

УДК 697.972

А.С. Штым, Е.В. Тарасова, А.С. Кузьменко

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СНЕГА В АККУМУЛЯТОРАХ ЕСТЕСТВЕННОГО ХОЛОДА СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

В связи с тенденцией к увеличению стоимости энергоресурсов и ужесточением требований к охране окружающей среды рассмотрены экологически чистые и энергосберегающие методы кондиционирования воздуха помещений различного назначения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: системы охлаждения помещений, снег, лед, аккумулятор холода, удельная теплота плавления, возобновляемый источник холода.

Some important problems include energy savings, because now there is a tendency to increase their value, tighten the requirements for environmental protection, so you need non-polluting and energy-saving methods of air conditioning methods for the premises of different functionality.

К е y w o r d s: system cooling, snow, ice, the accumulator is cold, specific heat of fusion, renewable source of cold.

В нашей стране в свое время были разработаны, освоены и широко использовались приемы рационального использования энергии холода, но особенно широкое применение имело «безмашинное» охлаждение с помощью естественного или искусственного водного, а также сухого льда (твердой углекислоты).

Затем, по мере развития холодильной техники в условиях низких цен на энергоносители эти технологии практически были забыты. Достоинствами «безмашинного» охлаждения для получения низких температур при небольшой холодопроизводительности являлись: простота, доступность, малые первоначальные затраты, малый расход металла и других конструкционных материалов и, главное, возможность охлаждения без потребления энергии.

Аккумуляция холода в системах холодоснабжения зданий с использованием возобновляемых источников холода: снега или льда — является одним из способов уменьшения потребления энергии и экономически выгодным инженерным решением, которое в настоящее время широко применяется в Японии на острове Хоккайдо, имеющем снежную зиму и жаркое лето. Схема использования льда и снега достаточно простая: лед замораживается естественным образом, снег собирается с прилегающих территорий и сохраняется в холодохранилище до теплого периода года, далее используется для охлаждения воздуха внутри помещений. Для разработки эффективных холодохранилищ и методики их расчета требуется изучение теплофизических процессов, протекающих в таких установках, и изменения физических свойств снега в процессе его хранения.

Сухой снег представляет собой двухфазную, а мокрый — трехфазную системы, состоящие из кристаллов льда, воды и воздуха, содержащего водяной пар [2].

Установлено, что все физические характеристики снега зависят от его плотности и пористости. Плотность снега изменяется от 10 до 700 кг/м³ и весьма неоднородна по высоте снежного объема. Одной из первых формул

для определения плотности в зависимости от толщины снежного покрова, построенной на обобщении эмпирических данных, является формула Абэ, полученная в начале прошлого столетия [1]:

$$\rho = a \cdot 10^{bz}, \quad (1)$$

где $a = 185,4$; $b = 0,545$; z — глубина от поверхности снега, м.

На практике формулу (1) используют в следующем виде:

$$\lg \rho = \lg 185,4 + 0,545z. \quad (2)$$

Плотность снега, определенная по зависимости (2), составляет 900 кг/м^3 при глубине снежного покрова 1,3 м, что близко к значению плотности льда (рис. 1). Следовательно, эта формула справедлива до глубины снежного покрова 1,1 м. При условии загрузки снега в снегохранилище и при его достаточно тщательной утрамбовке плотность оказалась в пределах $300 \dots 450 \text{ кг/м}^3$.

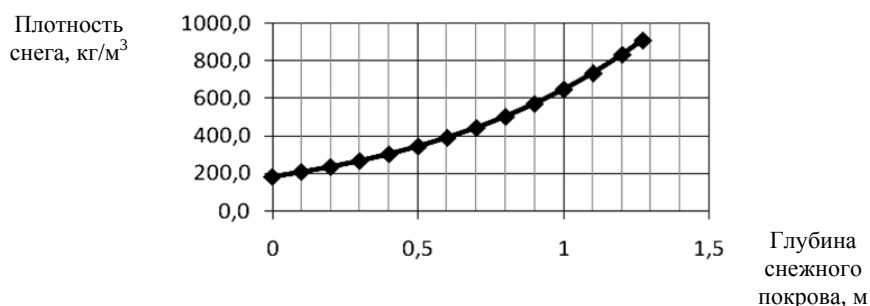


Рис. 1. Зависимость плотности снега от глубины снежного покрова при отсутствии влаги в порах

Пористость снежного покрова, связана с его структурой и изменяется от 98 до 20 % по мере уплотнения снега. В естественных условиях к началу снеготаяния (обычно при плотности $280 \dots 300 \text{ кг/м}^3$) она составляет 73...65 %; в условиях снегохранилища при плотности $300 \dots 450 \text{ кг/м}^3$ — 65...58 %.

