

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ВОДОКОЛЬЦЕВЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ



А.А. Землянов, студент строительного факультета, ФГБОУ ВО
«Калининградский государственный технический университет»,
e-mail: zemlyanov99@gmail.com

В.А. Наумов, д-р. техн. наук, проф., зав. кафедрой водных ресурсов и
водопользования, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»,
e-mail: van-old@mail.ru

Статья посвящена анализу применимости предложенной математической модели для описания зависимости производительности водокольцевых вакуумных насосов от давления воздуха в рабочей камере. Использована ранее опубликованная полуэмпирическая математическая модель, описывающая исследуемую зависимость. Произведена оцифровка значений с графиков испытаний насосов, к полученным данным применена введенная гипотеза. По результатам вычислений и анализа графиков сделан вывод о возможности применения гипотезы.

Вакуумный водокольцевой насос, расход, давление, модель

Водокольцевые вакуумные насосы (ВКН) (рисунок 1) характеризуются надежностью конструкции, отсутствием быстроизнашивающихся деталей, простотой эксплуатации, нечувствительностью к гидравлическим ударам и малый нагрев газа [1]. Благодаря этому они широко используются в современных системах. Однако у ВКН есть значительный недостаток - низкий коэффициент полезного действия. Опубликованы результаты теоретических исследований по повышению эффективности применения ВКН [2].

Данная работа посвящена анализу применимости ранее предложенной математической модели для описания зависимости производительности ВКН от давления воздуха в рабочей камере. Основой исследования послужила статья [3].

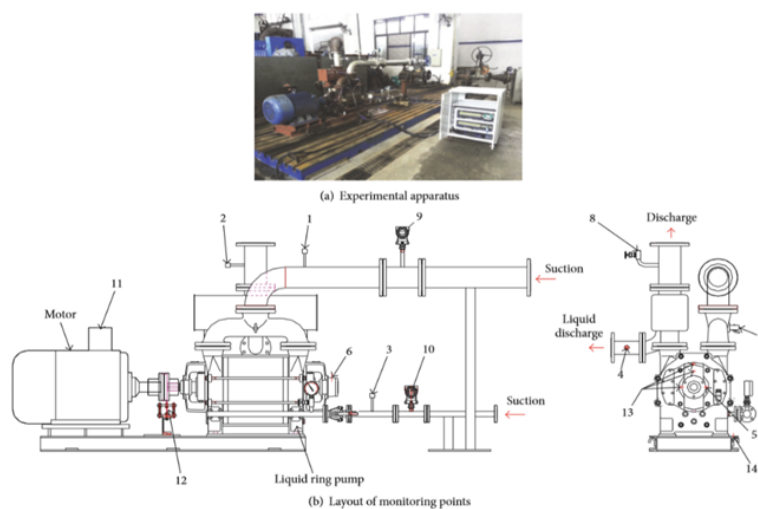


FIGURE 4: Experimental facility. 1—suction temperature; 2—discharge temperature; 3—liquid suction temperature; 4—liquid discharge temperature; 5—drive bearing temperature; 6—non-driven bearing temperature; 7—suction pressure; 8—discharge pressure; 9—air capacity; 10—liquid capacity; 11—power; 12—rotational speed; 13—X/Y/Z-direction vibration; 14—substructure vibration.

Рисунок 1 – Устройство водокольцевого насоса [1]

Математическая модель в ней является полуэмпирической, базируется на балансовом соотношении: объемный расход воздуха Q_S (отнесенный к условиям всасывания) равен разности между теоретическим расходом Q_T и расходом газа, возвращающегося к зоне всасывания Q_E (рис. 2):

