

## Приборы и оборудование

УДК 536.42

**Кушнерук В.И.**, канд. техн. наук, **Браверман В.Я.**, канд. техн. наук,  
**Букраба М.А.**, канд. техн. наук, **Челидзе Д.И.**  
**ГП «Научно исследовательский институт «Шторм», Одесса**  
ул. Терешковой, 27, 65078 Одесса, Украина, e-mail: shtorm\_soj@ukr.net

### Теплофизическое конструирование теплоаккумулятора на основе парафина

Проведено аналитическое и расчетное конструирование теплоаккумулирующей ячейки из парафина, способной отдавать теплоту в течение 8–9 ч, накопленную за время ночного тарифа. Обоснован выбор цилиндрической формы теплоаккумулирующей ячейки, корпус которой выполнен из тонкостенного металла. Ячейка заполняется теплоаккумулирующим веществом, парафином, на 70 % объема и закрывается крышкой. На основании расчетов по методикам нестационарной теплопроводности определены диаметр и высота ячейки из парафина цилиндрической формы, которые выбираются равными и составляют 130–135 мм для времени ночного тарифа. Результаты конструирования подтверждены экспериментально и могут быть использованы для разработки парафиновых теплоаккумуляторов в системах отопления на основе тепловых насосов для помещений, работающих в режиме офиса. *Библ. 5, рис. 2.*

**Ключевые слова:** теплоаккумулятор, парафин, ночной тариф, тепловой насос, ячейка.

Высокая стоимость углеводородов и повышенные экологические требования к окружающей среде определяют необходимость детального изучения и использования возобновляемых источников энергии. В настоящее время получили широкое развитие такие направления, как солнечная энергетика, ветрогидроэнергетика, геотермальная энергетика и др.

Значительную сложность для эффективного применения тепловой энергии, полученной от возобновляемых источников, представляет проблема аккумуляции этой теплоты с последующим ее использованием. Перспективным представляется решение задачи круглогодичного поддержания заданной температуры помещения, работающего в офисном режиме, посредством теплового насоса с использованием аккумуляции теплоты.

Круглосуточное энергосберегающее поддержание заданной температуры офисных помеще-

ний в течение всего года: подогрев воздуха при пониженных температурах окружающей среды и охлаждение воздуха при повышенных температурах окружающей среды — может быть достигнуто в результате применения теплового насоса с высоким коэффициентом полезного действия COP (COP — отношение мощности обогрева к потребляемой мощности).

Важной положительной особенностью теплового насоса является то, что он может преобразовывать низкопотенциальную тепловую энергию в энергию более высокого потенциала круглосуточно, независимо от наличия солнечного излучения. В связи с этим целесообразным является наличие эффективного теплоаккумулятора, позволяющего в течение рабочего дня использовать тепловую энергию, аккумулированную за время ночного тарифа.

Анализ литературы [1–4] показывает, что для решения задачи аккумуляции теплоты

за время ночного тарифа с 23.00 до 7.00 ч и эффективного использования этой тепловой энергии во время работы офиса с 8.00 до 17.00 ч единственно подходящим является применение теплоизолированного бака-аккумулятора теплоты, заполненного водой, с твердым наполнителем, плавящемся в рабочем диапазоне температур теплового насоса. Полное количество запасенной теплоты баком-аккумулятором будет определяться всей массой теплоаккумулирующего вещества, которую необходимо разделить на ряд несмешивающихся теплоаккумулирующих объемов — ячеек, каждая из которых омывается теплоносителем. В качестве таких ячеек целесообразно применить теплоаккумуляторы на основе парафина [1, 4]. В литературе отсутствуют четкие рекомендации по теплофизическому проектированию парафиновых аккумуляторов.

Для применения парафиновых аккумуляторов теплоты необходимо определить основные параметры, которые определяют эффективность их работы. Из [5] известно, что время нагревания, следовательно, и плавления данного вещества определяется не только условиями обогрева, но и формой и размерами тела. Поскольку условия обогрева каждого объема парафина в баке-аккумуляторе практически одинаковые, то идеальной формой будет шар, который имеет минимальную поверхность контакта с обогревающей его водой, следовательно, и минимальную массу для расплавления за данное время. Минимальная поверхность теплоаккумулирующей ячейки обеспечивает максимальное время ее расплавления и затвердевания, а минимальная масса удешевляет теплоаккумулятор.

