

Характеристики водокольцевых компрессорных машин вакуумных рыбонасосных установок

DOI

Д-р техн. наук, профессор
В.А. Наумов – Калининградский
 государственный технический
 университет (ФГБОУ ВО «КГТУ»);
 д-р техн. наук, профессор
Н.Л. Великанов –
 Балтийский федеральный
 университет им. И. Канта
 (ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта»)

@ van-old@mail.ru;
 vladimir.naumov@klgtu.ru
 monolit8@yandex.ru;
 NVelikanov@kantiana.ru

Ключевые слова:
 частота вращения ротора,
 вытеснение водорыбной
 смеси, компрессорная
 машина

Keywords:
 rotor speed, displacement
 of fish water-based mixture,
 compressor machine

CHARACTERISTICS OF WATER RING COMPRESSOR MACHINES VACUUM FISH PUMPING UNITS

Doctor of Technical Sciences, Professor **V.A. Naumov** – Kaliningrad State
 Technical University (KSTU);
 Doctor of Technical Sciences, Professor **N.L. Velikanov** – I. Kant Baltic Federal University,
 van-old@mail.ru; vladimir.naumov@klgtu.ru monolit8@yandex.ru; NVelikanov@kantiana.ru

The operation of the Samson KS910 pump under various conditions is investigated. The values of empirical constants in mathematical dependencies for calculating pump characteristics were found using the least squares method based on published experimental data.

The results of calculating the productivity and power consumption of the Samson KS910 in the vacuum pump mode depending on the pressure in the working chamber at different values of the rotor speed and pressure in the working chamber are presented.

Задачи механизации и автоматизации процессов промышленного рыболовства не утратили своей актуальности. Для их решения широко применяются рыбонасосы различных конструкций. Вакуумные рыбонасосные установки обеспечивают наименьшую повреждаемость при перемещении рыбы. Поэтому их все больше используют в рыбной отрасли, несмотря на низкую энергетическую эффективность по сравнению с центробежными рыбонасосами [1-3].

Большинство вакуумных рыбонасосных установок производят на базе водокольцевых

компрессорных машин. Это обусловлено их высокими эксплуатационными качествами, а также возможностью работать как в режиме вакуумного насоса, так и в режиме воздуходувки.

В [4-6] было выполнено исследование характеристик водокольцевых компрессорных машин в зависимости от давления в рабочей камере p при постоянной частоте вращения ротора n . В [7; 8] была предложена и исследована математическая модель этапов работы вакуумных рыбонасосных установок при фиксированном значении n .

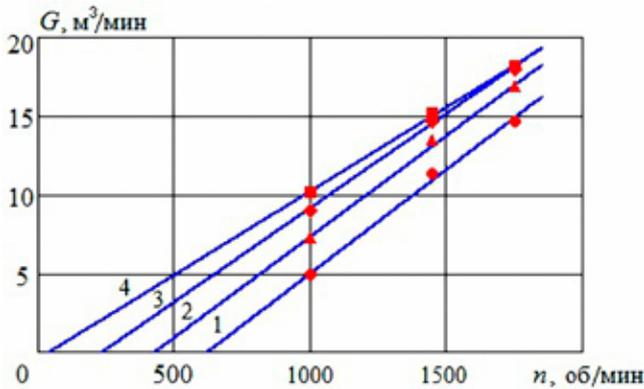


Рисунок 1. Зависимость производительности Samson KS910 в режиме вакуумного насоса от частоты вращения ротора при разных значениях давления в рабочей камере: 1 – $p = 20$ кПа; 2 – $p = 40$ кПа; 3 – $p = 60$ кПа; 4 – $p = 80$ кПа. Точки – экспериментальные данные [9], линии – расчет по (1)

Figure 1. The dependence of the Samson KS910 performance in the vacuum pump mode on the rotor speed at different pressure values in the working chamber: 1- $p = 20$ kPa; 2- $p = 40$ kPa; 3- $p = 60$ kPa; 4- $p = 80$ kPa. Points – experimental data [9], lines – calculation according to (1)

