

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВАКУУМНОЙ РЫБОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ



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

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

Статья посвящена разработке способа расчета производительности и коэффициента полезного действия вакуумной рыбонасосной установки при помощи математического моделирования этапов ее работы. Статья подготовлена по плану госбюджетной научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы, проводимой в рамках государственного задания на выполнение государственных работ 2020 г. «Моделирование работы вакуумных рыбонасосных установок». В результате дана оценка эффективности конкретной ВРУ. Сделан вывод о возможности применения методики.

***Ключевые слова:** вакуумная рыбонасосная установка, вакуумный водокольцевой насос, расход, давление, эффективность*

ВВЕДЕНИЕ

Вакуумные рыбонасосные установки (ВРУ) используются для транспортировки рыбы и отличаются обеспечением наименьшей повреждаемости объектов лова. Поэтому в настоящее время они широко применяются наряду с центробежными рыбонасосами [1, 2]. Однако в сравнении с последними ВРУ обладают значимым недостатком – низкой энергетической эффективностью. Это связано с тем, что процесс вакуумной откачки характеризуется гораздо большими энергетическими затратами, чем при перекачивании жидкостей центробежными насосами.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является вакуумная рыбонасосная установка и ее характеристики. В качестве объекта моделирования принята ВРУ на базе водокольцевых компрессорных машин (ВКМ) Samson KS-625 VS 2000, которые применяет компания Euskan Fish Systems. Расчеты производятся по параметрам ВРУ из [3], рабочие характеристики ВКМ взяты из [4].

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Необходимо на основе математического моделирования выполнить поиск параметров и режимов, которые позволят повысить энергетическую эффективность и производительность вакуумных рыбонасосов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В [5] было предложено математическое описание этапов работы ВРУ, которое далее и будет использовано. Проведем расчет коэффициента гидродинамического сопротивления

водорыбной смеси. Для этого определим коэффициент гидравлического сопротивления в трубопроводе, воспользовавшись формулой Альтшуля (1):

$$\lambda_0(Re) = 0,11 * \left(\frac{\Delta * 10^{-3}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (1)$$

где Re - число Рейнольдса;
 d – внутренний диаметр трубопроводов, м;
 Δ – абсолютная шероховатость трубопроводов, мм;

Дальнейший расчет ведем по эмпирическим формулам из [6]:

$$W_k(\theta) = 1,1 * (1 + 3,333 * \theta), \quad (2)$$

$$Re_k(\theta) = W_k(\theta) * \frac{d}{\nu}, \quad (3)$$

$$K_k(\theta) = 0,015 * (1 + 3,333 * \theta), \quad (4)$$

$$b(\theta) = (3,2 - 6,4 * \theta) * 10^{-5}, \quad (5)$$

$$B(\theta) = \frac{A_1(\theta)}{\lambda_0(Re_k(\theta)) * K(\theta) * Re_k(\theta)} - 1, \quad (6)$$

$$R(Re) = Re - Re_k(\theta), \quad (7)$$

$$A_1(\theta) = K_k(\theta) * \frac{2 * g * d^2}{\nu}, \quad (8)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости воды;
 θ – доля рыбы в водорыбной смеси.

Выполняем построение кривой (рис. 1).

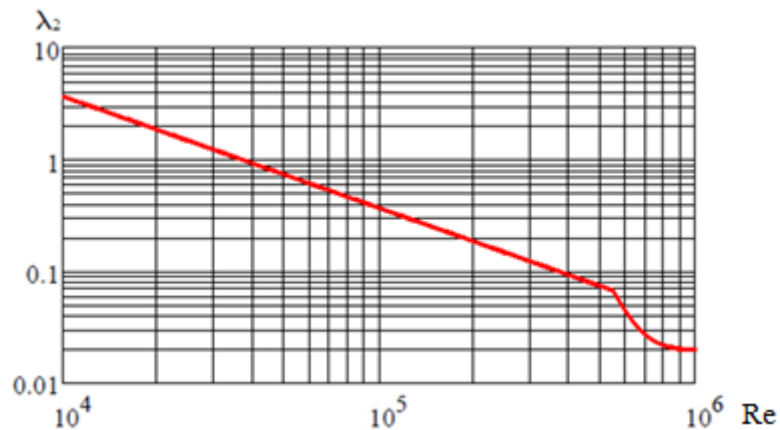


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента потерь на трение от числа Рейнольдса при заданной концентрации водорыбной смеси

В работе ВРУ используется циклический принцип, который основан на использовании с помощью компрессорных машин поочередно то вакуума, то избыточного давления в рабочей емкости. Из-за такой очередности установка имеет два этапа: всасывание и выброс [5]. Задаемся параметрами работы компрессорной машины:

Q - расход водорыбной смеси при частоте вращения n об/мин, м³/ч;

N - затраченная мощность при частоте вращения 1000 об/мин, кВт;

Выполняем расчет нагрузочных характеристик в режиме вакуумного насоса (рис. 2).

