

Научная статья
УДК 621.3

Охлаждение молока на животноводческих фермах: современное состояние и перспективы развития

Максим Борисович Фомин¹, Андрей Петрович Козловцев¹, Владимир Михайлович Мартынов²,
Маргарита Алексеевна Христиановская³, Валерий Валерьевич Кононец¹

¹ Оренбургский ГАУ

² Башкирский ГАУ

³ Санкт-Петербургский ГУВМ

Аннотация. Свежевыдоенное молоко теряет свои бактерицидные и потребительские свойства, если его не охладить в течение 16–20 мин. Статья посвящена анализу способов и технических средств охлаждения молока на молочно-товарных фермах агропромышленного производства. Исторический способ охлаждения молока с помощью заготавливаемого в зимнее время года в открытых водоёмах льда ввиду трудоёмкости и нетехнологичности в настоящее время уступает место охлаждению с использованием искусственно намороженного льда или естественного холода. Наряду с тем, что такое охлаждение сопровождается минимальными энергетическими затратами, наблюдается безвозвратный сброс тепла, запасённого в охлаждаемом молоке. Это же относится и к охлаждению молока с помощью парокомпрессионных холодильных установок. Возврат и полезное использование тепловой энергии охлаждаемого молока возможны при его охлаждении с помощью тепловых насосов. В результате и утилизируемое тепло, и тепло, выделяемое при работе компрессора уходят на нагрев охлаждающей воды, используемой, например, для поения животных. При этом затраты энергии на привод компрессора теплового насоса (в зависимости от его холодильного коэффициента) в несколько раз меньше тепловой энергии, высвобождаемой при охлаждении молока, и как минимум на порядок меньше, если молоко предварительно охлаждается проточной водой. Бесплезные потери тепла, как в том, так и другом случае отсутствуют. В перспективе следует провести исследования по оптимизации и согласованию режимов теплового насоса и теплообменника при работе их в едином потоке, а также отработать принципиальную схему автоматизации процесса охлаждения молока и её техническую реализацию.

Ключевые слова: охлаждение молока, естественный холод, холодильный агрегат, тепловой насос, энергосбережение.

Для цитирования: Охлаждение молока на животноводческих фермах: современное состояние и перспективы развития / М.Б. Фомин, А.П. Козловцев, В.М. Мартынов [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (87). С. 134–139.

Original article

Milk cooling at livestock farms: current state and development prospects

Maxim B. Fomin¹, Andrey P. Kozlovstev¹, Vladimir M. Martynov²,
Margarita A. Khristianovskaya³, Valery V. Kononets¹

¹ Orenburg State Agrarian University

² Bashkir State Agrarian University

³ Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine

Abstract. Freshly milked milk, if it is not cooled within 16...20 minutes, loses its bactericidal, and with it consumer properties. The present work is devoted to the analysis of methods and technical means of milk cooling on dairy farms of agro-industrial production. The historical method of cooling milk with the help of ice harvested in the winter season in open reservoirs, due to its laboriousness and low technological effectiveness, is now giving way to cooling using artificially frozen ice or natural cold. Along with the fact that such cooling is accompanied by minimal energy consumption, there is an irreversible discharge of heat stored in the cooled milk. The same applies to milk cooling with vapor compression refrigeration units. Meanwhile, the return and useful use of the thermal energy of the cooled milk is possible when it is cooled using heat pumps. As a result, both the recovered heat and the heat generated during the operation of the compressor go to heating the cooling water used, for example, for watering animals. At the same time, the energy consumption for the drive of the heat pump compressor (depending on its coefficient of performance) is several times less than the thermal energy released during milk cooling, and at least an order of magnitude less if the milk is pre-cooled with running water. There is no useless loss of heat in either case. In the future, research should be carried out to optimize and harmonize the modes of the heat pump and heat exchanger when they work in a single stream, as well as to work out the principle diagram of the automation of the milk cooling process and its technical implementation.

Keywords: milk cooling, natural cold, refrigeration unit, heat pump, energy saving.

For citation: Milk cooling at livestock farms: current state and development prospects / M.B. Fomin, A.P. Kozlovstev, V.M. Martynov et al. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021; 87(1): 134–139. (In Russ.).

