

Сезонный аккумулятор холода (льда) для охлаждения молока

*В.Г. Петько, д.т.н., профессор, А.Б. Рязанов, к.т.н.,
М.Б. Фомин, к.т.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ*

Разработка и внедрение энергосберегающих технологий в настоящее время является одной из весьма актуальных задач промышленного и в не меньшей мере агропромышленного производства. К одной из таких технологий в сельском хозяйстве относится технология производства молока на животноводческих фермах, в частности, энергозатратная технология охлаждения молока перед отправкой его на молокоперерабатывающие предприятия. Так, на охлаждение 1 т молока с помощью охладительных установок, используемых в настоящее время, расходуется до 35 кВт·часов электрической энергии [1].

В связи с этим в последнее время всё чаще стали поступать предложения по реанимации вытесненного электрическими охладителями и ушедшего в связи с этим в тень метода охлаждения молока и молочных продуктов с использованием естественного холода, запасённого в зимнее время года в виде массы льда достаточного объёма.

Материал и методы исследования. К техническим средствам, усовершенствующим этот метод и делающим его более привлекательным в смысле эффективности и снижения трудозатрат, можно отнести аккумулятор естественного холода А-15 [2, 3]. Металлический бак этого аккумулятора сообщается с атмосферой, заполнен водой и контактирует внешней поверхностью с окружающим воздухом. Из нижней части полости бака вода через трубо-

провод поступает на вход теплообменника «вода – молоко» и с выхода теплообменника через градирню поступает снова в бак (в его верхнюю часть).

Однако этот аккумулятор естественного холода нельзя использовать для сезонного накопления льда, так как даже при достаточном объёме бака и достаточном на летний период накопленном в нём льда большая его часть уйдёт не на охлаждение молока, а на охлаждение окружающего бак воздуха. Необходимость же иметь для нормального функционирования данного аккумулятора естественного холода градирню повышает его стоимость, усложняет конструкцию и управление работой.

В связи с этим нами разработан сезонный аккумулятор естественного холода, в значительной степени свободный от указанных недостатков [4]. Принципиальная схема устройства и функционирования этого аккумулятора приведена на рисунке 1.

Цилиндрический металлический бак 1, контактирующий внешней поверхностью с окружающим его воздухом, сообщается с атмосферой и заполнен водой. Циркуляционный насос 2 трубопроводом 3 соединён с входом 4 охладителя молока 5. Выход 6 охладителя трубопроводом 7 соединён с верхней частью полости бака. Бак установлен плоским нижним торцом на плоское дно заглубленного в грунт цилиндрического колодца 8 с возможностью свободного прохождения воздуха между стенкой бака и стенкой колодца. Верхний торец бака покрыт слоем 9 теплоизоляции, в которой имеется отверстие 10 небольшого диаметра для выравнивания давлений в баке и атмосферного давления. Колодец имеет шатровое перекрытие 11, по периметру которого размещены защищённые от проникновения осадков и метелей окна 12 для

поступления в кольцевую полость 13 колодца холодного атмосферного воздуха (х.в.) и отверстия 14 для выхода из полости колодца воздуха более высокой температуры (т.в.).

При отрицательной температуре окружающей среды холодный воздух заполняет через окна 12 кольцевое пространство между стенками бака и колодца и охлаждает через стенки бака 1 находящуюся в нём воду. При этом температура воздуха повышается, и он, поднимаясь, уходит через окна 14 в атмосферу.

При снижении температуры воды до нуля градусов в зоне H объёма бака начнётся образование и нарастание слоя льда, прилегающего к стенке бака. В верхней же зоне h объёма воды в баке лёд образуется в меньшем количестве, так как туда периодически в течение суток поступает тёплая вода с выхода 6 охладителя молока 5. В летнее время охлаждение воды в зоне h бака будет происходить не за счёт оттока тепла через стенки верхней зоны бака, а за счёт расплавления водой льда. Это будет происходить в первую очередь за счёт расплавления верхних его слоёв. При этом зона h будет расширяться, а зона H уменьшаться (к концу летнего периода при правильном расчёте высоты бака вплоть до нуля). Теплоизоляция верхнего торца бака, цилиндрическая форма и установка его днищем непосредственно на основание колодца предотвращает деформацию днища и стенок бака под действием напора воды при относительно малой их толщине, что в итоге снижает металлоёмкость устройства.

