

Оценка интенсивности подачи воздуха в аккумуляторы льда для ускорения его таяния

Канд. техн. наук В. И. ПЕТРОВ

ООО «Хладотехника»

630501, Новосибирская обл., пос. Краснообск

Using ice accumulators in enterprises of food industry involves the necessity to provide maximum rate of ice melting. One way to speed up ice melting is to feed compressed air into water of the accumulator, e.g. from an air compressor. The present paper produces a method to calculate volumetric capacity of the air compressor that will guarantee a predetermined rate of ice melting.

Ключевые слова: ice accumulators, air compressor, acceleration of ice melting.

Ключевые слова: аккумуляторы льда, воздушный компрессор, ускорение таяния льда.

На предприятиях пищевой промышленности, где существует переменная нагрузка по холодопотреблению, активно используются аппараты (аккумуляторы) с накоплением и дальнейшим таянием льда. Для обеспечения максимальной скорости таяния нередко используется продувка (барботаж) объема воды аккумулятора воздухом от источника сжатого воздуха.

Количество подаваемого воздуха должно оцениваться исходя из желаемой интенсивности таяния льда с теплообменной поверхности труб (или плоскостей) аккумулятора. Процесс, сопровождаемый таянием льда, называется разрядкой аккумулятора. Как правило, время, затрачиваемое на данный процесс, зависит от вида графика нагрузки на технологические аппараты предприятия. Чем дольше нагрузка на технологические аппараты превышает холодопроизводительность установленной холодильной машины, тем интенсивнее должен осуществляться теплообмен с водой тающего льда.

Оценим требуемую объемную производительность источника сжатого воздуха для получения заданного времени таяния льда.

Авторами работы [1] приведена информация о существенной зависимости коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{воз}}$ от приведенной скорости барботирующего воздуха w_r и свойств жидкости. Влияние на теплообмен оказывают турбулентные пульсации, проникающие в пристеночный слой от турбулентного потока жидкости и всплывающих в ней деформируемых газовых пузырей.

Коэффициент теплоотдачи в барботажном слое для жидкостей с небольшой вязкостью и средним газосо-

держанием $\varphi_r \leq 0,1$ можно определить из следующего выражения [2]:

$$\alpha_{\text{воз}} = 0,048 \rho_{\text{ж}} C_{\text{рж}} \nu_{\text{ж}}^{1/2} g^{1/6} w_r^{1/6} L^{-1/3} \text{Pr}^{2/3}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{воз}}$ — коэффициент теплоотдачи от поверхности льда в аккумуляторе к воде при барботаже воздуха, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$C_{\text{рж}}$ — теплоемкость воды, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

$\nu_{\text{ж}}$ — коэффициент кинематической вязкости воды, $\text{м}^2/\text{с}$;

g — ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$;

L — характерный размер, м ;

Pr — число Прандтля для воды.

Приведенная скорость барботирующего воздуха w_r определяется как

$$w_r = u_r \varphi_r,$$

где u_r — скорость поднимающихся пузырьков воздуха в аккумуляторе, м ;

φ_r — газосодержание,

$$\varphi_r = \frac{V_r}{V_{\text{ж+г}}}.$$

Здесь V_r , $V_{\text{ж+г}}$ — объем воздуха и объем смеси вода—воздух в объеме аккумулятора.

Для расчета скорости подъема пузырей воздуха u_r можно воспользоваться уравнением [3]

$$u_r = 1,5 \left(\sigma g \frac{\delta \rho}{\rho_{\text{ж}}^2} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;
 $\rho_{\text{ж}}$ — плотность воды, м³/кг;

$$\delta\rho = \rho_{\text{ж}} - \rho_r.$$

Здесь ρ_r — плотность воздуха в пузыре.

Расчеты коэффициентов теплоотдачи, выполненные по формуле (1), в зависимости от величин газосодержания φ_r приведены в табл. 1. Расчеты производились для температуры воды $T = 5^\circ\text{C}$.

Таблица 1

$\varphi_r \cdot 10^6$	$\alpha_{\text{воз}}$, Вт/(м ² ·К)
1000	855
100	582
50	519
8	380
5	353

Для оценки интенсивности подачи воздуха в аккумулятор следует сопоставить расчетное время таяния льда τ с желаемыми значениями. Для определения времени таяния льда в зависимости от величины коэффициента теплоотдачи α от воды ко льду рассмотрим уравнение теплового баланса для слоя льда толщиной L_l , намороженного на теплообменную поверхность трубы,

$$\rho r \frac{\partial L_l}{\partial \tau} = \alpha(T_b - T_l), \quad (3)$$

где ρ, r — плотность и теплота плавления льда;

T_b , T_l — температуры воды в объеме аккумулятора и льда на поверхности контакта с водой соответственно, °С ($T_l = 0^\circ\text{C}$).

