

Анализ условий обледенения водонапорной башни Рожновского в системе водоснабжения объектов АПК

В.Г. Петько, д.т.н., профессор, М.Б. Фомин, ст. преподаватель, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

Основной недостаток самой распространённой в сельской местности водонапорной башни системы Рожновского – функциональный отказ из-за намерзания льда на внутренних стенках башни в зимнее время года. При этом происходит не только уменьшение полезного объёма башни, но зачастую и её разрушение. Намерзание льда происходит, когда теплопотери через стенки башни превышают поступление тепла с водой, закачиваемой в полость башни из скважины. Ранее предложена методика расчёта толщины слоя льда на стенках башни в динамическом режиме при различных климатических и режимных параметрах [1]. Однако положенная в основу расчёта скорость увеличения

слоя льда оценивается по этой методике по косвенному критерию, что приводит к неоднозначным результатам. Поэтому представляет практический интерес уточнение данной методики и на этой основе построение зависимости толщины слоя льда от времени для различных климатических условий и различных величин протока воды через водонапорную башню.

Материал и методы исследования. На рисунке 1 показан поперечный разрез ствола башни.

При перемешивании находящейся в ней воды, которое частично осуществляется за счёт естественной конвекции и может интенсифицироваться различными техническими средствами [2–5], а также при наличии на внутренней стенке башни льда можно с достаточной степенью точности считать, что её температура по всей высоте башни

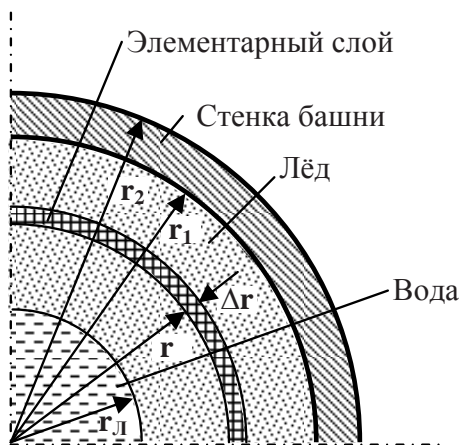


Рис. 1 – К расчёту температурного сопротивления водонапорной башни

равна 0°С. Так как температура вне башни в зимнее время года отрицательная, то передача тепла происходит в направлении от центра башни в окружающее пространство. Передача осуществляется через лёд и стенку башни теплопроводностью и с внешней поверхности стенки башни теплоотдачей. Теплопроводность осуществляется в соответствии с законом Фурье, согласно которому

$$P = \lambda F (T_1 - T_2) / \delta = \theta / (\delta / \lambda F) \quad [6],$$

где P – мощность теплового потока, проходящего через плоскую стенку, перпендикулярную направлению движения потока, Вт;
 F – площадь поверхности стенки, м²;
 θ – температурное напряжение (по аналогии с законом Ома для электрической цепи) $\theta = T_1 - T_2$, °С;
 $T_1 - T_2$ – разность температур поверхностей стенки, °С;
 $\delta / \lambda F = R_T$ – по аналогии с законом Ома для электрической цепи сопротивление передаче тепла, °С/Вт;
 δ – расстояние между гранями пластины, м;
 λ – удельная теплопроводность, численно равная мощности теплового потока проходящего через плоскую стенку площадью 1 м² толщиной 1 метр при разности температур между противоположными её гранями 1°С, Вт/(м·°С).

Удельная теплопроводность зависит от материала стенки и температуры. Другое её название – коэффициент теплопроводности, более распространённое в технической литературе, однако не совсем соответствующее её физической сущности.

Для рассматриваемой водонапорной башни представляет интерес сопротивление при передаче тепла через однородную цилиндрическую стенку (рис. 1). Если толщина стенки бесконечно мала, сопротивление её также имеет бесконечно малую величину и может быть определено так же, как и для плоской стенки, по формуле:

$$dR_T = dr / \lambda F = dr / 2\pi r H \lambda, \quad (1)$$

где H – высота башни, м;
 r – радиус элементарного слоя, м;
 dr – толщина элементарного слоя, м.