Так как колодец, в котором расположен бак, заглублён в грунт, холодный воздух будет заполнять полость между стенками бака и колодца и при по-

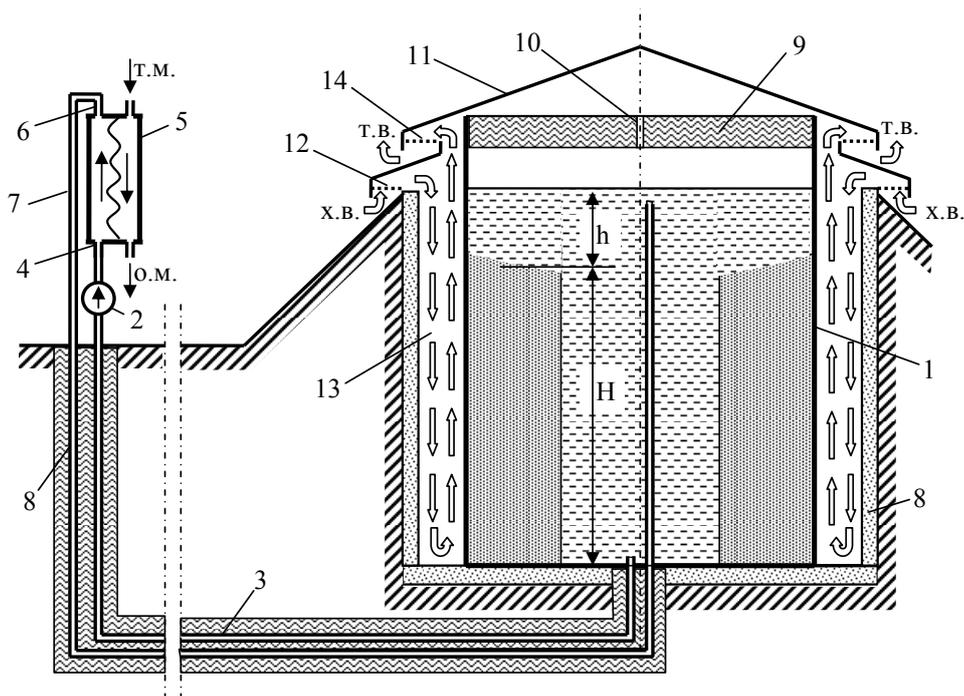


Рис. 1 – Принципиальная схема сезонного льдоаккумулятора

ложительной температуре атмосферного воздуха. При этом отдача холода через стенки бака в тёплое время года будет минимальна, а следовательно, большая часть запасённого объёма льда будет сохранена непосредственно для охлаждения молока в летнее время.

Целью настоящей работы является разработка методики определения необходимых размеров бака аккумулятора льда для конкретного животноводческого предприятия, расположенного в конкретном климатическом районе.

На рисунке 2 показан поперечный разрез бака аккумулятора льда.



Рис. 2 – К расчёту температурного сопротивления бака

В ранее опубликованных работах [5, 6] было показано, что в цилиндрическом баке общее тепловое сопротивление от внутренней поверхности льда до окружающей среды имеет вид:

$$R = f(r_{\text{л}}) = R_{\text{л}} + R_{\text{с}} + R_{\text{п}} = \frac{1}{2\pi H \lambda_{\text{л}}} \ln \frac{r_1}{r_{\text{л}}} + \frac{1}{2\pi H \lambda_{\text{с}}} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi H r_2 \alpha}, \quad (1)$$

где $R_{\text{л}}$, $R_{\text{с}}$ и $R_{\text{п}}$ – сопротивление теплопередаче соответственно слоя льда, стенки бака и теплоотдающей поверхности бака, °С/Вт;

H – высота теплоотдающей поверхности бака, м;

$\lambda_{\text{л}}$ – удельная теплопроводность льда, равная 2,23 Вт/(м·°С);

$\lambda_{\text{с}}$ – удельная теплопроводность стали, равная 47 Вт/(м·°С);

α – удельная теплоотдача, Вт/(м²·°С).

По данным Х. Кухлинга [7]:

$$\alpha = 4,5 + 4v, \quad (2)$$

где v – скорость охлаждающего воздуха относительно поверхности бака (по условиям размещения бака можно считать близкой к нулю), м/с.

