

УДК 621.6:532.542

doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-81-90

Транспортирование серной кислоты вакуумной установкой

Н.Л. Великанов¹, В.А. Наумов²

¹ Балтийский федеральный университет имени И. Канта

² Калининградский государственный технический университет

Transportation of Sulfuric Acid with Vacuum Unit

N.L. Velikanov¹, V.A. Naumov²

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University

² Kaliningrad State Technical University

В химической промышленности, например, при производстве серной кислоты и перемещении серы, извлеченной на нефтеперерабатывающих заводах, температура жидких субстанций может изменяться в широких пределах. Проведено исследование влияния температуры и концентрации агрессивной жидкости на производительность и энергетическую эффективность вакуумных систем для транспортирования жидкостей. Рассмотрены зависимости производительности (скорости откачки сухого воздуха) и затраченной мощности вакуумного насоса ЖВН-12Н от давления в рабочей камере. Определены поправочные коэффициенты производительности при откачке влажного воздуха для разных температур. Исследованы показатели работы вакуумной системы для транспортирования жидкостей на базе ЖВН-12Н. Установлено, что увеличение температуры откачиваемого влажного воздуха повышает среднюю производительность вакуумной системы для транспортирования жидкостей, снижая ее энергоемкость. Показано, что рост концентрации раствора серной кислоты приводит к уменьшению производительности и увеличению энергоемкости вакуумной системы, при этом коэффициент полезного действия снижается незначительно.

Ключевые слова: водокольцевой вакуумный насос, откачка влажного воздуха, поправочный коэффициент производительности, транспортирование серной кислоты

In the chemical industry, for example, in the production of sulfuric acid and the movement of sulfur recovered in refineries, the temperature of liquid substances can vary widely. The study of the effect of aggressive liquid temperature and concentration on the productivity and energy efficiency of vacuum systems for transporting liquids has been carried out. The performance (dry air pumping rate) and the consumed power of the vacuum pump ZhVN-12N depending on the pressure in the working chamber are considered. The correction coefficients of productivity for pumping out humid air have been determined for different temperatures. The performance indicators of a vacuum system for transporting liquids based on ZhVN-12N have been investigated. It was found that an increase in the temperature of the pumped humid air increases the average productivity of the vacuum system for transporting liquids, reducing its energy consumption. It is shown that an increase in the sulfuric acid solution concentration results in a decrease in productivity and an increase in the energy consumption of the vacuum system, while the efficiency decreases slightly.

Keywords: water ring vacuum pump, wet air pumping, performance correction factor, sulfuric acid transportation

Вакуумные системы транспортирования жидкостей (ВСТЖ) по сравнению с центробежными или поршневыми насосами имеют довольно низкую энергетическую эффективность [1, 2]. Поэтому их применяют в таких особых случаях, как перекачивание жидкости без ее контакта с различными поверхностями [3], минимизация повреждений рыбы в коммерческом рыболовстве [4] и транспортирование агрессивных жидкостей в химической промышленности [5]. В этих системах в полной мере проявляются преимущества водокольцевых вакуумных насосов (ВВН) перед аналогичными агрегатами [6].

Исследования по улучшению конструкции ВВН с целью повышения производительности и энергетической эффективности продолжают до сих пор [7–9]. Математические модели откачки воздуха с помощью ВВН предложены во многих публикациях. В работе [9] была предпринята попытка разработать теоретическую модель для повышения производительности и мощности насосов, но она получилась полуэмпирической.

Теоретический анализ вакуумирования и его применение в вязком потоке рассмотрены в статье [10]. Откачивающая модель вакуумных камер с адсорбирующими стенками предложена в работе [11]. Метод моделирования нагрузочных характеристик по результатам испытаний разработан в публикации [12]. Динамика процесса ВВН исследована в работе [13].

В статье [14] предложена математическая модель работы ВСТЖ на базе ВВН (рис. 1). Определены критерии подобия задачи, исследовано влияние коэффициента утечки на производительность и коэффициент полезного действия (КПД). Установлено, что производительность

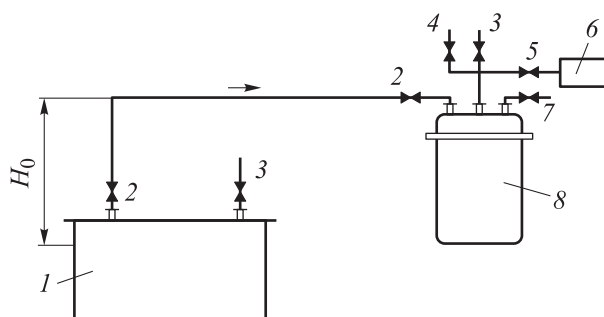


Рис. 1. Схема работы ВСТЖ при наполнении под вакуумом:

- 1 — резервуар с раствором серной кислотой;
2 и 7 — вентиль всасывающего и нагнетательного трубопровода; 3 и 4 — вентиль линии атмосферного и сжатого воздуха; 5 — вентиль насоса; 6 — ВВН;
8 — промежуточный резервуар

ВСТЖ имеет максимум, значение которого определяется параметрами устройства.