Молоко – это уникальный пищевой продукт, сложный по химическому составу и структуре составляющих его градиентов. Свежевыдоенное

молоко содержит бактерицидные вещества, оказывающие угнетающее воздействие на микроорганизмы в течение определённого промежутка

времени. В естественных условиях оно используется сразу же после выведения его из вымени и не адаптировано к условиям длительного хранения. В условиях производства и заготовки в молоке, если его не охладить, через некоторое время начинается бурный рост микроорганизмов [1]. Поэтому согласно зоотехническим нормам сразу же после выдаивания молоко требуется охладить до 4 °С [2]. При этом задержка с началом охлаждения не должна превышать 16–20 мин. [3].

Материал и методы. В домашних хозяйствах охлаждение молока осуществлялось, да и кое-где ещё осуществляется, путём размещения удоя в погребах, а иногда и в колодцах. В настоящее время молоко в бытовых условиях в подавляющем большинстве случаев охлаждается в холодильниках, конечно, при достаточном их количестве. Однако при производстве и переработке молока на предприятиях применяются более масштабные методы и технические средства охлаждения молока. Так, в послевоенные годы на молокозаводе в п. Тарутино Чесменского района Челябинской области при переработке молока, поступавшего на завод из окружающих колхозов и совхозов, а также в рамках существующей в ту пору системы налогообложения от личных подворий, охлаждение молока и продуктов его переработки осуществлялось с помощью заготавливаемого в зимнее время года льда. Несмотря на то что мелководное озеро, в котором осуществлялась заготовка льда, располагалось в непосредственной близости от завода, затраты ручного труда на его заготовку и транспортировку были значительными. Трудоёмким был также и процесс охлаждения молочных продуктов таким способом.

Поэтому позднее по мере электрификации сельских населённых пунктов в системы охлаждения молока как на молочных заводах, так и на крупных животноводческих фермах стали внедряться установки искусственного холода. Среди них абсорбционные холодильные установки и паровые компрессорные холодильные установки. Изучалась также возможность использования для охлаждения молока термоэлектрической холодильной установки, основанной на использовании элемента Пельтье [4]. Элемент Пельтье представляет собой термоэлектрический преобразователь (рис. 1), в котором возникает разность температур при прохождении тока через контакт двух разнородных проводников, а ещё лучше – полупроводников.

Поглощающий теплоту спай с температурой T_2 помещается в охлаждаемую среду, а спай с более высокой температурой T_1 отдаёт тепло охлаждающей среде. Однако наряду с высокой стоимостью энергетическая эффективность таких источников холода достаточно низка, поэтому исключительно благодаря простоте устройства

они применяются для маломощных холодильных установок, а для охлаждения молока они в настоящее время применения не получили.

Наиболее распространены на молочных фермах паровые холодильные установки. Согласно второму закону термодинамики, чтобы передача тепла осуществлялась от охлаждаемой среды к среде с более высокой температурой, необходимо совершать механическую работу. При этом горячей среде передаётся тепловая энергия q_1 , равная сумме энергии q_2 , отнимаемой от охлаждаемой среды, и энергии l , затрачиваемой на привод компрессора:

$$q_1 = q_2 + l. \quad (1)$$

Чем больше тепловой энергии отнято у охлаждаемой среды и чем меньше затрачено при этом механической энергии, тем совершеннее холодильная установка. Количественно степень совершенства оценивается холодильным коэффициентом, который рассчитывается по формуле:

$$\kappa = q_2/l = q_2/(q_1 - q_2). \quad (2)$$

В соответствии с обратным циклом Карно холодильный коэффициент является функцией температуры T_1 охлаждаемого тела и температуры T_2 тела, которому теплота передаётся [5] как:

$$\kappa = T_2/(T_1 - T_2). \quad (3)$$

На рисунке 2 изображена принципиальная схема паровой холодильной установки.

