

УДК: 62–681; 621.431

## Метод термостатирования аккумуляторов энергоустановок в условиях отрицательных температур окружающей среды\*

Ю. А. Зейгарник, А. С. Косой, О. С. Попель, А. Б. Тарасенко

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412, Россия  
e-mail: O\_Popel@oivtran.ru*

Поступила в редакцию 12.10.2018

После доработки 5.11.2018

Принята к публикации 12.11.2018

Предложен метод термостатирования аккумуляторных батарей в составе энергоустановок, работающих в условиях отрицательных низких температур окружающей среды, например на Крайнем Севере, базирующийся на использовании теплоты фазового перехода при замерзании воды. На основе расчетных оценок показано, что размещение аккумуляторной батареи или целиком всей энергоустановки в контейнере с двойными герметичными стенками, пространство между которыми заполнено водой, позволяет сохранять температуру в контейнере выше нуля градусов Цельсия в течение длительного периода (до нескольких месяцев) зимней эксплуатации энергоустановки. Периодическое расплавление (несколько раз в сезон) образующегося в межстеночном пространстве льда может осуществляться за счет использования части сбросного тепла дизель-генераторной установки на подогрев системы термостатирования. Обращено внимание на возможность использования в качестве теплоносителя системы термостатирования хладона Novac 1230 или его российского аналога ФК-5-1-12, обладающего рядом эксплуатационных преимуществ по сравнению с традиционными антифризами.

**Ключевые слова:** аккумуляторная батарея, термостатирование, фазовый переход, энергоустановка.

Аккумуляторные батареи широко применяются в различных областях энергетики. Они используются для запуска двигателей внутреннего сгорания, в качестве резервных источников бесперебойного питания, являются важным компонентом – буферным накопителем энергии в солнечных и ветровых энергоустановках, характеризующихся нестабильной генерацией энергии и др. Большинство типов аккумуляторных батарей обладает существенным недостатком: при их эксплуатации при низких отрицательных температурах (как правило, менее минус 10 °С) резко снижается рабочая емкость аккумуля-

торов и значительно ухудшается зарядно-разрядная характеристика [1]. Наиболее чувствительны к отрицательным температурам широко применяемые в современной практике свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. В результате, в суровых климатических условиях эксплуатации энергоустановок, в том числе в условиях Крайнего Севера, происходит преждевременный по сравнению с заявленным производителем срок эксплуатации выход из строя аккумуляторов и отказ техники. Традиционные методы предотвращения таких негативных последствий ориентированы прежде всего на сверхнормативное по сравнению со стандартными условиями увеличение емкости аккумуляторной батареи и/или на дополнительные затраты топлива и энергии на обогрев аккумуляторов, на «горя-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития».

чий простой» техники или на автономные системы ее подогрева [2].

Вместе с тем природа Крайнего Севера подталкивает возможность решения этой проблемы «нетрадиционным» способом. Как хорошо известно, ноль градусов Цельсия является границей фазового перехода «вода–лед», при котором выделяется значительное количество тепла  $r=330$  кДж/кг, что более чем в 1.5 раза выше, чем у такого известного теплоаккумулирующего вещества, как парафин. Поэтому, если окружить «термостатируемый» при температуре выше  $0^\circ\text{C}$  объект (в нашем случае это аккумуляторная батарея в составе, например, дизель-генератора или без него) должным образом спроектированной оболочкой, заполненной водой, то до тех пор, пока под воздействием холодной окружающей среды эта вода не превратится в лед, внутри этой оболочки будет сохраняться положительная температура. За счет использования тепла выхлопных газов дизель-генераторной установки (ДГУ) замерзшие стенки ледяной оболочки могут быть оттаяны, после чего процесс повторяется. Стенки термостатирующей оболочки дополнительно могут быть теплоизолированы с помощью современных вспененных теплоизоляционных материалов. Наличие снежного покрова также дополнительно повышает теплоизоляционные свойства оболочки контейнера. Схема теплоизолирующей конструкции представлена на рис. 1. Естественно, должны быть предусмотрены конструктивные меры для компенсации расширения льда при замерзании.