Для практической реализации изготовить теплоаккумулирующие ячейки в виде сфер с последующим заполнением их парафином достаточно сложно, поэтому решено исследовать ячейки в виде цилиндров, у которых высота равна диаметру, то есть исследовать объемы, максимально приближенные по форме к шару. В этом варианте исполнения ячейки практически все точки поверхности одинаково удалены от центра цилиндра, то есть процессы плавления и затвердевания парафина будут происходить равномерно от поверхности к центру. Некоторым погружением еще не расплавившейся части парафина в процессе плавления ввиду разности плотностей твердой и жидкой фаз в расчетах, представленных ниже, пренебрегаем.

Емкости с парафином выполняют функцию аккумуляторов теплоты только в режиме отопления, когда парафин может расплавиться с последующим затвердеванием. Именно при затвердевании, которое должно происходить в течение времени нахождения в офисах работни-

ков (8.00–17.00 ч), происходит выделение аккумулированной теплоты. Из приведенного выше следует, что всю массу парафина надо разделить на несмешиваемые объемы такой массы, чтобы время плавления этих объемов парафина составляло 8–9 ч.

Определение высоты, а соответственно, и диаметра цилиндрического объема, в который предполагается заключать теплоаккумулирующий материал — парафин, проведем по зависимостям для нестационарной теплопроводности [5]. В общем случае нестационарные процессы нагрева и охлаждения для одного и того же тела имеют небольшой гистерезис, которым в данной задаче можно пренебречь.

Температура на середине оси цилиндра, помещенного в горячую среду, зависит от интенсивности его нагрева и теплофизических свойств, а именно: теплопроводности, теплоемкости и плотности, радиуса и времени нахождения в этой среде.

Для безразмерной температуры на середине оси цилиндра  $\Theta = t_0/t_{\text{п}}$  имеется аналитическое решение [5], которое устанавливает связь с числами подобия Био  $Bi = \alpha r_0/\lambda$  и Фурье  $Fo = \alpha \tau/r_0^2$ :

$$\Theta = f(Bi, Fo).$$

Здесь  $t_0$  — температура на оси цилиндра, °C;  $t_{\text{п}}$  — температура на поверхности цилиндра, °C;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·K);  $r_0$  — радиус цилиндра, м;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности парафина, Вт/(м·K);  $a$  — коэффициент температуропроводности парафина,  $a = \lambda/\rho c_p$  (здесь  $\rho$  — плотность парафина, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  — изобарная теплоемкость парафина, Дж/(кг·K));  $\tau$  — время процесса, с.

Передача теплоты от горячей воды к металлическому цилиндру, в котором находится парафин, происходит естественной конвекцией в большом объеме. Расчетная формула для средних коэффициентов теплоотдачи при свободном ламинарном течении вдоль вертикальной поверхности высотой  $l$  имеет вид [5]:

$$Nu_{\text{ж}l} = 0,75 (Gr_{\text{ж}l} Pr_{\text{ж}})^{0,25} (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25},$$

где  $Nu_l$  — число Нуссельта,  $Nu_{\text{ж}l} = \alpha l/\lambda$ ;  $Gr_{\text{ж}l}$  — число Грасгофа,  $Gr_{\text{ж}l} = g \beta l^3 (t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})/\nu^2$ ;  $Pr$  — число Прандтля,  $Pr = \nu/a$ ;  $l$  — высота цилиндра,  $l = d = 2r_0$ ;  $d$  — диаметр цилиндра.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что температура в геометрическом центре цилиндра зависит от диаметра цилиндра и коэффициента теплоотдачи жидкости, омывающей стенку цилиндра, в котором находится плавящийся парафин. Коэффициент теплоотдачи зависит от диаметра цилиндра.

Расчет диаметра цилиндра для данного сорта парафина при времени плавления  $\tau = 8$  ч проводился методом последовательных приближений, где переменной являлся диаметр. Температура жидкости  $t_{ж}$  принималась равной  $55$  °С, температура стенки  $t_{ст}$  —  $40$  °С, что подтверждалось последующими экспериментальными измерениями. По расчетам, величина диаметра цилиндра для этих условий составила  $134$  мм.