Она состоит из компрессора 1, испарителя 2, конденсатора 3 и дросселирующего вентиля 4. Компрессор засасывает при постоянном давлении насыщенный пар рабочего тела (аммиака, фреона) из испарителя, имеющего степень сухости, приблизительно равную единице. Затем этот пар почти адиабатно сжимается, при этом перегревается и перегретый направляется в конденсатор. В конденсаторе пар отдаёт тепло через стенки конденсатора обдуваемому его поверхность окружающему воздуху, в результате чего конденсируется, т.е. превращается в жидкость с повышенным давлением и температурой насыщения,

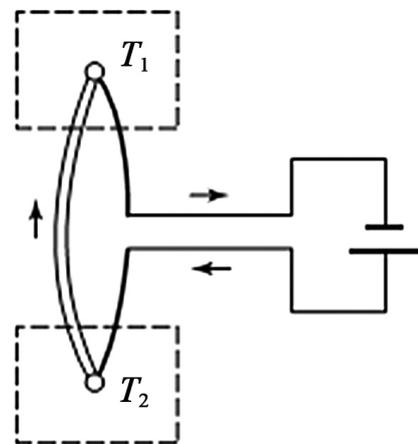


Рис. 1 – Принципиальная схема термоэлектрической холодильной установки

соответствующей этому давлению. Далее жидкий агент проходит в испаритель через дросселирующий вентиль. Давление его, а следовательно, и температура на выходе дросселирующего вентиля резко падают. При этом образуется смесь жидкости и пара с коэффициентом сухости меньше единицы. В испарителе происходит интенсивное испарение холодильного агента за счёт притока тепла через стенки охладителя от охлаждаемой среды. Как следствие, температура её (в нашем случае молока) уменьшается.

Испарение при постоянном давлении сопровождается повышением сухости рабочего тела практически до единицы. И в таком состоянии рабочее тело вновь засасывается в компрессор. Чтобы исключить утечку паров холодильного агента в окружающее пространство, компрессор полностью герметизируется. Это достигается путём размещения компрессора вместе с электродвигателем в контур циркуляции холодильного агента.

Расчёты и практика применения систем охлаждения молока с помощью парокompрессорных холодильных машин показывают, что на охлаждение, например, 1 т молока расходуется до 29 кВт·час электрической энергии [6]. Это в условиях постоянно возрастающих тарифов на электрическую энергию негативно влияет на себестоимость производства молока в целом. Поэтому в настоящее время параллельно проводятся научные исследования по совершенствованию технических средств, реализующих способ охлаждения молока с использованием естественного холода [7] или искусственно замороженного льда [8–13], заготовка которого не требует затрат ручного труда. Как в том, так и другом случае, если не учитывать вспомогательные операции, непосредственно на охлаждение молока затраты электроэнергии отсутствуют.

Однако и при охлаждении молока холодильными установками, и при охлаждении молока с помощью замороженного искусственно льда

или естественного холода отнимаемая от молока тепловая энергия бесполезно расходуется на нагрев окружающего воздуха или какого-либо другого хладагента.

Этот недостаток устраняется в том случае, если отбираемое от охлаждаемого молока отдаётся не в окружающее пространство, а идёт на нагрев воды, используемой на животноводческой ферме для поения коров, подмывание вымени и другие технологические нужды. Это можно осуществить с помощью особого вида холодильных установок – тепловых насосов типа «вода – вода», а в данном случае «молоко – вода». Принципиальная схема такого теплового насоса приведена на рисунке 3 [14].

Отличие его от обычной холодильной установки заключается только лишь в том, что конденсатор непосредственно охлаждается водой, которая при этом нагревается и используется для тех или иных целей. Применительно к охлаждению молока контур циркуляции соляного раствора должен быть заменён на контур подачи молока, а контур циркуляции отопления – на контур циркуляции подогрева воды, поступающей на ферму из водопровода.

Как следует из выражения (3), эффективность теплового насоса, оцениваемая холодильным коэффициентом κ , тем выше, чем меньше разность между температурой T_2 охлаждаемой среды (молока) и температурой T_1 среды (воды, например, из артезианской скважины), в которую тепло отдаётся [15]. В этой связи вполне логичной является реализация технических решений, направленных на снижение температуры молока перед подачей в испаритель теплового насоса другими менее энергозатратными способами, например предварительным охлаждением молока проточной водой в теплообменнике [16, 17]. При этом происходит не только снижение доли отнимаемого от молока тепла q_2 , а следовательно, и необходимой мощности теплового насоса, но и повышение его эффективности,