Плотность снега зависит от его влажности [1]. Наличие влаги (воды) существенно увеличивает плотность снега (рис. 2).

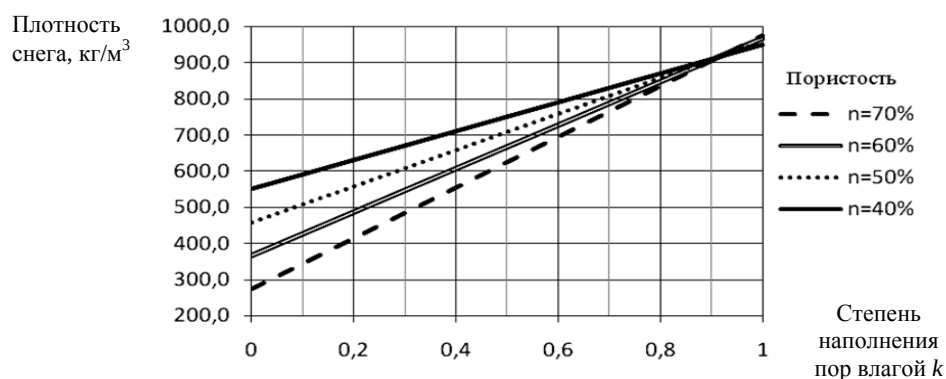


Рис. 2. Зависимость плотности снега от его пористости и влажности

Важной характеристикой является водопроницаемость снега для гравитационной воды, поступающей от таяния верхнего слоя, которая зависит от структуры снежного объема. Движение гравитационной воды в снежном объеме ламинарное, и предполагается, что оно подчиняется закону Дарси:

$$\vec{u} = K \vec{I}, \quad (3)$$

где $\vec{u}$ — скорость фильтрации; K — коэффициент фильтрации; $\vec{I}$ — градиент напора.

В состоянии равновесия величина дополнительного капиллярного давления Δp связана со средней кривизной r поверхности уравнением Лапласа [3]:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} = (\rho_1 - \rho_2)gh, \quad (4)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; r — радиус сферического мениска, значение которого принимается положительным, если мениск выпуклый; ρ_1 и ρ_2 — плотность жидкости и газа (контактирующего с жидкостью) соответственно; g — ускорение свободного падения; h — высота капиллярного поднятия жидкости.

Водопроницаемость определяется коэффициентом фильтрации, который различен по горизонтали и по вертикали снежного объема. Полученные опытным путем значения коэффициента фильтрации снега, $(1...6)10^{-3}$ м/с, являются ориентировочными [1].

Удельная теплоемкость сухого снега принимается равной удельной теплоемкости льда и определяется по зависимости Б.П. Вейнберга [1]:

$$c = 2,12(1 + 0,037t). \quad (5)$$

Физические свойства в объеме снега, упакованного в снеохранилище, изменяются от момента его закладки до момента использования в теплый период года. Происходит процесс теплообмена с окружающей средой даже при тщательной теплоизоляции. Снег закладывается в снеохранилище в зимние месяцы. Пик нагрузки на системы кондиционирования в условиях г. Владивостока приходится на июль — август. Более трех месяцев снеохранилище находится в области положительных температур, следовательно, температура в объеме снега изменяется. Натурные испытания показали, что к моменту включения системы кондиционирования, температура снега изменяется от -4°C в центре снежного объема до 0°C к стенам контейнера. Снег в объеме снеохранилища является не однородной массой, в нем имеется воздух, количество которого определяется пористостью снега и вода, которая начинает образовываться при нулевой температуре у внутренних стен контейнера. По мере таяния снега поры начинают заполняться водой, что приводит к изменению теплоемкости. Средняя пористость снега в снеохранилище на момент засыпки и утрамбовки составляет 65... 58 %, далее она постепенно уменьшается, доходя до 15...20 % в конце таяния снега.

Изменение теплоемкости снежно-водяной массы от степени наполнения пор влагой при различной пористости (10...70 %) определялась по зависимости:

$$C_{\text{см}} = \frac{(m_{\text{снега}}c_{\text{снега}} + m_{\text{воды}}c_{\text{воды}} + m_{\text{возд}}c_{\text{возд}})}{m_{\text{снега}} + m_{\text{воды}} + m_{\text{возд}}}, \quad (6)$$

где $m_{\text{снега}}$, $c_{\text{снега}}$ — масса и теплоемкость снега; $m_{\text{воды}}$, $c_{\text{воды}}$ — масса и теплоемкость воды; $m_{\text{возд}}$, $c_{\text{возд}}$ — масса и теплоемкость воздуха, содержащегося в порах.