Тогда сопротивление теплопередаче слоя толщиной от r_0 до r находится по формуле:

$$R_T = \frac{1}{2\pi H \lambda} \int_{r_0}^r \frac{dr}{r} = \frac{1}{2\pi H \lambda} \ln \frac{r}{r_0}. \quad (2)$$

Конкретно для рассматриваемого случая сопротивление слоя льда толщиной от $r = r_L$ до $r = r_1$ выражение (2) примет вид:

$$R_{TL} = \frac{1}{2\pi H \lambda_L} \int_{r_L}^{r_1} \frac{dr}{r} = \frac{1}{2\pi H \lambda_L} \ln \frac{r_1}{r_L}, \quad (3)$$

а для сопротивления теплопередаче стенки башни от $r = r_1$ до $r = r_2$:

$$R_{TC} = \frac{1}{2\pi H \lambda_c} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{1}{2\pi H \lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (4)$$

Теплоотдача с поверхности башни в окружающую среду осуществляется в соответствии с положениями Ньютона, согласно которым

$$P = \alpha F (T_{\text{п}} - T_{\text{с}}) = \theta_{\text{nc}} / (1/\alpha F) \quad [6],$$

где P – мощность теплового потока излучаемого теплоотдающей поверхностью, Вт;
 $T_{\text{п}} - T_{\text{с}} = \theta_{\text{nc}}$ – разность температур теплоотдающей поверхности и окружающей среды, °С;
 F – площадь теплоотдающей поверхности, м²;
 $1/\alpha F = R_{\text{ТП}}$ – сопротивление теплоотдаче, °С/Вт;
 α – удельная теплоотдача, численно равная мощности теплового потока, отдаваемого (поглощаемого) поверхностью площадью 1 м² в окружающую среду при разности температур между поверхностью и окружающей средой один градус, Вт/(м²·°С).

По данным Х. Кухлинга [7], $\alpha = 4,5 + 4V$, где V – скорость обдувающего поверхность воздуха, м/с.

Конкретно выражение теплового сопротивления теплоотдающей поверхности башни примет вид:

$$R_{\text{ТП}} = \frac{1}{S\alpha} = \frac{1}{2\pi r_2 H \alpha}. \quad (5)$$

Общее тепловое сопротивление от внутренней поверхности льда до окружающей среды рассчитывается по формуле:

$$R = f(r_L) = R_{TL} + R_{TC} + R_{\text{ТП}} = \frac{1}{2\pi H \lambda_L} \ln \frac{r_1}{r_L} + \frac{1}{2\pi H \lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi H r_2 \alpha}. \quad (6)$$

Тогда мощность теплового потока, уходящего в окружающую среду, равно:

$$R_T = \frac{\theta_{\text{BC}}}{R(r_L)} dt = \frac{\theta_{\text{BC}}}{\frac{1}{2\pi H \lambda_L} \ln \frac{r_1}{r_L} + \frac{1}{2\pi H \lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi r_2 H \alpha}}, \quad (7)$$

где $\theta_{BC} = T_B - T_C$ – разность температуры воды T_B , находящейся в баке башни (при наличии льда равной нулю), и температуры окружающей среды (воздуха) T_C , °С.

При этом мощность притока тепла, поступающего с закачиваемой из скважины водой, определяется выражением:

$$P_B = C_B \rho_B Q \theta_B, \quad (8)$$

где Q – поступление воды в бак, м³/с;
 θ_B – разность температуры воды, находящейся в баке, и температуры поступающей воды, °С;
 C_B – удельная теплоёмкость воды, Дж/кг;
 ρ_B – плотность воды, кг/м³.

В установившемся состоянии, когда ни нарастания массы льда, ни его плавления не происходит, существует баланс притока тепла и его отдачи в окружающее пространство ($P_T = P_B$). Заменяв в этом равенстве мощности тепловых потоков их значениями и произведя некоторые преобразования, получим выражение расхода поступающей воды, необходимого для поддержания данного баланса при установившемся радиусе r_{ly} внутренней цилиндрической поверхности слоя льда:

$$Q = f(r_{ly}) = \frac{\theta_{BC}}{\left(\frac{1}{2\pi H \lambda_{л}} \ln \frac{r_1}{r_{ly}} + \frac{1}{2\pi H \lambda_{с}} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi r_2 H \alpha} \right) C_B \rho_B \theta_B}. \quad (9)$$

Результаты исследования. На рисунке 2 проиллюстрирована полученная зависимость $Q = f(r_{ly})$ для нескольких значений температуры T_c окружающей среды при:

$r_1 = 0,495$ м; $r_2 = 0,5$ м; $H = 10$ м; $V = 10$ м/с;
 $\theta_B = 5$ °С; $\lambda_{с} = 47$ Вт/(м · °С);
 $C_B = 4186$ Дж/(кг · °С); $\rho_B = 1000$ кг/м³.

