

Обоснование достоверности модели функционально-параметрического состояния водонапорной башни системы водоснабжения объектов сельскохозяйственного назначения

Е.М. Асманкин, д.т.н., профессор, Ю.А. Ушаков, д.т.н., профессор, М.Б. Фомин, преподаватель, Н.К. Комарова, д.с.-х.н., профессор, А.А. Аверкиев, д.с.-х.н., профессор, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

Среди основных схем подъёма и подачи воды на объектах сельскохозяйственного назначения преобладают башенные системы водоснабжения на основе водонапорных башен. Актуальной проблемой при эксплуатации водоснабжения является нарушение работы водонапорной башни в зимний период, вызванное сбоем в цикле водопотребления, застоем воды, отказом датчиков уровня, протечками, переливами [1–3]. Выход из строя датчиков уровня вследствие обледенения и некорректной работы автоматики приводит к переполнению ёмкости башни и обмерзанию её как снаружи, так и внутри, что является недопустимым, так как наросты ледяной массы снаружи влекут за собой падение конструкции, а замерзание внутреннего объёма ведёт к разрушению целостности бака. Уменьшается вплоть до нуля её полезный объём и, если толстым слоем льда покрывается поверхность воды в ёмкости, может произойти её разрыв под давлением, развиваемым нагнетающим воду насосом.

Цель исследования – разработка концептуальной модели повышения эффективности работы сельскохозяйственных гидросооружений башенного типа при отрицательных температурах окружающего воздуха, выявление принципов, лежащих в основе конструирования сооружений, мало подверженных разрушениям образовавшимся льдом.

Материал и методы исследования. Специфика экспериментальных исследований, как лабораторных, так и производственных, предполагала подтверждение функциональной реализации технических элементов внедрённой системы в аспекте обеспечения производственного цикла дискретного водопотребления. Эксперименты проводили в Александровском районе Оренбургской области в период активного диапазона температур (-30; -5)°С при интенсивном теплообмене с окружающим воздухом водонапорной башни ВБР-15У-10, агрегатированной с ветроустановкой «Аэргон». Методы экспериментальных исследований строились на основе математического описания аэрологических явлений, физического моделирования реализации радиогенной энергии, теории теплообменных процессов и положений гидроаэромеханики.

Результаты исследования. Как показывает практика, время работы водонапорной башни ограничено временем смыкания горизонтального

сечения на том или ином уровне (нет протока по вертикали) и всегда меньше времени полного промерзания воды в стволе башни.

Элементарный объём приращения льда (рис. 1) определяется соотношением:

$$dV = 2\pi(R-r)hd(R-r), \quad (1)$$

где R – радиус ствола башни, м;

$(R-r)$ – текущая толщина ледяного нароста, м;

h – высота ствола башни, м;

$d(R-r)$ – дифференциал приращения толщины ледяного нароста, м.

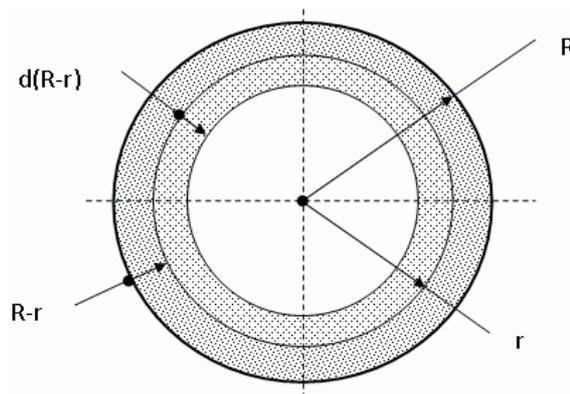


Рис. 1 – Горизонтальное сечение ствола водонапорной башни

Экспериментально величину толщины ледяного нароста и её дифференциал можно выразить, используя фактор времени:

$$(R-r) = Yt, \quad d(R-r) = Ydt, \quad (2)$$

где Y – скорость образования льда на внутренней поверхности ствола водонапорной башни, м/с.

Интегрируя левую и правую части уравнения (1), с учётом соотношений (2) получили зависимость объёма образовавшегося льда от времени:

$$\int_0^V dV = \int_0^t 2\pi h Y t Y dt \quad \text{или} \quad V = \pi h Y^2 t^2. \quad (3)$$

При интегрировании полагали, что скорость образования льда Y является величиной постоянной, присущей конкретным погодным условиям. Таким образом, время намерзания льда объёмом V будет равно:

$$t = \frac{\sqrt{V}}{Y\sqrt{\pi h}}. \quad (4)$$

Внедрение предлагаемых термоактиваторных установок позволяет довести время функциониро-

вания водонапорной башни до времени полного промерзания всего объёма, как минимум. Это обеспечивается выравниванием кривой величины нароста льда на внутренней стенке ствола башни и поставкой дополнительной геотермальной энергии и энергии от ветра.