Мощность теплового потока, уходящего в окружающую среду через стенки бака, пропорциональна разности $\theta_{\text{с}}$ температуры окружающей среды, являющейся функцией времени года $T_{\text{с}}(t)$ и температуры воды в баке $T_{\text{в}}$. С учётом допущения, что за исключением верхней зоны объёма воды в

баке при наличии в объёме бака льда температура воды по всей высоте H равна 0°С, получим:

$$\Theta_{\text{с}}(t) = T_{\text{в}} - T_{\text{с}}(t) = 0 - T_{\text{с}}(t) = -T_{\text{с}}(t). \quad (3)$$

Тогда и мощность оттока тепла из бака также будет функцией времени:

$$P_{\text{п}}(t) = \frac{\theta_{\text{с}}(t)}{R(r_{\text{л}})} = \frac{-T_{\text{с}}(t)}{\frac{1}{2\pi H \lambda_{\text{л}}} \ln \frac{r_1}{r_{\text{л}}} + \frac{1}{2\pi H \lambda_{\text{с}}} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi H r_2 \alpha}}. \quad (4)$$

В то же время в бак за счёт циркуляции воды в контуре «бак – теплообменник» поступает тепло охлаждаемого молока. Мощность притока тепла равна:

$$P_{\text{м}} = c_{\text{м}} m (T_{\text{мн}} - T_{\text{мк}}), \quad (5)$$

где $c_{\text{м}}$ – удельная теплоёмкость молока, равная 4000 [8], Дж/(кг·°С);

$T_{\text{мн}}$ – начальная температура молока, поступающего на охлаждение, °С;

$T_{\text{мк}}$ – температура охлаждённого молока, °С;

$m = N \cdot y / (365 \cdot 24 \cdot 3600)$ – среднесуточная интенсивность поступления молока на охлаждение, кг/с;

N – поголовье дойных коров на ферме, гол.;

Y – годовая молочная продуктивность коровы, кг/гол.

Для решения вопроса о динамике нарастания льда необходимо учесть теплоту плавления льда. Теплота плавления элементарного слоя льда в джоулях рассчитывается как:

$$dw_{\text{л}} = g dm_{\text{л}} = g \rho_{\text{л}} 2\pi r_{\text{л}} H dr_{\text{л}}, \quad (6)$$

где g – удельная теплота плавления льда, равная 333700 Дж/кг [9];

$dm_{\text{л}}$ – элементарный прирост массы льда по всей внутренней боковой поверхности бака, кг.

При этом можно пренебречь теплом, запасаемым в массе льда за счёт его теплоёмкости, так как оно более чем на порядок меньше теплоты плавления льда. Тогда с достаточной степенью точности можно считать, что

$$dw_{\text{м}} = dw_{\text{п}} + dw_{\text{л}}$$

или

$$P_{\text{м}} dt = P_{\text{п}}(t) dt + dw_{\text{л}}.$$

Заменим входящую в уравнение величину $dw_{\text{л}}$ её значением из (6), получим следующее дифференциальное уравнение:

$$dr_{\text{л}} = \frac{P_{\text{м}} - P_{\text{п}}(t)}{g \rho_{\text{л}} 2\pi H r_{\text{л}}} dt. \quad (7)$$

Решение данного дифференциального уравнения осуществим графоаналитическим способом. С этой целью заменим в уравнении дифференциалы переменных величин $r_{\text{л}}$ и t достаточно малыми приращениями этих величин. При этом будем считать, что на отрезке времени $\Delta t_{\text{рл}}$, m и $T_{\text{с}}$ будут оставаться постоянными, а изменение температуры окружающей среды в течение года происходит по

синусоиде, смещённой относительно оси времени на величину среднегодовой температуры в районе расположения аккумулятора холода:

$$T_c(t) = T_a \cdot \sin(\omega t + \varphi) + T_{сг}, \quad (8)$$

где T_a и $T_{сг}$ – соответственно амплитуда синусоиды и среднегодовая температура окружающей среды, °С;
 $\omega = 2\pi/365$ – угловая частота периодических колебаний температуры, 1/сут;
 φ – начальная фаза периода колебаний в радианах.

Алгоритм решения данного уравнения представлен на рисунке 3.

