

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 1 (11), май, 2022

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.
Телефон: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных подписчиков; 009992 — для организаций.
Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском, белорусском и английском языках.
Распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор Л. Н. Щербук
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 04.05.2022. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 8,60.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014. Адрес: ул. Хлопина, 16, 231800 г. Слоним, Гродненская обл.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (гл. ред. журн.), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, заслуженный работник образования Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Алифанов А. В. (гл. ред. сер.), лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Горбач Ю. Е. (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Зубрицкая Л. С. (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович И. А. (отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Дубень И. В.** (отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

Белый А. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

Дремук В. А., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**, доктор технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь); **Карташевич А. Н.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клочков А. В.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клубович В. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**, доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь); **Томило В. А.**, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Educational Institution
"Baranovichi State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichi.
Phone: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;
009992 — for companies.
The certificate of the registration of mass media № 1533
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information
of Belarus.

In compliance with the order of the Higher Attestation
Commission of the Republic of Belarus from January 21,
2015 № 16 the scientific and practical journal "BarSU
Herald. Engineering Series" is included into the List of
scientific publications of the Republic of Belarus for
publishing the results of theses research on engineering
sciences (mechanical engineering and machines,
processes and machines of agroengineering systems).

Scientific-and-practical journal "BarSU Herald"
is included into RSCI (Russian Science Citation Index),
license agreement № 06-01/2016.

Issued in Russian, Belorussian and English. The journal is
distributed on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor A. Y. Sidorenko
Technical editor L. N. Scherbuk
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 04.05.2022. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 13,25.
Acc.-pub. s. l. 8,60. Circulation of 100 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary
Enterprise "Slonim printing establishment". The state
registration certificate of the publisher, manufacturer and
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim,
Grodno region.

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochov A. V.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Громыко П. Н., Хатетовский С. Н., Макацария Д. Ю., Макаревич А. С. Обеспечение поступательного движения сателлита при работе эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов

Жигалов А. Н., Горавский И. А. Экспериментальные исследования микроструктуры быстрорежущей стали P6M5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом

Малеронко В. В., Кушнеров А. В., Алифанов А. В. Влияние магнитно-импульсной обработки на фазовые переходы в поверхностном слое режущего осевого инструмента из инструментальной стали

Налиуко А. І., Русан С. І., Сівачэнка Л. А., Сівачэнка Т. Л. Методика набліжаного аналізу сілавога ўзаемадзеяння ў здрабняльных машынах са шчоткападобнымі звёнамі

Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Корольков А. С. Исследование эксплуатационных показателей синтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях легковых автомобилей

Фадин Ю. М., Шеметова О. М. Использование пневмосмесительного оборудования для производства сухих строительных смесей

Шматов А. А. Характер упрочнения твердых сплавов при термо-гидрохимической обработке

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Бондарев С. Н. Определение потребной мощности на процесс машинного доения коровы

Китун А. В., Передня В. И., Крупенин П. Ю., Филатов В. Г., Дубень И. В. Исследование процесса измельчения кормов плоскостным роторным измельчающим аппаратом вертикального типа

Китун А. В., Передня В. И., Крупенин П. Ю., Филатов В. Г., Дубень И. В. Оптимизация выбора оборудования линии первичной обработки молока

Китун А. В., Швед И. М. Определение параметров участка размыва осадка в навозохранилище направленным действием струи жидкого навоза

Пузевич К. Л., Коцуба В. И., Пузевич В. В., Филиппов А. И. Агрегаты для посева сельскохозяйственных культур под мульчирующую пленку

Шаршунов В. А., Курзенков С. В., Левчук В. А., Цайц М. В. Исследование характера деформации и разрушения семенной коробочки льна

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

4 Gromyko P. N., Khatetovsky S. N., Makatsaryia D. Yu., Makarevich A. S. Provision of the satellite translational motion during the operation of eccentric transmission with parallel arrangement of input and output shafts

14 Jigalov A. N., Goravskii I. A. Experimental investigations of the high-speed steel P6M5 microstructure hardened by the aerodynamic sound method

24 Maleronok V. V., Kushnerou A. V., Alifanov A. V. The effect of magnetic pulse processing on phase transitions in the surface layer of a cutting axial tool of tool steel

31 Naliuko O. I., Rusan S. I., Sivachenko L. A., Sivachenko T. L. Method of approximate analysis of force interaction in grinding machines with brush-like links

37 Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Korolkov A. S. Research of performance of synthetic motor oils indicators used in gasoline engines of passenger cars