Результаты расчетов проверялись экспериментально. Для этого испытывались три цилиндрические емкости разных объемов, у которых диаметр равнялся высоте и составлял  $120$ ,  $130$  и  $140$  мм. Каждая из этих емкостей помещалась в резервуар с водой. Температура воды  $t_2$  поддерживалась в диапазоне  $(55 \pm 2)$  °С в течение всех опытов, а сам резервуар находился в термостатирующей камере, в которой поддерживалась температура  $t_k = (55-60)$  °С. В опытах через каждые  $15$  мин проводились измерения температур воды в резервуаре и парафина  $t_1$  на середине высоты центральной оси. Измерения проводились тарированными термомпарами, погрешность которых была не выше  $0,3$  °С. Содержимое емкости с размерами  $120$  мм полностью расплавлялось за  $6$  ч, поэтому более детально исследовались ячейки с размерами  $130$  и  $140$  мм. Схема измерений по экспериментальному изучению условий плавления парафина показана на рис.1.

Результаты экспериментальных зависимостей времени расплавления цилиндрических объемов разных геометрических размеров показаны на рис.2. Видно, что цилиндрический объем с диаметром  $130$  мм полностью расплавляется за  $7,5$  ч нахождения в воде при температуре  $(55 \pm 2)$  °С, а цилиндрический объем с диаметром  $140$  мм расплавляется за  $8,5$  ч. При этом в цилиндрическом объеме с диаметром  $140$  мм термомпара, установленная в геометрическом центре, показывала расплавление объема, по-

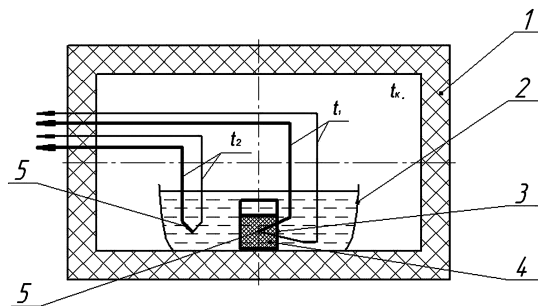


Рис.1. Схема измерений по экспериментальному изучению условий плавления парафина: 1 — термостатирующая камера; 2 — резервуар с теплой водой; 3 — емкость с парафином (ячейка); 4 — парафин; 5 — термомпара;  $t_1$  — температура в геометрическом центре ячейки;  $t_2$  — температура воды в резервуаре;  $t_k$  — температура воздуха в камере.

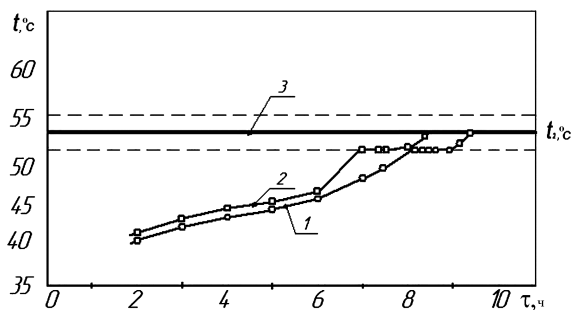


Рис.2. Зависимости времени расплавления цилиндрических объемов парафина: 1 — цилиндрический объем с  $D = H = 140$  мм; 2 — цилиндрический объем с  $D = H = 130$  мм; 3 — температура воды в резервуаре; пунктир — отклонение температуры  $t_2$ .

скольку находилась уже в жидкой фазе парафина, а на дне цилиндрического объема еще оставался нерасплавленный шаровидный объем твердого парафина диаметром примерно  $50$  мм. При нагревании парафина наблюдалось увеличение его объема до  $25\%$ , что необходимо учитывать при проектировании емкостей для парафиновых аккумуляторов.

По результатам расчетов и экспериментальных исследований проведено теплотехническое конструирование системы поддержания комфортной температуры помещений на основе теплого насоса с баком-аккумулятором теплоты.

Для круглогодичного энергосберегающего поддержания заданной температуры офисных помещений используется тепловой насос фирмы «Daikin», наружный блок теплового насоса ERLQ006CV3, внутренний блок (гидромодуль) теплового насоса ENBX08CB3V. При работе теплового насоса на обогрев температура воды на выходе из насоса может составлять до  $55-57$  °С, а при работе на охлаждение  $5-7$  °С. Тепловой насос соединен системой трубопроводов с баком-аккумулятором, внутри которого имеются змеевиковые теплообменники, через которые обеспечивается передача теплоты к потребителю.