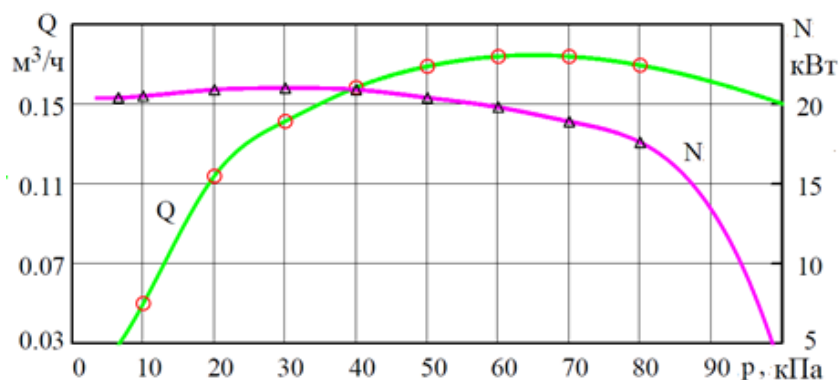


Рисунок 2 – Нагрузочная характеристика установки в режиме вакуумного насоса.
Точки – экспериментальные данные [4], линии – результаты расчета

Графики функций $Q(p)$ и $N(p)$ - результат кубической сплайн-интерполяции при значениях давления в емкости от минимального (3,4 кПа) до атмосферного (100 кПа).

Определяем параметры работы в режиме компрессора. Графики функций $Q_k(p)$ и $N_k(p)$ - результат полиномиальной регрессии при степени полинома $k=1$. Суть графиков такова, что приближение к максимальному давлению в системе (порядка 300 кПа) приводит к «холостому ходу» - мощность остается максимальной, а расход водорыбной смеси прекращается (рис. 3).

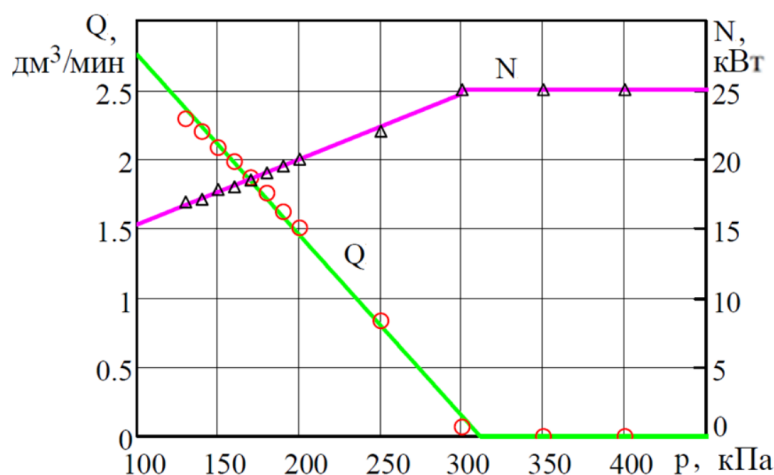


Рисунок 3 – Нагрузочная характеристика установки в режиме компрессора (воздуходувки).
Точки – экспериментальные данные [4], линии – результаты расчета

Далее следует моделирование этапов работы вакуумной рыбонасосной установки. Первым этапом является этап всасывания. На нем происходит откачка воздуха из бака (повышение давления при постоянном объеме), описываемая уравнением

$$V_0 * \frac{d}{dt} = q_2(p(t)) * [k - P_{ak} - p(t) * (1 + k)], \quad (9)$$

где $p(t)$ – абсолютное давление в резервуаре;

$q_2(p(t))$ – зависимость производительности от давления конкретной ВКМ;

P_{ak} – атмосферное давление, кПа;

k – коэффициент утечки;

Начальные условия первой фазы первого этапа

$$p(0) = P_{ak} \quad (10)$$

На графике $p(t)$ – решение дифференциального уравнения (9) относительно t , $A(t)$ – механическая работа, совершенная в процессе откачки (рис. 4).