43 Fadin Yu. M., Shemetova O. M. The use of pneumatic mixing equipment for the dry building mixes production

48 Shmatov A. A. The nature of hard alloys hardening during thermo-hydrochemical treatment

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

55 Bondarev S. N. Determination of the required power for the machine cow milking process

65 Kitun A. V., Perednya V. I., Krupenin P. Y., Filatov V. G., Duben I. V. Research of grinding feed process by a planar vertical rotary grinder

74 Kitun A. V., Perednya V. I., Krupenin P. Y., Filatov V. G., Duben I. V. Optimization of the equipment choice for a primary milk processing line

81 Kitun A. V., Shved I. M. Determination of the sediment erosion area parameters in the manure storage by the directed action of a liquid manure jet

88 Puzevich K. L., Kotsuba V. I., Puzevich V. V., Filippov A. I. Aggregates for sowing agricultural crops under mulching film

96 Sharshunov V. A., Kurzenkov S. V., Levchuk V. A., Tsaits M. V. Investigation of the nature of flax seedpods deformation and destruction

УДК 631.116.2

С. Н. Бондарев

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 899 80 92,
seregabondarev1991@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОЙ МОЩНОСТИ НА ПРОЦЕСС МАШИННОГО ДОЕНИЯ КОРОВЫ

Целью данной работы является теоретическое исследование по определению потребной мощности на процесс машинного доения в зависимости от конструктивных и технологических параметров доильного аппарата. Новизна работы заключается в получении аналитических выражений по определению потребной мощности на процесс машинного доения коровы с учетом ее молокоотдачи, а также конструктивных и технологических параметров доильной установки.

Введение содержит краткую информацию об анализе энергопотребления отрасли животноводства и, в частности, ферм для содержания крупного рогатого скота. В основной части работы проведено теоретическое исследование по определению потребной мощности на выдаивание молока из вымени коровы и его транспортировку в молокоприемник доильной установки с учетом ее конструктивных параметров.

Установлено, что потребная мощность на процесс машинного доения коровы $N_{д1} = 0,105$ кВт в двухтактном доильном аппарате и $N_{д2} = 0,1226$ кВт — в трех- и четырехтактном при $p_b = 40$ кПа, $\chi_{т1} = 60$ мин⁻¹, соотношении тактов 60/40.

Результаты исследований будут полезны при разработке конструкций доильных аппаратов для выбора наиболее энергоэффективных параметров работы с учетом интенсивности молокоотдачи животного.

Ключевые слова: доильный аппарат; молоко; вакуумметрическое давление; сосковая резина; потребная мощность; молокоотдача; животноводство.

Рис. 2. Библиогр.: 4 назв.

S. N. Bondarev

Educational Institution “Belarusian State Agrarian Technical University”, 99 Nezavisimosti Prospect,
220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 899 80 92, seregabondarev1991@yandex.ru

DETERMINATION OF THE REQUIRED POWER FOR THE MACHINE COW MILKING PROCESS

The purpose of the work is theoretical research in determining the required power for the process of machine milking, depending on the design and technological parameters of the milking machine. The novelty of the work is in obtaining analytical expressions to determine the required power for the process of machine cow milking, taking into account its milk output, as well as the design and technological parameters of the milking unit.

The introduction contains brief information on the analysis of energy consumption of the livestock industry and, in particular, cattle farms. In the main part of the work, theoretical studies were carried out to determine the required capacity for milking milk from the udder of a cow and its transportation to the milking machine receiver, taking into account its design parameters.

It is established that the required power for the process of machine cow milking is $N_{д1} = 0.105$ kW in a two-stroke milking machine and $N_{д2} = 0.1226$ kW in a three-four-stroke at $p_b = 40$ kPa, $\chi_{т1} = 60$ min⁻¹, the ratio of cycles 60/40.

The results of the research will be useful in the development of milking machine designs for selecting the most energy-efficient operation parameters, taking into account the intensity of the animal's milk output.

Key words: milking machine; milk; vacuum pressure; nipple rubber; required capacity; milk output; animal husbandry.
Fig. 2. Ref.: 4 titles.

Введение. Анализ энергопотребления по отраслям сельского хозяйства показывает, что отрасль животноводства является одним из основных потребителей энергии в сельском хозяйстве, на долю которого приходится 17...21 % общих энергозатрат, более 50 % от которых приходится на фермы для содержания крупного рогатого скота, где одним из основных потребителей энергии является процесс машинного доения [1].

Целью данной работы является теоретическое исследование по определению потребной мощности на процесс машинного доения от конструктивных и технологических параметров доильного аппарата.