Результаты исследования. В работе в качестве примера приведён расчёт по изложенной выше методике и компьютерной программе, реализующей данный алгоритм накопления и расхода льда в баке аккумулятора холода радиусом r_2 , равным 1,5 м, высотой 4 и средней высотой H объёма льда в баке 3,6 м. Толщина стальной стенки бака $\delta = 0,004$ м. Аккумулятор холода (льда) установлен в

климатических условиях г. Оренбурга для охлаждения молока в фермерском хозяйстве с поголовьем $N=20$ дойных коров, каждая с продуктивностью $y=4000$ кг молока в год. Охлаждение молока осуществляется от $T_H = 30^\circ\text{C}$ до $T_K = 4^\circ\text{C}$.

Годовой ход температуры в г. Оренбурге характеризуется следующими показателями [10]:

- средняя температура по месяцам –

Мес.	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
$T_{ср}, ^\circ\text{C}$	-13,7	-13,1	-6	7	15,4	19,8	22,2	20,1	14,1	5,1	-3,1	-9,7

- среднегодовая температура $T_{сг} = +4,8^\circ\text{C}$;
- разность максимальной и минимальной среднемесячных температур – $25,9^\circ\text{C}$.

Для осуществления расчётов по разработанному алгоритму зависимость температуры окружающего воздуха от времени года, представленную таблично, аппроксимирована аналитическим выражением, в качестве которого, как было показано выше, в наибольшей степени подходит выражение (8).

