биофильтрации [1]. Загрязняющие вещества адсорбируются на внешней поверхности среды и метаболизируются с помощью иммобилизованных микробов, что приводит к благоприятным последствиям. В последние годы конструкции, основанные на биофильтрации, оказались полезными для удаления опасных загрязняющих веществ из сточных вод или загрязненного воздуха.

Системы удаления и очистки загрязненного воздуха широко распространены на химических и нефтехимических производствах, в системах жизнеобеспечения населенных пунктов [2–8].

Для рационализации размещения трубопроводов и уменьшения их протяженности в системах удаления воздуха применяют схему ветвления [9–11].

Различные вопросы повышения эффективности вакуумных систем рассмотрены в работах [12–14]. Во всех перечисленных исследованиях описана гидравлическая схема с одним воздухозаборным каналом (ВЗК), тогда как на производстве нередко задействованы воздухозаборные системы с несколькими ВЗК, которые могут иметь разные параметры.

Цель статьи — разработка физической и математической моделей работы вакуумно-импульсной системы удаления загрязненного воздуха, имеющей разветвленный трубопровод.

Предлагаемая вакуумно-импульсная установка для удаления загрязненного воздуха (рис. 1) имеет три воздухозаборных ветви (ВЗК) разной длины. Установка работает следующим образом. На первом этапе клапан 2 открыт, клапаны 4 и 5 закрыты. Низковакуумный (например, водокольцевой) насос 3 откачивает воздух из приемной камеры (ПК) 1, снижая давление в ней до предельного значения P_0 .

На втором этапе клапан 5 открыт, клапаны 2 и 4 закрыты. Давление в рабочем помещении (РП) P_{cp} имеет порядок атмосферного, поэтому загрязненный водородом воздух засасывается ВЗК 7–9. Эта газовая смесь (ГС) по

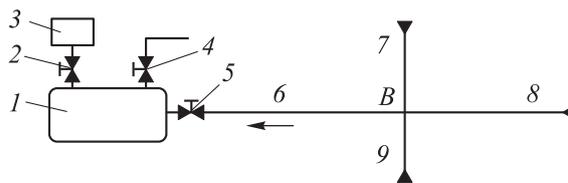


Рис. 1. Схема вакуумно-импульсной установки для удаления загрязненного воздуха

магистральному каналу (МК) 6 поступает в ПК. Давление ГС в ПК P возрастает до тех пор, пока не сравняется с давлением P_{cp} , после чего клапан 5 закрывается.

На третьем этапе открывается клапан 4, и загрязненный воздух направляется на очистку.

Газодинамические процессы полагаем адиабатными. Математическое моделирование первого этапа подробно описано в работах [12, 13]. Математическая модель процесса на втором этапе включает в себя дифференциальные уравнения динамики массы ГС и внутренней энергии в ПК:

$$\begin{cases} dm/dt = G_0; \\ d(mCT)/dt = G_0(T_3C_3 - CT), \end{cases} \quad (1)$$

где m — масса ГС в ПК, кг; t — время заполнения ПК; G_0 — массовый расход ГС в МК, кг/с; C , C_3 и T , T_3 — теплоемкости и абсолютные температуры воздуха в ПК и загрязненного воздуха соответственно, Дж/(кг·К) и К.

Первое уравнение системы (1) оставим без изменений, а во втором выразим произведение массы на температуру ГС в ПК через давление с помощью уравнения состояния совершенного ГС

$$mT = PV/R_g, \quad (2)$$

где P — давление ГС в ПК, Па; V — объем ПК, м³; R_g — газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Полагаем, что изменением теплоемкости при движении ГС можно пренебречь. После подстановки выражения (2) во второе уравнение системы (1) и преобразований получаем

$$dm/dt = G_0; \quad dP/dt = G_0(T_3R_g/V - P/m). \quad (3)$$

Чтобы система уравнений (3) была замкнутой, необходимо связать параметры G_0 и T_3 с искомыми функциями $m(t)$ и $P(t)$. В статьях [12–14] показано, что при определении массового расхода ГС в системе уравнений (1) можно использовать квазистационарный подход: рассчитывать G_0 в каждый момент времени по текущим перепадам давления ГС.