Материалы и методы исследования. Машинное доение — технологический процесс, при котором выдаивание молока из сосков вымени коровы осуществляется в доильном аппарате с последующей транспортировкой молока в молокоприемник доильной установки за счет вакуумметрического давления, создаваемого вакуумным насосом. Тогда потребную мощность электродвигателя на привод вакуумного насоса в общем виде определим по формуле

$$N_{\text{д}} = N_{\text{выд}} + N_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{выд}}$ — потребная мощность на выдаивание молока из вымени коровы, кВт;

$N_{\text{тр}}$ — потребная мощность на транспортировку молока из доильного аппарата в молокоприемник доильной установки, кВт.

Потребную мощность на выдаивание молока из вымени коровы в общем виде определим по формуле

$$N_{\text{выд}} = \frac{Q_{\text{выд}} p_{\text{в}} n_{\text{д.а}}}{1000 \eta_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{выд}}$ — объемная подача молока и воздуха, откачиваемая из доильного аппарата вакуумным насосом, м³/с;

$p_{\text{в}}$ — вакуумметрическое давление в доильной установке, Па;

$n_{\text{д.а}}$ — количество доильных аппаратов в доильной установке, шт.;

$\eta_{\text{н}}$ — коэффициент полезного действия вакуумного насоса.

Так как выдаивание молока из сосков вымени коровы происходит за счет разницы давлений в вымени и подсосковых камерах доильных стаканов, интенсивность потока молока, извлекаемого из соска вымени коровы, определим как для расхода жидкости через отверстие [2, с. 203]:

$$Q_{\text{м}} = \frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1}{4} \sqrt{\frac{2(p_{\text{в}} - p_{\text{вым}})}{\rho}}, \quad (3)$$

где $d_{\text{к}}$ — диаметр канала соска вымени коровы, м;

μ_1 — коэффициент расхода молока для канала соска вымени коровы;

$p_{\text{вым}}$ — величина внутривыменного давления животного, Па;

ρ — плотность молока, кг/м³.

Во время такта «сосание» в доильном аппарате происходит откачка воздуха вакуумным насосом из межстенных камер доильных стаканов с величины атмосферного давления до значения вакуумметрического. Тогда объем воздуха в межстенной камере доильного стакана при величине вакуумметрического давления определим с учетом его конструктивных параметров и величины прогиба стенок сосковой резины по формуле

$$V_{м.к2} = \frac{\pi}{4} (d_{г}^2 l_{г} - \delta_{с.р}^2 l_{г} - d_{с}^2 (l_{с} - l_{пр})) + \pi \delta_{с.р} d_{в} \left[(l_{м.т} + l_{пр} - l_{с.р}) + l_{с} + \frac{(l_{с}^3 - (l_{м.т} + l_{пр} - l_{с.р})^3)}{3(l_{с.р} - l_{м.т} - l_{с})^2} \right], \quad (4)$$

где $d_{г}$ — внутренний диаметр гильзы доильного стакана, м;
 $l_{г}$ — длина гильзы доильного стакана, м;
 $\delta_{с.р}$ — толщина стенки сосковой резины, м;
 $d_{с}$ — диаметр соска вымени коровы, м;
 $l_{с}$ — длина соска вымени животного, м;
 $d_{в}$ — внутренний диаметр сосковой резины, м;
 $l_{м.т}$ — длина молочной трубки, м;
 $l_{пр}$ — длина присоска сосковой резины, м;
 $l_{с.р}$ — длина сосковой резины, м.

Тогда объем воздуха, откачиваемый вакуумным насосом из межстенной камеры доильного стакана во время такта «сосание», определим с учетом формулы (4) и конструктивных параметров доильного стакана:

$$V_{м.к1} = \frac{\pi}{4} (d_{г}^2 l_{г} - \delta_{с.р}^2 l_{г} - d_{с}^2 (l_{с} - l_{пр}) - l_{г} (d_{г}^2 - d_{н}^2)) + \pi \delta_{с.р} d_{в} \times \left[(l_{м.т} + l_{пр} - l_{с.р}) - l_{с} - \frac{1}{3l_{п.к}^2} (l_{с}^3 - (l_{м.т} + l_{пр} - l_{с.р})^3) \right]. \quad (5)$$

Объем воздуха, откачиваемый вакуумным насосом из шланга, соединяющего вакуум-распределитель и межстенную камеру доильного стакана, определим как разницу объемов, занимаемых воздухом при вакуумметрическом и атмосферном давлениях:

$$V_{шл.дс1} = \frac{\pi d_{шл.дс}^2 l_{шл.дс}}{4} \left(\frac{p_{атм}}{(p_{атм} - p_{в})} - 1 \right), \quad (6)$$

где $d_{шл.дс}$ — внутренний диаметр шланга, соединяющего вакуум-распределитель и межстенную камеру доильного стакана, м;
 $l_{шл.дс}$ — длина шланга, соединяющего вакуум-распределитель и межстенную камеру доильного стакана, м;
 $p_{атм}$ — величина атмосферного давления, Па.