Определяем затраченную за первую фазу первого этапа

$$A_{11} = 1\,208 \text{ кДж}$$

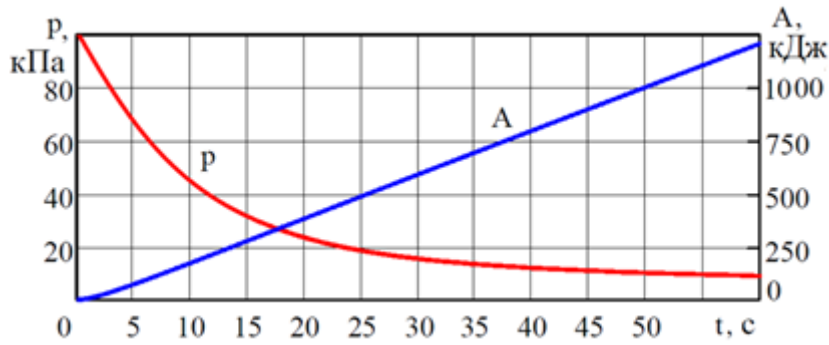


Рисунок 4 - График изменения давления и затраченной работы по времени в первой фазе

Следующей фазой первого этапа является всасывание водорыбной смеси в бак. Поскольку в процессе движения водорыбной смеси давление изменяется, образуется нестационарное течение. Опишем его, пользуясь уравнением Бернулли. Начальные условия второго этапа первой фазы:

$$P_0 = p_{t1}(T_{11}), \quad (11)$$

$$V_{min} = \frac{P_0 * V_0}{P_{ak} - \frac{\rho_c}{1000} * g * H_{01}}, \quad (12)$$

$$V_{12} = V_0 - V_{min}, \quad (13)$$

где P_0 – абсолютное давление в конце первой фазы первого этапа, кПа;

T_{11} – предварительно заданная длительность первой фазы первого этапа, с;

V_{min} – минимальный объем воздуха, при котором прекращается движение жидкости, м³;

V_0 – объем резервуара, м³;

H_{01} – перепад уровней высот всасывающего трубопровода, м.

Уравнение изменения объема воздуха в резервуаре:

$$\frac{d}{dt} V(t) = -W(t) * S_0, \quad (14)$$

где W – скорость жидкости в трубопроводе, м/с

S_0 – площадь поперечного сечения трубопроводов, м²

Уравнение нестационарного движения жидкости в одномерном приближении имеет вид:

$$\frac{d}{dt} W(t) = \frac{1}{L_1} \left(\frac{1}{\rho_c} \left(P_a - H_{01} * \rho_c * g - \frac{V_0 * P_0 * 1000}{V(t)} \right) \right) - 0,5(1 + 1,1 * L_{d1} * \lambda_2 \left(W(t) * \frac{d}{v} \right)) * W(t)^2, \quad (15)$$

где L_1 – длина всасывающего трубопровода, м;

L_{d1} – отношение длины всасывающего трубопровода к его внутреннему диаметру.

Решаем дифференциальные уравнения и определяем изменение объема, давления и скорости по времени (рис. 5). Вычисляем время второй фазы первого этапа

$$T_{12} = 12,56 \text{ с}$$

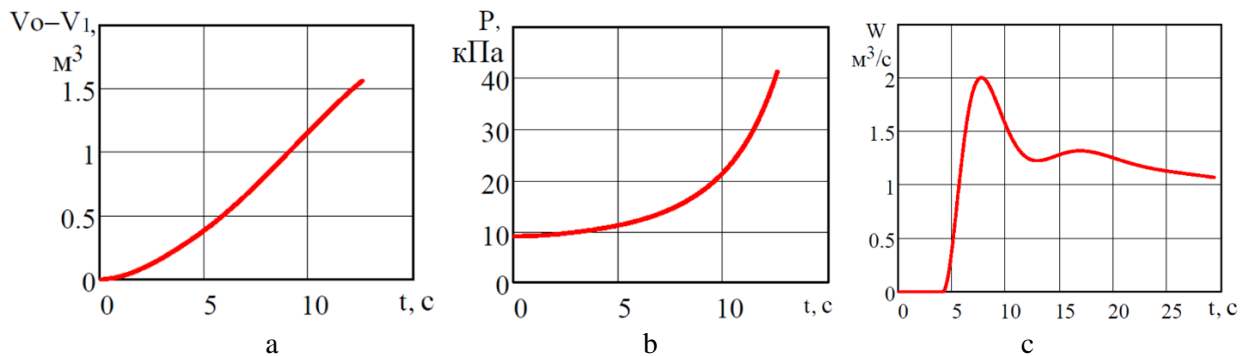


Рисунок 5 - Изменение параметров по времени на первом этапе работы ВРУ: а – объема жидкости в баке, b – давления в баке, с – скорости движения водорыбной смеси в трубопроводе