Samson Pumps (Дания) [9] является одной из наиболее известных компаний по производству водокольцевых компрессорных машин для вакуумных рыбонасосных установок. Компания в течение 2018 г. полностью сменила программу производства вакуумных рыбонасосных установок. С 2019 г. поставляются компрессорные машины только двух серий: Truck Master и Ocean Master. Серия Ocean Master предназначена для перемещения рыбы, в том числе живой. Серия включает следующие модели: Ocean Master 1000, 700, 500, 450, 250 и SVF27. Высоко-

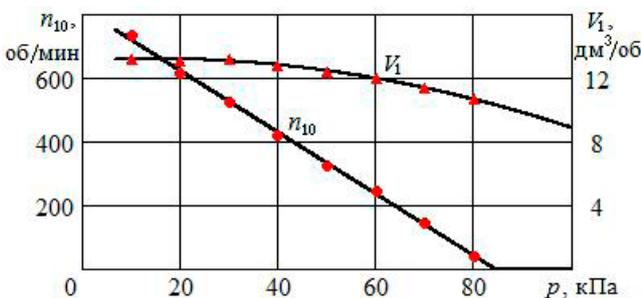


Рисунок 2. Минимальная частота вращения ротора и объем воздуха за один оборот вакуумного насоса Samson KS910.

Точки – экспериментальные данные [9], линии – расчет по (2), (3)

Figure 2. Minimum rotor speed and air volume per revolution of the Samson KS910 vacuum pump.

Points – experimental data [9], lines – calculation according to (2), (3)

Исследована работа насоса Samson KS910 в различных условиях. Методом наименьших квадратов, по опубликованным экспериментальным данным, были найдены значения эмпирических констант в математических зависимостях для расчета характеристик насоса.

Представлены результаты расчета производительности затраченной мощности Samson KS910 в режиме вакуумного насоса, в зависимости от давления в рабочей камере, при разных значениях частоты вращения ротора, давления в рабочей камере.

прочные водокольцевые компрессорные машины серии Ocean Master разработаны для транспортировки водорыбной смеси в агрессивных условиях, в том числе в морской воде.

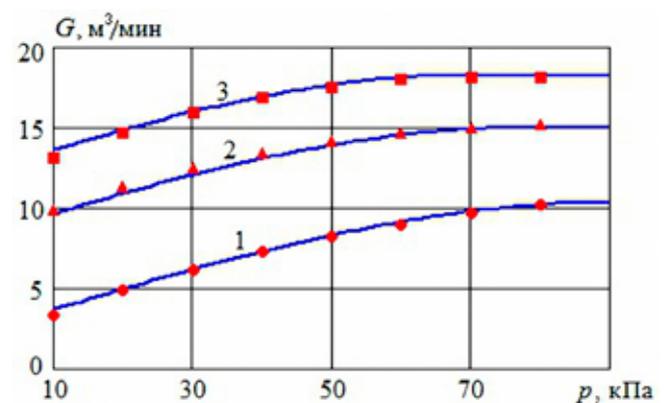


Рисунок 3. Зависимость производительности Samson KS910 в режиме вакуумного насоса от давления в рабочей камере при разных значениях частоты вращения ротора:

1 – $n = 1000$ об/мин; 2 – $n = 1450$ об/мин; 3 – $n = 1750$ об/мин.

Точки – экспериментальные данные [9], линии – расчет по (1)

Figure 3. The dependence of the performance of Samson KS910 mode of the vacuum pump from the pressure in the working chamber at different values of frequency of rotation of the rotor: 1- $n = 1000$ rpm; 2- $n = 1450$ rpm; 3- $n = 1750$ rpm.