В перечисленных публикациях считалось, что воздух сухой. При наличии паров производительность ВВН растет [15], что учитывается поправочным коэффициентом производительности

$$K = G_W / G_D,$$

где G_W — расход откачиваемого воздуха при давлении всасывания и 100%-ной относительной влажности; G_D — расход откачиваемого сухого воздуха при давлении всасывания.

Исследование, выполненное в работе [15], позволило проанализировать и обобщить влияние влажности откачиваемого воздуха на производительность ВВН. Однако это лишь первая фаза работы ВСТЖ. Влияние влажности воздуха на вторую фазу работы не было изучено.

Известно, что в химической промышленности температура жидких субстанций может меняться в широких пределах, например, при производстве серной кислоты [16], где применяются ВСТЖ. Однако влияние вязкости перекачиваемой жидкости на характеристики ВСТЖ осталось неисследованным.

В работе [17] рассмотрены проблемы, связанные с хранением жидкой серы в подземном сооружении и с ее транспортированием. Анализ подземных сооружений, особенно карьера для хранения серы низкого качества, всегда являлся сложной задачей для инженеров-строителей. Такой карьер временно вмещает элементарную серу, поступающую из нефтеперерабатывающих заводов через установку извлечения серы и перемещаемую через насосную систему в различные транспортные системы, такие как железнодорожные вагоны, грузовые автомобили или баржи.

Рабочая температура резервуара для хранения серы низкого качества колеблется в пределах 394...422 К. При такой температуре расплавленная сера удерживается в жидкой форме с помощью погружных нагревательных змеевиков, расположенных у основания резервуара. Изменение концентрации и температуры приводит к изменению вязкости и плотности раствора серной кислоты, что влияет на гидравлические характеристики ВСТЖ. Учет этого влияния необходим при проектировании таких систем.

Цель работы — исследовать влияние температуры и концентрации агрессивной жидкости на производительность и энергетическую

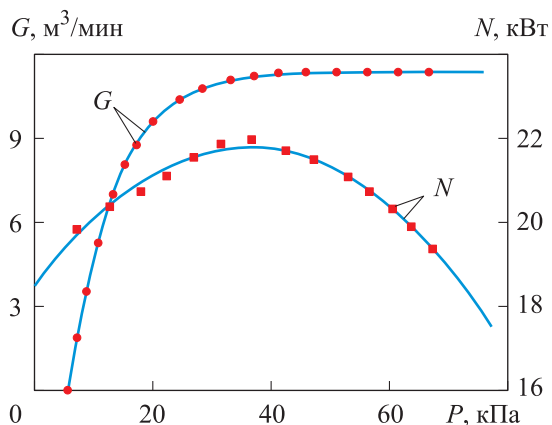


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) зависимости производительности (скорости откачки сухого воздуха) G и затраченной мощности N вакуумного насоса ЖВН-12Н от давления в рабочей камере P

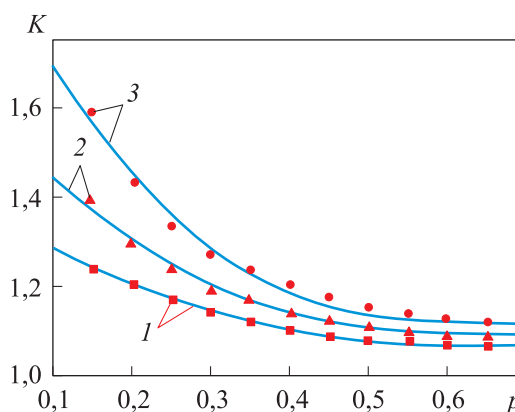


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) зависимости поправочного коэффициента производительности K от безразмерного давления p при откачке ВВ с температурой $T = 305$ (1), 311 (2) и 316 К (3)

эффективность вакуумных систем для ее транспортирования.

Исходные данные. В статье [13] для расчетов использованы нагрузочные характеристики вакуумного насоса KE-180 датской компании Samson Pumps, в работе [14] — вакуумного насоса ELRS-5 немецкой компании ERSTVAK, тогда как аналогичные агрегаты производятся и на российских предприятиях.

Машины, серийно выпускаемые разными предприятиями, по производительности и потребляемой мощности могут иметь отклонения в пределах 10 %.

Результаты заводских испытаний вакуумного насоса ЖВН-12Н при перекачивании сухого воздуха [18] показаны на рис. 2 точками.

Так как рассмотрен процесс откачивания влажного воздуха (ВВ) из рабочей камеры (РК), использованы результаты испытаний ВВН серии CL фирмы Nash [19], часть из которых показана точками на рис. 3.

В расчетах использованы параметры раствора серной кислоты — динамическая вязкость μ и плотность ρ [16], значения которых приведены в табл. 1 и 2.

Методы исследования. Дифференциальное уравнение откачки воздуха из РК в первой фазе работы ВСТЖ имеет вид

$$V_0 \frac{dP}{dt} = GkP_a - P(t)(1+k), \quad P(0) = P_a, \quad (1)$$

где V_0 — объем ВСТЖ, m^3 ; P — давление в ВСТЖ, Па; P_a — атмосферное давление, Па; t — текущее время, с; $G = f[P(t), T]$ — зависимость эффективной производительности насоса от давления и температуры воздуха, m^3/s ; k — коэффициент утечек воздуха, равный отношению расхода утечки к текущему расходу, принятый постоянным $k = 0,05$.

