

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.5.614-624>

УДК 637.115



Экспериментально-теоретические исследования движения молока и воздуха в молоковыводящем тракте доильного аппарата

© 2020. А. А. Рылов¹, П. А. Савиных^{1,2}✉, В. Н. Шулятьев¹

¹ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Киров, Российская Федерация,

²ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

В статье на основании сплошной модели пробкового течения двухфазной среды выполнен теоретический анализ процесса движения молока из молочной камеры коллектора по молочному шлангу до молокопровода. Получены аналитические выражения, позволяющие определять величины падения давления на нисходящем и восходящем участках молочного шланга. По результатам теоретического анализа для двухтактного аппарата попарного действия выявлена линейная зависимость ($R^2 = 0,9965$) между падением давления в молочном шланге и интенсивностью молоковыведения. Экспериментальные исследования величины падения давления в молочном шланге доильного аппарата, выполненные в коровнике на 200 голов одного из передовых предприятий Кировской области, подтвердили весьма тесную связь ($R^2 = 0,9967$) между текущей интенсивностью молоковыведения и падением давления в молочном шланге при движении молоковоздушной смеси. Во всем диапазоне варьирования интенсивности молоковыведения потери давления на нисходящем участке изменялись в диапазоне $\Delta p_{пр12} = 0,85...1,47$ Па. По абсолютному вкладу в общие потери давления $\Delta p_{1-3} = 8293,80...12705,32$ Па подавляющее влияние оказывают потери давления на преодоление сил тяжести на восходящем участке молочного шланга $\Delta p_{\text{ш}} = 6611,31...10992,27$ Па. Результаты расчетов падения давления в молочном шланге, выполненные по предлагаемому в статье алгоритму, укладываются в доверительный интервал экспериментального измерения падения давления с 5% уровнем значимости. Использование результатов работы позволит прогнозировать потери давления в молочном шланге в зависимости от интенсивности молоковыведения и учитывать результаты расчетов при проектировании доильных аппаратов и разработке их алгоритмов функционирования для доения высокоудойных коров.

Ключевые слова: давление, двухфазная среда, интенсивность молоковыведения, коллектор, молоковоздушная смесь, молокопровод, молочный шланг, пробковое и расслоенное движение

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № 0767-2019-0094).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Рылов А. А., Савиных П. А., Шулятьев В. Н. Экспериментально-теоретические исследования движения молока и воздуха в молоковыводящем тракте доильного аппарата. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(5):614-624. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.5.614-624>

Поступила: 11.03.2020

Принята к публикации: 01.09.2020

Опубликована онлайн: 22.10.2020

Experimental and theoretical studies of milk and air motion in the milk-producing tract of the milking machine

© 2020. Alexander A. Rylov¹, Peter A. Savinykh^{1,2}✉, Valeri N. Shulyatyev¹

¹Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russian Federation,

²Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky,
Kirov, Russian Federation

The article provides a theoretical analysis of the process of milk movement from the milk chamber of the collector through the milk hose to the milk pipeline using a continuous model of the plug flow of a two-phase medium. There have been obtained analytic expressions that allow determining the values of pressure drop in the descending and ascending sections of the milk hose. According to the results of the theoretical analysis for two-stroke milking machine of pairwise action there was obtained a linear dependence ($R^2=0.9965$) between the pressure drop in the milk hose and intensity

of milk production. Experimental studies of the value of the pressure drop in the milk hose of the milking machine performed in a cowshed for 200 heads of one of the leading enterprises of the Kirov region confirmed a very close relationship ($R^2 = 0.9967$) between the current intensity of milk production and the pressure drop in the milk hose when the milk-air mixture moves. Over the entire range of variation in the intensity of lactation, the pressure loss in the descending section varies in the range $\Delta p_{mp12} = 0.85 \dots 1.47$ Pa. According to the absolute contribution to the total pressure loss $\Delta p_{1-3} = 8293.80 \dots 12705.32$ Pa, the pressure loss for overcoming gravity force in the ascending section of the milk hose $\Delta p_p = 6611.31 \dots 10992.27$ Pa has the greatest influence. The results of calculations of the pressure drop in the milk hose performed according to the algorithm proposed in the article, fit into the confidence interval of the experimental measurement of the pressure drop with a 5% significance level. Using the results of the research will allow to predict pressure losses in the milk hose in dependence to the intensity of milk production and take into account the results of calculations when designing milking machines and developing their functioning algorithms for milking high-yield cows.

Keywords: pressure, two-phase medium, milk production intensity, collector, milk-air mixture, milk line, milk hose, plug and stratified movement

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. 0767-2019-0094).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Rylov A. A., Savinykh P. A., Shulyatyev V. N. Experimental and theoretical studies of milk and air motion in the milk-producing tract of the milking machine. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(5):614-624. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.5.614-624>

Received: 11.03.2020

Accepted for publication: 01.09.2020

Published online: 22.10.2020

В результате направленной селекционной работы и ответственного отношения к кормовым рационам, осуществляемых во всех категориях хозяйств РФ, в последние годы среднегодовые удои на одну корову ежегодно увеличивались на 0,2...5,7 % [1]. Для доильного аппарата, осуществляющего принудительное движение выдоенного молока, постоянное повышение объема разовых удоев является дополнительной нагрузкой на его молоководящую систему. Наиболее сложным для транспортирования является участок (молочный шланг) от коллектора доильного аппарата до молокопровода. Пространственное расположение молокопровода относительно коллектора определяющим образом влияет в целом на отсасывающую способность доильного аппарата. При несоответствии интенсивности молоковыведения транспортирующей способности молочного шланга усиливается инерционность движения молоковоздушной смеси, ухудшается качество молока [2], увеличиваются пульсации разрежения в коллекторе доильного аппарата [3]. Пульсации разрежения способствуют возникновению воспалительных процессов в молочной железе вымени у коров [4, 5, 6]. Повсеместному распространению мастита [7, 8, 9] сопутствуют существенные экономические потери в молочном скотоводстве [3, 10]. Поэтому исследования гидравлических процессов, направленные на определение структуры течения молоковоз-

душной смеси и величину потерь давления в молочном шланге доильного аппарата, не потеряли своей актуальности.

Цель исследований – теоретические и экспериментальные исследования структуры течения и потерь давления при движении молоковоздушной смеси по молочному шлангу от коллектора доильного аппарата до молокопровода.