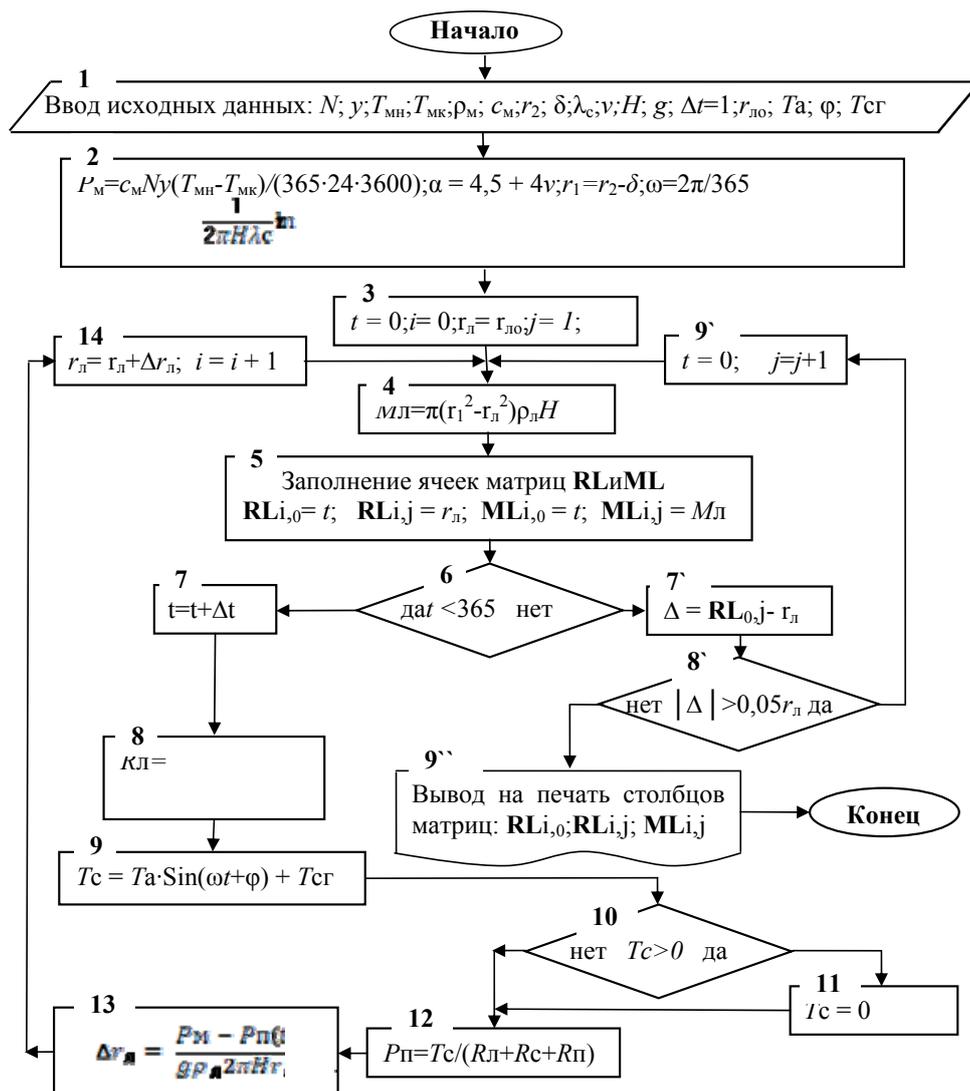


Рис. 3 – Алгоритм решения дифференциального уравнения (7)

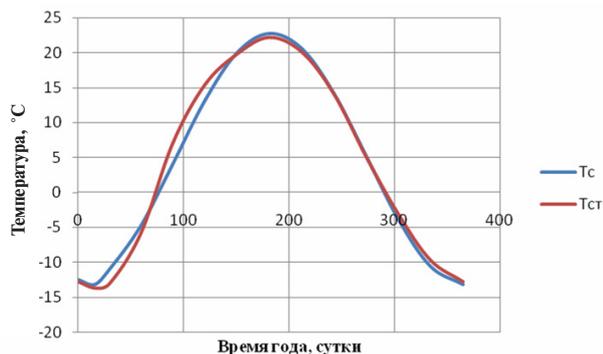


Рис. 4 – Кривые аппроксимирующей T_C и аппроксимируемой (табличной) T_{ct} зависимостей температуры окружающего воздуха от времени года

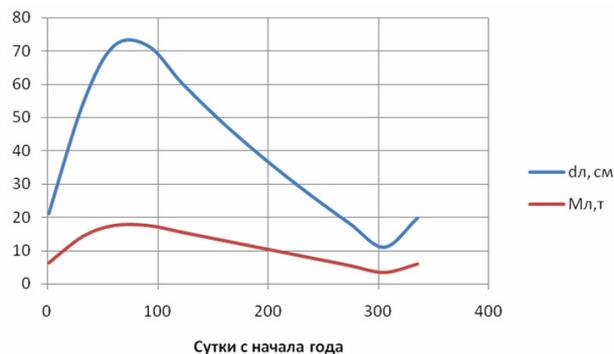


Рис. 5 – Графики зависимости толщины слоя льда d_L и массы накопленного льда M_L от времени года

Конкретно для данных климатических условий это выражение примет следующий вид:

$$T_C(t) = 17,95 \sin(0,017t + 1,85) + 4,8. \quad (9)$$

На рисунке 4 представлены кривые аппроксимируемой и аппроксимирующей зависимостей. Вид кривых свидетельствует о достаточно приемлемой для рассчитываемого объекта степени соответствия этих зависимостей.

Все указанные исходные данные, а также справочные данные используемых в устройстве материалов, приведённые выше, заносятся в соответствии с алгоритмом расчёта в блок исходных данных программы (модуль 1 алгоритма). При этом элементарный промежуток времени Δt установлен длительностью в одни сутки. В модуле 2 алгоритма программа в соответствии с выражениями (5, 2, 1) осуществляет расчёт параметров бака льдоаккумулятора, не зависящих от радиуса r_L внутренней поверхности льда. Далее в модуле 3 устанавливаются начальные значения времени t , а также начальные номера строк i и столбцов j матриц RLML хранения промежуточных результатов расчёта соответственно радиусу внутренней поверхности льда r_L и массе накопленного в баке льда M_L . Начальное значение r_L устанавливается произвольно, и по истечении нескольких периодов расчёта оно выходит на установившуюся величину, которую и следует считать за результат расчёта.

В модуле 4 осуществляется расчёт массы льда в момент времени t с последующим заполнением (модуль 5) ячеек матриц, соответствующих номеру i суток года и номеру j года. По условию модуля 6, если t менее года, производится увеличение t на величину Δt (одни сутки). По выражению (1) вычисляется сопротивление теплопередаче R_L (модуль 8) и по выражению (9) – температура T_C наружного воздуха (модуль 9). Если $T_C > 0$, так как наружный воздух при его температуре выше нуля, в кольцевое пространство между стенками колодца 8 и бака 1 опускаться не может, величина температуры в кольцевом пространстве, окружающем бак, приравнивается к нулю (модули 10 и 11 алгоритма).