Для обоснования предлагаемого технического решения выполним некоторые предварительные оценки. В качестве примера рассмотрим следующую постановку задачи. Пусть электрогенерирующая установка мощностью 100 кВт, снабженная соответствующей аккумуляторной батареей, находится внутри контейнера внутренней площадью  $a \times b = 2 \times 3$  м<sup>2</sup> и высотой  $h=3$  м. Примем величину зазора между ограждающими герметичными стенками контейнера, заполненного замерзающей водой,  $\delta=600$  мм (наружный периметр контейнера при этом составит 14.8 м, а площади боковых стен и потолка – 53.3 и 13.4 м<sup>2</sup> соответственно). Общий объем замерзающей воды в организованной межстенной полости (боковые стенки и потолок) составит  $V=30.2$  м<sup>3</sup>. Теплота фазового перехода при замерзании воды (плотность воды  $\rho=10^3$  кг/м<sup>3</sup>) в зазоре составит  $Q_{\text{зам}} = V\rho r = 10^{10}$  Дж.

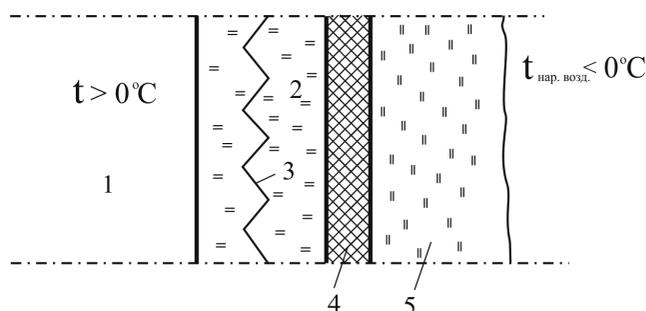


Рис. 1. Схема теплоизоляции контейнера: 1 – внутреннее помещение с аккумуляторной батареей (энергоустановкой); 2 – межстенная полость заполненная водой/льдом; 3 – греющий змеевик с теплоносителем; 4 – дополнительный вспененный утеплитель; 5 – снежный покров

Средний коэффициент теплоотдачи естественной конвекцией от стенок домика к наружному воздуху (с учетом поправок на ветер) приблизительно равен  $\alpha = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [3]. Пусть наружная температура воздуха равна минус  $30^\circ\text{C}$ . Тогда расчетная разность температур может быть принята равной  $\Delta t_n = 30^\circ\text{C}$ . При этом плотность отводимого от наружных стенок домика теплового потока составит  $\alpha\Delta t = 300$  Вт/м<sup>2</sup>, а максимальные (при отсутствии утеплителя и снежного покрова) потери тепла через оболочку контейнера составят  $Q_{\text{пот}} = q(F_{\text{ст}} + F_{\text{пот}}) = 20 \cdot 10^3$  Вт. Соответственно, минимальная продолжительность процесса замерзания воды в стенках контейнера будет равна  $Q_{\text{зам}}/Q_{\text{пот}} = 5 \cdot 10^5 \text{ с} = 139$  ч или 5.8 суток.

Естественно рационально дополнительно теплоизолировать контейнер теплоизолирующими панелями. Панель из пенополистирола толщиной 200 мм, характеризующегося теплопроводностью  $0.05$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), обладает термическим сопротивлением  $0.2/0.05 = 4$  м<sup>2</sup>·К/Вт. Это значение более чем на порядок величины превышает термическое сопротивление теплоотдаче к наружному воздуху  $1/\alpha \approx 1/10 = 0.1$  м<sup>2</sup>·К/Вт. Соответственно, более чем на порядок величины увеличится продолжительность замерзания аккумулялирующей холод водяной оболочки контейнера.

Как правило, работа в арктических условиях неизбежно связана с заносами сооружений снегом. Если принять, что теплопроводность самоуплотнившегося снега с плотностью  $250$  кг/м<sup>3</sup> не превышает  $0.25$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [4], то снежный покров толщиной 30 см добавит к суммарному термическому сопротивлению ограждения контейнера еще примерно  $1.2$  м<sup>2</sup>·К/Вт, а расчетная продолжительность процесса замерзания воды в оболочке увеличится почти до 2–2.5 месяцев.