В уравнении (1) необходимо задать зависимость производительности ВВН от давления и температуры ВВ в РК. Ранее установлено [15],

Таблица 1

Значения динамической вязкости раствора серной кислоты

Концентрация $C, \%$	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^3, \text{ Па} \cdot \text{с}$, при температуре, К					
	288	293	298	323	348	373
20	1,83	1,60	1,40	0,83	0,59	0,36
40	3,32	2,91	2,51	1,58	1,08	0,60
60	6,75	6,00	5,37	3,36	2,32	1,08
80	24,00	20,50	17,40	8,09	4,68	2,21
95	28,50	23,10	17,70	9,10	5,37	2,79

Таблица 2

Значения плотности раствора серной кислоты при температуре $T = 293$ К

C, %	ρ , кг/м ³	C, %	ρ , кг/м ³	C, %	ρ , кг/м ³
10	1066,1	50	1395,2	85	1778,6
20	1139,4	60	1498,2	90	1814,4
30	1218,5	70	1610,5	95	1833,7
40	1302,8	80	1727,2	99	1834,2

что затраченная мощность практически не зависит от температуры, поэтому $N = \varphi(p)$. Воспользуемся методикой моделирования нагрузочных характеристик ВВН [12], рассчитываемых по безразмерному давлению $p = P/P_a$:

$$G \equiv f(p, T) = \begin{cases} 0 & \text{при } p \leq p_V; \\ G_{\max} K(p, T) \frac{1 - (p_V/p)^\alpha}{1 - (p_V/P_a)^\alpha} & \text{при } p_V < p < p_1; \\ G_{\max} K(p_1, T) & \text{при } p \geq p_1; \end{cases} \quad (2)$$

$$N = \varphi(p) = \begin{cases} N_0 & \text{при } p \leq p_V, \\ N_{\max} (1 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3) & \text{при } p > p_V, \end{cases} \quad (3)$$

где p_V — минимальное безразмерное давление воздуха; α — показатель степени, $\alpha = 1,0$; G_{\max} , N_0 , N_{\max} , a_1 , a_2 , a_3 — эмпирические константы, найденные путем сравнения результатов расчета по формулам (2), (3) и данных испытаний, показанных на рис. 2; p_1 — максимальное давление, достигнутое в экспериментах.

Методом наименьших квадратов подобрана эмпирическая зависимость для поправочного коэффициента производительности ВВН

$$K = \begin{cases} K_0(T) + A(T)(p_1 - p)^{\beta(T)} & \text{при } p < p_1; \\ K_0(T) & \text{при } p \geq p_1; \end{cases} \quad (4)$$

$$K_0 = 1 + 0,004266(T - 290,1);$$

$$A = \exp[0,112(T - 307,0)];$$

$$\beta = 0,03818(T - 246,6),$$

где T — абсолютная температура ВВ в РК.

Результаты расчета поправочного коэффициента производительности по формуле (4) при различных значениях температуры ВВ показаны на рис. 3 линиями.

Рабочая емкость наполняется жидкостью во второй фазе работы ВСТЖ под действием пе-

репада давления, который со временем уменьшается по формуле

$$\Delta P(t) = P_a - P(t) = P_a - P_0 V_0 / V(t), \quad (5)$$

где $P(t)$ и $V(t)$ — давление и объем воздуха в момент времени t ; P_0 — абсолютное давление в РК после завершения первого этапа работы ВСТЖ, Па.

Течение жидкости будет нестационарным в соответствии с формулой (5). Уравнение Бернулли для плавного нестационарного течения жидкости запишем в следующем виде [14]:

$$L \frac{dW}{dt} = \frac{1}{\rho} \left[P_a - P_0 \frac{V_0}{V(t)} \right] - gH_0 - \frac{W^2}{2} (1 + \zeta),$$

$$W(0) = 0.$$

Здесь L — длина трубопровода, м; W — средняя по поперечному сечению скорость жидкости, м/с; ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; H_0 — высота подъема жидкости в ВСТЖ, м; ζ — обобщенный коэффициент гидравлического сопротивления

$$\zeta = \lambda L/d + \Sigma \zeta_m,$$

где λ — коэффициент потерь на трение; d — диаметр трубы, м; ζ_m — коэффициент местных гидравлических потерь.

Согласно известной формуле Альтшуля, коэффициент потерь на трение

$$\lambda = 0,11 \left(\delta + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}; \quad \delta = \frac{\Delta}{d}; \quad \text{Re} = \frac{Wd}{\nu}, \quad (6)$$

где Re — число Рейнольдса; Δ — абсолютная шероховатость трубы; ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости.

С ростом кинематической вязкости жидкости число Рейнольдса Re уменьшается. Наибольшую вязкость имеет серная кислота со 100%-ной концентрацией. Однако в исследованном диапазоне параметров число Рейнольдса остается достаточно большим ($\text{Re} > 15\,000$),

что позволяет использовать формулу (6) для расчета коэффициента гидравлических потерь по длине трубопровода.