Воспользуемся известным решением для дозвукового адиабатного течения ГС в канале постоянного сечения [15]. Массовый расход ГС в МК — от узла *B* до ПК (см. рис. 1)

$$G_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{\frac{(P_B^\alpha - P^\alpha)\gamma}{\theta(1+\gamma) \left[\frac{1}{\gamma} \ln \frac{P_B}{P} + 0,5\lambda \left(d_0, G_0 \right) \frac{L_0}{d_0} \right]}}, \quad (4)$$

где d_0 и L_0 — диаметр и длина МК; P_B — давление ГС в узле *B*, Па; $\alpha = (1 + \gamma)/\gamma$; γ — показатель адиабаты ГС; $\theta = P_{cp}^{1/\gamma}/\rho_{cp}$ (ρ_{cp} — плотность ГС в РП, кг/м³); λ — коэффициент потерь по длине трубы.

Массовый расход ГС в *i*-м ВЗК (до узла *B*)

$$G_i = \frac{\pi d_i^2}{4} \sqrt{\frac{(P_{cp}^\alpha - P_B^\alpha)\gamma}{\theta(1+\gamma) \left[\frac{1}{\gamma} \ln \frac{P_{cp}}{P_B} + 0,5\lambda \left(d_i, G_i \right) \frac{L_i}{d_i} \right]}}; \quad (5)$$

$$G_1 + G_2 + \dots + G_n = G_0, \quad (6)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ (n — количество ВЗК); d_i и L_i — диаметр и длина *i*-го ВЗК.

При турбулентном режиме течения ГС коэффициент потерь по длине трубы можно рассчитать по формуле Альтшуля

$$\lambda_i = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d_i} + \frac{68}{Re_i} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d_i} + \frac{17d_i\pi\mu}{G_i} \right)^{0,25},$$

где Δ — абсолютная шероховатость труб, м; Re_i — число Рейнольдса; μ — коэффициент динамической вязкости ГС (вычисленный методом Уилки), Па·с.

В системе алгебраических уравнений (4)–(6) неизвестными являются массовые расходы ГС G_1, G_2, \dots, G_n и давление ГС в узле *B* P_B . Эта система не имеет аналитического решения. Ее решали численным методом при следующих параметрах: $n = 3$; $L_0 = 60$ м; $L_1 = 20$ м; $L_2 = 30$ м; $L_3 = 40$ м; $\Delta = 0,1$ мм; $P_{cp} = 1,013 \cdot 10^5$ Па; $P_0 = 0,1P_{cp}$; $T_{cp} = 20$ °С. В качестве варьируемых параметров выступали массовая доля водорода в загрязненном воздухе (далее массовая доля водорода) $c = 0 \dots 8$ %, объем ПК $V = 0,8 \dots 2,0$ м³, диаметр МК $d_0 = 35 \dots 50$ мм и диаметры первого–третьего ВЗК $d_1 = d_2 = d_3 = 22 \dots 30$ мм.