Время работы водонапорной башни при использовании термоактиваторов для различных погодных условий (с учётом 2) увеличивается в k раз:

$$k = \frac{t'' + t'}{t''} = \frac{\sqrt{V''} + \sqrt{V'}}{\sqrt{V''}}, \quad (5)$$

где t'' – время до момента смыкания ледяной массы в горизонтальном сечении без внедрения предлагаемых устройств, с;

t' – время промерзания оставшейся на момент смыкания ледяной массы в горизонтальном сечении жидкой фазы, с;

V'' и V' – объём льда и незамёрзшей воды в стволе башни на момент смыкания горизонтального сечения соответственно, м³.

Форма поверхности льда на внутренней поверхности ствола башни носит вероятностный характер. В одних и тех же погодных при проведении экспериментальных исследований условиях было зафиксировано смыкание ледяного нароста в сечениях разных уровней. Асимметрия присутствовала как в горизонтальных, так и в вертикальных сечениях. Однако ставилась цель получить точную аналитическую зависимость формы поверхности наледи. Для дальнейшей формализации была использована наиболее вероятная функция – функция распределения Вейбулла для определения объёма жидкой и твёрдой фаз. Такой подход даёт хорошее совпадение с результатами теоретических и экспериментальных исследований по объёмам нароста льда в диапазоне проводимых исследований и значительно упрощает анализ.

Адекватность модели функционально-параметрического состояния водонапорной башни подтверждалась в диапазоне ухудшения погодных условий на примере модели ВБР-15У-10 (коэффициент теплопроводности – 0,436 Вт/(мК)): 0% – температура окружающей среды – 0°С ниже нуля, скорость ветра – 0 м/с; 25% – температура окружающей среды – 10°С ниже нуля, скорость ветра – 5 м/с; 50% – температура окружающей среды – 20°С ниже нуля, скорость ветра – 10 м/с; 75% – температура окружающей среды – 30°С ниже нуля, скорость ветра – 15 м/с; 100% – температура окружающей среды – 40°С ниже нуля, скорость ветра – 20 м/с.

Объём льда в опытах определялся вычитанием объёма воды из объёма ствола башни. Ледяную фракцию выцеживали.

На рисунках 2 и 3 представлена плоская и пространственная визуализация объёма образовавшегося льда на внутренней поверхности ствола водонапорной башни (ВБР-15У-10).

Функцию, описывающую форму поверхности льда в вертикальном осевом сечении ствола башни при смыкании горизонтального сечения и исключении вертикального тока воды, выразим как:

$$f(x) := c + \frac{m}{\sigma} \cdot 0,1x^{(m-1)} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^m}, \quad (6)$$

где $\sigma = 4,3$, $m = 2,95$, $c = -0,46$ – параметры модели при скорости ветра величиной 5 м/с и температуре окружающей среды 10°С ниже 0.

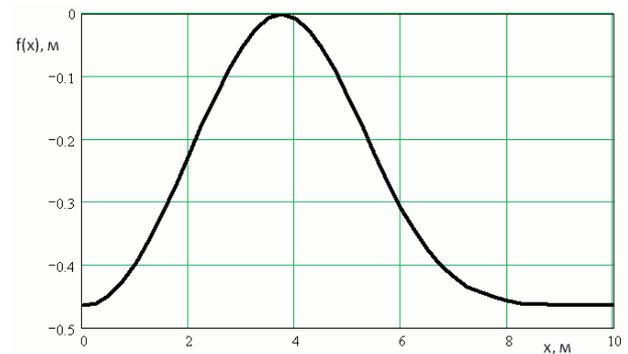


Рис. 2 – Визуализация объёма образовавшегося льда на внутренней поверхности ствола водонапорной башни (ВБР-15У-10)

Объём незамёрзшей воды в стволе башни определяли по формуле:

$$V := \pi \cdot \int_a^b f(x)^2 dx. \quad (7)$$

Анализ объёмов замёрзшей и незамёрзшей воды в разных погодных условиях (рис. 4, 5) позволил установить хорошее совпадение теоретических предположений с результатами экспериментальных исследований. Расхождение не превышает 7% (рис. 6).

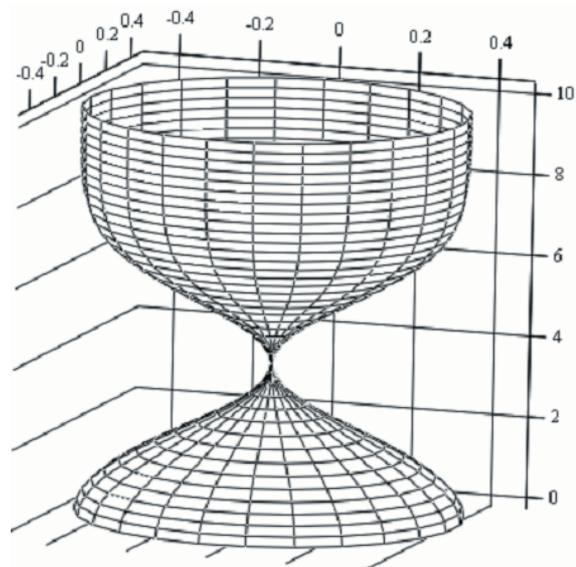


Рис. 3 – Пространственная визуализация объёма образовавшегося льда на внутренней поверхности ствола водонапорной башни (ВБР-15У-10)