Бак-аккумулятор выполнен в форме цилиндра диаметром  $1,20$  м и высотой  $1,80$  м, сверху закрывается крышкой. Бак теплоизолирован клеющимся алюфомом, толщина которого  $8$  мм. Полный объем бака  $2,0$  м<sup>3</sup>, рабочий —  $1,9$  м<sup>3</sup>. Такой объем бака позволит аккумулировать за время ночного тарифа с учетом тепловых потерь теплоту, необходимую для отопления четырех офисных помещений общей площадью не менее  $100$  м<sup>2</sup> в течение всего отопительного периода.

Внутри бака-аккумулятора установлена металлическая этажерка, полностью проточная для воды, на полках которой установлены емкости с парафином, которые выполняют функцию аккумуляторов теплоты. В бак-аккумулятор может

быть установлено до 500 кг парафина. Температура плавления парафина должна быть ниже рабочей температуры воды при работе теплового насоса на отопление. Для исследований был применен парафин нефтяной твердый марки П-2, температура плавления которого, в соответствии с сертификатом качества, — 52,6 °С.

Парафиновые аккумуляторы представляют собой тонкостенные (толщина стенки 0,3 мм) жестяные емкости высотой 170 мм и диаметром 150 мм с закрывающейся крышкой. В предварительно расплавленном состоянии высота парафина в емкости 128–130 мм, что по массе парафина составляет 2,0 кг.

Алгоритм работы теплового насоса на отопление следующий.

Отопительный период начинается в 23.00 с наступлением ночного тарифа. В общем случае к 23.00 вода в баке по температуре близка к 50–55 °С, поскольку до 17.00 происходил процесс отопления помещений. Включается тепловой насос, его тепловая энергия расходуется на догрев воды в баке-аккумуляторе и плавление парафина. С увеличением доли парафина в баке увеличивается количество теплоты, которое можно аккумулировать, по сравнению с баком, заполненным только водой.

Так, при загрузке парафина в количестве 160 кг в бак-аккумулятор, в который залито 1600 кг воды, теоретически можно аккумулировать 91200 кДж теплоты или 25,4 кВт·ч электроэнергии. Для бака-аккумулятора, в который залито 1760 кг воды, при прогреве ее от 50 до 60 °С теоретически можно аккумулировать 73920 кДж теплоты или 20,5 кВт·ч электроэнергии, то есть аккумулирующая способность бака увеличится на 23 %. При загрузке в бак 500 кг парафина аккумулирующая способность бака увеличится на 73 %.

В течение ночного тарифа вода должна иметь температуру  $(55 \pm 2)$  °С, а парафин в емкостях должен полностью расплавиться, то есть температура в придонной части на центральной оси каждой емкости с парафином ко времени окончания ночного тарифа 7.00 ч должна быть не менее чем на 2 °С ниже температуры плавления данного сорта парафина.

### Выводы

Для отопления помещений экономически выгодно применять тепловые насосы с парафиновыми аккумуляторами теплоты, которые аккумулируют тепловую энергию за время ночного тарифа, а отдают ее в течение рабочего времени.

Оптимальной формой ячейки парафинового аккумулятора является цилиндр, у которого

высота заполнения расплавленным парафином равна его диаметру и составляет 130–135 мм. Цилиндр выполняется из тонкостенной стали, закрывается крышкой и имеет общую высоту не менее 170 мм.

Температура в геометрическом центре ячейки аккумулятора теплоты, выполненного в виде цилиндра и помещенного в горячую среду, зависит от интенсивности его нагрева, теплофизических свойств, а именно: теплопроводности, теплоемкости и плотности, радиуса и времени нахождения в этой среде.

Результаты расчетов и экспериментальных исследований позволили установить, что парафин, находящийся в тонкостенной металлической ячейке цилиндрической формы, у которой высота и диаметр находятся в диапазоне 130–135 мм, расположенной в воде, температура которой на 2–4 °С выше его температуры плавления, полностью расплавится за 8,5 ч.

Количество аккумулированного тепла определяется общей массой парафина в баке. Так, если масса парафина в баке-аккумуляторе достигает 30 % общей вместимости бака, то аккумулирующая способность бака с парафином увеличивается до 75 % по сравнению с баком, заполненным только водой. Замена части воды парафином приводит к существенному снижению рабочего объема бака-аккумулятора.

Полученные экспериментальные и расчетные результаты использованы при теплофизическом конструировании баков-аккумуляторов и позволили сформулировать алгоритм работы системы отопления на основе теплового насоса с баком-аккумулятором теплоты.