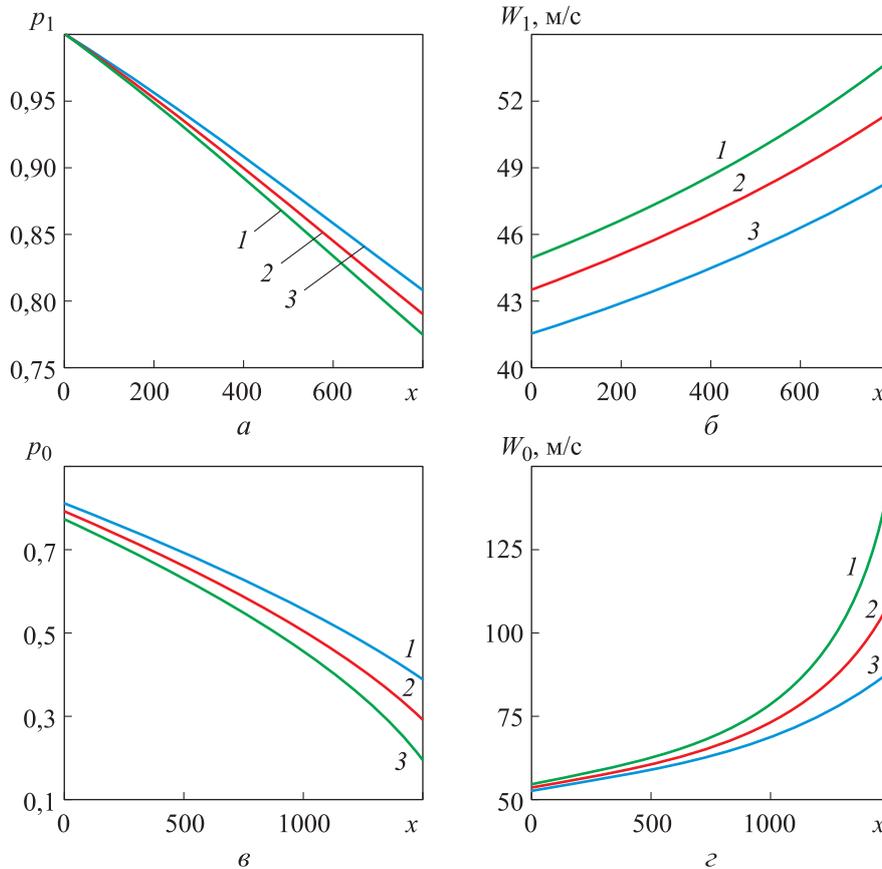


Рис. 2. Зависимости газодинамических параметров от безразмерной координаты x при массовой доле водорода $c = 3$ % и безразмерном давлении в ПК $p = 0,2$ (1), $0,3$ (2) и $0,4$ (3): $a, б и в, z$ — безразмерных давлений p_1, p_0 и скоростей течения ГС W_1, W_0 в первом ВЗК и МК соответственно

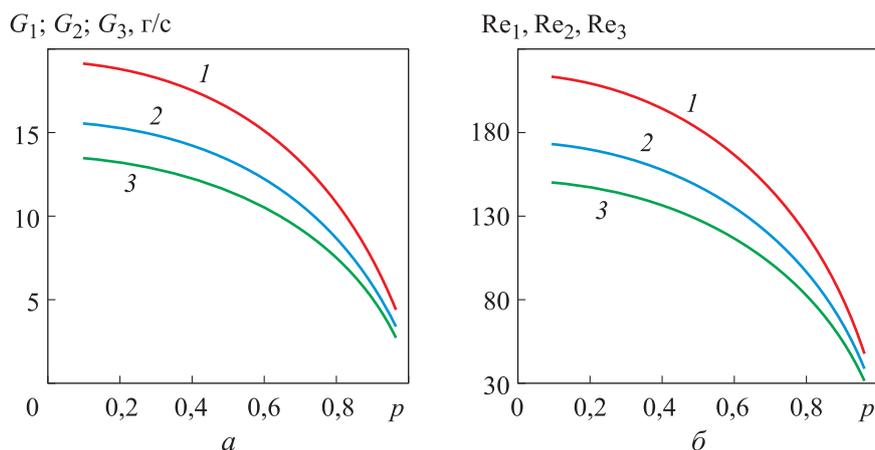


Рис. 3. Зависимости газодинамических параметров в первом (1), втором (2) и третьем (3) ВЗК от безразмерного давления в ПК p при массовой доле водорода $c = 3\%$: a — массовых расходов ГС G_1, G_2, G_3 ; b — чисел Рейнольдса Re_1, Re_2, Re_3

Результаты решения системы уравнений (4)–(6) численным методом для давления ГС в ПК $P = P_0 \dots P_{cp}$ при массовой доле водорода $c = 3\%$ приведены на рис. 2–4. Здесь введены следующие обозначения: p, p_1 и p_0 — безразмерное давление соответственно в ПК, первом ВЗК и МК, где $p = P/P_{cp}, p_1 = P_1/P_{cp}, p_0 = P_0/P_{cp}$; x — безразмерная координата вдоль оси канала, $x = X/d$.