Для ускорения процесса транспортировки молока из молокоборной камеры коллектора доильного аппарата в молокопровод в корпусе коллектора выполнено калиброванное отверстие, соединяющее атмосферу с молокоборной камерой. Тогда объемный расход воздуха через отверстие в корпусе коллектора доильного аппарата определим по формуле

$$Q_{к} = \frac{\pi d_{отв}^2 \mu_{отв}}{4} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p_{атм}}{\rho_0} \left[1 - \frac{\rho_0 (p_{атм} - p_{в})}{\rho_{в} p_{атм}} \right]}, \quad (7)$$

где $d_{отв}$ — диаметр отверстия в корпусе коллектора, м;
 $\mu_{отв}$ — коэффициент расхода воздуха через отверстие в корпусе коллектора;
 k — показатель адиабаты для воздуха;
 ρ_0 — плотность воздуха при атмосферном давлении, кг / м³;
 $\rho_{в}$ — плотность воздуха при вакуумметрическом давлении в доильном аппарате, кг / м³.

Тогда с учетом формул (3), (5)...(7) объемную подачу молока и воздуха, откачиваемых из доильного аппарата вакуумным насосом, определим по формуле

$$Q_{\text{выд1}} = n_{\text{д.с}} \left[\frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{V_{\text{м.к1}} + V_{\text{шл.дс1}}}{t_{\text{А}}} \right] + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4}, \quad (8)$$

где $n_{\text{д.с}}$ — количество одновременно работающих доильных стаканов, шт.;

v_1 — скорость истечения молока через канал соска вымени коровы, м / с;

$v_{\text{в}}$ — скорость потока воздуха через отверстие в корпусе коллектора, м / с.

В трехтактном доильном аппарате во время такта «сосание» воздух откачивается из подсосковой и межстенной камер доильного стакана до величины вакуумметрического давления, после чего происходит извлечение молока из соска вымени животного и его транспортировка в коллектор доильного аппарата, откуда его транспортировка в молокопровод ускоряется поступлением воздуха через калиброванное отверстие в коллекторе. Тогда формула для определения объемной подачи молока и воздуха для трехтактного доильного аппарата примет следующий вид:

$$Q_{\text{выд2}} = n_{\text{д.с}} \left[\frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{(V_{\text{м.к1}} + V_{\text{шл.дс1}} + V_{\text{п.к1}})}{t_{\text{А}}} \right] + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4}, \quad (9)$$

где $V_{\text{п.к1}}$ — объем воздуха, откачиваемый вакуумным насосом из подсосковой камеры доильного стакана, м³.

Затраты мощности на выдаивание молока в двухтактном доильном аппарате определим с учетом формулы (8):

$$N_{\text{выд1}} = \frac{p_{\text{в}} n_{\text{д.а}}}{1000 \eta_{\text{н}}} \left[n_{\text{д.с}} \left(\frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{V_{\text{м.к1}} + V_{\text{шл.дс1}}}{t_{\text{А}}} \right) + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4} \right]. \quad (10)$$

Затраты мощности на выдаивание молока в трех- и четырехтактном доильных аппаратах определим с учетом выражения (9) по формуле

$$N_{\text{выд2}} = \frac{p_{\text{в}} n_{\text{д.а}}}{1000 \eta_{\text{н}}} \left[n_{\text{д.с}} \left(\frac{V_{\text{м.к1}} + V_{\text{шл.дс1}} + V_{\text{п.к1}}}{t_{\text{А}}} \right) + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4} \right]. \quad (11)$$

При анализе формул (10) и (11) было установлено, что потребная мощность, затрачиваемая на выдаивание молока, зависит от величины вакуумметрического давления в доильном аппарате и его конструктивных параметров.

В процессе машинного доения коров в доильной установке выдоенное молоко с воздухом транспортируется из подсосковых камер доильных стаканов по молочным трубкам в коллектор доильного аппарата и далее по молочному шлангу в молокопровод, по которому транспортируется в молокоприемник доильной установки.