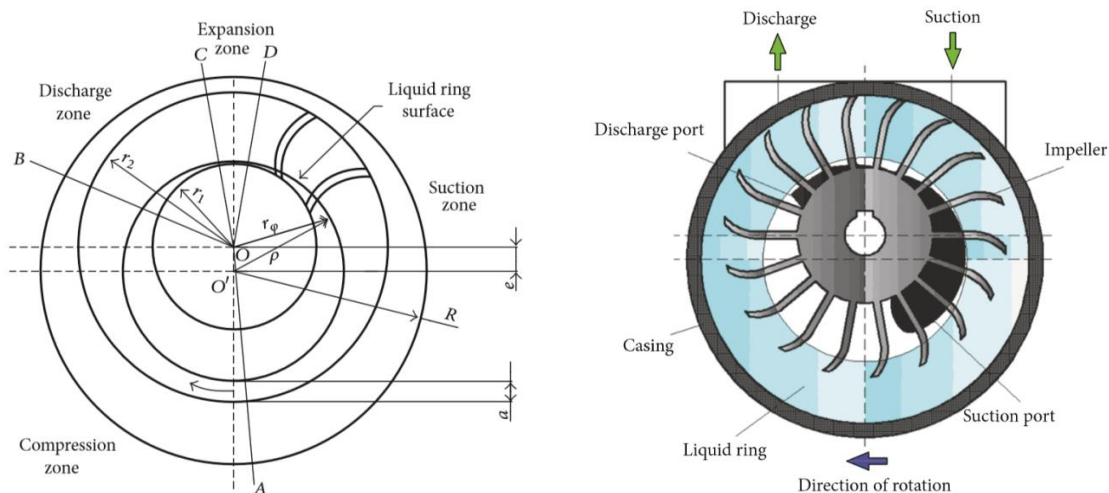


Рисунок 2 – Составляющие механизма ВКН [3]

Суть исследования заключалась в следующем. За основу были взяты графики сравнения кривых расхода между тестовой и теоретической моделями (рис. 3).

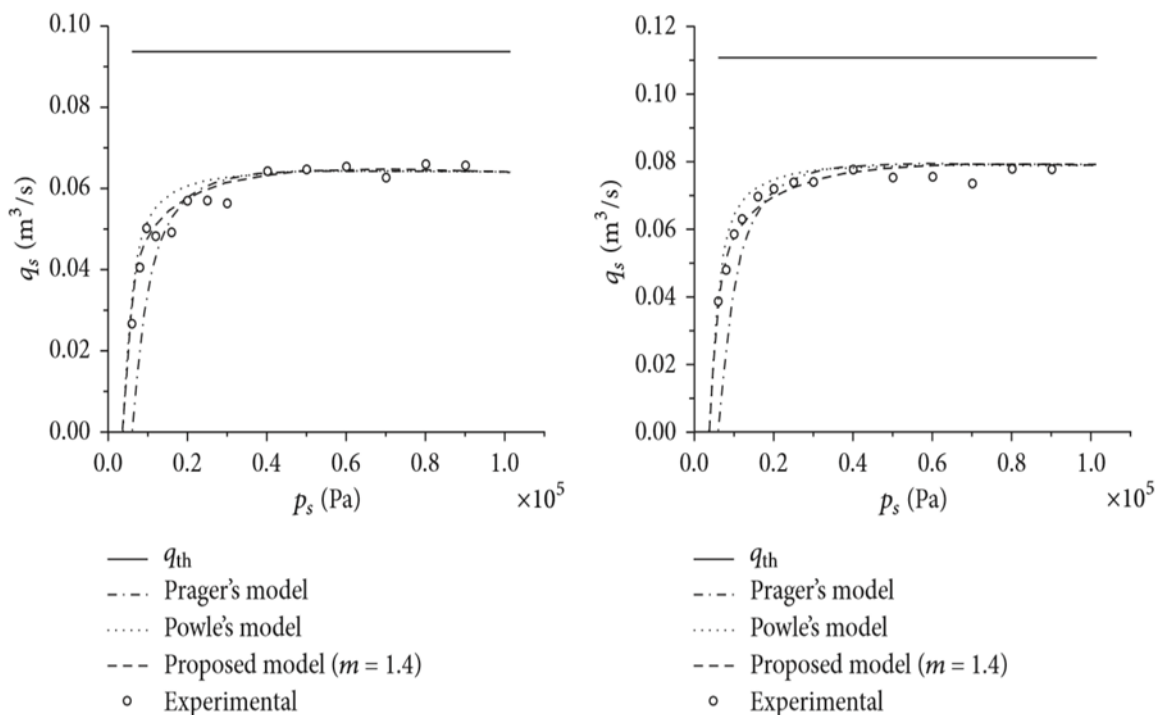


Рисунок 3 – Кривые расхода [3]

При помощи программы Graph2Digit (рис. 4) тестовые значения были получены в цифровой форме, а затем перенесены в среду MathCad. К полуэмпирической модели были подобраны значения двух параметра Q_0 и Q . Они определялись из условия наилучшего согласия результатов расчетов с экспериментальными данными для каждого ВКН.