Движение жидкости будет продолжаться до тех пор, пока давление в РК возрастает до величины

$$P_2 = P_a - \rho g H_0.$$

В этот момент объем воздуха в РК станет наименьшим

$$V_{\min} = V_0 P_0 / P_2,$$

Объем жидкости, поступающий в РК за один цикл,

$$V_1 = V_0 - V_{\min} = V_0 (1 - P_0 / P_2).$$

Дифференциальное уравнение для объема воздуха в РК имеет вид

$$\frac{dV}{dt} = -Q(t); \quad W(t) = \frac{Q(t)}{S}; \quad V(0) = V_0,$$

где Q — объемный расход жидкости в трубопроводе, $\text{м}^3/\text{с}$; S — площадь поперечного сечения трубопровода, $S = \pi d^2 / 4$, м^2 .

Результаты исследования и их обсуждение. Математическое моделирование работы ВСТЖ выполнено для вакуумного насоса ЖВН-12Н при следующих параметрах: объем ВСТЖ $V_0 = 6 \text{ м}^3$; длина трубопровода $L = 40 \text{ м}$; высота подъема жидкости в ВСТЖ $H_0 = 2 \text{ м}$; диаметр трубы $d = 0,15 \text{ м}$; $\Delta = 0,1 \text{ мм}$; минимальное давление воздуха $P_v = 5,3 \text{ кПа}$. При концентрации раствора серной кислоты $C = 20 \dots 99 \%$ ее плотность $\rho = 1139,4 \dots 1834,2 \text{ кг/м}^3$ (см. табл. 2). У 95%-ного раствора серной кислоты при

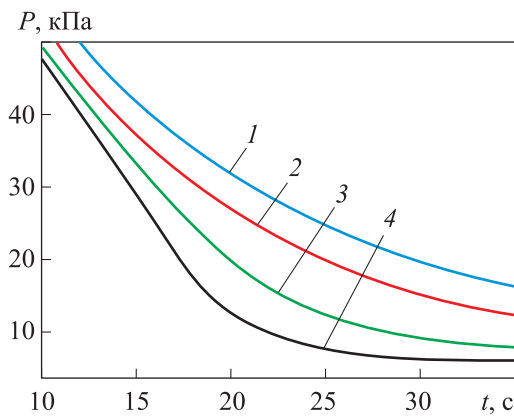


Рис. 4. Изменение давления в РК P в первой фазе работы ВСТЖ при концентрации раствора серной кислоты $C = 95 \%$ и температуре откачиваемого ВВ $T = 283$ (1), 313 (2), 333 (3) и 343 К (4)

изменении температуры в диапазоне $T = 288 \dots 373 \text{ К}$ коэффициент динамической вязкости уменьшается с 28,5 до $2,79 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ (см. табл. 1). Продолжительность первой фазы работы ВСТЖ $t_1 = 30 \text{ с}$.

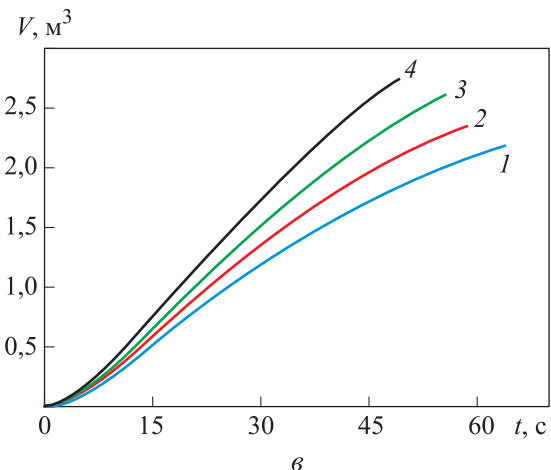
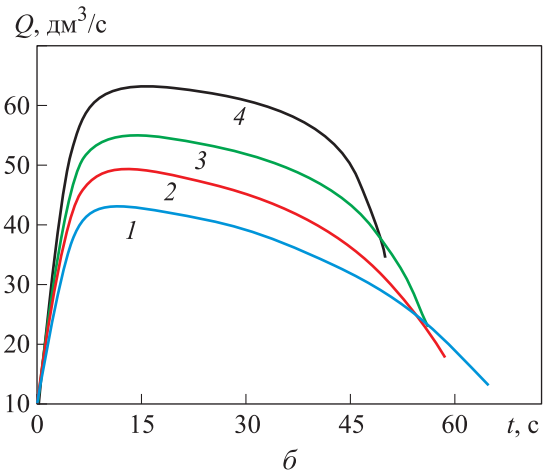
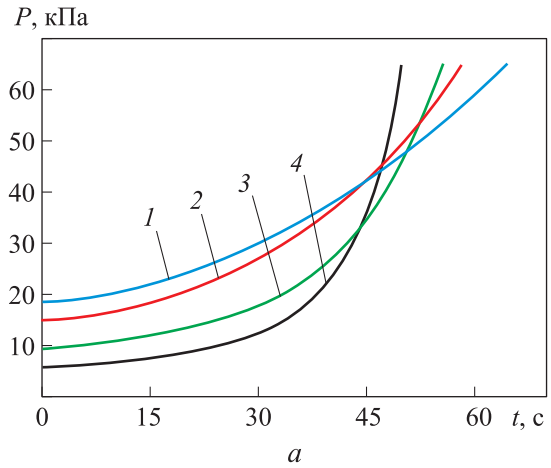