Таким образом, полное время первого этапа (режим всасывания) составит:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_{11} + T_{12} \\ T_1 &= 60 + 12,56 = 72,56 \text{ с} \end{aligned} \quad (16)$$

Определяем полезную работу через гидравлическую мощность:

$$A_{12} = 130,95 \text{ кДж}$$

Коэффициент полезного действия первого этапа работы установки составляет:

$$\eta_1 = 0,108$$

Давление в конце первого (начале второго) этапа:

$$P_{o1} = 41,204 \text{ кПа}$$

Следующий этап – вытеснения жидкости. Первоначально происходит нагнетание воздуха в бак. Первая фаза второго этапа продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто необходимое для движения воды давление P_{o2} . Начальные условия:

$$P_{o2} = P_{ak} + \frac{\rho_c}{1000} * g * \left(H_{o2} - \frac{V_{o2}}{S_1} \right), \quad (17)$$

$$V_{o2} = V_0 - V_{min}, \quad (18)$$

где H_{o2} – перепад уровней нагнетательного трубопровода, м;

S_1 – площадь основания резервуара, м^2 .

Дифференциальное уравнение закачки воздуха в резервуар

$$\frac{d}{dt} P(t) = \frac{q_k(P(t)) * (P(t)(1-k) + P_{ak} * k)}{V_0 - V_{o2}}, \quad (19)$$

где $q_k(P)$ - зависимость производительности конкретной ВКМ (в режиме воздуходувки) от давления в резервуаре

Время, затраченное в первой фазе второго этапа работы установки

$$T_{21} = 4,15 \text{ с.}$$

Завершающей является фаза вытеснения водорыбной смеси из бака. Вторая фаза второго этапа описывается тремя дифференциальными уравнениями

$$\frac{d}{dt} V(t) = -W(t) * S_0, \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt} P(t) = \frac{q_k(P(t)) * (P(t)(1-k) + P_{ak} * k) - P(t) * W(t) * S_0}{V_0 - V(t)}, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} W(t) &= \frac{1}{L_2} \left(\frac{\rho_c}{1000} (P(t) - P_{ak}) \right) - g \left(H_{o2} - \frac{V(t)}{S_1} \right) - \\ &- 0,5 * (1 + 1,1 * L_{d2} * \lambda_2 \left(W(t) * \frac{d}{v} \right)) * W(t)^2, \end{aligned} \quad (22)$$

где L_2 – длина нагнетательного трубопровода, м

L_{d2} – отношение длины нагнетательного трубопровода к его внутреннему диаметру

Решаем систему уравнений. Определяем время, затраченное на втором этапе:

$$T_{22} = 25,09 \text{ с}$$

Аналогично формуле (16):

$$T_2 = 4,15 + 25,21 = 29,36 \text{ с}$$

Результаты вычислений оформляем в виде графиков (Рисунок 6).