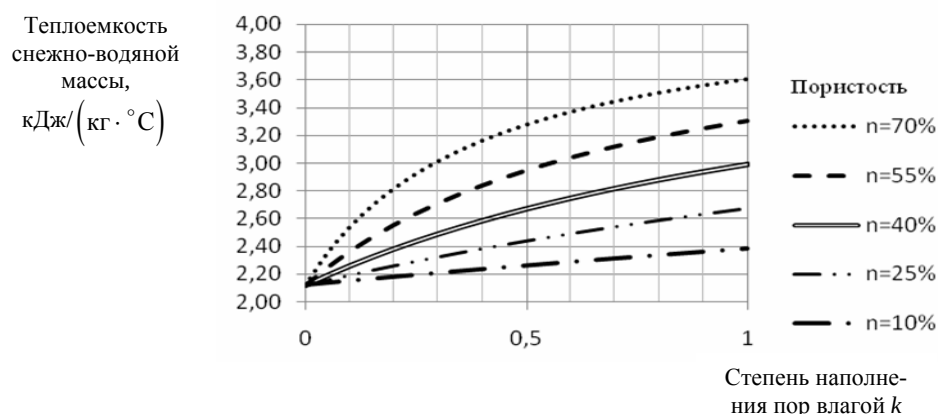


Рис. 3. Зависимость теплоемкости от пористости и влажности снежно-водяной массы

Для данных, определенных опытным путем (пористость, степень наполнения влагой), с помощью диаграммы (рис. 3) можно найти значения теплоемкости снежно-водяной смеси. Теплоемкость снежно-водяной массы в снегохранилище изменяется от 2,2 в начале хранения снега до 2,6 кДж/(кг·°С) в конце таяния снега при отводе талой воды.

Для разработки физической модели и исследования процессов, происходящих с источником холода в установках холодоснабжения для поддержания микроклимата в помещении, была создана экспериментальная научно-исследовательская установка (рис 4).

В стеклянный теплоизолированный контейнер 1 загружается источник холода — снег. Вентилятор 6 забирает воздух из помещения через воздуховод 5 и подает его в контейнер по воздуховоду 3. Далее воздух проходит через пространство внутри контейнера, заполненное снегом и выходит через воздуховод 4 в охлаждаемое помещение. Сверху контейнер герметично закрыт крышкой 2.

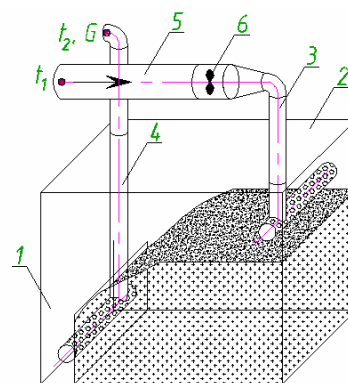


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Снег в контейнер загружали и плотно утрамбовывали. Производили измерение расхода воздуха, G , и его температуры на входе в установку t_1 , и на выходе в нее — t_2 . Температура воздуха в помещении в процессе экспери-

мента была равной $+29\text{ }^{\circ}\text{C}$ и изменялась незначительно. Произведены замеры температур в массиве снега, тепловизионное обследование, выполнены фотографии в инфракрасном диапазоне (рис. 5). Минимальная температура снежной массы $-0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальная температура на поверхности теплоизолированной крышки контейнера $+24,41\text{ }^{\circ}\text{C}$. В конце эксперимента объем снега уменьшился более чем на половину, а снежная масса приобрела сероватый оттенок из-за наполнившей ее влаги, практически весь снег перешел в жидкую фазу с незначительными остатками снега, плавающего в объеме воды, ближе к поверхности. Минимальная температура талой воды $+1,48\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальная температура на поверхности теплоизолированной крышки контейнера $+27,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 6).

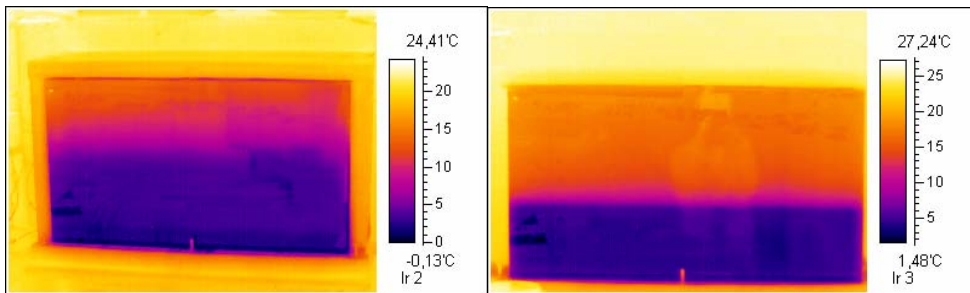


Рис. 5. Изменение температуры в срезе снежного объема (начало эксперимента, фото в инфракрасном диапазоне)

Рис. 6. Изменение температуры в срезе снежного объема (завершение эксперимента, фото в инфракрасном диапазоне)

Плотность снежной массы увеличилась от 350 кг/м^3 до 780 кг/м^3 (рис. 7). Степень наполнения влагой изменялась постепенно от 0 до 1 (рис. 8).