Была выдвинута следующая гипотеза о зависимости расхода от давления:

$$Q(p) = Q_t - Q_e \left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{1}{m}}, \quad (1)$$

где Q_t – теоретический расход, м³/с;
 Q_e – расход газа, возвращающегося к зоне всасывания, м³/с;
 p_a – атмосферное давление, Па;
 p – давления воздуха в рабочей камере, Па;
 m – показатель расширения газа.

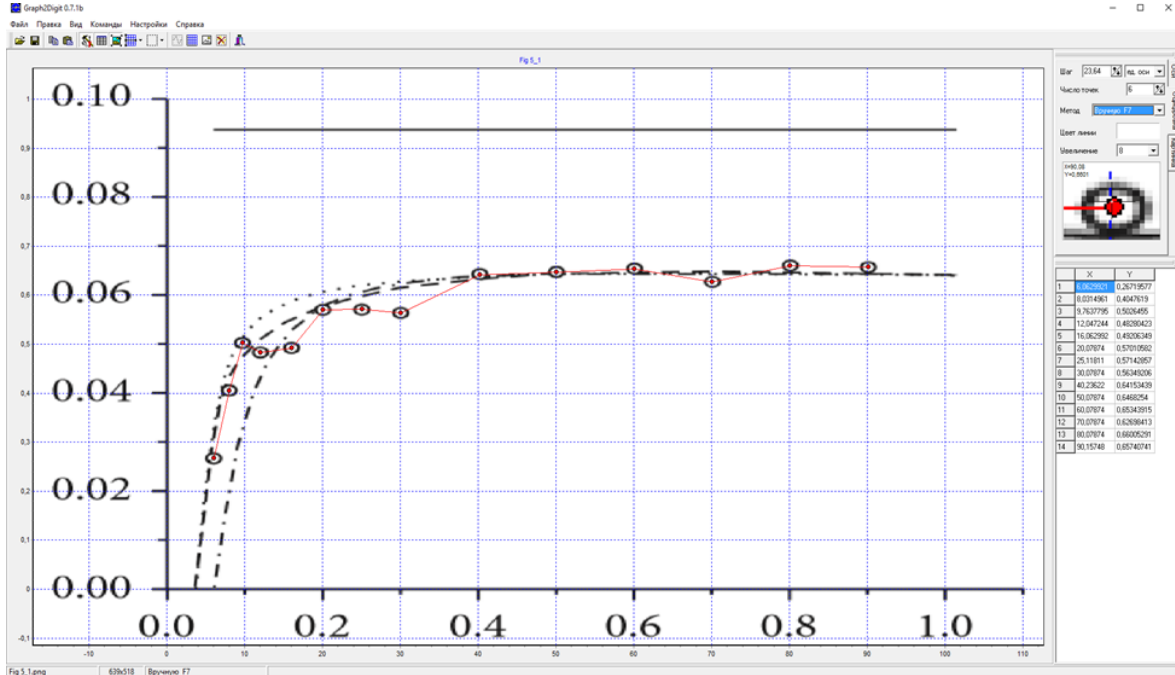


Рисунок 4 – Интерфейс программы оцифровки графиков

Подставив $p = p_a$ в (1), получаем максимальное значение расхода:

$$Q_m = Q(p_a) = Q_t - Q_e. \quad (2)$$

Значение Q_m берем из графика результатов испытаний (рис. 4). Из (2) выражаем $Q_e = Q_t - Q_m$ и подставляем в (1):

$$Q(p) = Q_t - (Q_t - Q_m) * \left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{1}{m}} = Q_t * \left[1 - \left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{1}{m}}\right] + Q_m * \left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{1}{m}}. \quad (3)$$