Тогда объем молоковоздушной смеси, поступающей в молокоприемник доильной установки в единицу времени, определим для двухтактного доильного аппарата с учетом формул (3) и (7):

$$Q_{\text{см1}} = \frac{\pi n_{\text{д.а}}}{4} \left(\frac{n_{\text{д.с}} d_{\text{к}}^2 \mu_1 t_{\text{в}} \chi_{\text{п}} v_1}{60} + d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}} \right), \quad (12)$$

где $t_{\text{в}}$ — продолжительность такта «сосание», с;

$\chi_{\text{п}}$ — частота пульсаций, мин⁻¹.

Так как в трех- и четырехтактных доильных аппаратах с выдоенным молоком также происходит и откачка воздуха из подсосковых камер доильных стаканов до величины вакуумметрического давления, то формула для определения объема молоковоздушной смеси, поступающей в молокоприемник доильной установки в единицу времени при трех- и четырехтактном доении, с учетом формул (3), (7) и (9) примет следующий вид:

$$Q_{см2} = \frac{\pi n_{д.а}}{4} \left(\frac{n_{д.с} \chi_{п}}{60} \left(d_k^2 \mu_1 t_B v_1 + d_B^2 (l_{с.р} - l_c - l_{м.т}) \left(\frac{p_{атм}}{(p_{атм} - p_B)} - 1 \right) \right) + d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B \right). \quad (13)$$

При движении потока молока из подсосковых камер доильных стаканов в коллектор доильного аппарата возникают потери вакуумметрического давления, вызванные местными гидравлическими сопротивлениями. Тогда формулу для определения местных потерь вакуумметрического давления на гидравлические сопротивления при движении потока молока из подсосковых камер доильных стаканов в коллектор доильного аппарата определим как для потока жидкости при движении по трубопроводу [3, с. 128]:

$$\Delta p_{1-2}^M = \frac{\rho(v_1^2 - v_2^2)}{2}, \quad (14)$$

где v_2 — скорость потока молока на выходе из молочной трубки, м / с.

Скорость потока молока на выходе из молочной трубки определим как для потока жидкости при движении по трубопроводу [4, с. 117]:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_B - p_{вым})}{\rho(\alpha + \xi_{п.с} + \xi_{вых})}}, \quad (15)$$

где α — коэффициент Кориолиса;

$\xi_{п.с}$ — коэффициент местных сопротивлений, обуславливающий постепенное сужение диаметра сосковой резины в месте ее соединения с молочной трубкой;

$\xi_{вых}$ — коэффициент местных сопротивлений, обуславливающий выход потока молока из молочной трубки в коллектор.

С учетом формулы (15) выражение (14) примет следующий вид:

$$\Delta p_{1-2}^M = (p_B - p_{вым}) \left(1 - \frac{1}{(\alpha + \xi_{п.с} + \xi_{вых})} \right). \quad (16)$$

Потери давления по длине молочной трубки при движении потока молока из подсосковой камеры доильного стакана в коллектор доильного аппарата определим по формуле Дарси—Вейсбаха [4, с. 155]:

$$\Delta p_{1-2}^{дл} = \frac{\lambda_1 l_{м.т} v_2^2}{2g d_{м.т}}, \quad (17)$$

где λ_1 — коэффициент гидравлических потерь на трение по длине молочной трубки;

$l_{м.т}$ — длина молочной трубки, м;

g — ускорение свободного падения, м / с²;

$d_{м.т}$ — внутренний диаметр молочной трубки, м.

Тогда суммарные потери вакуумметрического давления при движении потока молока из подсосковых камер доильных стаканов в коллектор доильного аппарата определим как сумму выражений (17) и (16) с учетом геометрических напоров:

$$\Delta p_{1-2} = (p_B - p_{\text{ВЫМ}}) \left(\frac{1}{(\alpha + \xi_{\text{п.с}} + \xi_{\text{ВЫХ}})} \left(\frac{0,316 l_{\text{м.т}}}{\sqrt[4]{\text{Re}} g d_{\text{м.т}} \rho} - 1 \right) + 1 \right) + (z_2 - z_1) g \rho, \quad (18)$$

где z_2 — высота расположения коллектора доильного аппарата, м;

z_1 — высота расположения доильных стаканов, м.