Материал и методы. Теоретические исследования выполнены на основе базовых законов гидрогазодинамики¹. Экспериментальная часть работы осуществлена в типовом коровнике на 200 голов привязного содержания с верхним расположением молокопровода в одном из передовых хозяйств Кировской области. Средний годовой удой на корову на момент проведения экспериментов составлял 7100 л. Измерения интенсивности молоковыведения и вакуумного режима выполнены во время дневной дойки. В опытах использован доильный аппарат с устройством почетвертного контроля интенсивности молоковыведения [11]. Измерения разрежения в молочной камере коллектора и молокопроводе выполнены с помощью вакуум-тестера «Тензор-7». В расчетах использованы усредненные показатели разрежения в молочной камере коллектора за такт сосания. Удой в опытах измерялся с интервалом в 12 с посредством молокомера WAIKATO MK5.

¹Ахметистов Е. В., Григорьев В. А., Емцов Б. Т. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.

Результаты и их обсуждение. Молоко-выводящий тракт доильного аппарата включает в себя четыре доильных стакана, коллектор и молочный шланг, соединяющий коллектор с молокопроводом (рис. 1).

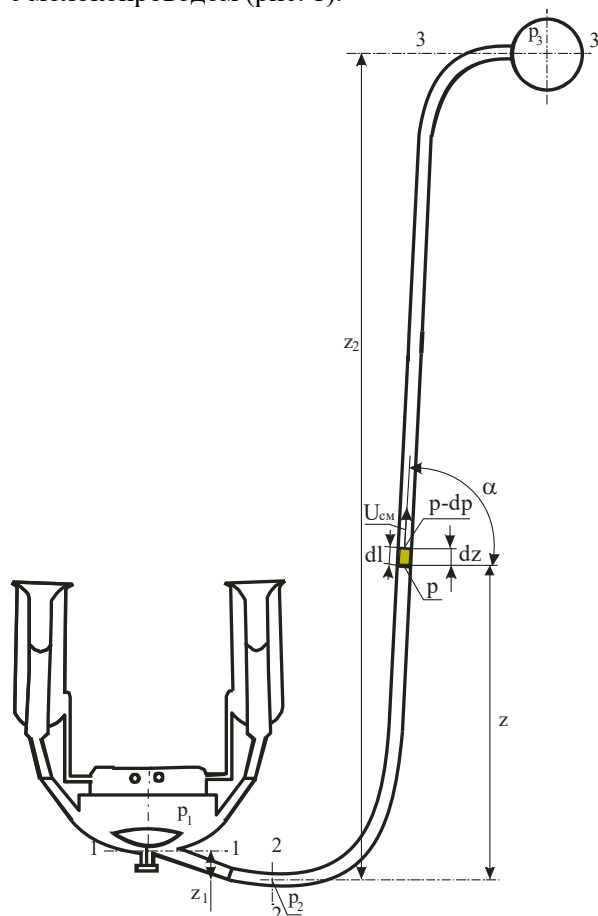


Рис. 1. Схема молоковыводящего тракта доильного аппарата /
Fig. 1. Scheme of the milk-producing tract of the milking machine

Обеспечить непрерывное движение молока по молочному шлангу на участке от коллектора доильного аппарата до молокопровода технологически необходимо и очень важно, а технически весьма непросто.

В молочном шланге доильного аппарата происходит принудительное перемещение молока в виде молоковоздушной смеси в условиях смены направления ее движения по отношению к направлению действия сил гравитации, поскольку за нисходящим течением следует восходящее течение молоковоздушной смеси.

Для гарантированного транспортирования молока по молочному шлангу из коллектора доильного аппарата в молокопровод, особенно при его верхнем расположении, необходимо обеспечить устойчивое превышение давления в молочной камере коллектора над величиной давления в молокопроводе.

Превышение давления в современных доильных аппаратах технически достигается путем постоянного подсоса воздуха через специальное калиброванное отверстие, расположенное в верхней части коллектора [3, 12]. Массовый расход поступающего через отверстие в коллекторе воздуха можно определить по формуле²

$$G_2 = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2kp_0\rho_0}{(k-1)} \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]},$$

где G_2 – массовый расход воздуха, поступающего в коллектор, кг/с; $\mu = 0,62$ – коэффициент расхода через малое отверстие с острой кромкой; $d = 0,0008$ м – диаметр калиброванного отверстия; $k = 1,4$ – показатель адиабаты для воздуха; p_0 – атмосферное давление, Па; p_1 – давление в молочной камере коллектора, Па; ρ_0 – плотность воздуха при атмосферном давлении, кг/м³.

Объемный расход воздуха, поступающего из коллектора в молочный шланг доильного аппарата в смеси с молоком, может быть определен с учетом его сжимаемости через его массовый расход по выражению

$$Q_2 = \frac{G_2}{\rho_2},$$

где ρ_2 – плотность воздуха в молочной камере коллектора, кг/м³.

Тогда объемный расход воздуха будет равен

$$Q_2 = \mu \frac{\pi d^2}{4\rho_2} \sqrt{\frac{2kp_0\rho_0}{(k-1)} \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (1)$$

Известно³, что параметры газа без теплообмена с окружающей средой (адиабатный процесс) описываются выражением

$$\frac{p}{\rho^k} = const.$$

²Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М: Машиностроение, 1992. 672 с. (С. 41).

³Дейч М. Е. Техническая газодинамика. Изд. 2-е, перераб. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. 673 с.