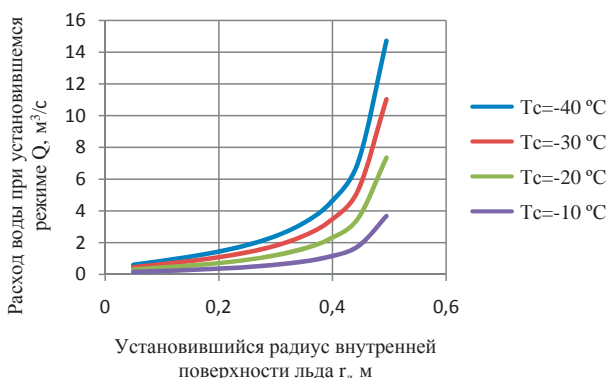


Рис. 2 – Зависимость расхода воды от установившегося радиуса внутренней поверхности льда

Анализ графиков показывает, что наиболее интенсивное снижение необходимого расхода воды для поддержания установившегося режима обледенения наблюдается уже при слое льда, составляющем около 20% радиуса бака башни.

Для решения вопроса о динамике нарастания льда необходимо включить в уравнение теплового баланса теплоту плавления льда. Формула расчёта теплоты плавления элементарного слоя льда имеет вид:

$$dw_{л} = g dm, \quad (10)$$

где g – удельная теплота плавления льда, Дж/кг;
 $dm = \rho_{л} 2\pi r_{л} H dr_{л}$ – элементарный прирост массы льда по всей внутренней поверхности бака водонапорной башни, кг.

Процессы теплообмена и таяния льда протекают достаточно медленно, поэтому количество тепла, идущего на нагрев или выделяемого при охлаждении льда и стенок башни, значительно меньше того количества тепла, которое отдаётся поступающей в башню водой. Тогда с достаточной степенью точности можно считать, что тепло поступающей воды целиком уходит на плавление льда и покрытие теплопотерь $dw_B = dw_{п} + dw_{л}$.

Заменяв входящие в уравнение величины их значениями, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$C_B \rho_B Q \theta_B dt = \frac{\theta_{BC}}{\frac{1}{2\pi H \lambda_{л}} \ln \frac{r_1}{r_{л}} + \frac{1}{2\pi H \lambda_{с}} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi r_2 \alpha}} dt + g \rho_{л} 2\pi H r_{л} dr_{л}, \quad (11)$$

из которого следует:

$$dr_{л} = \frac{\theta_{BC}}{C_B \rho_B Q \theta_B - \frac{1}{2\pi H \lambda_{л}} \ln \frac{r_1}{r_{л}} + \frac{1}{2\pi H \lambda_{с}} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi r_2 H \alpha}} dt. \quad (12)$$

Решим данное дифференциальное уравнение, определим зависимости $r_{л} = f(t)$ для Q , изменяющегося по суточному графику $Q = f(t)$, представленному на рисунке 3, и для постоянного среднесуточного значения Q , соответствующего данному графику.

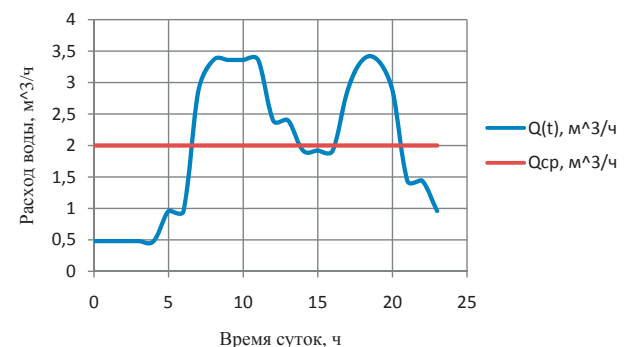


Рис. 3 – Суточный график водопотребления при $Q_{cp} = 2$ м³/ч

Решение дифференциального уравнения осуществим графоаналитическим способом, заменив в нём дифференциалы переменных величин $r_{л}$ и t