В последующем по выражению (4) определяется мощность теплоотдачи с поверхности бака P_L и по выражению (7) прирост радиуса льда за сутки Δr_L (модули 12 и 13 соответственно). В модуле 14 осуществляется пересчёт r_L и i на начало следующих суток и повторный выход на начало суточного цикла (модуль 4). Как только будут перебраны все сутки года, по условию модуля 6 проверяется накопление льда в начале и конце года (модуль 7') и если расхождение превышает 5%, по условию модуля 8' осуществляется переход на начало следующего года (модуль 9'). Таким образом, годовые циклы будут повторяться до тех пор, пока разность радиусов льда в начале и в конце года не станет меньше 5%, т.е. не наступит установившийся режим, и по условию модуля 8' результаты последнего года будут выведены на печать (модуль 9'').

На рисунке 5 приведены графики изменения в течение года толщины слоя льда ($d_L = r_1 - r_L$) и массы льда, построенные по результатам расчёта рассмотренного примера льдоаккумулятора.

Вид кривых показывает, что максимум накопления льда происходит на 75-е сутки с начала года, что соответствует примерно середине марта. В дальнейшем происходит снижение как массы льда, так и радиуса внутренней поверхности стенки льда, а соответственно и её толщины. Минимума они достигают, как следует из графиков, примерно на 305–310-е сутки (начало ноября) и далее с наступлением морозов повторно увеличиваются. При этом в данном случае минимум массы льда составляет 11 т. Это запас на случай аномально тёплой зимы. При необходимости его можно увеличить или, наоборот, уменьшить корректировкой или высоты бака, или его диаметра с последующим пересчётом его выходных характеристик.

Выводы. Проведённые расчёты по разработанной выше методике наглядно показывают возможность использования предложенной конструкции сезонного аккумулятора холода (льда) для охлаждения молока в пределах животноводческой фермы без привлечения для этой цели электрической

энергии и с минимальными затратами ручного труда. Если учесть, что для охлаждения 1 т молока с использованием в настоящее время холодильной техники по данным требуется затратить 35 кВт · час электрической энергии, то в рассмотренном примере за год её будет сэкономлено 2800 кВт · час, что эквивалентно годовому экономическому эффекту 12 тыс. руб. при стоимости электроэнергии 4 руб. за кВт · час.

Литература

1. Козловцев А.П., Квашеников В.И., Шахов В.А. Охлаждение молока на молочных фермах: монография. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2016. 110 с.
2. Аккумулятор естественного холода а-15 / Информационный портал ПИЩЕВИК. [Электронный ресурс]. URL: <http://mppnik.ru/publ/525-akkumulyator-estestvennogo-holoda-a-15.html>.
3. Козловцев А.П. Обоснование и разработка энергосберегающей технологии охлаждения молока в замкнутом цикле системы «атмосфера—инженерное сооружение—водная среда»: дис. ... док. техн. наук: 05.20.01. Оренбург, 2017. 385 с.
4. Пат. РФ № 2691486 Сезонный аккумулятор естественного холода / Петько В. Г.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО ОГАУ; опубл. 14.06.2019.
5. Петько В.Г., Фомин М.Б. Анализ условий обледенения водонапорной башни Рожновского в системе водоснабжения объектов АПК // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 6 (62). С. 85–89.
6. Петько В.Г. Процесс обледенения металлической водонапорной башни в системах водоснабжения объектов сельского хозяйства, выполненной по типу «бак-стойка» / М.Б. Фомин, В.Г. Петько, Л.Р. Фомина [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 5 (67). С. 129–132.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике / пер. с нем. Е.М. Лейкина. 2-е изд. М.: Мир, 1985. 520 с.: ил. стр. 234. табл. 29.
8. Теплофизические свойства молочных продуктов. [Электронный ресурс]. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-produktov/molochnye-produkty/teplofizicheskie-svoystva-molochnyh-produktov>.
9. Петько В.Г., Рязанов А.Б. Исследование динамики нарастания льда на внутренних стенках водонапорных башен // Техника в сельском хозяйстве. 2014. № 1. С. 31–32.
10. Климатические данные городов по всему миру. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.climate-data.org>.