На рис. 2 показаны промежуточные результаты — зависимости газодинамических параметров от безразмерной координаты x при фиксированном давлении в ПК. Как видно из рис. 2, б, в первом ВЗК до узла В скорость течения ГС W_1 увеличивается, но незначительно (всего на несколько метров в секунду), безразмерное давление ГС p_1 мало зависит от безразмерной координаты x (рис. 2, а). В МК (рис. 2, в) разница между кривыми становится заметной, как и на рис. 2, г. При безразмерном давлении $p = 0,2$

скорость течения ГС на входе в ПК достигает 150 м/с, при $p = 0,4$ — не превышает 90 м/с. Во всех рассмотренных случаях число Маха на выходе из МК было меньше единицы.

Как же указывалось, диаметры первого–третьего ВЗК одинаковые, а их длины подчинены неравенству $L_1 < L_2 < L_3$, поэтому для массовых расходов ГС в этих ВЗК справедливо соотношение $G_1 > G_2 > G_3$ (рис. 3, а). Согласно рис. 3, б в ВЗК область гидравлического сопротивления является переходной, вследствие чего необходимо учитывать влияние расхода ГС на коэффициент потерь по длине ВЗК.

Зависимости массового расхода ГС в МК G_0 от безразмерного давления в ПК p (при фиксированном давлении в РП, заданной гидравлической схеме и параметрах ГС) и массовой доле водорода $c = 0, 3$ и 8% приведены на рис. 4, а. Эта зависимость необходима для замыкания системы дифференциальных уравнений (3).

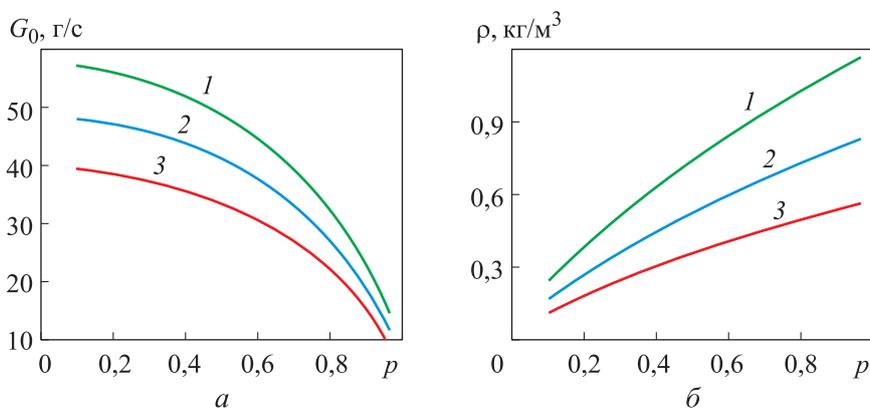


Рис. 4. Зависимости массового расхода ГС в МК G_0 (а) и плотности ГС в ПК ρ (а) от безразмерного давления в ПК p при массовой доле водорода $c = 0$ (1), 3 (2) и 8 % (3)