Поэтому плотность воздуха в молочной камере коллектора можно выразить через его плотность при атмосферном давлении

$$\rho_2 = \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} \rho_0. \quad (2)$$

Заменив в выражении (1) плотность воздуха через эквивалентную ему величину из выражения (2), получим

$$Q_2 = \mu \frac{\pi d^2}{4} \frac{\sqrt{\frac{2k p_0 \rho_0}{(k-1)} \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}}{\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} \rho_0}.$$

После несложных преобразований, связанных с делением подкоренного выражения на соответствующее значение плотности воздуха в молочной камере коллектора, объемный расход воздуха, поступающий в молочный шланг доильного аппарата, будет равен

$$Q_2 = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k p_0}{(k-1) \rho_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

Нетрудно заметить (рис. 1), что на пути движения молоковоздушной смеси от коллектора к молокопроводу в молочном шланге имеются два участка с разными условиями организации направленного движения молока и воздуха: нисходящий участок 1-2 и восходящий – 2-3. Известно [13], что движение двухфазных сред на снижающихся участках трубопровода и его подъема при малых значениях числа Фруда обязательно сопровождается сменой структуры потока. На восходящих участках, как правило, поток имеет пробковую структуру [2, 13, 14, 15]. На нисходящих участках чаще всего устанавливается расслоенное движение молоковоздушной смеси [13]. Молоко из коллектора на нисходящем участке 1-2 способно перемещаться вниз исключительно за счет сил тяжести в режиме безнапорного движения и, наоборот, на участке 2-3 необходим перепад давлений для преодоления совместного действия сил трения и гравитации для обеспечения устойчивого перемещения молоковоздушной смеси снизу вверх по молочному шлангу.

Для определения потерь давления, происходящих во время движения двухфазных

сред, наиболее популярен подход, базирующийся на использовании сплошной модели пробкового течения [2, 13, 16], основное соотношение которого [5, 13, 16] связывает касательные напряжения на стенках молочного шланга с параметрами движения двухфазного потока

$$\tau = \frac{\lambda_{cm}}{8} \rho_{cm} U_{cm}^2, \quad (3)$$

где τ – касательное напряжение на стенке трубопровода, Н/м²; λ_{cm} – коэффициент гидравлического сопротивления; ρ_{cm} – плотность смеси, кг/м³; U_{cm} – скорость смеси молока с воздухом, м/с.

Для теоретического анализа процесса транспортирования молоковоздушной смеси на основе сплошной модели пробкового движения выделим на участке молочного шланга (рис. 1) элементарный объем молоковоздушной смеси, длиной dl , и определим потери давления на этом участке, обусловленные силами трения. Для этого умножим обе части уравнения (3) на смоченный периметр живого сечения молочного шланга, элементарную длину и поделим на площадь живого сечения молочного шланга

$$\frac{4\tau\pi D dl}{\pi D^2} = \frac{4\lambda_{cm}\rho_{cm}U_{cm}^2\pi D dl}{8\pi D^2},$$

где D – диаметр молочного шланга, м; dl – длина выделенного элементарного объема молоковоздушной среды, м.

Длина выделенного участка dl связана с расстоянием по высоте dz простым соотношением $dl = dz/\sin\alpha$ (рис. 1), где dz – длина вертикальной проекции элементарного участка, м; α – угол наклона шланга к горизонту, град.

В результате выполнения очевидных преобразований, принимая во внимание, что $dl = dz/\sin\alpha$, получим выражение, определяющее потери давления, необходимые на преодоление сил трения при движении выделенного объема молоковоздушной смеси на элементарном участке молочного шланга

$$dp_{mp} = \lambda_{cm} \frac{dz}{D \sin \alpha} \frac{\rho_{cm} U_{cm}^2}{2}. \quad (4)$$

Применив к живым сечениям (рис. 1) выделенного элементарного объема молоковоздушной смеси, двигающегося со скоростью U_{cm} , уравнение Бернулли, получим

$$\frac{p}{\rho_{cm} g} + z + \frac{U_{cm}^2}{2g} = \frac{p - dp}{\rho_{cm} g} + z + dz + \frac{U_{cm}^2}{2g} + h_w.$$

После несложных преобразований, связанных с приведением подобных членов, из уравнения Бернулли выразим величину давления dp , определяющую потери давления, обусловленные движением элементарного объема молоковоздушной смеси со скоростью U_{cm} ,

$$dp = h_w \rho_{cm} g + \rho_{cm} g dz. \quad (5)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (5) представляет собой потери давления на преодоление сил трения, поэтому заменим эту составляющую потерь давления на трение в уравнении (5) эквивалентным ему значением из выражения (4). В результате замены получим

$$dp = \lambda_{cm} \frac{dz}{D \sin \alpha} \frac{\rho_{cm} U_{cm}^2}{2} + \rho_{cm} g dz. \quad (6)$$

Очевидно, что потери давления на участках 1-2 и 2-3 (рис. 1) молочного шланга можно рассчитать путем интегрирования уравнения (6) в пределах текущих значений высоты подъема z и угла α при осредненных значениях ρ_{cm} , λ_{cm} , и U_{cm}

$$dp = \int_{z_i}^{z_{i+1}} \lambda_{cm} \frac{dz}{D \sin \alpha} \frac{\rho_{cm} U_{cm}^2}{2} + \int_{z_i}^{z_{i+1}} \rho_{cm} g dz. \quad (7)$$

Структуру течения молоковоздушной смеси исчерпывающе полно характеризуют объемное расходное содержание воздуха, критерий Фруда и скорость движения смеси, выраженная обобщенной безразмерной величиной скорости W_* .

Объемное β расходное содержание воздуха для молоковоздушной смеси определяются по формуле [13]

$$\beta = Q_2 / (Q_1 + Q_2),$$

где Q_1 , Q_2 – объемные расходы соответственно молока и воздуха.

Число Фруда, соответствующее фактическим условиям движения молоковоздушной смеси в молочном шланге доильного аппарата, будет равно [13]

$$Fr_{cm} = \left[\frac{4(Q_1 + Q_2)}{\pi D^2} \right]^2 \frac{1}{g D},$$

где Fr_{cm} – критерий Фруда; D – диаметр молочного шланга, м.

Обобщенная безразмерная величина скорости смеси в молочном шланге определяется выражением [13]

$$W_* = \frac{4(Q_1 + Q_2)}{\pi D^2} \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{g \sigma} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0.5},$$

где ρ_1 и ρ_2 – соответственно плотности молока и воздуха, кг/м³; σ – коэффициент поверхностного натяжения молока, Н/м.

При движении молока после коллектора на нисходящем участке молочного шланга в зависимости от конкретных условий возможны кольцевой, пробковый и расслоенный режимы течения молоковоздушной смеси. На нисходящем и горизонтальном участках молочного шланга граница смены структуры движения молоковоздушной смеси определяется по критическому значению обобщенной безразмерной величины скорости W_{cp} , определяемой по формуле [13]

$$W_{cp} = (2,2 - 0,0017 \bar{\mu}^{-0,6}) 10^{(5,3+115\bar{\mu})(1-\beta)},$$

где $\bar{\mu} = \mu_2 / \mu_1$ – относительная вязкость молоковоздушной смеси; μ_2 – динамическая вязкость воздуха, Па·с; μ_1 – динамическая вязкость молока, Па·с.