Интегрируя уравнение, получим зависимость времени таяния льда толщиной L_l от величины коэффициента теплоотдачи α

$$\tau = \rho r \frac{L_l}{\alpha T_b}. \quad (4)$$

В табл. 2 приведены значения времени таяния льда, рассчитанные по зависимости (4), и требуемые для этого коэффициенты теплоотдачи.

Таблица 2

$\tau, \text{ч}$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
3	557
9	186
12	139

Оценим время разрядки трубчатого аккумулятора с базовыми размерами $6 \times 2 \times 2$ м (с запасом «холода» накопленного льда 680 кВт·ч) при перемещении потока воды через аккумулятор насосом. Для данного аккумулятора требуемая объемная производительность технологического насоса составляет $\sim 50 \text{ м}^3/\text{ч}$. В трубчатом аккумуляторе принимаем диаметр трубы 15 мм, длину 40 мм, шаг труб змеевика 120 мм (поток воды проходит вдоль длинной стороны бака поперек змеевика) и количество труб по высоте в одном змеевике 16 шт. Средняя скорость потока воды в баке соответствует ламинарному режиму движения ($Re = 193$). Расчет коэффициента теплоотдачи проводим по формуле [4]

$$N_u = 0,5 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,38}. \quad (5)$$

Расчет дает значение α , равное 177 Вт/(м²·К), при характерном размере среднего диаметра трубы со льдом: $(d_t + 2L_n)/2$. По данным табл. 2, этому значению α будет соответствовать время ставания льда, превышающее 9 ч. Для реальных режимов нагрузок на предприятиях с аккумуляторами льда такое время неприемлемо. Таким образом, для более быстрого таяния льда потребуется дополнительная интенсификация теплообмена, в частности способом барботажа воздуха в объем воды. Оценим связь между требуемой для этого производительности по воздуху и временем таяния льда (примем желаемое время таяния, равное 3 ч). Согласно табл. 2 и значению α , вычисленному по формуле (5), потребуется дополнительная интенсификация воздухом с коэффициентом $\alpha_{\text{воз}}$, равным 380 Вт/(м²·К).

Примем количество отверстий в воздушном коллекторе для барботажа в объем воды, выбранный выше аккумулятора, $N_{\text{отв}} = 65$ шт. Шаг между отверстиями по длине воздушного коллектора составляет 0,15 м, количество коллекторов — 2 шт., диаметр отверстия — $d_o = 0,001$ м. Рассчитаем производительность воздушного компрессора

$$V_{\text{ком}} = N_{\text{отв}} V_{\text{пуз}} nm^{1/k}, \quad (6)$$

где $V_{\text{пуз}}$ — объем пузыря, м³;

n — частота отрыва пузырей, с⁻¹, $n = u_r/s$ (здесь s — расстояние между соседними пузырями, рассчитываемое с учетом φ_r , м);

m — степень сжатия компрессора, примем $m = 4$;

k — показатель адиабаты воздуха, $k = 1,4$.

Объем пузыря рассчитаем по формуле [3]

$$V_{\text{пуз}} = \frac{2\pi d_o \sigma}{3g\delta\rho}, \quad (7)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м.

Из табл. 1 для $\alpha_{\text{воз}} = 380 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и формул (6) и (7) производительность компрессора равна

$$V_{\text{ком}} = 7,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с},$$

или

$$V_{\text{ком}} = 2,7 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Список литературы

1. Соколов В. Н., Доманский И. В. Газожидкостные реакторы. — Л.: Машиностроение, 1976.

2. Гаврилов А. С., Лаптев А. Г. Математическое моделирование теплоотдачи от газожидкостной смеси к стенке аппарата. В кн.: Передовые технологии и пути развития ОАО Казаньоргсинтез / Междунар. юбилейная научно-практ. конф. — Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2008.

3. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. — Новосибирск: Наука, 1984.

4. Жукаускас А., Макарчявицус В., Шланчаускас А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости. — Вильнюс: Минтис, 1972.