Рис. 5. Изменение параметров работы ВСТЖ во второй фазе при концентрации раствора серной кислоты $C = 95 \%$ и температуре откачиваемого ВВ $T = 293$ (1), 313 (2), 333 (3) и 363 К (4):
 а — давления ВВ в РК P ;
 б — текущего расхода жидкости в трубопроводе Q ;
 в — объема перекачиваемой жидкости V

На рис. 4 и 5, *a–в* приведены результаты расчета параметров работы ВСТЖ во второй фазе при концентрации раствора серной кислоты $C = 95\%$ и разной температуре откачиваемого ВВ.

Повышение температуры откачиваемого ВВ приводит к росту производительности ВВН. Поэтому давление в РК к концу первой фазы P_1 (и в начале второй) оказывается тем ниже, чем выше температура (см. рис. 4 и 5). Возрастание перепада давления вызывает увеличение расхода жидкости по трубопроводу во второй фазе работы ВСТЖ (см. рис. 5, *a*). В результате продолжительность второй фазы работы ВСТЖ t_2 уменьшается, а объем жидкости, перекачанной за один цикл V_1 , увеличивается.

Заметим, что изменение расхода жидкости во второй фазе имеет такой же характер, как и в работе [14]: сначала расход быстро нарастает, достигает максимума, а затем постепенно снижается по мере уменьшения перепада давления.

Средняя производительность ВСТЖ за две фазы ее работы

$$Q_{\text{cp}} = V_1 / (t_1 + t_2).$$

Механическая работа, затраченная насосом ЖВН-12Н на откачку воздуха из РК,

$$A_1(T) = \int_0^{t_1} \varphi[P(t, T)] dt.$$

Полезная работа рассчитывается по гидравлической мощности во второй фазе работы ВСТЖ

$$A_2(T) = \int_0^{t_2} [P_a - P(t, T)] Q(t, T) dt.$$

Показателями энергетической эффективности процесса являются КПД $\eta = 100 A_2 / A_1$ и энергоемкость (отношение затраченной работы к объему перекачанной жидкости) $E = A_1 / V_1$. Значения показателей работы ВСТЖ на базе ЖВН-12Н, рассчитанных при различных значениях температуры и концентрации раствора