Метод наименьших квадратов [4] применяем для того, чтобы по экспериментальным данным найти Q_t . Сумма квадратов отклонений:

$$S = \sum_i [Q_i - Q(p)]^2 = \sum_i \left[Q_i - Q_t \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{\frac{1}{m}}\right) - Q_m \left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{\frac{1}{m}} \right]^2. \quad (4)$$

Производная от S по искомому параметру:

$$\frac{\partial S}{\partial Q_t} = -2 \sum_i \left[Q_i - Q_t \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{\frac{1}{m}}\right) - Q_m \left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{\frac{1}{m}} \right] * \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{\frac{1}{m}}\right). \quad (5)$$

Для нахождения значения Q_t , при котором S имеет минимум, приравняем (4) к нулю, раскрывая скобки:

$$\sum_i Q_i \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\frac{1}{m}} \right] - Q_t \sum \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^2 - Q_m \sum \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\frac{1}{m}} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\frac{1}{m}} \right] = 0. \quad (6)$$

Получаем уравнение $S_1 - Q_t S_2 - Q_m S_3 = 0$, откуда $Q_t = \frac{S_1 - Q_m S_3}{S_2}$.

Проверяем применимость модели при двух значениях показателя газового процесса сжатия: $m = 1$ – изотермический процесс; $m = 1,4$ – адиабатный процесс.

По результатам вычислений строятся индивидуальные графики для каждого насоса (рис. 5) и общий график для безразмерных расходов (рис. 6). Для улучшения читаемости графика были убраны кривые, отличавшиеся менее чем на 0.5%.

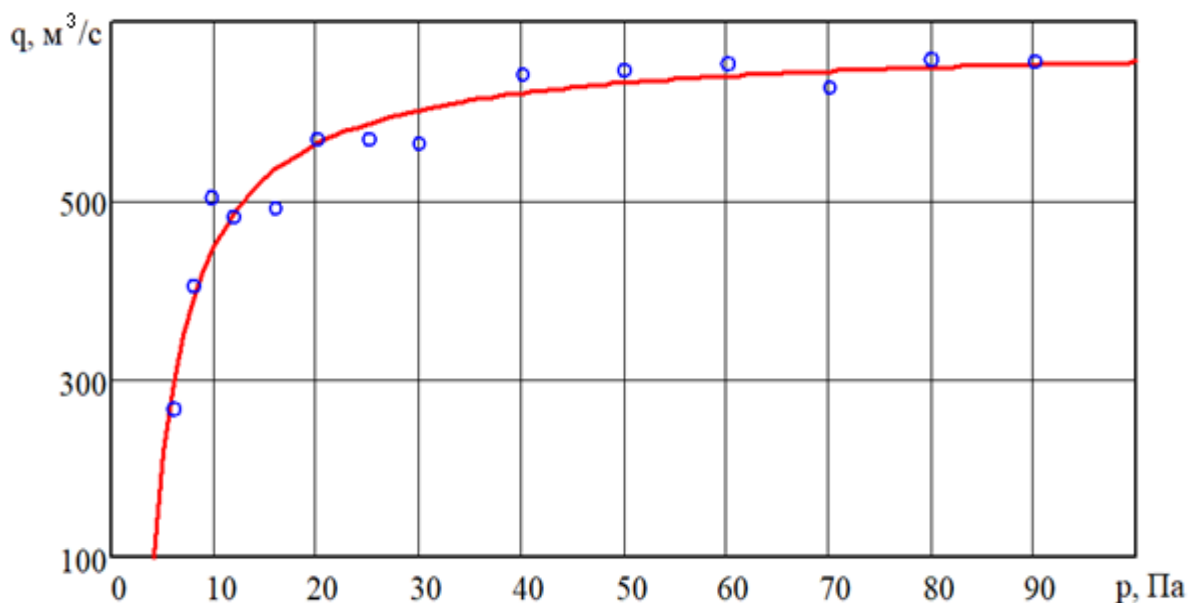


Рисунок 5 – Построение нагрузочной характеристики в среде MathCad: точки – экспериментальные данные [3], линия – результат расчета по формуле (1)

Далее, исходя из полученных данных, вводим среднюю нагрузочную характеристику:

$$q_s(p) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^n q_i(p). \quad (7)$$

И рассчитываем относительные отклонения от среднего для каждого насоса по формуле:

$$\varepsilon_i(p) = \frac{q_i(p) - q_s(p)}{q_s(p)}. \quad (8)$$

На рис. 7 представлен график относительных отклонений от среднего, на котором явно видно, что при номинальном режиме ($p > 40$ кПа) относительная погрешность составляет менее 4 %, в то время как в [3] это значение – от 13 % до 2 %.