### Список литературы

1. Зайцев О.М., Петренко В.О., Петренко А.О. Снижение затрат энергетических ресурсов системы жизнеобеспечения за счет использования природных аккумуляторов тепла // Строительство и техногенная безопасность. — 2012. — Вып. 41. — С. 91–103.
2. Повышение эффективности систем обеспечения микроклимата промышленных зданий : Сб. науч. тр. / ЦНИИпромзданий. Ред. кол. С.Н. Булгаков и др. — М., 1991. — 113 с.
3. Левенберг В.Д., Ткач М.Р., Гольстром В.А. Аккумулирование тепла. — Киев : Техника, 1991. — С. 49–74.
4. Sharma A., Tyagi V., Chen C. et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2008. — Vol. 497. — P. 1–28.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. — М. : Энергоиздат, 1981. — 416 с.

Поступила в редакцию 29.07.16



**Кушнерук В.І.,** канд. техн. наук, **Браверман В.Я.,** канд. техн. наук,  
**Букраба М.О.,** канд. техн. наук, **Челідзе Д.І.**

**ДП «Науково-дослідний інститут «Шторм», Одеса**

вул. Терешкової, 27, 65078 Одеса, Україна, e-mail: shtorm\_soj@ukr.net

## Теплофізичне конструювання теплоакумулятора на основі парафіну

Проведено аналітичне та розрахункове конструювання теплоакумуляторної чарунки з парафіну, здатної віддавати тепло на протязі 8–9 год, накопичене за період нічного тарифу. Обґрунтовано вибір циліндричної форми теплоакумуляторної чарунки, корпус якої виконано з тонкостінного металу. Чарунка заповнюється теплоакумуляторною речовиною, парафіном, на 70 % об'єму та закривається кришкою. На підставі розрахунків за методиками нестационарної теплопровідності визначено діаметр та висоту чарунки з парафіну циліндричної форми, які вибираються рівними, та складають 130–150 мм для періоду нічного тарифу. Результати конструювання підтверджено експериментально. Вони можуть бути використані для розроблення парафінових теплоакумуляторів у системах опалення на основі теплових насосів для приміщень, що працюють у режимі офісу. *Бібл. 5, рис. 2.*

**Ключові слова:** теплоакумулятор, парафін, нічний тариф, тепловий насос, чарунка.

**Kushneruk V.I.,** Candidate of Technical Sciences,  
**Braverman V.Ya.,** Candidate of Technical Sciences,

**Bukraba M.A.,** Candidate of Technical Sciences, **Chelidze D.I.**

**PE «Research Institute «STORM», Odessa**

27, Tereshkova Str., 65078 Odessa, Ukraine, e-mail: shtorm\_soj@ukr.net

## Thermal-Physical Design of Paraffin-Based Heat Accumulator

Currently, analytical and calculated design is being performed for heat-retaining cell of wax that can give up the accumulated during the «nighttime tariff» heat within 8 ... 9 hours. The choice of a cylindrical form for the heat-retaining cell is being validated; cell body is made of a thin-walled metal, the cell is filled with heat-retaining substance - paraffin by 70% of volume and is covered with lid. Based on calculations, comply with the methods of transient heat conduction, the diameter and the height of cylindrical shape cells of wax were defined, which are chosen equal and reach 130–135 mm for the period of «nighttime tariff». Design results have been confirmed experimentally and can be applied to develop paraffin-based heat accumulators in heating systems based on heat pumps for spaces, operating as offices. *Bibl. 5, Fig. 2.*

**Key words:** heat accumulator, paraffin, nighttime tariff, heat pump, cell.

### References

1. Zaitsev O.M., Petrenko V.O., Petrenko A.O. [Cost cutting of energy resources of life support systems through the application of natural heat accumulators], [Construction and technogenic safety], 2012, Iss. 41, pp. 91–103. (Rus.)
2. Enhancing the effectiveness of microclimate support systems in industrial buildings, CSRI of industrial buildings, Ed. board S.N. Bulgakov and other, Moscow, 1991, pp 113. (Rus.)
3. Levenberg V.D., Tkach M.R., Golstrem V.A. [Heat accumulation], Kiev : Technika, 1991, pp. 49–74. (Rus.)
4. Sharma A., Tyagi V., Chen C., and others, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 497, pp. 1–28.
5. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. [Thermal transfer process], Moscow : Energoizdat, 1981, pp. 416. (Rus.)

Received July 29, 2016