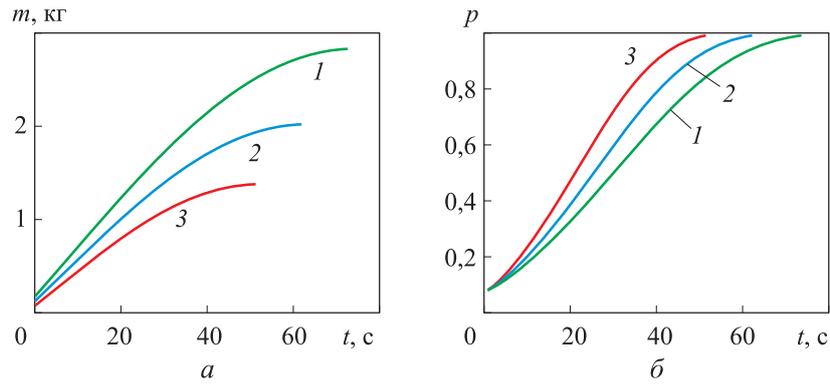


Рис. 5. Зависимости массы ГС в ПК m (а) и безразмерного давления в ПК p от времени заполнения ПК t при диаметрах МК $d_0 = 40$ мм, ВЗК $d_1 = 25$ мм, объеме ПК $V = 1,0$ м³ и массовой доле водорода $c = 0$ (1), 3 (2) и 8 % (3)

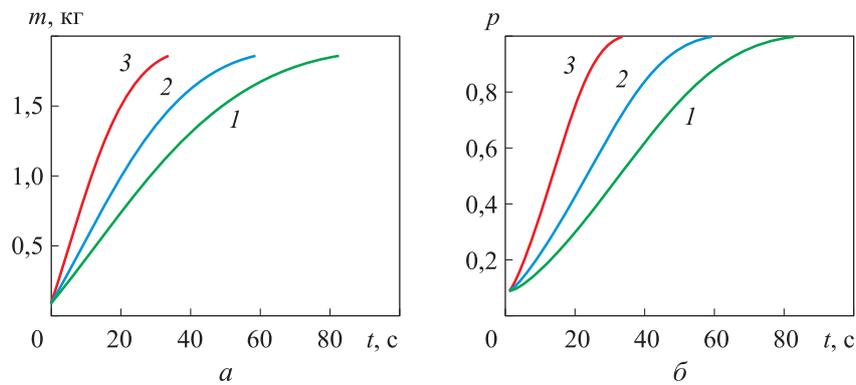


Рис. 6. Зависимости массы ГС в ПК m (а) и безразмерного давления в ПК p от времени заполнения ПК t при массовой доле водорода $c = 4$ %, объеме ПК $V = 1,0$ м³ и различных значениях диаметров МК и первого ВЗК: 1 — $d_0 = 35$ мм, $d_1 = 22$ мм; 2 — $d_0 = 40$ мм, $d_1 = 25$ мм; 3 — $d_0 = 50$ мм, $d_1 = 30$ мм

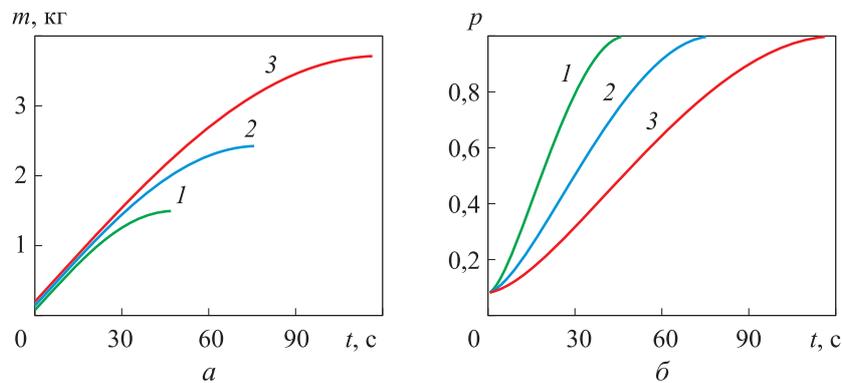


Рис. 7. Зависимости массы ГС в ПК m (а) и безразмерного давления в ПК p от времени заполнения ПК t при массовой доле водорода $c = 4$ %, диаметрах каналов $d_0 = 40$ мм, $d_1 = 25$ мм и различных значениях объема ПК: 1 — $V = 0,8$ м³; 2 — $V = 1,3$ м³; 3 — $V = 2,0$ м³

Как видно из рис. 4, б, увеличение массовой доли водорода приводит к снижению плотности ГС в ПК. Так, при отсутствии водорода в загрязненном воздухе плотность ГС в ПК составляет 1,203 кг/м³, при $c = 3$ % — 0,857 кг/м³, при $c = 8$ % — 0,579 кг/м³. В результате при одинаковом перепаде давления массовый расход ГС в последнем случае получается наименьшим.