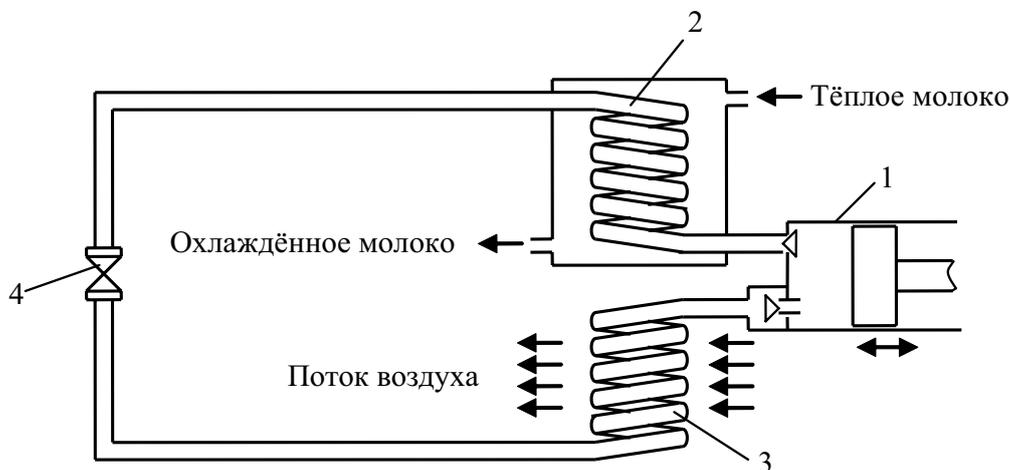


Рис. 2 – Схема паровой компрессионной холодильной установки

конечной температурой $t_{\text{БК}}$, равной оптимальной температуре для поения животных (примем её равной $18\text{ }^{\circ}\text{C}$), то теоретически холодильный коэффициент теплового насоса в соответствии с выражением (3) будет равен:

$$\kappa = (t_{\text{МК}} + 273) / (t_{\text{БК}} - t_{\text{МК}}) = (4 + 273) / (18 - 4) = 19,8.$$

Высокое значение холодильного коэффициента получено ввиду малой разницы между температурами охлаждаемой среды (молока) и охлаждающей среды (артезианской воды). Однако поскольку практически он не превышает 7 ед. [21], примем его с запасом, равным 5. Тогда затраты энергии в сутки на привод компрессора в соответствии с выражением (2) будут равны:

$$l = q_{\text{М}} / \kappa = 1,26 \cdot 10^8 / 5 = 2,52 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 7 \text{ кВт}\cdot\text{час}.$$

Таким образом, воде для поения животных будет передано в соответствии с выражением (1) $q_{\text{В}} = q_{\text{М}} + l = 35 + 7 = 42 \text{ кВт}\cdot\text{час}$ тепловой энергии, при потреблении из сети в случае электрического привода всего $7 \text{ кВт}\cdot\text{час}$, а не $29 \text{ кВт}\cdot\text{час}$, как было указано в ранее опубликованной работе [6]. С учётом времени доения в течение суток (примем его равным 2 час.) необходимая мощность привода холодильной установки будет равна $3,5 \text{ кВт}$, но при этом мощность передачи энергии тепловым насосом в несколько раз больше и равна 21 кВт . К тому же эта энергия не сбрасывается в окружающее пространство, а находит полезное применение.

Ещё более впечатляющие результаты в плане энергоэффективности и снижения капитальных затрат получаются в случае предварительного охлаждения молока до поступления его в испаритель теплового насоса. Охлаждение осуществляется проточной холодной водой из артезианской скважины с помощью пластинчатого теплообменника при движении молока и воды противотоком. Разность Δt температуры $t_{\text{МКТО}}$ молока на выходе из теплообменника, равной температуре $t_{\text{МНТН}}$ на входе в тепловой насос, и температуры $t_{\text{ВНТО}}$ воды на входе в теплообменник зависит от площади пластин теплообменника и скоростей протока воды и молока через его полости. Обычно она достижима в пределах от 2 до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Примем для расчёта $\Delta t = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда при температуре $t_{\text{ВНТО}}$ охлаждающей воды (воды в источнике), равной $7\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{МКТО}} = t_{\text{МНТН}} = t_{\text{ВНТО}} + \Delta t = 7 + 4 = 11\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Отсюда следует, что через теплообменник охлаждающей воде от молока будет передано

$$q_{\text{МТО}} = c_{\text{М}} \cdot m_{\text{С}} \cdot (t_{\text{МН}} - t_{\text{МКТО}}) = 3817 \cdot 1000 \cdot (37 - 11) = 9,92 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 27,57 \text{ кВт}\cdot\text{час},$$