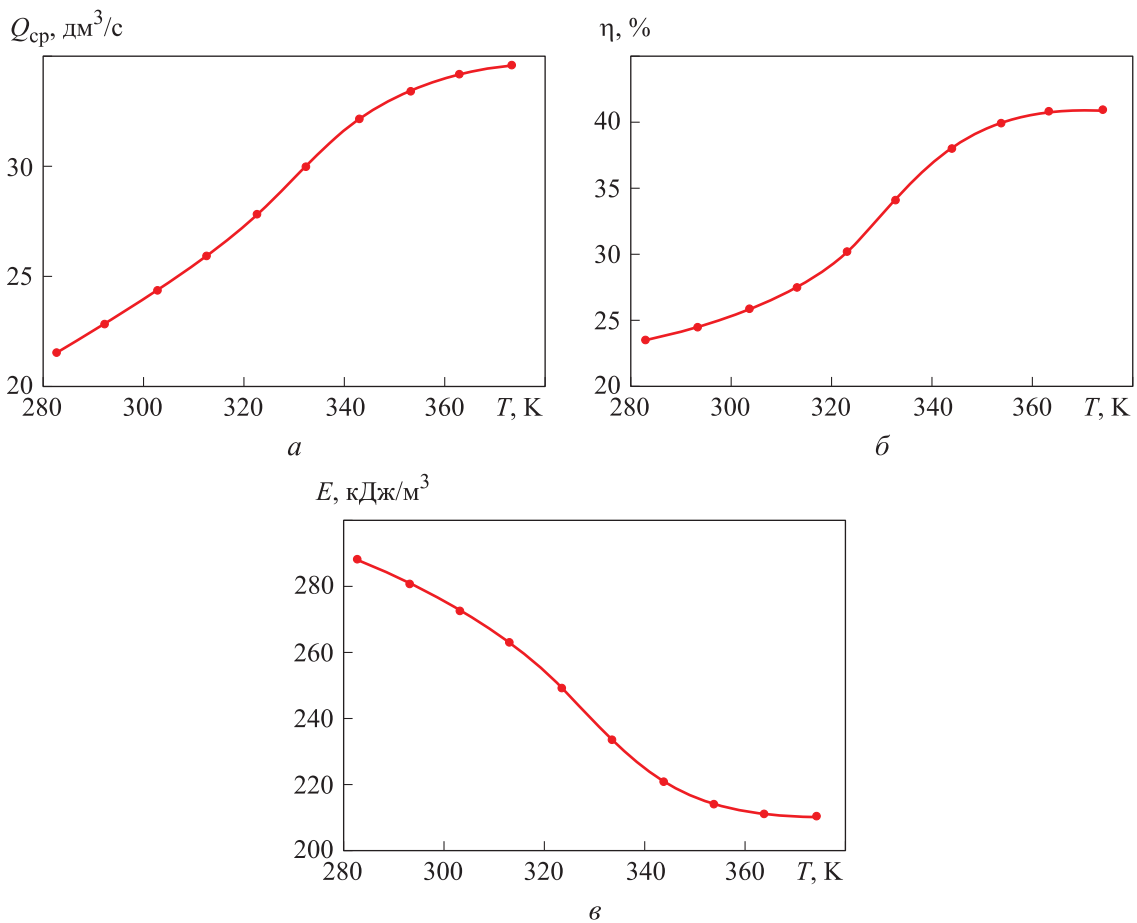


Рис. 6. Зависимости средней производительности Q_{cp} (*a*), КПД η (*б*) и энергоемкости E (*в*) ВСТЖ на базе ЖВН-12Н от температуры ВВ T при концентрации раствора серной кислоты $C = 95\%$

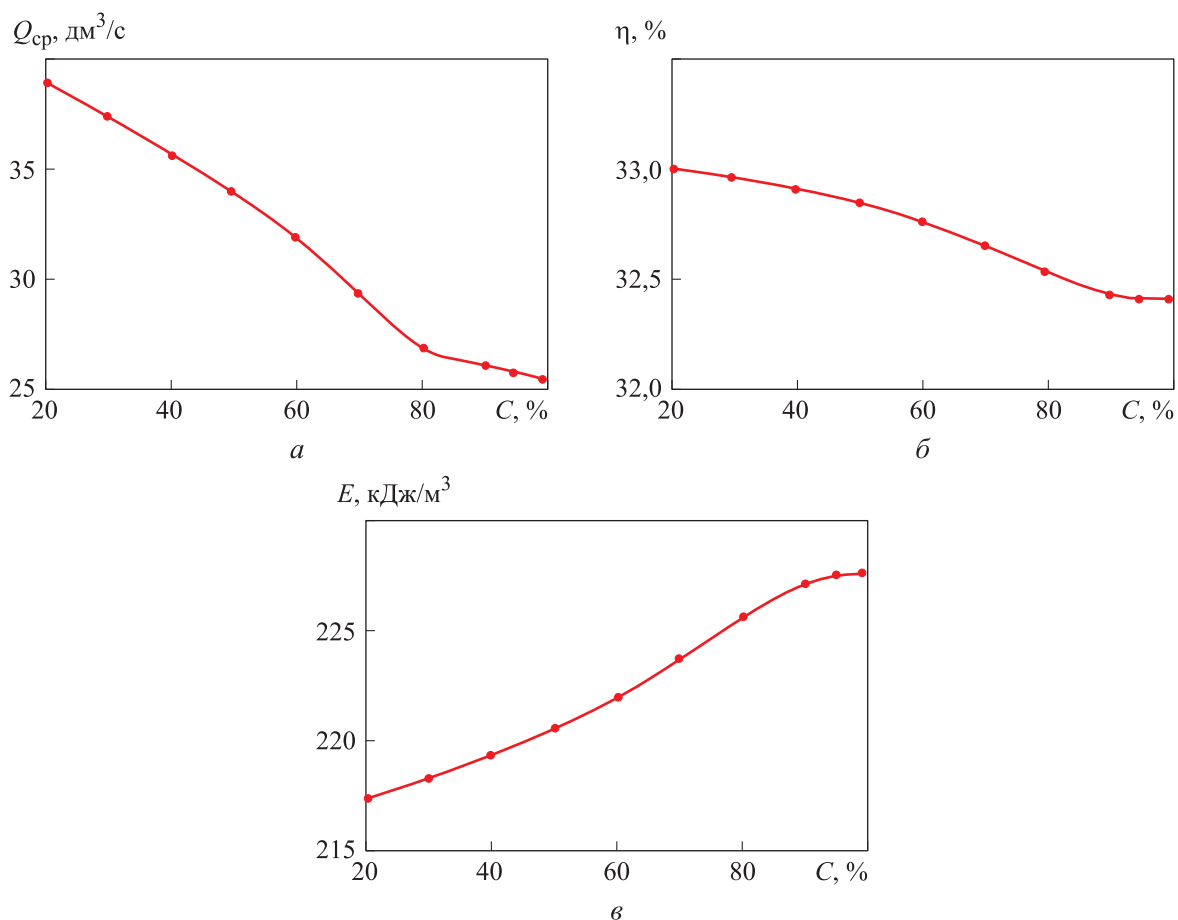


Рис. 7. Зависимости средней производительности Q_{cp} (а), КПД η (б) и энергоёмкости E (в) ВСТЖ на базе ЖВН-12Н от концентрации раствора серной кислоты при температуре ВВ $T = 303$ К

серной кислоты, приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

Выводы

1. Увеличение температуры откачиваемого ВВ с 283 до 373 К при 95%-ной концентрации раствора серной кислоты привело к росту средней производительности ВСТЖ на базе

ЖВН-12Н с 21,5 до 34,8 dm^3/s , КПД — с 23,4 до 41,2 % и снижению энергоёмкости от 288,2 до 209,9 kJ/m^3 .