Например, на рис. 4, а при безразмерном давлении в ПК $p = 0,1$ массовые расходы ГС в МК для $c = 0, 3$ и 8 % равны 0,057, 0,048 и 0,039 кг/с соответственно. Уменьшается и плотность ГС в ПК (см. рис. 4, б).

Кроме того, для замыкания системы дифференциальных уравнений (3) определяем температуру ГС на входе в ПК по уравнению адиабаты

$$T_3 = \theta P^\beta / R_g; \quad \beta = (\gamma - 1) / \gamma. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) получаем систему дифференциальных уравнений с начальными условиями

$$\frac{dm}{dt} = G_0; \quad \frac{dP}{dt} = G_0 \left(\frac{\theta P^\beta}{V} - \frac{P}{m} \right); \quad (8)$$

$$m(0) = m_0; \quad P(0) = P_0.$$

Некоторые результаты решения задачи Коши (8) численным методом при изменении газодинамических параметров приведены на рис. 5–7. Если доля водорода повышается, то конечная масса загрязненного воздуха в ПК снижается (рис. 5, а), а время заполнения ПК t возрастает (рис. 5, б).

Увеличение диаметров первого ВЗК и МК приводит к падению их гидравлического сопротивления, вследствие чего при прочих рав-

ных условиях массовый расход ГС растет, а время заполнения ПК уменьшается (рис. 6, б). При этом конечная масса ГС в ПК остается неизменной (рис. 6, а).

Рост объема ПК без изменения других параметров приводит к увеличению как конечной массы ГС в ПК, так и времени ее заполнения t (рис. 7, а, б).

Выводы

1. Использование схемы ветвления трубопровода дает дополнительные возможности проектировщику по оптимизации его длины.

2. Гидродинамические параметры сети существенно зависят от соотношения геометрических параметров ветвей и состава загрязненного воздуха.

Литература

- [1] Sheoran K., Siwal S.S., Kapoor D. et al. Air pollutants removal using biofiltration technique: a challenge at the frontiers of sustainable environment. *ACS Eng. Au*, 2022, vol. 2, no. 5, pp. 378–396, doi: <https://doi.org/10.1021/acseengineeringau.2c00020>
- [2] Шарапов В.И., Марченко А.В. Разработка технологий удаления и обезвреживания загрязненного воздуха городов. *Записки Горного института*, 2004, т. 158, с. 90–92.
- [3] Бусыгина Н.В., Бусыгин И.Г. *Технология переработки природного газа и газового конденсата*. Оренбург, Газпромпечат, 2002. 428 с.
- [4] Берлин М.А., Гореченков В.Г., Капралов В.П. *Квалифицированная первичная переработка нефтяных и природных углеводородных газов*. Краснодар, Сов. Кубань, 2012. 514 с.
- [5] Молчанов С.А. *Особенности выделения гелия из природного газа*. Москва, Недра, 2011. 288 с.
- [6] Бирюков А.В., Усачев А.П., Шурайц А.Л. Математическая модель для технико-экономического обоснования конструкции газового фильтра с параллельно соединенными в одном корпусе фильтрующими элементами. *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*, 2014, № 3, с. 138–147.
- [7] Бирюков А.В., Усачев А.П., Шурайц А.Л. Обоснование и разработка многоблочной установки очистки природного газа от твердых частиц. *Нефтегазовое дело*, 2012, № 4, с. 437–448. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Usachev/Usachev_2.pdf
- [8] Арзамасова Г.С., Карманов В.В. Решение комплексных вопросов обращения с отходами очистки природного газа от механических примесей. *Вестник ПНИПУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности*, 2013, № 2, с. 7–15.
- [9] Лобанов И.Е. Теоретическое аналитическое решение задачи о стационарном докритическом течении газообразного теплоносителя в разветвлениях трубопроводов теплообменных аппаратов. *Вестник Брянского государственного технического университета*, 2019, № 9, с. 25–35, doi: https://doi.org/10.30987/article_5d9317b27868a4.78923465
- [10] Губин С.А., Сумской С.И., Сверчков А.М. и др. Визуализация параметров течения в разветвленных системах с помощью графиков с древовидной структурой (на примере течения в трубопроводе). *Научная визуализация*, 2018, т. 10, № 1, doi: <https://doi.org/10.26583/sv.10.1.01>
- [11] Черноусов А.А. Модель взаимодействия волн конечной амплитуды с разветвлением канала. *Ползуновский вестник*, 2006, № 4–1, с. 182–185.