а через тепловой насос

$$q_{\text{МТН}} = c_{\text{М}} \cdot m_{\text{С}} \cdot (t_{\text{МК}} - t_{\text{МНТН}}) = 3817 \cdot 1000 \cdot (11 - 4) = 2,67 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 7,42 \text{ кВт}\cdot\text{час}.$$

При том же самом холодильном коэффициенте ($\kappa = 5$) затраты энергии на привод компрессора будут равны:

$$l_{\text{К}} = q_{\text{МТН}} / \kappa = 2,67 \cdot 10^7 / 5 = 5,34 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 1,484 \text{ кВт}\cdot\text{час}.$$

В данном случае воде для поения животных будет передано в общей сложности

$$q_{\text{В}} = q_{\text{МТО}} + q_{\text{МТН}} + l_{\text{К}} = 9,92 \cdot 10^7 + 2,67 \cdot 10^7 + 5,34 \cdot 10^6 = 1,31 \cdot 10^8 = 36,47 \text{ кВт}\cdot\text{час}.$$

Это несколько меньше, чем в предыдущем случае, за счёт уменьшения затрат энергии на привод компрессора. Но что более важно, необходимая мощность привода компрессора в режиме охлаждения в течение 2 час. будет равна:

$$P_{\text{К}} = l_{\text{К}} / 2 = 1,484 / 2 = 0,742 \text{ кВт},$$

что в 5 раз меньше, чем при охлаждении молока только с помощью теплового насоса.

Выводы. Охлаждение молока с помощью заготовленного льда и естественного холода целесообразно производить в тех случаях, когда отсутствует централизованное электроснабжение, а также в условиях мелких товарных ферм и в тех случаях, когда отсутствуют условия для утилизации тепла.

Наиболее совершенным техническим средством для охлаждения молока являются тепловые насосы, позволяющие утилизировать тепло свежесвыдоенного молока и использовать его для технологических целей на молочно-товарной ферме.

Предварительное охлаждение молока перед поступлением его в охладители проточной водой, используемой в дальнейшем для хозяйственных нужд, позволяет до минимума снизить расход энергии на охлаждение молока, а бесполезные потери энергии – практически до нуля.

Литература

1. Охлаждение молока [Электронный ресурс]. URL: <https://milkof.ru/produkcija/ohlazhdenie-moloka> (дата обращения 12.12.2020).
2. Охлаждение молока на ферме [Электронный ресурс]. URL: <https://stylopedia.ru/2x2063.html> (дата обращения 15.12.2020).
3. Доение коров, охлаждение и хранение молока на фермах [Электронный ресурс]. URL: <https://agroru.com/news/doenie-korov-ohlazhdenie-i-hranenie-moloka-na-fermah-676502.htm> (дата обращения 18.12.2020).
4. Цикл термоэлектрической холодильной установки [Электронный ресурс]. URL: https://studwood.ru/2158566/tovarovedenie/tsikl_termoelektricheskoy_holodilnoy_ustanovki (дата обращения 18.11.2020).
5. Основы теплотехники и теплоснабжение сельскохозяйственных предприятий / В.Е. Егорушкин и др. М.: Колос, 1972. 42 с.
6. Природный холод – приоритетное направление при охлаждении молока / В.И. Квашенников, В.А. Шахов, А.П. Козловцев [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2015. № 6 (56). С. 90–93.
7. Пат. № 2340169. Холодильная установка для охлаждения молока с использованием естественного

холода / Марьяхин Ф.Г., Учеваткин А.И., Коршунов Б.П., Коршунов А.Б., Пржегитшевский Ю.Б., Челнинцев Ю.В., Романовский Н.В.; Патентооблад.: Российская академия сельскохозяйственных наук, Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ). Опубл.: 10.12.2008; Бюл. № 34.

8. Секционный аккумулятор природного холода для охлаждения молока на фермах / С. П. Козловцева [и др.] // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. Т. 1. № 4. С. 43–46.