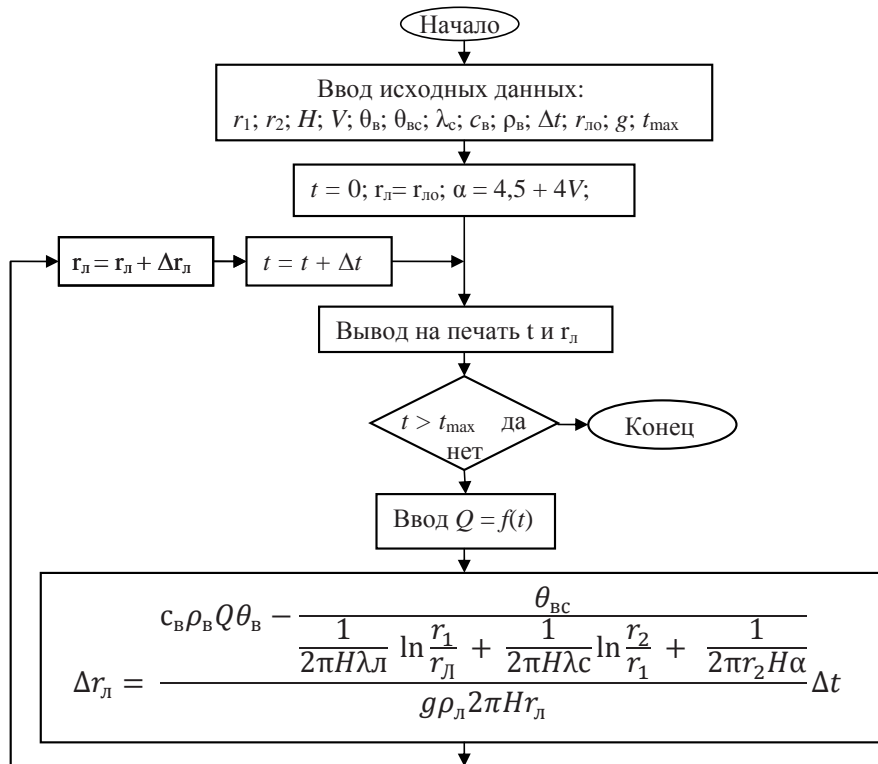


Рис. 4 – Алгоритм решения дифференциального уравнения (9)

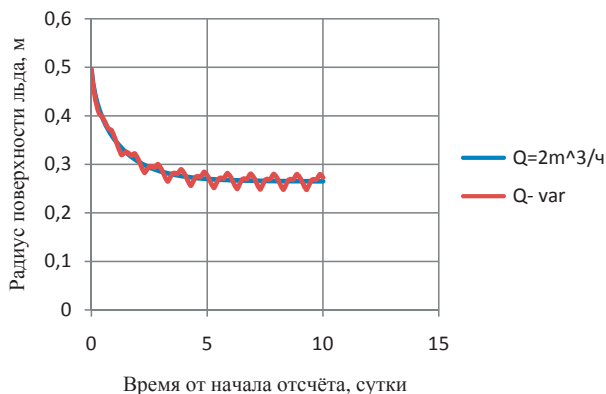


Рис. 5 – Зависимость радиуса внутренней поверхности льда от времени при переменном ($Q-var$) и постоянном ($Q=2 \text{ м}^3/\text{ч}$) среднесуточном расходе воды ($T_c = -40^\circ\text{C}$; $V = 10 \text{ м/с}$)

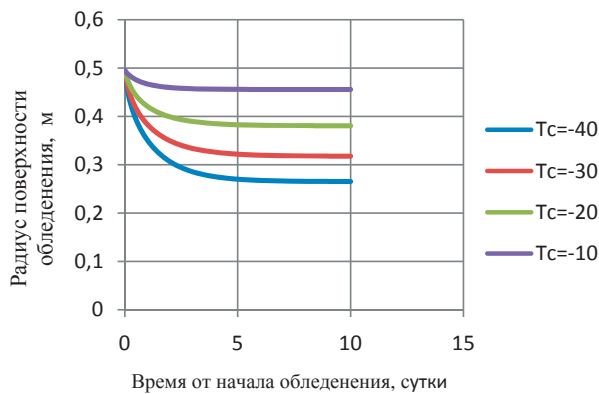


Рис. 6 – Зависимость радиуса внутренней поверхности льда от времени для различных значений температуры окружающей среды при $V = 10 \text{ м/с}$, $Q = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$, $r_{\text{ло}} = 0,5 \text{ м}$

достаточно малыми приращениями этих величин. При этом будем считать, что на отрезке времени Δt r_l и Q будут оставаться постоянными. Алгоритм решения уравнения представлен на рисунке 4.

В результате получим две кривые (рис. 5) изменения радиуса внутренней поверхности льда от времени: одна при неизменном расходе воды в течение суток ($Q = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$), а другая при переменном расходе ($Q-var$), среднее значение которого также равно $2 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Вид кривых показывает, что нарастание льда до установившегося уровня происходит за время, превышающее несколько суток. При этом в среднем накопление льда при переменном в

течение суток поступлении воды в бак водонапорной башни ($Q=f(t)$) происходит так же, как если бы это поступление было постоянным, равным среднесуточному поступлению ($Q=Q_{\text{cp}}$). Тогда для упрощения расчётов интенсивности нарастания льда и его установившегося значения по приведённому выше алгоритму величину Q , и равным образом температуру T_c и скорость окружающего воздуха V можно принять постоянными, равными среднесуточным.

