

Ветроэнергетическая установка для повышения устойчивости металлической водонапорной башни к обледенению

*М.Б. Фомин, ст. преподаватель,
ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ*

В Оренбургском ГАУ разработана математическая модель процесса обледенения металлической водонапорной башни при отрицательной температуре окружающего воздуха [1]. С её помощью было показано, что при условии интенсивного перемешивания воды обледенение не достигает критической величины даже при наименьшей средней температуре окружающей среды (-40°C) и наибольшей средней скорости ветра (10 м/с), если поступление воды в башню не снижается ниже $2 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Материал и методы исследования. При более низком притоке воды обледенение превышает

допустимую для нормального функционирования башни величину. Именно такой приток наиболее вероятен для мелких фермерских хозяйств. В этом случае возможны два направления решения указанной проблемы. Первый из них следует из того, что перемерзает сначала стойка башни, а затем при дальнейшем ухудшении погодных условий бак водонапорной башни, поскольку он имеет больший диаметр. Следовательно, особенно в случаях расположения водонапорной башни на возвышенности, целесообразно диаметр стойки башни увеличить вплоть до диаметра бака.

Вторым направлением является использование дополнительных источников энергии для подогрева воды в ёмкости. Для этой цели целесообразно использовать альтернативные источники энергии, на-

пример ветроагрегаты различной конструкции [2]. На рисунке 1 изображена водонапорная башня, устойчивость к обледенению которой обеспечивается применением обоих указанных направлений.

Подача воды осуществляется в верхнюю зону водонапорной башни, что способствует уменьшению застойных явлений. Эту же функцию выполняет и ветроагрегат, интенсифицирующий конвективные процессы в баке водонапорной башни. Однако при достаточной мощности он может осуществлять и дополнительный подвод энергии, обеспечивая повышение устойчивости водонапорной башни к обледенению.

Рассмотрим, насколько эффективно его применение именно в плане дополнительного подвода энергии.

Как известно, мощность, развиваемая ветроагрегатом, пропорциональна ометаемой им площади и кубу скорости ветра [3]:

$$P_{BA} = \xi \rho S V^3 / 2, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент использования энергии ветра;
 ρ – плотность воздуха, кг/м³;
 S – ометаемая площадь, м²;
 V – скорость ветра, м/с.

В установившемся режиме обледенения водонапорной башни эта мощность, суммируясь с мощ-

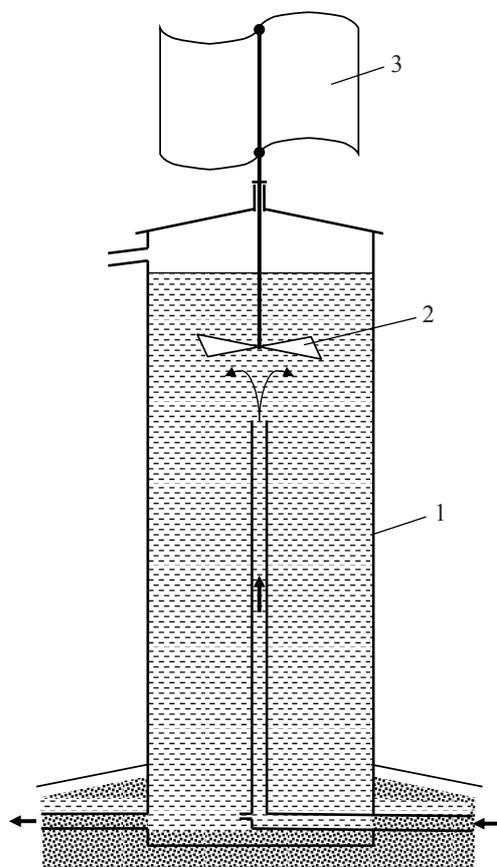


Рис. 1 – Водонапорная башня повышенной устойчивости к обледенению:
 1 – бак; 2 – активатор циркуляции воды; 3 – ротор ветроагрегата

ностью поступления тепла с приточной водой P_B , покрывает мощность P_{Π} теплопотерь водонапорной башни. Следовательно, при заданной мощности поступления тепла с приточной водой P_B мощность ветроагрегата P_{BA} , необходимая для поддержания установившегося режима при различных значениях относительного радиуса обледенения башни ($r_{\text{ль}}/r_1$), будет рассчитываться как

$$P_{BA} = P_{\Pi} - P_B.$$

Подставив в данное выражение значения P_{Π} и P_B , приведённые ранее [1], получим:

$$P_{BA} = \frac{\theta_{BC}}{\frac{1}{2\pi H \lambda_l} \ln \frac{r_1}{r_{\text{ль}}} + \frac{1}{2\pi H \lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi r_2 H \alpha} - c_B \rho_B Q \theta_B},$$

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;
 $\theta_{BC} = T_B - T_C$ – разность температуры воды T_B , находящейся в баке башни (при наличии льда равной нулю) и температуры окружающей среды T_C , °С;
 α – удельная теплоотдача ($\alpha = 4,5 + 4V$), Вт/(м²·°С) [4];
 V – скорость ветра, м/с;

H, r_1, r_2 и $r_{\text{ль}}$ – соответственно высота, внутренний и внешний радиусы бака башни и установившийся радиус поверхности льда, м;
 λ_l и λ_c – соответственно удельная теплопроводность льда и стенки бака башни, Вт/(м·°С).

Результаты исследования. Данное уравнение позволяет построить графики зависимостей необходимой мощности ветроагрегата от относительного радиуса обледенения башни. На рисунке 2 представлен такой график при различных расходах воды и наиболее жёстких условиях охлаждения башни: скорости ветра $V = 10$ м/с и температуре окружающей среды -40 °С.