2. Рост концентрации раствора серной кислоты при температуре 303 К с 20 до 98 % уменьшил производительность от 38,8 до 25,5 dm^3/s и увеличил энергоёмкость с 217,5 до 227,6 kJ/m^3 . При этом КПД снизился незначительно.

Литература

- [1] Hoffman D.M., Singh B., Thomas J.H. *Handbook of vacuum science and technology*. Academic Press, 1997. 835 p.
- [2] Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. Characteristics of plunger pumps. *Russ. Engin. Res.*, 2018, 38, pp. 428–430, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18060175>
- [3] Demikhov K.E., Ochkov A.A., Gordeeva U.S. Development of calculation method of main parameters of vacuum liquid transportation system. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 387, art. 012014, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/387/1/012014>
- [4] Великанов Н.Л., Наумов В.А. Компрессорные машины вакуумных рыбонасосов. *Рыбное хозяйство*, 2018, № 6, с. 78–81.

- [5] Yu H.M. Analysis on selection of water ring vacuum pumps in the chemical industry. *Appl. Mech. Mater.*, 2013, vol. 325–326, pp. 1435–1439, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.325-326.1435>
- [6] Qiu G.Q., Huang S., Zhu L.L., et al. Performance monitoring analysis of liquid ring vacuum pumps. *Appl. Mech. Mater.*, 2016, vol. 853, pp. 463–467, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.853.463>
- [7] Rodionov Y.V., Selivanov Y.T., Nikitin D.V., et al. New design of liquid ring vacuum pump. *Chem. Oil Gas Eng.*, 2019, vol. 6, pp. 22–25.
- [8] Zhang Y., Zhou F., Li J., et al. Application and research of new energy-efficiency technology for liquid ring vacuum pump based on turbulent drag reduction theory. *Vacuum*, 2020, vol. 172, art. 109076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109076>
- [9] Huang S., He J., Wang X., et al. Theoretical model for the performance of liquid ring pump based on the actual operating cycle. *Int. J. Rotating Mach.*, 2017, vol. 2017, art. 3617321, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/3617321>
- [10] Senda Y. Theoretical analysis of vacuum evacuation in viscous flow and its applications. *SEI Tech. Rev.*, 2010, vol. 71, pp. 4–10.
- [11] Rozanov L.N. Pump-down model of vacuum chambers with adsorbing walls. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 387, art. 012067, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/387/1/012067>
- [12] Наумов В.А., Великанов Н.Л., Землянов А.А. Производительность вакуумных рыбо-насосных установок большой мощности. *Рыбное хозяйство*, 2020, № 4, с. 101–105, doi: <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2020-4-101-105>
- [13] Великанов Н.Л., Наумов В.А. Динамические характеристики вакуумных насосов и компрессоров рыбонасосных установок. *Рыбное хозяйство*, 2019, № 1, с. 79–83.
- [14] Наумов В.А., Великанов Н.Л. Характеристики водокольцевых компрессорных машин вакуумных рыбонасосных установок. *Рыбное хозяйство*, 2021, № 1, с. 94–98, doi: <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-1-94-98>
- [15] Наумов В.А. Влияние температуры и влажности воздуха на рабочие характеристики водокольцевых вакуумных насосов. *Известия КГТУ*, 2020, № 56, с. 108–118.
- [16] Малинин К.М., ред. *Справочник серноокислотчика*. Москва, Химия, 1971. 744 с.
- [17] Anwar A., Mohammed B.S., Liew M.S., et al. Below-grade sulfur storage pits in oil refineries. A review. *J Fail. Anal. and Preven.*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1745–1760, doi: <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00773-0>
- [18] *Водокольцевые вакуум-насосы и компрессоры производительностью 0,75–12 м³/мин. Руководство по эксплуатации*. URL: http://servocompressor.ru/docs/vvn/vvn_vk.pdf (дата обращения: 30.01.2021).
- [19] Gardner denver nash. Liquid ring vacuum pumps [Electronic resource]. URL: <https://www.gardnerdenver.com/en-us/nash/products-and-systems/liquid-ring-vacuum-pumps> (дата обращения: 20.01.2021).

References

- [1] Hoffman D.M., Singh B., Thomas J.H. *Handbook of vacuum science and technology*. Academic Press, 1997. 835 p.
- [2] Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. Characteristics of plunger pumps. *Russ. Engin. Res.*, 2018, 38, pp. 428–430, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18060175>
- [3] Demikhov K.E., Ochkov A.A., Gordeeva U.S. Development of calculation method of main parameters of vacuum liquid transportation system. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 387, art. 012014, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/387/1/012014>
- [4] Velikanov N.L., Naumov V.A. Compressor machines of vacuum fish pump. *Rybnoe khozyaystvo* [Fisheries], 2018, no. 6, pp. 78–81. (In Russ.).
- [5] Yu H.M. Analysis on selection of water ring vacuum pumps in the chemical industry. *Appl. Mech. Mater.*, 2013, vol. 325–326, pp. 1435–1439, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.325-326.1435>