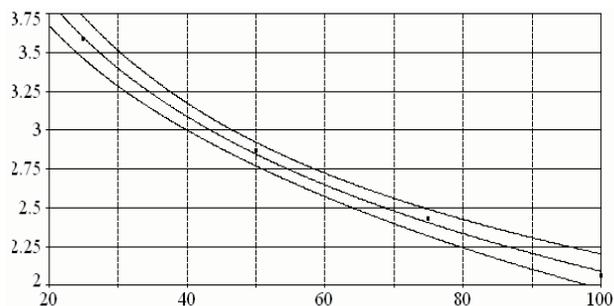


Рис. 4 – Объем незамерзшей воды в стволе водонапорной башни (ВБР-15У-10) перед смыканием горизонтального сечения в зависимости от разных погодных условий

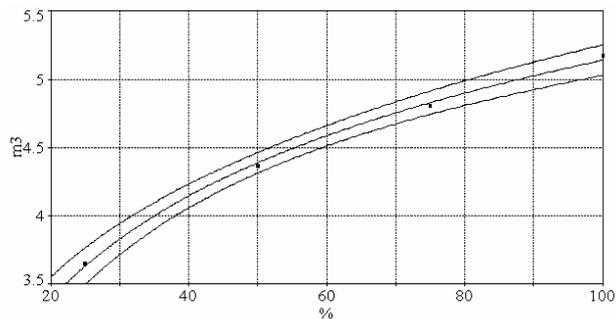


Рис. 5 – Объем льда в стволе водонапорной башни (ВБР-15У-10) при смыкании горизонтального сечения (исключении вертикального тока воды) в зависимости от погодных условий

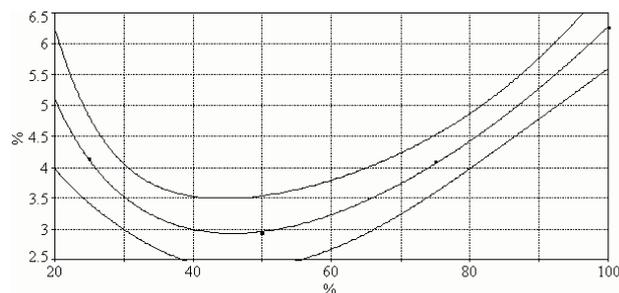


Рис. 6 – Расхождение между значениями объемов льда (момент смыкания горизонтального сечения) в стволе водонапорной башни (ВБР-15У-10), полученными теоретически и экспериментально для разных погодных условий

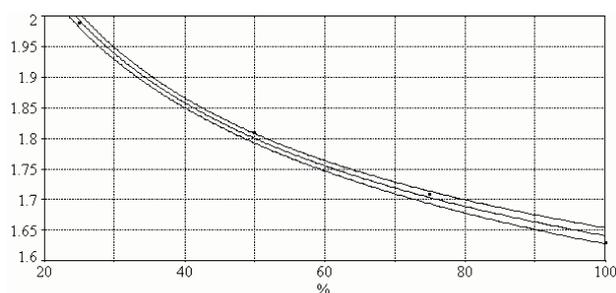


Рис. 7 – Отношение времени работы башни до смыкания льда в горизонтальном сечении при внедрении мероприятий к времени работы стандартной башни до смыкания ледяного нароста в разных погодных условиях.

Время работы водонапорной башни при внедрении предлагаемых мероприятий возрастает в 1,63–2 раза в зависимости от погодных условий (рис. 7).

Увеличение времени работы водонапорной башни (ВБР-15) в критических условиях до момента перемерзания в 1,63 и 1,99 раза показало при технико-экономическом анализе прибыль 350523,39 руб., снижение годовых эксплуатационных издержек на 62631,044 руб. и амортизационных отчислений на 53040,244 руб. с учётом срока окупаемости 0,998 года.

Вывод. Проведение расчётных процедур со значениями факторов в интервале реализации режима дискретного водопотребления показало достоверность и адекватность математической интерпретации льдообразования в стволе водонапорной башни на момент смыкания, определённый теоретически

и зафиксированный экспериментально, а техническое управление параметрами пристеночного слоя воды увеличивает время функционирования проектируемой башни в 1,63–1,99 раза для экстремальных условий её эксплуатации.

Литература

1. Асманкин Е.М., Фомин М.Б., Рязанов А.Б. Использование низкопотенциальной энергии для предотвращения льдообразования в металлических водонапорных башнях // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2015. № 6. С. 27–28.
2. Асманкин Е.М. Математическая модель, функционально-параметрического состояния водонапорной башни для условий эксплуатации при отрицательных температурах окружающего воздуха / Е.М. Асманкин, Ю.А. Ушаков, И.А. Рахимжанова, М.Б. Фомин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 3 (59). С. 72–74.
3. Асманкин Е.М. Способ повышения устойчивости водонапорной ёмкости к обледенению / Е.М. Асманкин, И.А. Рахимжанова, М.Б. Фомин, И.Н. Дементьева // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 2 (58). С. 48–49.