Из коллектора доильного аппарата молоко за счет вакуумметрического давления транспортируется по молочному шлангу в молокопровод доильной установки. Тогда формула для определения местных потерь вакуумметрического давления при движении потока молоко-воздушной смеси из коллектора в молокопровод примет следующий вид:

$$\Delta p_{2-3}^{\text{м}} = \frac{\rho_{\text{см}} (v_3^2 - v_4^2)}{2}, \quad (19)$$

где $\rho_{\text{см}}$ — плотность молоковоздушной смеси, кг / м³;

v_3 — скорость потока молоковоздушной смеси на входе в молочный шланг, м / с;

v_4 — скорость потока молоковоздушной смеси на входе в молокопровод, м / с.

Так как молоковоздушная смесь движется из коллектора в молокопровод за счет разности давлений, то скорость потока молоковоздушной смеси на входе в молочный шланг определим по формуле

$$v_3 = \sqrt{\frac{2(p_B - \Delta p_{1-2})}{\rho_{\text{см}}}}. \quad (20)$$

Молоко, транспортируемое в молокопровод, смешивается с воздухом, поступающим через калиброванное отверстие в корпусе коллектора. Тогда плотность молоковоздушной смеси определим с учетом формул (3) и (7):

$$\rho_{\text{см}} = \frac{n_{\text{д.с}} \rho d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1 + \rho_{\text{в}} d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{n_{\text{д.с}} d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1 + d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}. \quad (21)$$

Подставив значения формулы (21) в выражение (20), получим формулу для определения скорости потока молоковоздушной смеси на входе в молочный шланг:

$$v_3 = \sqrt{\frac{2(p_B - \Delta p_{1-2}) (n_{\text{д.с}} \rho d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1 + \rho_{\text{в}} d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}})}{n_{\text{д.с}} d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1 + \rho_{\text{в}} d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}}. \quad (22)$$

Скорость потока молоковоздушной смеси на выходе из молочного шланга в молокопровод определим по формуле

$$v_4 = \varphi_2 v_3, \quad (23)$$

где φ_2 — коэффициент скорости потока молоковоздушной смеси при движении по молочному шлангу, определяемый по формуле

$$\varphi_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{\text{ВЫХ}}}}. \quad (24)$$

С учетом формул (18), (23) и (24) выражение (19) примет следующий вид:

$$\Delta p_{2-3}^M = (p_B - \Delta p_{1-2}) \left(1 - \frac{1}{(\alpha + \xi_{\text{ВЫХ}})} \right). \quad (25)$$

Потери давления по длине молочного шланга при движении потока молоковоздушной смеси из коллектора в молокопровод определим по формуле

$$\Delta p_{2-3}^{\text{дл}} = \frac{\lambda_2 l_{\text{м. шл}} v_3^2}{2gd_{\text{м. шл}}}, \quad (26)$$

где λ_2 — коэффициент потерь на трение по длине молочного шланга;

$l_{\text{м. шл}}$ — длина молочного шланга, м.

$d_{\text{м. шл}}$ — диаметр молочного шланга доильной установки, м.

Суммарные потери вакуумметрического давления при движении потока молоковоздушной смеси из коллектора в молокопровод определим с учетом выражений (26), (22), (25) и геометрических напоров:

$$\Delta p_{2-3} = (p_B - \Delta p_{1-2}) \left(1 - \frac{1}{(\alpha + \xi_{\text{ВЫХ}})} \right) + \frac{0,316 \Delta p_{1-2} l_{\text{м. шл}}}{\rho_{\text{см}} g d_{\text{м. шл}} \sqrt[4]{\text{Re}_2}} + (z_3 - z_2) g \rho_{\text{см}}, \quad (27)$$

где Re_2 — число Рейнольдса для потока молока при движении по молочному шлангу доильного аппарата;

z_3 — высота расположения молокопровода, м;

z_2 — высота расположения коллектора, м.

Так как транспортировка молоковоздушной смеси в молокоприемник осуществляется по молокопроводу, то потери вакуумметрического давления при движении потока молоковоздушной смеси в молокоприемник доильной установки определим как потери по длине молокопровода:

$$\Delta p_{3-4} = \frac{\lambda_3 l_{\text{м. пр}} v_5^2}{2gd_{\text{м. пр}}}, \quad (28)$$

где λ_3 — коэффициент потерь на трение по длине молокопровода;

$l_{\text{м. пр}}$ — длина молокопровода, м;

v_5 — скорость потока молоковоздушной смеси в молокопроводе, м / с;

$d_{\text{м. пр}}$ — диаметр молокопровода, м.