- [6] Qiu G.Q., Huang S., Zhu L.L., et al. Performance monitoring analysis of liquid ring vacuum pumps. *Appl. Mech. Mater.*, 2016, vol. 853, pp. 463–467, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.853.463>
- [7] Rodionov Y.V., Selivanov Y.T., Nikitin D.V., et al. New design of liquid ring vacuum pump. *Chem. Oil Gas Eng.*, 2019, vol. 6, pp. 22–25.
- [8] Zhang Y., Zhou F., Li J., et al. Application and research of new energy-efficiency technology for liquid ring vacuum pump based on turbulent drag reduction theory. *Vacuum*, 2020, vol. 172, art. 109076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109076>
- [9] Huang S., He J., Wang X., et al. Theoretical model for the performance of liquid ring pump based on the actual operating cycle. *Int. J. Rotating Mach.*, 2017, vol. 2017, art. 3617321, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/3617321>
- [10] Senda Y. Theoretical analysis of vacuum evacuation in viscous flow and its applications. *SEI Tech. Rev.*, 2010, vol. 71, pp. 4–10.
- [11] Rozanov L.N. Pump-down model of vacuum chambers with adsorbing walls. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 387, art. 012067, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/387/1/012067>
- [12] Naumov V.A., Velikanov N.L., Zemlyanov A.A. Performance of high-power vacuum fish pumping units. *Rybnoe khozyaystvo* [Fisheries], 2020, no. 4, pp. 101–105, doi: <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2020-4-101-105> (in Russ.).
- [13] Velikanov N.L., Naumov V.A. Dynamic characteristics of vacuum pumps and compressors of fish pumping facilities. *Rybnoe khozyaystvo* [Fisheries], 2019, no. 1, pp. 79–83. (In Russ.).
- [14] Naumov V.A., Velikanov N.L. Characteristics of water ring compressor machines vacuum fish pumping units. *Rybnoe khozyaystvo* [Fisheries], 2021, no. 1, pp. 94–98, doi: <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-1-94-98> (in Russ.).
- [15] Naumov V.A. Air temperature and humidity effect on the performance of water ring vacuum pumps. *Izvestiya KGTU* [KSTU News], 2020, no. 56, pp. 108–118. (In Russ.).
- [16] Malinin K.M., ed. *Spravochnik sernokislotchika* [Handbook for sulphuric acid-worker]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 744 p. (In Russ.).
- [17] Anwar A., Mohammed B.S., Liew M.S., et al. Below-grade sulfur storage pits in oil refineries. A review. *J Fail. Anal. and Preven.*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1745–1760, doi: <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00773-0>
- [18] *Vodokol'tseve vakuuum-nasosy i kompressory. proizvoditel'nost'yu 0,75–12 m³/min. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Ring vacuum pumps and compressors with 0.75–12 m³/min output. User manual]. URL: http://servocompressor.ru/docs/vvn/vvn_vk.pdf (accessed: 30.01.2021). (In Russ.).
- [19] Gardner Denver Nash. Liquid ring vacuum pumps [Electronic resource]. URL: <https://www.gardnerdenver.com/en-us/nash/products-and-systems/liquid-ring-vacuum-pumps> (accessed: 20.01.2021).

Статья поступила в редакцию 10.05.2021

Информация об авторах

ВЕЛИКАНОВ Николай Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиноведения и технических систем. Балтийский федеральный университет имени И. Канта (236029, Калининград, Российская Федерация, ул. Озерова, д. 57, e-mail: monolit8@yandex.ru).

НАУМОВ Владимир Аркадьевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования. Калининградский государственный технический университет (236000, Калининград, Российская Федерация, Советский проспект, д. 1, e-mail: van-old@mail.ru).

Information about the authors

VELIKANOV Nikolai Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Engineering Science and Technical Systems. Immanuel Kant Baltic Federal University (236029, Kaliningrad, Russian Federation, Ozerova St., Bldg. 57, e-mail: monolit8@yandex.ru).

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Великанов Н.Л., Наумов В.А. Транспортирование серной кислоты вакуумной установкой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 11, с. 81–90, doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-81-90

Please cite this article in English as:

Velikanov N.L., Naumov V.A. Transportation of Sulfuric Acid with Vacuum Unit. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 11, pp. 81–90, doi: 10.18698/0536-1044-2021-11-81-90



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Материаловедение и технология обработки материалов»

Авторы: А.Ф. Третьяков, Л.В. Тарасенко

Изложены закономерности формирования строения материалов в процессе кристаллизации, пластического деформирования, термической обработки и сварки. Приведены технологические способы управления строением и свойствами сплавов, основные свойства конструкционных и инструментальных материалов. Рассмотрены физико-химические процессы, протекающие при изготовлении изделий в парогазовой, жидкой, твердожидкой и твердой фазах, принципы выбора оптимальной марки материала и метода получения проектируемых изделий. Даны примеры изготовления деталей машин обработкой давлением и резанием, литьем и сваркой.

Второе издание (1-е изд. — 2014 г.) дополнено сведениями по аддитивным технологиям, формированию фасонных изделий из твердожидких заготовок, а также о новом технологическом процессе — сварке трением с перемешиванием.

Для студентов технических университетов, обучающихся по машиностроительным направлениям подготовки, а также для преподавателей и инженеров.

По вопросам приобретения обращайтесь:

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