Points – experimental data [9], lines – calculation (1)

Водокольцевые компрессорные машины серии Ocean Master, в соответствии с технической документацией производителя [9], могут работать в широком диапазоне частоты вращения ротора от 800 до 1800 об/мин. Результаты испытаний водокольцевых компрессорных машин серии Ocean Master не размещены в открытом доступе, но указано, что Ocean Master 250 является версией ранее выпускаемого ВКН KE 225, Ocean Master 700 – KS 625, Ocean Master 1000 – KS 910. Здесь будем использовать результаты испытаний ВКН KE 225, KS 625, KS 910, которые ранее были в открытом доступе [9].

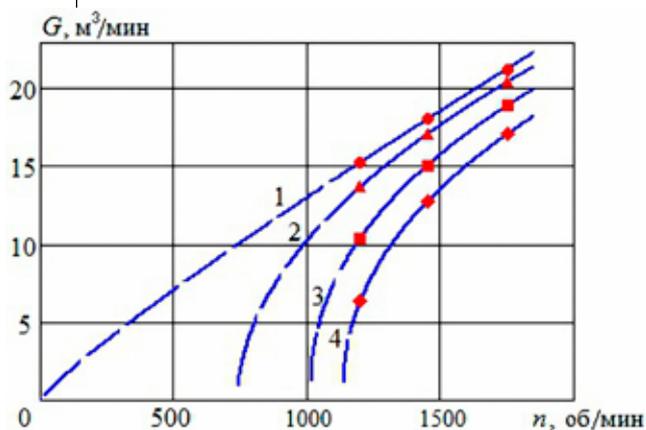


Рисунок 4. Зависимость производительности Samson KS910 в режиме компрессора от частоты вращения ротора, при разных значениях давления в рабочей камере: 1 - $p = 130$ кПа; 2 - $p = 160$ кПа; 3 - $p = 200$ кПа; 4 - $p = 250$ кПа. Точки - экспериментальные данные [9], линии - расчет по (1)

Figure 4. Dependence of the Samson KS910 performance in compressor mode on the rotor speed, at different pressure values in the working chamber: 1 - $p = 130$ kPa; 2 - $p = 160$ kPa; 3 - $p = 200$ kPa; 4 - $p = 250$ kPa. Points - experimental data [9], lines - calculation according to (1)

На рисунке 1 точками показана зависимость производительности Samson KS910 в режиме вакуумного насоса (ВН) от частоты вращения ротора по результатам испытаний.

В соответствии с экспериментальными данными (см. рис. 1), зависимость производительности вакуумного насоса от частоты вращения ротора и давления может быть рассчитана по формуле:

$$G = f_1(n, p) = V_1(p) \cdot (n - n_{10}(p)). \quad (1)$$

Физический смысл величин: V_1 - объем воздуха, перекачиваемого за один оборот ротора; n_{10} - минимальная частота вращения ротора, при которой вакуумный насос способен откачивать воздух из рабочей камеры. Указанные величины могут быть аппроксимированы следующими формулами (рис. 2):

$$n_{10}(p) = \begin{cases} a_0 - a_1 \cdot p & \text{при } p < p_1, \\ 0 & \text{при } p \geq p_1 \end{cases}; \quad (2)$$

$$V_1(p) = b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot p^2. \quad (3)$$

Методом наименьших квадратов были найдены значения эмпирических констант в формулах (2) - (3), например, для вакуумного насоса KS910: $p_1 = 84,4$ кПа; $a_0 = 816,8$ об/мин; $a_1 = 9,68$ об/(мин·кПа); $b_0 = 13,1$ дм³/об; $b_1 = 0,0162$ дм³/(об·кПа); $b_2 = -5,86 \cdot 10^{-4}$ дм³/(об·кПа²).