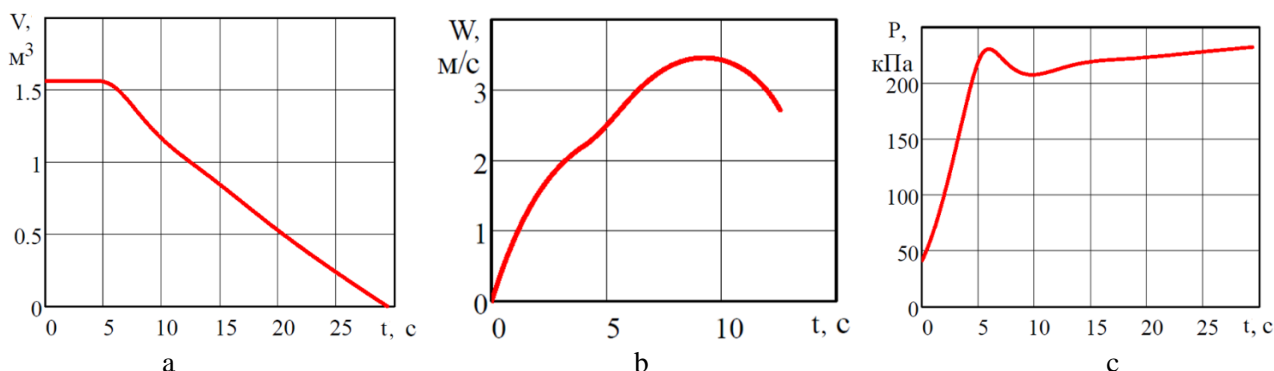


Рисунок 6 – Изменение параметров по времени на втором этапе работы ВРУ: а – объема жидкости в камере, б – скорости жидкости в нагнетательном трубопроводе, с - абсолютного давления в камере

Определяем параметры энергоэффективности и производительности. Затраченная и полезная работа на втором этапе работы установки,

$$A_{21} = 594,1 \text{ кДж}$$

$$A_{22} = 186,73 \text{ кДж}$$

Тогда коэффициент полезного действия всего процесса составит

$$\eta = \frac{A_{12} + A_{22}}{A_{11} + A_{21}}, \quad (23)$$

$$\eta = 17,626.$$

Общее время работы установки за один цикл

$$T = 72,56 + 29,36 = 101,92 \text{ с.}$$

Итак, расчетная производительность вакуумного рыбонасоса

$$Q_s = 0,0153 \text{ м}^3/\text{с.}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнивая полученные показатели производительности с заявленными в технической документации для конкретной ВРУ (50 л/с), можно сделать вывод, что даже при допустимых перепадах высот и длинах трубопроводов, значение расхода в 3,25 раза меньше паспортного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, данный метод позволяет произвести расчет производительности и коэффициента полезного действия той или иной машины ВРУ. Методика может быть использована в проектировании вакуумных рыбонасосных установок на базе водокольцевых компрессорных машин, а также для выбора режима работы действующих установок с целью повышения их производительности и энергетической эффективности. Значения производительности ВРУ, близкие к паспортной производительности, можно получить только при малых перепадах уровней и небольшой длине трубопровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудакаев, В. В. Автоматизированные гидравлические системы транспортировки рыбы из орудий лова рыбонасосами / В. В. Кудакаев, Т. П. Карпелев, А. Н. Бойцов // Известия ТИНРО. – 2016. – Т. 186. – С. 207-213.
2. Великанов, Н. Л. Компрессорные машины вакуумных рыбонасосов / Н. Л. Великанов, В. А. Наумов // Рыбное хозяйство. – 2018. – № 6. – С. 78-81.
3. Euskan Fish Systems [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.euskan.com/> (дата обращения: 02.05.2020).
4. Samson Pumps [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.samson-pumps.com/> (дата обращения: 02.05.2020).

5. Наумов, В. А. Этапы работы вакуумной рыбонасосной установки / Н. Л. Великанов, В.А. Наумов // Рыбное хозяйство. – 2020. – № 2. – С. 108-112.
6. Наумов, В. А. Инженерный метод расчета коэффициента гидравлических потерь при транспортировании водорыбной смеси по трубам / В. А. Наумов // Вестник науки и образования Северо-Запада России: электронный журнал, 2020. – Т. 6, № 1. – С. 20-28. – URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2020/01/2020-N1-Naumov.pdf>.

MODELING OF VACUUM FISH-PUMP UNIT OPERATION

A. A. Zemlyanov, Kaliningrad State Technical University, Faculty of Civil Engineering,
studente-mail: zemlyanov99@gmail.com

V.A. Naumov, Kaliningrad State Technical University, Head of Department of Water
Resources and Water Use, Ph. D, Professor
E-mail: van-old@mail.ru

The article is devoted to the development of a method for calculating the productivity and efficiency of a vacuum fish-pump unit using mathematical modeling of the stages of its operation. The article was prepared according to the plan of the state budget research and development work carried out as part of the state task for the implementation of government work in 2020 "Modeling of vacuum fish-pump unit operation." As a result, an assessment is made of the operational efficiency of a specific vacuum fish-pump unit. A conclusion is drawn on the possibility of applying the technique to a particular machine.

Key words: *vacuum fish-pump unit, water-ring vacuum pump, flow rate, pressure, efficiency*