При $W_* > W_{cp}$ имеет место кольцевой режим движения, а при $W_* < W_{cp}$ осуществляется пробковое или расслоенное течение молоковоздушной смеси.

На горизонтальном и нисходящем участках молочного шланга при конкретном значении β условие существования пробкового или расслоенного движения молоковоздушной смеси определяют по величине критерия Фруда. С целью уточнения возможности существования пробкового или расслоенного режимов необходимо рассчитать граничное значение критерия Фруда по полуэмпирической формуле [13]

$$Fr^* = \left[0,2 + \frac{2 \sin \alpha}{\lambda} \right] e^{-2,5\beta} \frac{1}{(1-\beta)^2},$$

где Fr^* – граничное значение критерия Фруда.

При значении критерия Фруда $Fr_{cm} > Fr^*$ имеет место пробковая структура течения молоковоздушной смеси. При выполнении условия $Fr_{cm} < Fr^*$ осуществляется расслоенное течение молоковоздушной смеси на нисходящем участке молочного шланга.

Известно [13], что влияние угла наклона трубопровода при $\beta > 0,2$ исчерпывающе точно учитывается величиной критерия Фруда Fr_0 , являющейся необходимым и достаточным условием обеспечения безнапорного движения молока на нисходящем участке молочного шланга

$$Fr_0 = \frac{2 \sin \alpha}{\lambda_1},$$

где α – угол наклона молочного шланга, град;

λ_1 – коэффициент гидравлического сопротивления (коэффициент Дарси), значение которого соответствует числу Рейнольдса, определяемого по скорости безнапорного движения молока на нисходящем участке молочного шланга под действием сил гравитации.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ_1 в приведенной выше формуле определяется по известному тригонометрическому соотношению $\Delta z/\Delta l = \sin \alpha$ методом последовательного приближения по числу Re_1 , соответствующего скорости безнапорного течения молока на нисходящем участке молочного шланга, обусловленного силами гравитации.

При реализации метода последовательного приближения необходимо задаваться скоростью движения молока U_1 , по которой последовательно находить эквивалентный диаметр живого сечения потока молока, число Рейнольдса и коэффициент Дарси в функции числа Рейнольдса по формулам:

$$D_{1\phi} = \sqrt{\frac{4Q_1}{\pi U_1}}; \quad Re_1 = \frac{U_1 D_{1\phi}}{\nu_1}; \quad \lambda_1 = f(Re_1),$$

где $D_{1\phi}$ – эквивалентный диаметр живого сечения потока молока, м; ν – кинематическая вязкость молока, m^2/c .

Вычисления необходимо выполнять до тех пор, пока располагаемый напор dh не сравняется по величине с потерями напора на трение. Практически при реализации метода последовательного приближения достаточно достигнуть результата, при котором выполняется условие:

$$\left(\Delta h - \lambda_1 \frac{\Delta l}{D_{1\phi}} \frac{U_1^2}{2g} \right) / \Delta h \leq 0,01,$$

где Δh – высота снижения молочного шланга, м; Δl – длина молочного шланга на участке снижения, м.

При движении молоковоздушной смеси в молочном шланге на нисходящем и восходящем участках истинное содержание воздуха ϕ является главным параметром, определяющим потери давления [2, 13, 16]. Поэтому при анализе молоковыводящего тракта доильного аппарата необходимо истинное содержание воздуха в смеси рассчитывать отдельно для нисходящего и восходящего участков молочного шланга. Истинная величина содержания воздуха ϕ при наличии устойчивого расслоенного течения молоковоздушной смеси, при объемном содержании воздуха, отвечающему интервалу $0,16 \leq \beta < 1,0$ и соотношению

$Fr_{cm} < Fr^*$, определяется в зависимости от величины χ по формулам [12]:

$$\phi = 1 - \chi^{0,4} \quad \text{при } 0 \leq \chi \leq 0,18;$$

$$\phi = 0,615(1 - \chi) \quad \text{при } 0,18 \leq \chi \leq 1,$$

где χ – коэффициент вычисляется по выражению

$$\chi = \frac{\lambda_1 (1 - \beta)^2 Fr_{cm}}{2 \sin \alpha}.$$

Следует иметь в виду, что при расслоенном установившемся режиме течения молоковоздушной смеси на нисходящем участке молочного шланга потери давления на трение потока молока практически полностью компенсируются энергией располагаемого напора Δh_{12} . Поэтому на нисходящем участке молочного шланга при соблюдении условий расслоенного режима движения молока и воздуха потери давления обусловлены исключительно за счет движения воздушной среды и могут быть определены интегрированием первого члена левой части выражения (7).

Полагая, что выражение $\int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{\sin \alpha}$ опре-

деляет длину нисходящего участка молочного шланга, на котором имеют место местные сопротивления, выражение (7) для нисходящего участка 1-2 (рис. 1) примет вид:

$$\Delta p_{12} = \left(\lambda_2 \frac{l_{12}}{D_{2\phi}} + \sum_1^n \zeta_i \right) \frac{\rho_2 U_2^2}{2},$$

где l_{12} – длина молочного шланга на нисходящем участке, м; $D_{2\phi}$ – эквивалентный диаметр для прохождения потока воздуха по молочному шлангу на нисходящем участке молочного шланга доильного аппарата, м; ζ_i – коэффициент местных потерь; U_2 – скорость воздуха при расслоенном режиме движения молоковоздушной смеси на нисходящем участке молочного шланга, м/с.

Эквивалентный диаметр может быть определен по выражению

$$D_{2\phi} = \sqrt{D^2 - \frac{4Q_1}{\pi U_1}}.$$

Скорость воздуха при расслоенной структуре потока на нисходящем участке молочного шланга определится с учетом истинного содержания воздуха по выражению

$$U_2 = \frac{4Q\phi}{\pi D_{2\phi}^2}.$$

Коэффициент сопротивления λ_2 определяется с учетом числа Рейнольдса при движении воздуха со скоростью U_2 . В таблице 1 приведены параметры, характеризующие структуру течения молоковоздушной смеси на нисходящем участке молочного шланга.