На рисунке 3 по формуле (1) построена зависимость производительности вакуумного насоса дав-

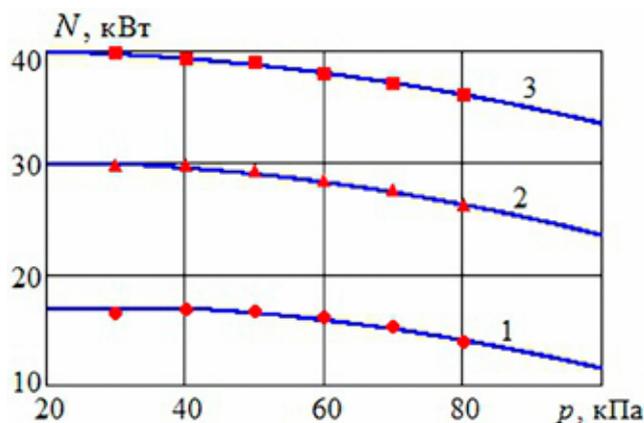


Рисунок 5. Зависимость затраченной мощности Samson KS910 в режиме вакуумного насоса от давления в рабочей камере при разных значениях частоты вращения ротора: 1 - $n = 1000$ об/мин; 2 - $n = 1450$ об/мин; 3 - $n = 1750$ об/мин. Точки - экспериментальные данные [9], линии - расчет по (5)

Figure 5. The dependence of power consumed Samson KS910 mode of the vacuum pump from the pressure in the working chamber at different values of frequency of rotation of the rotor: 1 - $n = 1000$ rpm; 2 - $n = 1450$ rpm; 3 - $n = 1750$ rpm. Points - experimental data [9], lines - calculation in (5)

ления в рабочей камере. Такая зависимость нужна для расчета динамики процесса откачки воздуха из бака вакуумных рыбонасосных установок [5].

На этапе вытеснения водорыбной смеси из бака водокольцевая компрессорная машина работает в режиме компрессора (воздуходувки) [7]. Рисунок 4, в отличие от рисунка 1, показывает, что производительность установок Samson в режиме компрессора зависит от частоты вращения ротора нелинейно. Эта зависимость может быть аппроксимирована формулой

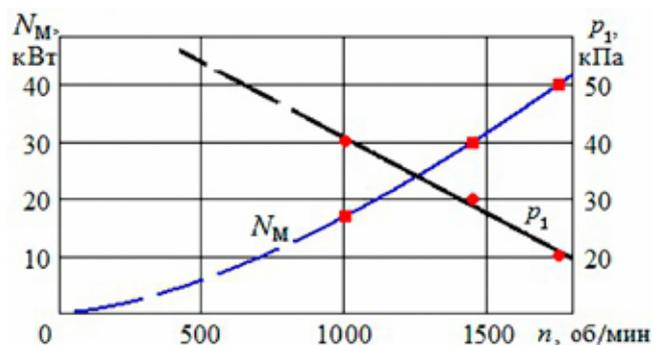


Рисунок 6. Зависимость параметров затраченной мощности от частоты.

Точки - экспериментальные данные, линии - расчет по формулам (6)

Figure 6. Dependence of the parameters of the consumed power on the frequency.

Points - experimental data, lines - calculation by formulas (6)

$$G = f_2(n, p) = K_2(p) \cdot (n - n_{20}(p))^{\beta(p)} \quad (4)$$

По рисунку 4 для давления в рабочей камере, близкого к атмосферному, процесс нагнетания воздуха начнется при сколь угодно малой частоте вращения ротора (линия 1). Чем больше давление в баке, тем больше должна быть частота, при которой может происходить процесс нагнетания.

Функции $f_1(n, p)$ и $f_2(n, p)$ необходимы для расчета производительности вакуумных рыбо-насосных установок [8]. Чтобы оценить энергетическую эффективность вакуумных рыбо-насосных установок требуется построить зависимость затраченной мощности N от частоты и давления. На рисунке 5 показано поведение функции $N = \varphi_1(n, p)$ при работе в режиме вакуумного насоса. При снижении давления в рабочей камере до некоторого значения p_1 затраченная мощность возрастает, а далее, практически, не изменяется. В экспериментах наблюдалось значительное увеличение затраченной мощности с ростом частоты вращения ротора.