Анализ кривых показывает, что при относительном радиусе поверхности льда от 0,8 до 1 необходимая мощность ветроагрегата достигает неприемлемо большой величины и практически не зависит от расхода воды из водопроводной башни. В то же время в пределах радиуса льда от 0 до 0,6 необходимая мощность ветроагрегата вполне может быть технически реализована и экономически оправдана. На рисунке 3 изображены кривые её изменения в этом пределе в увеличенном масштабе.

Как видим, необходимая мощность уменьшается с увеличением расхода воды. В то же время, как было отмечено ранее, необходимый расход воды в пределах изменения относительного радиуса от 0 до 0,6 практически не зависит от диаметра бака [1]. То же самое можно отметить и для необходимой

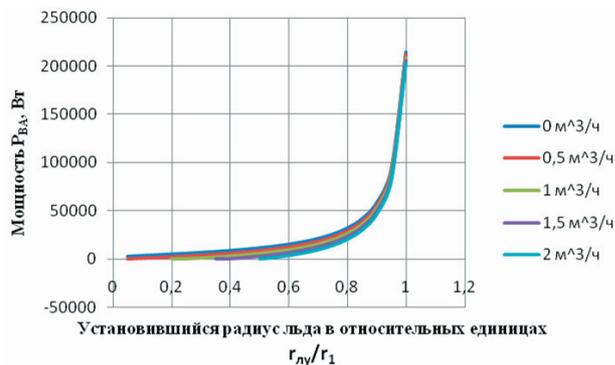


Рис. 2 – Зависимость мощности ветроагрегата, необходимой для поддержания установившегося режима, от установившегося радиуса поверхности льда при $H = 15$ м; $r_1 = 1,25$ м; $r_2 = 1,255$ м; $Q = (0; 0,5; 1; 1,5; 2)$ м³/ч

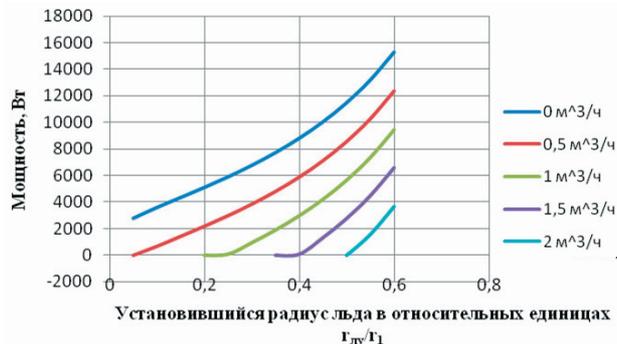


Рис. 3 – Зависимость мощности ветроагрегата, необходимой для поддержания установившегося режима, от установившегося радиуса поверхности льда в пределах относительного радиуса льда от 0 до 0,6 при $H = 15$ м; $r_1 = 1,25$ м; $r_2 = 1,255$ м; $Q = (0; 0,5; 1; 1,5; 2)$ м³/ч

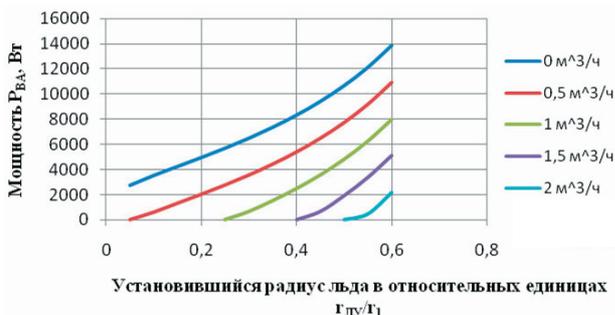


Рис. 4 – Зависимость мощности ветроагрегата, необходимой для поддержания установившегося режима, от установившегося радиуса поверхности льда в пределах относительного радиуса льда от 0 до 0,6 при $H = 15$ м; $r_1 = 0,5$ м; $r_2 = 0,505$ м; $Q = (0; 0,5; 1; 1,5; 2)$ м³/ч

мощности ветроагрегата. На рисунке 4 показаны кривые изменения необходимой мощности для бака в 2,5 раза меньшего диаметра.

Вывод. Анализ полученного графика показывает, что при приемлемом относительном радиусе обледенения стойки водонапорной башни, равном 0,4, необходимая мощность ветроагрегата равна 8 кВт даже при отсутствии поступления воды в водо-

напорную башню. Это в свою очередь позволяет, воспользовавшись уравнением (1), определить ометаемую ветротурбиной площадь:

$$S = 2P_{BA} / \xi \rho V^3.$$

Для ветротурбины с вертикальной осью вращения площадь ометаемой поверхности с учётом того, что коэффициент использования ветра этой ветротурбины равен 0,12:

$$S = 2 \cdot 8000 / (0,12 \cdot 1,29 \cdot 10^3) = 103 \text{ м}^2,$$

а радиус при высоте 5 м равен 5,7 м, что вполне реализуемо.

Литература

1. Петько В.Г., Фомин М.Б. Анализ условий обледенения водонапорной башни Рожновского в системе водоснабжения объектов АПК // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 1 (63). С. 85–89.
2. Петько В.Г., Рязанов А.Б., Фомин М.Б. Водонапорная башня с ветроколесом // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 2. С. 32.
3. Петько В.Г. Оптимизация степени загрузки ветроагрегата при различных скоростях ветра / В.Г. Петько, И.А. Рахимжанова, В.В. Пугачёв, А.С. Петров // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 4 (48). С. 76–79.
4. Кухлинг Х. Справочник по физике / пер. с нем. Е.М. Лейкина. 2-е изд. М.: Мир, 1985. 520 с.