В расчетах приняты: нисходящий участок молочного шланга $l_{12} = 0,5$ м, варьирование интенсивности молоковыведения в диапазоне 0,5...5,0 л/мин, разрежение в молочной камере коллектора $p_e = 41283...30200$ Па.

Таблица 1 – Параметры молоковоздушной среды на нисходящем участке молочного шланга /
Table 1 – Parameters of the milk-air medium in the descending section of the milk hose

p_e , Па	Q_1 , м ³ /с	Q_2 , м ³ /с	β	Fr_{cm}	W^*	Fr^*	φ	W_{cp}	ΔP_2 , Па
41283	$8,3 \times 10^{-6}$	$11,1 \times 10^{-5}$	0,93	4,41	0,23	416,49	0,94	5,61	0,85
41113	$1,7 \times 10^{-5}$	$11,1 \times 10^{-5}$	0,87	5,10	0,25	139,74	0,89	12,7	0,80
40075	$2,5 \times 10^{-5}$	$11,4 \times 10^{-5}$	0,81	5,90	0,27	81,67	0,85	25,44	0,86
37452	$3,3 \times 10^{-5}$	$11,7 \times 10^{-5}$	0,78	6,97	0,29	60,06	0,81	43,93	0,93
35553	$4,2 \times 10^{-5}$	$11,9 \times 10^{-5}$	0,74	8,03	0,30	48,53	0,76	71,29	1,00
34987	$5,0 \times 10^{-5}$	$12,0 \times 10^{-5}$	0,71	8,97	0,32	4106	0,73	114,13	1,07
34100	$5,8 \times 10^{-5}$	$12,2 \times 10^{-5}$	0,68	10,00	0,33	36,34	0,70	171,55	1,16
33088	$6,7 \times 10^{-5}$	$12,3 \times 10^{-5}$	0,65	11,12	0,35	33,10	0,66	245,51	1,25
32300	$7,5 \times 10^{-5}$	$12,5 \times 10^{-5}$	0,62	12,26	0,36	30,69	0,63	341,92	1,36
30200	$8,3 \times 10^{-5}$	$12,8 \times 10^{-5}$	0,61	13,71	0,37	29,16	0,59	433,04	1,47

Истинное содержание воздуха в молоковоздушной смеси на всем интервале варьирования интенсивности молоковыведения в нисходящем участке молочного шланга изменяется в диапазоне $\varphi = 0,94...0,59$, причем с увеличением интенсивности молоковыведения истинное содержание воздуха φ в смеси снижается. Потери давления при расслоенном движении молоковоздушной смеси при относительно малой протяженности нисходящего участка молочного шланга по абсолютной величине весьма незначительны.

Во всем диапазоне варьирования интенсивности молоковыведения потери давления на нисходящем участке, обусловленные трением воздуха о стенки молочного шланга, изменяются в диапазоне $\Delta p_2 = 0,85...1,47$ Па.

На восходящем участке молочного шланга в общем случае может существовать пробковый или кольцевой режимы движения молоковоздушной смеси. Пробковое течение наиболее распространенная форма течения газожидкостной смеси на восходящих участках [13, 15]. Граница перехода W_{cp} от кольцевой структуры течения смеси к пробковой на восходящем участке молочного шланга вычисляется по выражению

$$W_{cp} = (0,82 - 0,0017(\bar{\mu})^{-0,6}) 10^{(5,3+115\bar{\mu})(1-\beta)}.$$

При $W^* < W_{cp}$ – режим движения молоковоздушной смеси пробковый, а при $W^* > W_{cp}$ – режим движения кольцевой.

При движении молоковоздушной смеси на восходящем участке молочного шланга в суммарных потерях давления определяющее влияние оказывают гравитационные потери. Следовательно, истинное содержание воздуха при движении молоковоздушной смеси на восходящем участке молочного шланга является важнейшим фактором, определяющим потери давления молоковыводящего тракта доильного аппарата. Истинное содержание воздуха в смеси является функцией многих показателей, определяющих двухфазное движение: $\varphi = f(\beta, Fr, Re, \rho, \mu, \dots)$. Применительно для пробковой структуры течения истинное содержание воздуха в молоковоздушной смеси определяется по выражению [13]

$$\varphi = k_{\mu} \left[1 - \exp \left(-4,4 \sqrt{\frac{Fr_{cm}}{Fr_a}} \right) \right] \beta,$$

где k_{μ} и Fr_a – величины для конкретной смеси постоянные, зависящие исключительно от соотношения вязкостных свойств молока и воздуха.

Уравнения, определяющие k_{μ} и Fr_a , можно записать в следующем виде:

$$k_{\mu} = (1 + 4,5\bar{\mu}) - (0,14\bar{\mu}^{0,15});$$

$$Fr_a = 1150\bar{\mu}^{0,79} \text{ при } \bar{\mu} \leq 0,001;$$

$$Fr_a = 9,8\bar{\mu}^{0,1} \text{ при } \bar{\mu} \geq 0,001.$$

Выражения (8) справедливы при варьировании относительной вязкости $\bar{\mu}$ в широком диапазоне: $0,02 < \bar{\mu} < 0,0001$ [13]. Коэффициент гидравлического сопротивления λ_{cm} для пробкового режима течения молоковоздушной смеси определяется по формуле с учетом поправочного коэффициента ψ [13]

$$\lambda_{cm} = \psi \lambda(Re_{cm}),$$

$$\psi = \frac{1 - 0,78\beta[1 - \exp(-2,2\sqrt{Fr_{cm}})] - 0,22[1 - \exp(-15\bar{\rho})]\beta}{1 - \beta};$$

где Re_{cm} – критерий Рейнольдса смеси;

$\lambda(Re_{cm})$ – коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса;

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \text{ – относительная плотность воздуха;}$$

$$Re_{cm} = \frac{4Q}{\pi D} \left(\frac{\beta}{v_2} + \frac{1-\beta}{v_1} \right);$$

$$\lambda(Re_{cm}) = \frac{64}{Re_{cm}} \text{ при } Re_{cm} \leq 2320;$$

$$\lambda(Re_{cm}) = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_{cm}}} \text{ при } 2320 \leq Re_{cm} \leq 20D/\Delta;$$

Δ – эквивалентная шероховатость стенок молочного шланга, м; v_1 и v_2 – кинематическая вязкость соответственно молока и воздуха, м²/с.