9. Энергосберегающая технология заготовки естественного льда на молочных фермах / В.И. Квашенников, В.А. Шахов, А.П. Козловцев [и др.] // Научное обозрение. Научный журнал (Саратов). 2015. № 4.

10. Энергосберегающая технология охлаждения молочной продукции / В.И. Квашенников, А.П. Козловцев, А.А. Панин [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2014. № 4 (16). С. 95–97.

11. Квашенников В.И., Козловцев А.П., Панин А.А. Инновационный метод охлаждения сельскохозяйственной продукции // Материалы XVI Международного симпозиума по машинному доению сельскохозяйственных животных. Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2012. 383 с.

12. Терминология при производстве и эксплуатации ледогенераторов / В.И. Квашенников, А.П. Козловцев, В.А. Шахов [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 2. С. 30–31.

13. Пат. № 2691486. Сезонный аккумулятор естественного холода / Петько В.Г., Заявит. и патентооблад. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет». Опубл. 14.06.2019 г.

14. Расчёт эффективности парокомпенсационного теплового насоса [Электронный ресурс]. URL: // <https://poisk-ru.ru/s16013t3.html> (дата обращения 10.12.2020).

15. Цикл теплового насоса [Электронный ресурс]. URL: <https://helpiks.org/3-3445.html> (дата обращения 5.12.2020).

16. Резервы экономии электроэнергии при организации поения животных на молочных фермах / Г.П. Юхин, А.А. Катков, Р.А. Хамматов [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. №6(68). С. 120–123.

17. Технология охлаждения молока [Электронный ресурс]. URL: <https://moloko-chr.ru/articles/moloko/tehnologiya-okhlazhdeniya-moloka.html> (дата обращения 5.10.2020).

18. Борисов В.И., Борисова Н.В., Зайцев В.О. Современные технологии и оборудование для охлаждения молока на животноводческих фермах и комплексах [Электронный ресурс]. URL: <https://terjournal.ru/2019/id78> // Современные проблемы территориального развития: электронный журнал. 2019. № 1.

19. Охладитель молока в потоке (проточный охладитель молока [Электронный ресурс]. URL: <https://domagro18.ru/catalog/protochnye-okhladiteli-moloka-razdel-okhladitel-moloka-v-potoke-protocnyy-okhladitel-moloka/> (дата обращения 16.12.2020).

20. Охлаждение молока на комплексах и фермах [Электронный ресурс]. URL: <https://mppnik.ru/load/357-ohlazhdenie-moloka-na-kompleksah-i-fermah.html> (дата обращения 25.12.2020).

21. Расчёт мощности теплового насоса для дома: принцип действия оборудования и конкретные примеры вычислений [Электронный ресурс]. URL: <https://6sotokdom.com/dom/otoplenie/raschet-moshhnosti-teplovogo-nasosa.html> (дата обращения 25.12.2020).

Максим Борисович Фомин, кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет». Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, mbfom@mail.ru

Андрей Петрович Козловцев, доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет». Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, ap_kozlovcev@mail.ru

Владимир Михайлович Мартынов, доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет». Россия, 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, m_w_m@mail.ru

Мargarita Алексеевна Христиановская, соискатель. ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины». Россия, 196084, Санкт-Петербург, ул. Черниговская, 5, ritakhristianovskaya98@gmail.com

Валерий Валерьевич Кононец, аспирант. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет». Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, kaf@orensau.ru

Maxim B. Fomin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Orenburg State Agrarian University. 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia, mbfom@mail.ru

Andrey P. Kozlovtsev, Doctor of Technical Sciences, Professor. Orenburg State Agrarian University. 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia, ap_kozlovcev@mail.ru

Vladimir M. Martynov, Doctor of Technical Sciences, Professor. Bashkir State Agrarian University. 34, 50-let October St., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450001, Russia, m_w_m@mail.ru

Margarita A. Khristianovskaya, research worker. Saint-Petersburg State University of Veterinary Medicine. 5, Chernigovskaya St., 196084, Russia, ritakhristianovskaya98@gmail.com

Valery V. Kononets, postgraduate. Orenburg State Agrarian University. 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia, kaf@orensau.ru