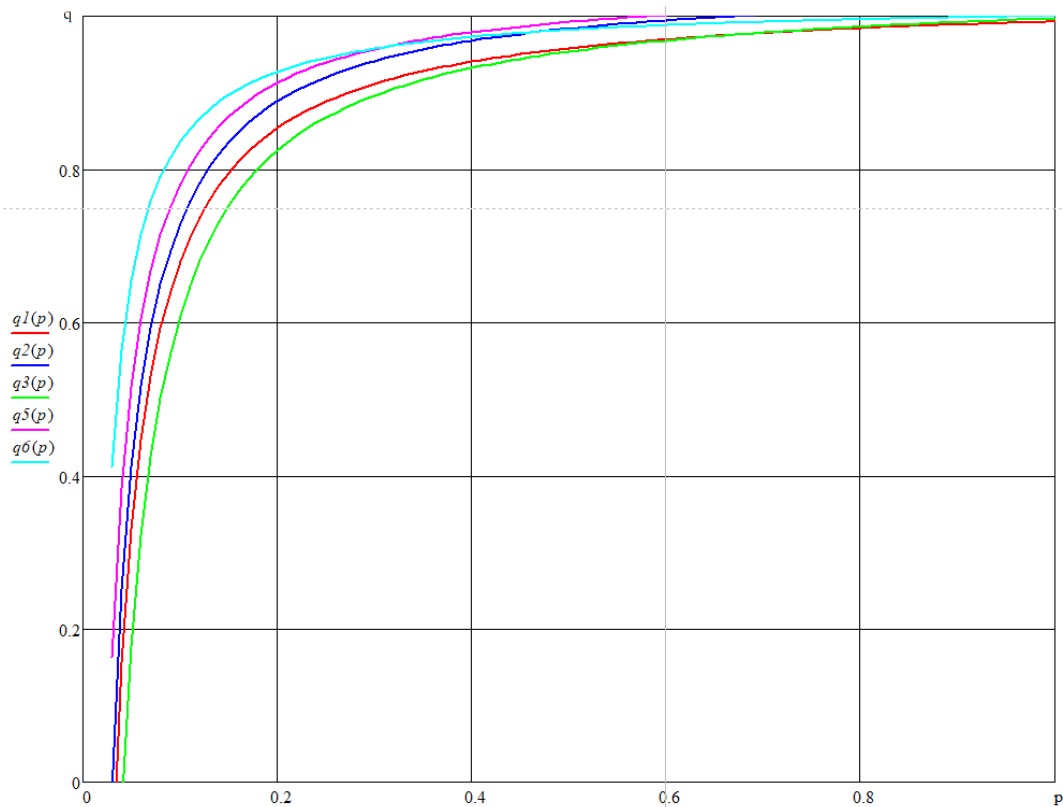


Рисунок 6 – График безразмерных расходов в среде MathCad:

$q1(p)$ – безразмерный расход первого насоса; $q2(p)$ – безразмерный расход второго насоса;
 $q3(p)$ – безразмерный расход третьего насоса; $q5(p)$ – безразмерный расход пятого насоса;
 $q6(p)$ – безразмерный расход шестого насоса