Плотность молоковоздушной смеси при пробковом режиме движения с учетом истинного содержания воздуха можно рассчитывать по формуле

$$\rho_{cm} = (1 - \varphi)\rho_1 + \varphi\rho_2.$$

С учетом истинного содержания воздуха при пробковом режиме движения потери давления по длине восходящего участка молочного шланга можно определить путем интегрирования уравнения (7) в диапазоне от z_2 до z_3 (от второго до третьего сечений, рис. 1). После интегрирования выражение (7) с учетом местных потерь на участке молочного шланга 2-3 примет вид:

$$\Delta p_{23} = \left(\lambda_{cm} \frac{l_{23}}{D} + \sum_1^n \zeta_i \right) \left[\frac{4(Q_1 + \varphi Q)}{\pi D^2 \sqrt{2}} \right]^2 \times$$

$$\times [(1 - \varphi)\rho_1 + \varphi\rho_2] + [(1 - \varphi)\rho_1 + \varphi\rho_2] g z_2,$$

где Δp_{23} – потери давления на восходящем участке молочного шланга, Па; l_{23} – длина восходящего участка молочного шланга, м; φ – истинное содержание воздуха в молоковоздушной смеси; ζ_i – коэффициент местных потерь; z_2 – высота подъема молока от второго сечения до третьего, м.

В таблице 2 приведены параметры, характеризующие структуру течения молоковоздушной смеси на восходящем участке молочного шланга ($l_{23} = 2,5$ м) при варьировании интенсивности молоковыведения в диапазоне от 0,5 до 5,0 л/мин.

Таблица 2 – Параметры молоковоздушной среды на восходящем участке молочного шланга /
Table 2 – Parameters of the milk-air medium in the ascending section of the milk hose

W_{cp}	Re_{cm}	λ_{cm}	Fr_a	φ	$\Delta P_{тр}, \text{Па}$	$\Delta P_{cp}, \text{Па}$	$\Delta P_{23}, \text{Па}$
2,03	1081,84	0,21	5,84	0,66	1681,64	6611,31	8292,95
4,60	1521,38	0,11	5,83	0,62	1233,37	7363,16	8596,53
9,20	1965,50	0,078	5,82	0,58	1158,00	8023,45	9181,45
15,87	2422,56	0,062	5,80	0,55	1209,06	8582,71	9791,77
25,74	2874,00	0,052	7,79	0,53	1277,34	9085,82	10363,16
41,20	3314,50	0,045	5,78	0,50	1333,36	9557,83	10891,19
61,91	3757,71	0,040	5,77	0,48	1409,49	9978,43	11387,92
88,56	4202,04	0,036	5,76	0,46	1496,97	10356,50	11853,47
123,30	4644,54	0,033	5,75	0,44	1585,14	10704,83	12289,97
156,03	5098,49	0,030	5,73	0,43	1711,58	10992,27	12703,85

Значение величины обобщенной безразмерной скорости W^* (табл. 1) подтверждает наличие пробковой структуры течения молоковоздушной смеси на восходящем участке

молочного шланга на всем интервале варьирования интенсивности молоковыведения, поскольку $W^* = 0,23 \dots 0,37 < W_{cp} = 2,03 \dots 153,03$. Истинное содержание воздуха в молоковоз-

душной смеси на протяжении восходящего участка молочного шланга изменяется в диапазоне $\varphi = 0,66 \dots 0,43$, причем по мере увеличения интенсивности молоковыведения истинное содержание воздуха φ в смеси снижается. Расчеты показывают (табл. 2), что потери давления в молочном шланге на восходящем участке более чем на 75% состоят из гравитационной ΔP_{gp} составляющей, обусловленной возрастанием удельной энергии положения молоковоздушной смеси. По мере увеличения интенсивности молоковыведения в связи со снижением объемного и истинного содержания воздуха в молоковоздушной смеси уменьшается доля потерь давления на преодоление сил трения $\Delta P_{тр}$ пробкового потока

по сравнению с потерями давления, обусловленными гравитационной составляющей потерь: $\Delta p_{тр}/\Delta p_{gp} = 0,25 \dots 0,16$.

На рисунке 3 приведены результаты расчетов потерь давления при транспортировании молока по молочному шлангу и доверительный коридор их варьирования при изменении интенсивности молоковыведения в диапазоне от 0,5 до 5,0 л/мин. Из графика видно, что потери давления, рассчитанные аналитически, практически линейно возрастают по мере увеличения интенсивности молоковыведения, коэффициент детерминации $R^2 = 0,9965$ указывает на весьма высокую линейную связь между потерями давления и интенсивностью молоковыведения.

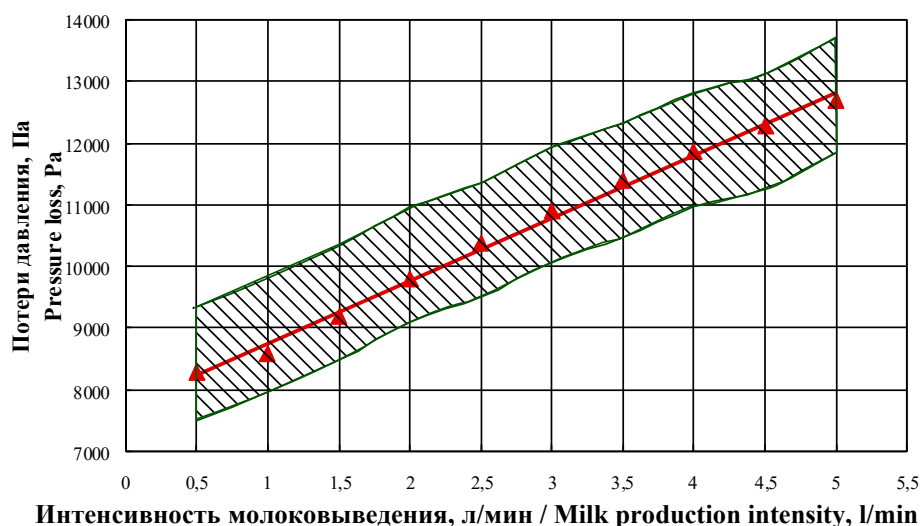


Рис. 2. Влияние интенсивности молоковыведения на потери давления в молочном шланге

доильного аппарата /

Fig. 2. Influence of milk production intensity on pressure losses in the milk hose of the milking machine

Результаты расчетов надежно укладываются внутрь коридора, образованного доверительным интервалом с 5 % уровнем значимости, рассчитанным по результатам экспериментальных измерений потерь давления в молоковыводящем тракте доильного аппарата.