Кривые зависимостей $r_l=f(t)$, рассчитанные с учётом этого допущения для стального бака водонапорной башни с указанными выше геометрическими размерами для различных среднесуточных

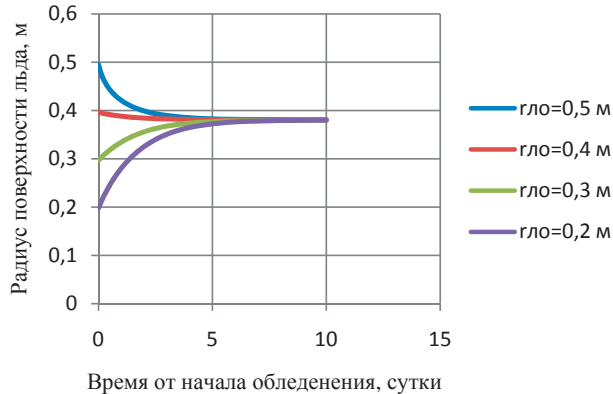


Рис. 7 – Зависимость радиуса внутренней поверхности льда от времени для различных начальных значений радиуса поверхности льда при $V = 10$ м/с, $Q = 2$ м³/ч, $T_c = -20^\circ\text{C}$

значений, приведены на рисунках 6–8: температуры окружающего воздуха T_c (рис. 6), радиуса поверхности льда в момент отсчёта $r_{\text{лю}}$ (рис. 7), притока воды Q (рис. 8).

Выводы. Анализ полученных зависимостей показывает, что для принятых в качестве примера размеров водонапорной башни установившийся режим обледенения наступает в среднем за время, равное 3–4 суткам. При этом льда в установившемся режиме намерзает на стенке башни тем больше, чем ниже среднесуточная температура окружающей среды и чем ниже приток воды в бак водонапорной башни. Однако, если соблюдается принятое допущение равенства нулю температуры воды по всему объёму башни, не происходит полного перемерзания ствола башни даже при экстремально низкой температуре и сравнительно малом объёме водопотребления. Это является наглядным доказа-

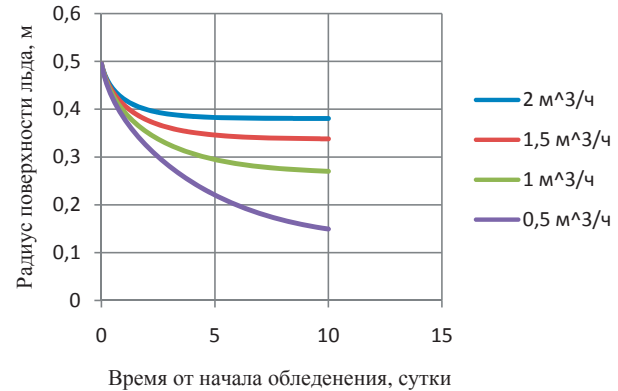


Рис. 8 – Зависимость радиуса внутренней поверхности льда от времени для различных значений среднесуточного поступления воды при $V = 10$ м/с, $T_c = -20^\circ\text{C}$, $r_{\text{лю}} = 0,5$ м

тельством целесообразности применения устройств и способов интенсификации перемешивания воды для выравнивания температуры по всему объёму водонапорной башни.

Литература

1. Петько В.Г., Рязанов А.Б. Исследование динамики нарастания льда на внутренних стенках водонапорных башен // Техника в сельском хозяйстве. 2014. № 1. С. 31–32.
2. Петько В.Г., Рязанов А.Б. Незамерзающая водонапорная башня // Сельский механизатор. 2008. № 2. С. 32.
3. Петько В.Г., Рязанов А.Б., Фомин М.Б. Водонапорная башня с ветроколесом // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 2. С. 32.
4. Патент 2379452, Водонапорная башня / Петько В.Г., Рязанов А.Б.; Заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО ОГАУ; опубл. 20.01.2010.
5. Патент 2454565, Водонапорная башня / Петько В.Г., Рязанов А.Б.; Заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО ОГАУ; бюл. № 9; опубл. 27.03.2012.
6. Егорушкин В.Е. и др. Основы теплотехники и теплоснабжение сельскохозяйственных предприятий. М.: «Колос», 1972. С. 92.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике / пер. с нем. Е.М. Лейкина. 2-е изд. М.: Мир, 1985. 520 с.