- [12] Наумов В.А. Динамика откачивания влажного воздуха из рабочей камеры с помощью водокольцевого вакуумного насоса. *Вестник науки и образования Северо-Запада России*, 2021, т. 7, № 1, с. 9–16.
- [13] Великанов Н.Л., Наумов В.А. Откачивание воздуха с примесями золотниковым вакуумным насосом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 6, с. 52–59, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-6-52-59>
- [14] Наумов В.А., Великанов Н.Л. Этапы работы вакуумной рыбонасосной установки. *Рыбное хозяйство*, 2020, № 2, с. 108–112, doi: <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2020-2-108-112>
- [15] Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика*. Ч. 1. Москва, Наука, 1991. 597 с.

References

- [1] Sheoran K., Siwal S.S., Kapoor D. et al. Air pollutants removal using biofiltration technique: a challenge at the frontiers of sustainable environment. *ACS Eng. Au*, 2022, vol. 2, no. 5, pp. 378–396, doi: <https://doi.org/10.1021/acseengineeringau.2c00020>
- [2] Sharapov V.I., Marchenko A.V. Development of technologies for the removal and decontamination of urban air pollution. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2004, vol. 158, pp. 90–92. (In Russ.).
- [3] Busygina N.V., Busygin I.G. *Tekhnologiya pererabotki prirodnogo gaza i gazovogo kondensata* [Technology of natural gas and gas condensate processing]. Orenburg, Gazprompechat Publ., 2002. 428 p. (In Russ.).
- [4] Berlin M.A., Gorechenkov V.G., Kapralov V.P. *Kvalifitsirovannaya pervichnaya pererabotka neftyanykh i prirodnnykh uglevodorodnykh gazov* [Qualified primary processing of oil and natural hydrocarbon gases]. Krasnodar, Sov. Kuban Publ., 2012. 514 p. (In Russ.).
- [5] Molchanov S.A. *Osobennosti vydeleniya geliya iz prirodnogo gaza* [Features of helium extraction from natural gas]. Moscow, Nedra Publ., 2011. 288 p. (In Russ.).
- [6] Biryukov A.V., Usachev A.P., Shurayts A.L. Mathematical model for feasibility study of gas filter construction with filter units parallel connected in one body. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov* [Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products], 2014, no. 3, pp. 138–147. (In Russ.).
- [7] Biryukov A.V., Usachev A.P., Shurayts A.L. Motivation and development multiblock installation for cleaning natural gas from hard particles. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2012, no. 4, pp. 437–448. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Usachev/Usachev_2.pdf (in Russ.).
- [8] Arzamasova G.S., Karmanov V.V. Decision of complex issues of gas condensate waste utilization. *Vestnik PNIPU. Okhrana okruzhayushchey sredy, transport, bezopasnost zhiznedeyatelnosti* [Bulletin PNIPU. Protection of the Environment, Transport, Life Safety], 2013, no. 2, pp. 7–15. (In Russ.).
- [9] Lobanov I.E. Theoretical analytical solution of problem on stationary subcritical current of gaseous heat carrier in piping bifurcations of heat-exchange equipment. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University], 2019, no. 9, pp. 25–35, doi: https://doi.org/10.30987/article_5d9317b27868a4.78923465 (in Russ.).
- [10] Gubin S.A., Sumskey S.I., Sverchkov A.M. et al. Visualization of flow parameters in the branched systems using tree-like graphs (by the example of flow in the pipeline). *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific Visualization], 2018, vol. 10, no. 1, doi: <https://doi.org/10.26583/sv.10.1.01> (in Russ.).
- [11] Chernousov A.A. A model of finite amplitude wave interaction with channel branching. *Polzunovskiy vestnik*, 2006, no. 4–1, pp. 182–185. (In Russ.).
- [12] Naumov V.A. Dynamics of pumping moist air out of the working chamber using the water-ring vacuum pump. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii* [Journal of Science and Education of North-West Russia], 2021, vol. 7, no. 1, pp. 9–16. (In Russ.).
- [13] Velikanov N.L., Naumov V.A. Using a spool vacuum pump for pumping out air with impurities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Me-