Заключение. Экспериментальные измерения потерь давления в молочном шланге доильного аппарата при движении молоковоздушной смеси указывают на наличие взаимосвязи между величиной потерь давления и уровнем интенсивности молоковыведения. По результатам экспериментальных исследований коэффициент детерминации в среднем равнялся $R^2 = 0,9967$, что подтверждает весьма существенную линейную связь между потерями давления и интенсивностью молоковыведения.

Потери давления при расслоенном движении молоковоздушной среды в виду малой

протяженности нисходящего участка молочного шланга по абсолютной величине весьма незначительны. Во всем диапазоне варьирования интенсивности молоковыведения потери давления на нисходящем участке, обусловленные трением воздуха о стенки молочного шланга, изменяются в диапазоне $\Delta p_{mp12} = 0,85 \dots 1,47$ Па.

Потери давления, обусловленные преодолением сил трения при пробковом движении молоковоздушной смеси, по причине, значительно превышающей протяженности восходящей части молочного шланга, и плотности перемещаемой среды существенно больше аналогичных потерь давления на нисходящем участке: $\Delta p_{mp1-2} = 0,85 \dots 1,47$ Па < $\Delta p_{mp2-3} = 1681,40 \dots 1711,58$ Па. По абсолютному вкладу в общие потери давления $\Delta p_{1-3} = 8293,80 \dots 12705,32$ Па подавляющее влияние оказывают потери давления на преодо-

ние сил тяжести на восходящем участке молочного шланга $\Delta p_{cp} = 8292,95 \dots 10992,27$ Па. Результаты теоретических расчетов потерь

давления в зависимости от интенсивности молоковыведения укладываются в доверительный интервал с 5 % уровнем значимости.

Список литературы

1. Федоренко В. Ф., Мишуров Н. П., Маринченко Т. Е., Тихомиров А. И. Анализ состояния и перспективы улучшения генетического потенциала крупного рогатого скота молочных пород: науч. аналит. обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 108 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37393601>
2. Цой Ю. А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. 424 с.
3. Шулятьев В. Н., Рылов А. А. Машинное доение коров (Привязное содержание): монография. Киров: ООО ЛОБАНЬ, 2017. 198 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009532413>
4. Ульянов В. М. Вопросы теории машинного доения. Рязань, 2006. 112 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003357569>
5. Кирсанов В. В. Структурно-технологическое обоснование эффективности построения и функционирования доильного оборудования: монография. Княгинино: НГИЭИ, 2012. 396 с. Режим доступа: <https://znanium.com/catalog/product/421621>
6. Hamman J., Main G. A., Wetzel S. Teat tissue reactions to milking. Effects of vacuum level. Journal of Dairy Science. 1993;76(4):1041-1045. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77432-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77432-9)
7. Ужик В. Ф., Кузьмина О. С., Китаева О. В., Некипелов С. И. Переносной манипулятор с почетвертным управляемым режимом доения коров. Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2019;(4(36)):51-56. Режим доступа: <http://vniimzh.ru/images/material/Magazines/n36.pdf>
8. Экхорутвен О. Т., Медведев Г. Ф. Неконтагиозный мастит у коров. Актуальные проблемы ветеринарного акушерства и репродукции животных: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. Горки: БСХА, 2013. С. 458-464. Режим доступа: <http://elc.baa.by/upload/science/vet-akushersvo-materialy.pdf>
9. Кирсанов В. В., Милешина О. В. Способы и технические средства определения ранней диагностики мастита у коров и отделения аномального молока в потоке при доении на доильных установках. Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии. 2011;22(2(2)):79-85. Режим доступа: <http://vniimzh.ru/images/material/Magazines/n2.pdf>
10. Сафиуллин Н. А., Хазипов Н. Н., Шайдуллин М. З., Загидуллин Л. Р., Каюмов Р. Р., Волков Р. А. Машинное доение коров – искусство. Казань: Печатный двор, 2013. 107 с.
11. Рылов А. А., Шулятьев В. Н., Конопельцев И. Г. Доильный аппарат: пат. №154881 (Российской Федерация). №2015113650/13: заявл. 13.04.15; опубл. 10.09.15. Бюл. №25. 2 с. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU154881U1_20150910
12. Соловьев С. А., Карташов Л. П. Исполнительные механизмы системы «человек-машина-животное». Екатеринбург: УрОРАН, 2001. 179 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000739079>
13. Мамаев А. А., Одишария Г. Э., Клапчук О. В., Точилин А. А., Семенов Н. И. Движение газожидкостных смесей в трубах. М.: Недра, 1978. 270 с. Режим доступа: <http://www.geokniga.org/books/9838>
14. Цой Ю. А., Мамедова Р. А. Параметры пробкового режима течения жидкости в молокопроводе при промывке. Техника в сельском хозяйстве. 2007;(2):3-4.
15. Тильман Хефельмайр, Якоб Майер Юн (ДЕ) Способ измерения расхода молока и устройство для его осуществления: пат. №2093982 (Российской Федерация). №5011377/02: заявл. 26.03.1992; опубл. 27.10.1997. Бюл. №37. 11 с. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2093982C1_19971027
16. Карташов Л.П. Машинное доение коров. М.: Колос, 1982. 301 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001110834>