Скорость потока молоковоздушной смеси в молокопроводе определим как для потока жидкости при движении по трубопроводу за счет разности давлений:

$$v_5 = \sqrt{\frac{2(p_B - \Delta p_{2-3})}{\rho_{\text{см}} (\alpha + \xi_{\text{ВЫХ}} + \xi_{\text{ПОВ}})}}. \quad (29)$$

Суммарные потери вакуумметрического давления при движении потока молоковоздушной смеси из подсосковых камер доильного стакана в молокоприемник доильной установки определим как сумму выражений (27), (28) и (18):

$$\Delta p_B = n_{д.а} \left[\frac{0,316 l_{м.т} (p_B - p_{вым})}{\sqrt[4]{Re} g d_{м.т} \rho (\alpha + \xi_{п.с} + \xi_{вых})} + \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_2 l_{м.шл} v_3^2}{g d_{м.шл}} + \rho (v_1^2 - v_2^2) + \rho_{см} (v_3^2 - v_4^2) + g (\rho_{см} (z_3 - z_2) + \rho (z_2 - z_1)) \right) \right] + \frac{0,316 l_{м.пр} (p_B - \Delta p_{2-3})}{\rho_{см} g d_{м.пр} (\alpha + \xi_{вых} + \xi_{пов}) \sqrt[4]{Re_3}}. \quad (30)$$

Тогда затраты мощности вакуумного насоса на транспортировку молока из подсосковых камер доильных стаканов в молокоприемник доильной установки при двухтактном доении определим с учетом формул (30) и (12):

$$N_{тр1} = \frac{\pi n_{д.а} (n_{д.а} (\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-3}) + 2\Delta p_{3-4})}{4000 \eta_H} \left(\frac{n_{д.с} d_K^2 \mu_1 t_B \chi_{п} v_1}{60} + d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B \right). \quad (31)$$

Затраты мощности на транспортировку молока из подсосковых камер доильных стаканов в молокоприемник доильной установки при трех- и четырехтактном доении определим с учетом выражений (30) и (13):

$$N_{тр2} = \frac{\pi n_{д.а} (n_{д.а} (\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-3}) + 2\Delta p_{3-4})}{4000 \eta_H} \times \left(\frac{n_{д.с} \chi_{п}}{60} \left(d_K^2 \mu_1 t_B v_1 + d_B^2 (l_{с.р} - l_c - l_{м.т}) \left(\frac{p_{атм}}{(p_{атм} - p_B)} - 1 \right) \right) + d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B \right). \quad (32)$$

Анализ формул (31) и (32) показал, что необходимая мощность на транспортировку молока из подсосковых камер доильных стаканов в молокоприемник доильной установки зависит от конструкции доильной установки, величины вакуумметрического давления, высоты расположения молокопровода относительно доильной площадки, частоты пульсаций и конструкции вакуумного насоса.

Результаты исследования и их обсуждение. Подставив значения формул (31), (2) и (10) в выражение (1), после математических преобразований получим формулу для определения потребляемой мощности на процесс машинного доения коровы двухтактным доильным аппаратом:

$$N_{д1} = \frac{n_{д.а}}{1000 \eta_H} \left[p_B \left[n_{д.с} \left(\frac{\pi d_K^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{V_{м.к1} + V_{шл.дс1}}{t_A} \right) + \frac{\pi d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B}{4} \right] + \frac{\pi (n_{д.а} (\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-3}) + 2\Delta p_{3-4})}{4} \left(\frac{n_{д.с} d_K^2 \mu_1 t_B \chi_{п} v_1}{60} + d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B \right) \right]. \quad (33)$$

Для трех- и четырехтактного доильных аппаратов формула по определению потребляемой мощности на процесс машинного доения коровы с учетом выражений (31), (2) и (11) примет следующий вид:

$$N_{д2} = \frac{n_{д.а}}{1000 \eta_H} \left[p_B \left[n_{д.с} \left(\frac{V_{м.к1} + V_{шл.дс1} + V_{п.к1}}{t_A} \right) + \frac{\pi d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B}{4} \right] + \frac{\pi \Delta p_B}{4} \left(\frac{n_{д.с} \chi_{п}}{60} \left(d_K^2 \mu_1 t_B v_1 + d_B^2 (l_{с.р} - l_c - l_{м.т}) \left(\frac{p_{атм}}{(p_{атм} - p_B)} - 1 \right) \right) + d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B \right) \right]. \quad (34)$$

Подставив численные значения конструктивных и технологических параметров доильной установки в формулы (33) и (34), получим графические зависимости потребной мощности на процесс машинного доения коровы от величины вакуумметрического давления в доильном аппарате (рисунки 1, 2).