- chanical Engineering], 2022, no. 6, pp. 52–59, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-6-52-59> (in Russ.).
- [14] Naumov V.A., Velikanov N.L. Stages of vacuum fish-pump unit operation. *Rybnoe khozyaystvo* [Fisheries], 2020, no. 2, pp. 108–112, doi: <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2020-2-108-112> (in Russ.).
- [15] Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika*. Ch. 1 [Applied gas dynamics. P. 1]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 597 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 15.05.2024

Информация об авторах

ВЕЛИКАНОВ Николай Леонидович — доктор технических наук, профессор, профессор научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники. Калининградский государственный технический университет (236000, Калининград, Российская Федерация, Советский пр-т, д. 1, e-mail: monolit8@yandex.ru).

НАУМОВ Владимир Аркадьевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства. Калининградский государственный технический университет (236000, Калининград, Российская Федерация, Советский пр-т, д. 1, e-mail: van-old@mail.ru).

Information about the authors

VELIKANOV Nikolay Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of the Scientific and Educational Center for Shipbuilding, Marine Infrastructure and Technology. Kaliningrad State Technical University (236000, Kaliningrad, Russian Federation, Sovetsky Ave., Bldg. 1, e-mail: monolit8@yandex.ru).

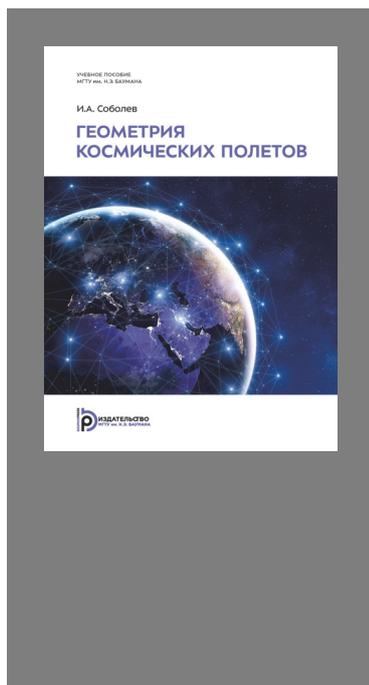
NAUMOV Vladimir Arkadievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management. Kaliningrad State Technical University (236000, Kaliningrad, Russian Federation, Sovetsky Ave., Bldg. 1, e-mail: van-old@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Великанов Н.Л., Наумов В.А. Удаление загрязненного воздуха вакуумной установкой с ветвлением. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 2, с. 82–89.

Please cite this article in English as:

Velikanov N.L., Naumov V.A. Polluted air removal by a vacuum system with branching. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 2, pp. 82–89.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие И.А. Соболева «Геометрия космических полетов»

Изложены подходы к решению геометрических задач, наиболее часто встречающихся при проектировании космических аппаратов: определение взаимного положения космического аппарата и планеты, условий наблюдения с борта космического аппарата земной поверхности и космического аппарата с Земли, условий обеспечения коммуникации между космическим аппаратом и наземной станцией и т. д.

Для студентов, изучающих дисциплины «Проектирование и конструирование космических аппаратов», «Основы устройства космических аппаратов» направления подготовки «Ракетные комплексы и космонавтика», а также для инженеров, работающих в ракетно-космической отрасли.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>