Эта зависимость может быть аппроксимирована формулой

$$N = \varphi_1(n, p) = \begin{cases} N_M(n) - A(n) \cdot p \cdot (p - p_1(n)) & \text{при } p > p_1(n) \\ N_M(n) & \text{при } p \leq p_1(n) \end{cases} \quad (5)$$

Для затраченной мощности должно выполняться условие:

$$n \rightarrow 0 \Rightarrow N_M \rightarrow 0.$$

Параметры в (5) рассчитаны по формулам (6), подобранным по экспериментальным данным для Samson KS910 (рис. 6):

$$N_M(n) = 4,116 \cdot 10^{-4} \cdot n^{1,538}, \quad p_1(n) = 66,84 - 0,0263 \cdot n \quad (6)$$

На рисунке 7 результаты расчета вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Причем зависимость затраченной мощности от частоты ротора значительно сильнее, чем от давления в баке.

Экспериментальные данные, полученные при работе установки KS910 в режиме компрессора (рис. 8), показывают значительный рост затраченной мощности с увеличением частоты вращения ротора, но зависимость от давления в рабочей камере большая, чем на рисунке 7. Как и ранее, полагаем, что при уменьшении частоты до нуля величина N также стремится к нулю. Зависимость от частоты и давления может быть аппроксимирована формулой:

$$N = \varphi_2(n, p) = V(p) \cdot n^{a(p)}. \quad (7)$$

Методом наименьших квадратов были получены эмпирические функции в формуле (7). Для установки KS910 они показаны на рисунке 9 ($b = V/V_0$, где $V_0 = 1$ кВт).

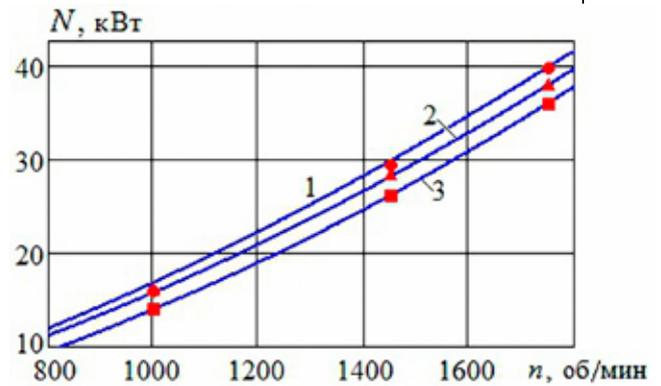


Рисунок 7. Зависимость затраченной мощности Samson KS910 в режиме вакуумного насоса от частоты вращения ротора при разных значениях давления в рабочей камере: 1 – $p = 20$ кПа; 2 – $p = 60$ кПа; 3 – $p = 80$ кПа.

Точки – экспериментальные данные [9], линии – расчет по (5)

Figure 7. Dependence of the consumed power of the Samson KS910 in the vacuum pump mode on the rotor speed at different pressure values in the working chamber: 1- $p = 20$ kPa; 2- $p = 60$ kPa; 3- $p = 80$ kPa.

Points – experimental data [9], lines – calculation according to (5)

Полученные алгоритмы расчета и эмпирические зависимости могут быть использованы при проектировании и модернизации вакуум-