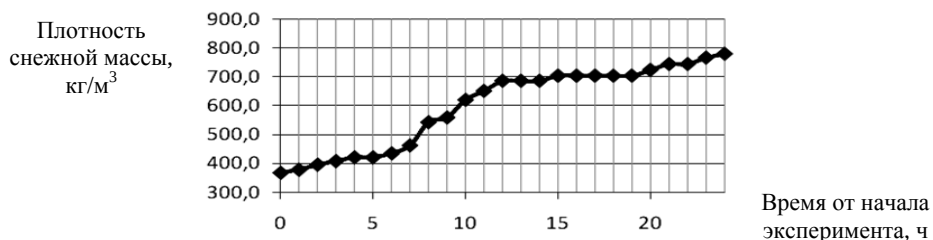


Рис. 7. Изменение плотности снежной массы в процессе эксперимента

Теплоемкость снежно-водяной смеси увеличилась от $2\text{ кДж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$ в начале эксперимента до $4,1$ — в конце, и приблизилась к теплоемкости воды за счет уменьшения количества снега в талой воде (рис. 9).

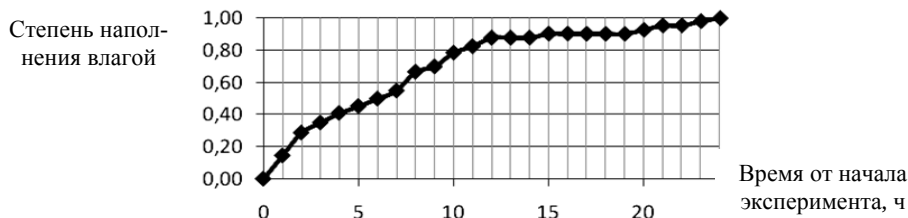


Рис. 8. Изменение степени наполнения влагой снежной массы в процессе эксперимента

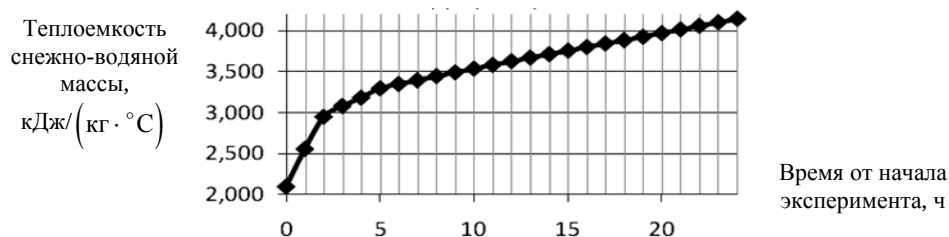


Рис. 9. Изменение теплоемкости снежно-водяной смеси в процессе эксперимента

Таким образом, в первые несколько часов эксперимента процесс таяния льда был достаточно интенсивным, далее скорость таяния замедлилась и в какой-то момент практически перестала изменяться. В процессе таяния температура снежной массы близка к нулю и постоянна, поэтому основной теплофизической характеристикой, влияющей на охлаждающую способность снежной массы, является удельная теплота плавления.

Полученные результаты будут использованы при разработке методики расчета снегохранилищ и систем охлаждения помещений при использовании естественных источников холода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов Д.В. Основы гидрофизики. М. : МГУП, 2004. 246 с.
2. Блох А.М. Структура воды и геологические процессы. М. : Недра, 1969. 216 с.
3. Богословский С.В. Физические свойства газов и жидкостей. СПб : СПбГУАП, 2001. 73 с.

1. Kozlov D.V. Osnovy gidrophiziki. M. : MGUP, 2004. 246 s.
2. Blokh A.M. Struktura vody i geologicheskiye protsessy. M. : Nedra, 1969. 216 s.
3. Bogoslovskiy S.V. Fizicheskiye svoystva gazov i zhidkostey. SPb : SPbGUAP, 2001. 73 s.

© Штым А.С., Тарасова Е.В., Кузьменко А.С., 2011

Поступила в редакцию
в марте 2011 г.

Ссылка при цитировании:

Штым А.С., Тарасова Е.В., Кузьменко А.С. Изменение физических свойств снега в аккумуляторах естественного холода систем кондиционирования воздуха // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2011. Вып. 2 (16). Режим доступа: www.vestnik.vgasu.ru.