References

1. Fedorenko V. F., Mishurov N. P., Marinchenco T. E., Tikhomirov A. I. *Analiz sostoyaniya i perspektivy uluchsheniya geneticheskogo potentsiala krupnogo rogatogo skota molochnykh porod: nauch. analit. obzor.* [Analysis of the state of and prospects of improving the genetic potential of cattle of dedicated meat breeds of domestic breeding]. Moscow: FGBNU «Rosinformagrotekh», 2019. 108 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37393601>
2. Tsoy Yu. A. *Protsessy i oborudovanie doil'no-molochnykh otdeleniy zhivotnovodcheskikh ferm.* [The processes and equipment of milking and dairy departments of livestock farms]. Moscow: GNU VIESKh, 2010. 424 p.
3. Shulyat'ev V. N., Rylov A. A. *Mashinnoe doenie korov (Privyaznoe sodержanie): monografiya.* [Machine milking of cows (Tieup housing): monograph]. Kirov: ООО LOBAN', 2017. 198 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009532413>
4. Ul'yanov V. M. *Voprosy teorii mashinnogo doeniya.* [Problems of the theory of machine milking]. Ryzan', 2006. 112 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003357569>
5. Kirsanov V. V. *Strukturno-tekhnologicheskoe obosnovanie effektivnosti postroeniya i funktsionirovaniya doil'nogo oborudovaniya: monografiya.* [Structural and technological justification of efficiency of construction and functioning of the milking equipment: monograph]. Knyaginino: NGIEI, 2012. 396 p. URL: <https://znanium.com/catalog/product/421621>

6. Hamman J., Main G. A., Wetzel S. Teat tissue reactions to milking. Effects of vacuum level. Journal of Dairy Science. 1993;76(4):1041-1045. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77432-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77432-9)
7. Uzhik V. F., Kuz'mina O. S., Kitaeva O. V., Nekipelov S. I. *Perenosny manipulyator s pochetvertnym upravlyaemym rezhimom doeniya korov*. [Portable manipulator with udder-on-quarters control of milking cows]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2019;(4(36)):51-56. (In Russ.). URL: <http://vniimzh.ru/images/material/Magazines/n36.pdf>
8. Ekkhorutoven O. T., Medvedev G. F. *Nekontagioznyy mastit u korov*. [Environmental mastitis in dairy cow]. *Aktual'nye problemy veterinarnogo akusherstva i reproduksii zhivotnykh: mat-ly Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Current problems of veterinary obstetrics and animal reproduction: Proceedings of International scientific and practical Conference.]. Gorki: BSKhA, 2013. pp. 458-464. URL: <http://elc.baa.by/upload/science/vet-akushersvo-materialy.pdf>
9. Kirsanov V. V., Milesheva O. V. *Sposoby i tekhnicheskie sredstva opredeleniya ranney diagnostiki mastita u korov i otdeleniya anomal'nogo moloka v potoke pri doenii na doil'nykh ustanovkakh*. [Methods and technical means of determining the early diagnosis of mastitis in cows and separation of abnormal milk flow during milking in milking installations]. *Nauchnye trudy GNU VNIIMZh Rossel'khozakademii*. 2011;22(2(2)):79-85. (In Russ.). URL: <http://vniimzh.ru/images/material/Magazines/n2.pdf>
10. Safiullin N. A., Khazipov N. N., Shaydullin M. Z., Zagidullin L. R., Kayumov R. R., Volkov R. A. *Mashinnoe doenie korov – iskusstvo*. [Machine milking of cows is the skill]. Kazan': Pechatnyy dvor, 2013. 107 p.
11. Rylov A. A., Shulyat'ev V. N., Konopel'tsev I. G. Milking machine: patent RF, no. 154881. 2015. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU154881U1_20150910
12. Solov'ev S. A., Kartashov L. P. *Ispolnitel'nye mekhanizmy sistemy «chelovek-mashina-zhivotnoe»*. [Operating mechanism of the «person-machine-animal» system]. Ekaterinburg: UrORAN, 2001. 179 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000739079>
13. Mamaev A. A., Odishariya G. E., Klapchuk O. V., Tochilin A. A., Semenov N. I. *Dvizhenie gazozhidkostnykh smesey v trubakh*. [Movement of gas-liquid mixtures in pipes]. Moscow: Nedra, 1978. 270 p. URL: <http://www.geokniga.org/books/9838>
14. Tsoy Yu. A., Mamedova R. A. *Parametry probkovogo rezhima techeniya zhidkosti v molokoprovode pri promyke*. [Parameters of jam regime of liquid flow in the milk pipeline by rinsing]. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*. 2007;(2):3-4. (In Russ.).
15. Til'man Khefel'mayr, Yakob Mayer Yun (DE) A way of measurement of an expense of milk and the device for its exercise: patent RF, no. 2093982. 1997. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2093982C1_19971027
16. Kartashov L. P. *Mashinnoe doenie korov*. [Machinery milking of cows]. Moscow: Kolos, 1982. 301 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001110834>

Сведения об авторах

Рылов Александр Аркадьевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры технологического и энергетического оборудования, ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», Октябрьский пр-кт, д. 133, г. Киров, Российская Федерация, 610017, e-mail: info@vgsha.info, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8431-1521>, e-mail: k-consultant@yandex.ru

✉ **Савиных Петр Алексеевич**, доктор техн. наук, профессор кафедры технологического и энергетического оборудования, ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», Октябрьский пр-кт, д. 133, г. Киров, Российская Федерация, 610017, e-mail: info@vgsha.info, главный научный сотрудник, зав. лабораторией механизации животноводства, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5668-8479>, e-mail: Peter.savinykh@mail.ru

Шулятьев Валерий Николаевич, доктор техн. наук, профессор кафедры технологического и энергетического оборудования, ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», Октябрьский пр-кт, д. 133, г. Киров, Российская Федерация, 610017, e-mail: info@vgsha.info, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5686-863X>, e-mail: Shulyat'ev.Valeriy@mail.ru

Information about the authors

Alexander A. Rylov, PhD in Engineering, associate professor, the Chair of Technological and Power Equipment, Vyatka State Agricultural Academy, Oktyabrsky Avenue, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: info@vgsha.info, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8431-1521>, e-mail: k-consultant@yandex.ru

✉ **Peter A. Savinykh**, DSc in Engineering, professor at the Chair of Technological and Power Equipment, Vyatka State Agricultural Academy, Oktyabrsky Avenue, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: info@vgsha.info, chief researcher, Head of the Laboratory of Mechanization of Livestock Production, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V.Rudnitsky, Lenin str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5668-8479>, e-mail: Peter.savinykh@mail.ru

Valeri N. Shulyatiev, DSc in Engineering, professor at the Chair of Technological and Power Equipment, Vyatka State Agricultural Academy, Oktyabrsky Avenue, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: info@vgsha.info, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5686-863X>, e-mail: Shulyat'ev.Valeriy@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author