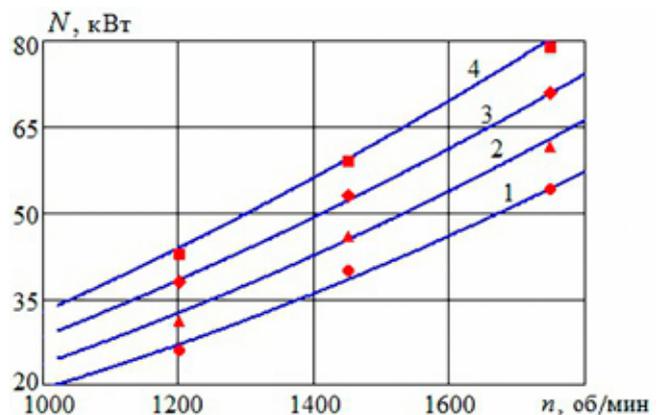


Рисунок 8. Зависимость затраченной мощности Samson KS910 в режиме компрессора от частоты вращения ротора при разных значениях давления в рабочей камере: 1 – $p = 140$ кПа; 2 – $p = 180$ кПа; 3 – $p = 250$ кПа; 4 – $p = 300$ кПа.

Точки – экспериментальные данные [9], линии – расчет по (7)

Figure 8. Dependence of the consumed power of the Samson KS910 in compressor mode on the rotor speed at different pressure values in the working chamber: 1- $p = 140$ kPa; 2- $p = 180$ kPa; 3- $p = 250$ kPa; 4- $p = 300$ kPa.

Points – experimental data [9], lines – calculation according to (7)

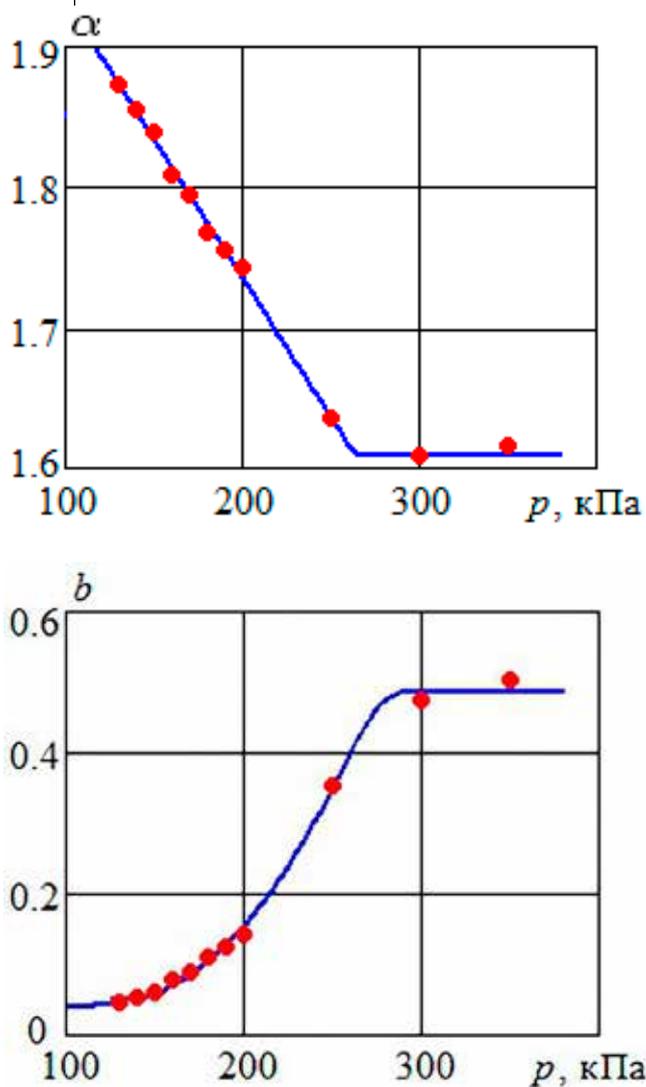


Рисунок 9. Эмпирические функции в формуле (7) для установки KS910. Точки получены по экспериментальным данным [9]

Figure 9. Empirical functions in formula (7) for the KS910 setup.