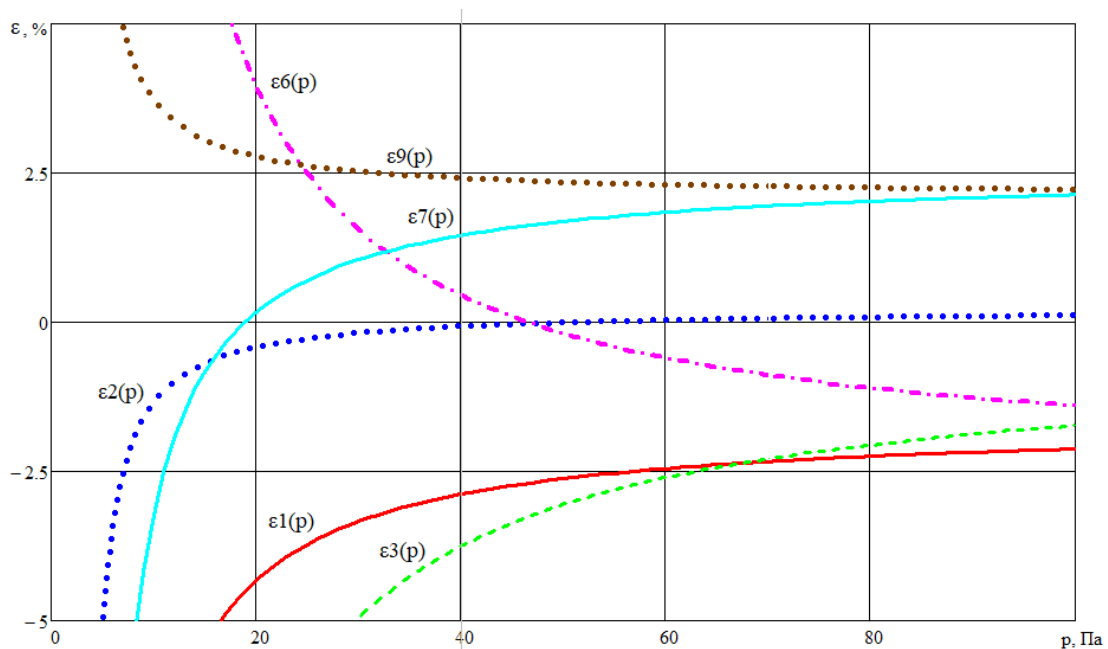


Рисунок 7 – Графики относительных отклонений от средних значений:

$\epsilon1(p)$ – относительное отклонение расхода первого насоса от среднего;
 $\epsilon2(p)$ – относительное отклонение расхода второго насоса от среднего;
 $\epsilon3(p)$ – относительное отклонение расхода третьего насоса от среднего;
 $\epsilon6(p)$ – относительное отклонение расхода шестого насоса от среднего;
 $\epsilon7(p)$ – относительное отклонение расхода седьмого насоса от среднего;
 $\epsilon9(p)$ – относительное отклонение расхода девятого насоса от среднего

Таким образом, можно сделать вывод, что полученные данные можно использовать

для моделирования и подбора насосов, принимая безразмерную форму нагрузочной характеристики единой, по крайней мере, для исследованных моделей водокольцевых вакуумных насосов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутья, О.В. Преимущества эксплуатации вакуумных водокольцевых насосов / О.В. Кутья // Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства. – 2011. – Вып. 110. – С. 69-73.
2. Великанов, Н.Л. Компрессорные машины вакуумных рыбонасосов / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов // Рыбное хозяйство. – 2018. – № 6. – С. 78-81.
3. Huang, S. Theoretical model for the performance of liquid ring pump based on the actual operating cycle / S. Huang, J. He, X. Wang, G. Qiu // International Journal of Rotating Machinery. – 2017. – 9 p. – URL: <https://doi.org/10.1155/2017/3617321>.
4. Наумов, В.А. Математическое моделирование: учебно-методическое пособие по лабораторным работам в среде MathCad / В. А. Наумов. – Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ», 2015. – 73с.

APPLICATION OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES FOR TREATING THE TEST RESULTS OF WATER-RING VACUUM PUMPS

A.A. Zemlyanov,
e-mail: zemlyanov99@gmail.com

V.A. Naumov V.A.,
e-mail: van-old@mail.ru
Kaliningrad State Technical University

The article is devoted to the analysis of the applicability of the proposed mathematical model for describing the dependence of the performance of water ring vacuum pumps on the air pressure in the working chamber. The previously published semi-empirical mathematical model describing the dependence under investigation is used. Theoretical values were digitized from pump test schedules and the entered hypothesis was applied to the obtained data. According to the results of calculations and analysis of graphs, it was concluded that the hypothesis can be applied.

Vacuum water ring pump, flow, pressure, model