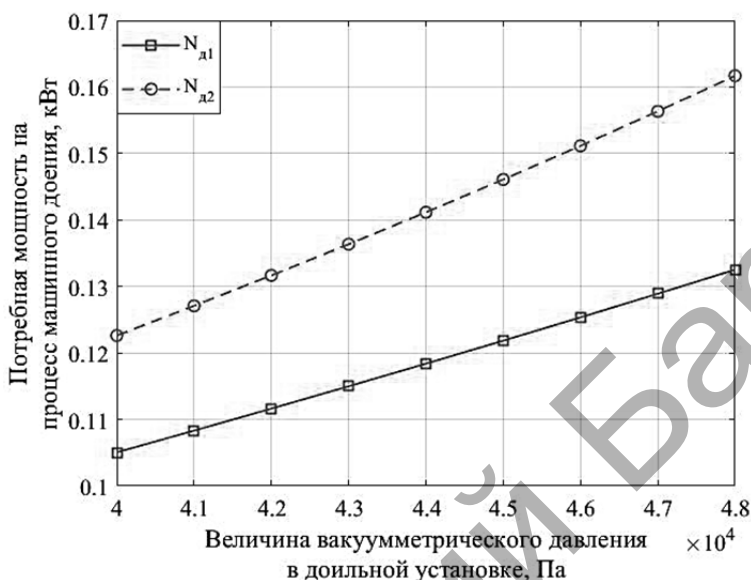


Рисунок 1. — Зависимость потребной мощности на процесс машинного доения коровы от величины вакуумметрического давления в доильном аппарате при $\chi_{п} = 60 \text{ мин}^{-1}$ и соотношении тактов 60/40

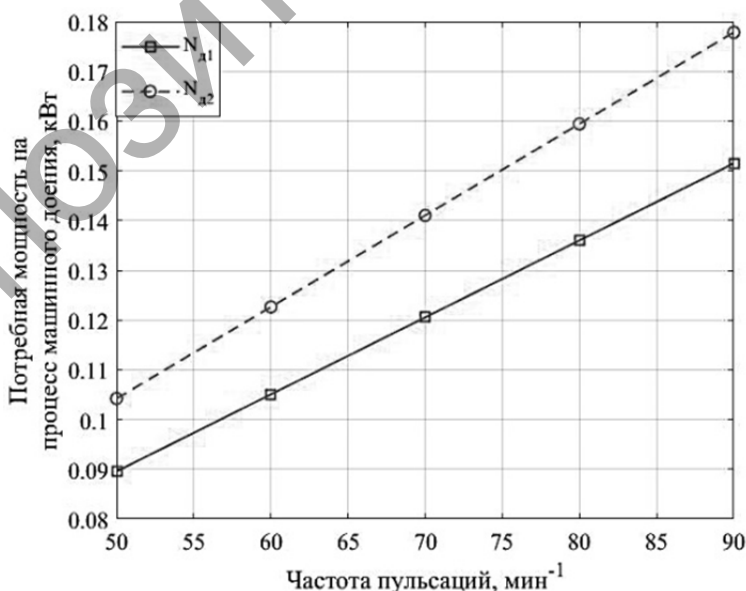


Рисунок 2. — Зависимость потребной мощности на процесс машинного доения коровы от частоты пульсаций в доильном аппарате при $p_{в} = 40 \text{ кПа}$ и соотношении тактов 60/40

Заключение. При анализе графических зависимостей, представленных на рисунках 1 и 2, было установлено, что потребная мощность на процесс машинного доения коровы находится в пределах 0,09...0,18 кВт на один доильный аппарат. Увеличение потребной мощности на процесс машинного доения коровы с повышением величины вакуумметрического давления и частоты пульсаций происходит из-за увеличения расхода воздуха в доильном аппарате.

Установлено, что потребная мощность на процесс машинного доения коровы $N_{д1} = 0,105$ кВт в двухтактном доильном аппарате и $N_{д2} = 0,1226$ кВт — в трех- и четырехтактном при $p_v = 40$ кПа, $\chi_d = 60 \text{ мин}^{-1}$, соотношении тактов 60/40.

Список цитированных источников

1. Мишуров, Н. П. Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока / Н. П. Мишуров. — М. : Росинформагротех, 2010. — 152 с.
2. Калекин, А. А. Гидравлика и гидравлические машины : учеб. пособие для студентов вузов / А. А. Калекин. — М. : Мир, 2005. — 512 с.
3. Зезин, В. Г. Механика жидкости и газа : учеб. пособие / В. Г. Зезин. — Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2016. — 250 с.
4. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы : учеб. для машиностр. вузов / Т. М. Башта [и др.]. — М. : Альянс, 2010. — 423 с.

Поступила в редакцию 22.03.2022.