The points were obtained from experimental data [9]

ных рыбонасосных установок, использующих водокольцевые компрессорные машины.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Кудакеев В.В. Автоматизированные гидравлические системы транспортировки рыбы из орудий лова рыбонасосами / В.В. Кудакеев, Т.П. Карпелев, А.Н. Бойцов // Известия ТИНРО. – 2016. – Т. 186. – С. 207-213.

1. Kudakaev V. V. Automated hydraulic systems for transporting fish from fishing gear with fish pumps / V. V. Kudakaev, T. P. Karpelev, A. N. Boitsov // Izvestiya TINRO. – 2016. – Т. 186. – p. 207-213.

2. Великанов Н.Л. Компрессорные машины вакуумных рыбонасосов / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов // Рыбное хозяйство. – 2018. – № 6. – С. 78-81.

2. Velikanov N. L. Compressor machines of vacuum fish pumps / N. L. Velikanov, V. A. Naumov // Rybnoe khozyaistvo. – 2018. – No. 6. – P. 78-81.

3. Pan Q. Fish-friendly design of an axial flow pump impeller based on a blade strike model / Q. Pan, W.D. Shi, D.S. Zhang, B.P.M. van Esch, R.J.

Zhao // Proceedings of the institution of mechanical engineers, part A – journal of power and energy. 2020. Vol. 234. Is. 2, pp. 173-186.

3. Q. Pan Fish-friendly design of an axial flow pump impeller based on a blade-strike model / Q. Pan, W. D. Shi, D. S. Zhang, B. P. M. van Esch, R. J. Zhao // Proceedings of the institution of mechanical engineer's part A – journal of power and energy. 2020. –Vol. 234. –Is. 2. – pp. 173-186.

4. Великанов Н.Л. Моделирование характеристик водокольцевых вакуумных насосов / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов // Известия вузов. Машиностроение. – 2019. – № 10. – С. 70-77.

4. Velikanov N.L. The modeling of the characteristics of liquid ring vacuum pumps / N. L. Velikanov, V. A. Naumov // Izvestiya vuzov. Mechanical engineering. – 2019. – No. 10. – pp. 70-77.

5. Великанов Н.Л. Динамические характеристики вакуумных насосов и компрессоров рыбонасосных установок / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов // Рыбное хозяйство. – 2019. – № 1. – С. 79-83.

5. Velikanov N.L. The dynamic characteristics of vacuum pumps and compressors ribonomic installations / N. L. Velikanov, V. A. Naumov // fisheries. – 2019. – No. 1. – P. 79-83.

6. Naumov V.A. Simulation of operational characteristics of the water-ring vacuum pumps / V.A. Naumov, N.L. Velikanov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 537, 032029.

6. Naumov V. A. Simulation of operational characteristics of the water-ring vacuum pumps / V. A. Naumov, N. L. Velikanov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 537, 032029.

7. Наумов В.А. Этапы работы вакуумной рыбонасосной установки / В.А. Наумов, Н.Л. Великанов // Рыбное хозяйство. – 2020. – № 2. – С. 98-102.

7. Naumov V. A. Stages of operation of a vacuum fish-pumping unit / V. A. Naumov, N. L. Velikanov // Fish farming. – 2020. – No. 2. – pp. 98-102.

8. Наумов В.А. Производительность вакуумных рыбонасосных установок большой мощности / В.А. Наумов, Н.Л. Великанов, А.А. Землянов // Рыбное хозяйство. – 2020. – № 4. – С. 119-123.

8. Naumov V. A. Productivity of vacuum fish-pumping installations of high power / V. A. Naumov, N. L. Velikanov, A. A. Zemlyanov // Fish farming. – 2020. – No. 4. – pp. 119-123.

9. Samson Liquid Ring Vacuum Pumps [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.samson-pumps.com/products/> (дата обращения: 29.09.2020).

9. Samson Liquid Ring Vacuum Pumps [Electronic resource]. – URL: <https://www.samson-pumps.com/products/> (accessed 29.09.2020).