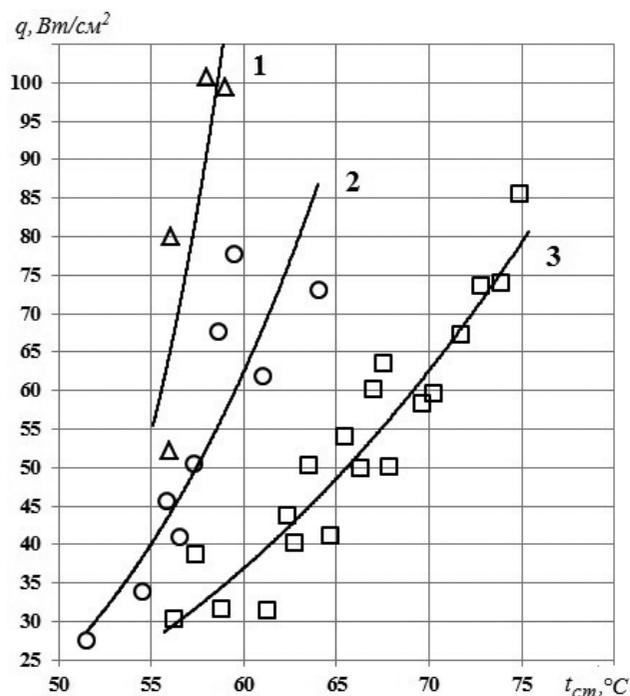


Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока на стенке  $q$  от температуры поверхности нагрева  $t_{ст}$  при кипении хладагента Noves 649: 1 – температура теплоносителя  $t_{ж} = 15.5$  °C, недогрев до температуры насыщения  $\Delta t_{нед} = 35$  °C, скорость теплоносителя  $V = 7.4$  м/с, давление  $P = 0.105$  МПа; 2 –  $t_{ж} \approx 15$  °C,  $\Delta t_{нед} \approx 36$  °C,  $V = 6$  м/с,  $P = 0.107$  МПа; 3 –  $t_{ж} \approx 21$  °C,  $\Delta t_{нед} \approx 32.5$  °C,  $V = 6.5$  м/с,  $P = 0.119$  МПа

Таким образом, оттаивание замерзающей воды в оболочке контейнера необходимо будет проводить всего несколько раз за зимний сезон.

Оценим баланс тепла, доступного для оттаивания льда в оболочке контейнера. При выбранной в рассматриваемом примере электрической мощности энергоустановки, размещенной в контейнере, 100 кВт, работающей в среднем с КПД 25%, и эффективности рекуперации тепла на уровне 50% тепловая мощность системы оттаивания льда может составить около 120–130 кВт. Тогда продолжительность времени, требуемого для оттаивания полностью замерзшей воды в оболочке контейнера, составит около суток. То есть для функционирования системы достаточно лишь эпизодическое использование сбросного тепла работающей энергоустановки.

Создание системы оттаивания льда в стенках контейнера с использованием сбросного тепла двигателя внутреннего сгорания потребует некоторой реконструкции схемы установки, но не представляет собой сложной инженерной теплотехнической задачи. Внутри заполненной водой оболочки контейнера может быть разме-

щен змеевик, по которому периодически прокачивается незамерзающий теплоноситель, нагреваемый в системе охлаждения двигателя. В принципе, в качестве такого теплоносителя могут использоваться стандартные антифризы. Однако интересно рассмотреть возможность использования хладонов (фторкетонов) типа ФК-5-1-12 или Noves 1230, представляющих собой бесцветную жидкость с близкой к воде плотности (около 1 г/см<sup>3</sup>), называемую иногда «сухой водой». Достоинствами данного теплоносителя является его низкая температура кипения (49 °C при атмосферном давлении), что обеспечивает возможность его использования при повышенных значениях плотности тепловых потоков, и нулевая электропроводность.

Вопрос об использовании данного класса хладоагентов для охлаждения полупроводниковых устройств и компьютерной техники в арктических условиях достаточно обстоятельно проработан в ОИВТ РАН. Рис. 2 иллюстрирует полученную в экспериментах зависимость плотности теплового потока от недогрева при течении хладагента Noves в канале. Видно, что при недогревах до температуры насыщения 30 °C и более могут быть отведены тепловые потоки до  $(0.8-1.0) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> [5].

Отметим, что при охлаждении объектов генерации энергии (газопоршневых двигателей, газотурбинных установок и др.) плотность тепловых потоков, отводимых в их системах охлаждения, заметно ниже.

Дополнительным преимуществом рассматриваемых хладонов является их незамерзаемость в арктических условиях ( $t_{зам} =$  минус 69 °C) и пожаробезопасность. Более того, данные хладоны сами являются отличными средствами пожаротушения. Таким образом, и анализ теплофизических свойств хладагента, и выполненные ОИВТ РАН достаточно представительные экспериментальные исследования кипения недогретого до температуры насыщения («поверхностного кипения») данного хладагента свидетельствуют о его безусловной перспективности как охладителя объектов электрогенерации и вторичных устройств преобразования и аккумулирования энергии.

Следует отметить доступность хладагента Noves, эквивалент которого производится в России и имеет примерно в три раза меньшую цену, чем хладоагент, выпускаемый американской фирмой 3 M.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Popel O. S., Tarasenko A. B. Hybrid electric energy storages: Their specific features and application (Review) // *Thermal Engineering*. 2018. V. 65. N 5. P. 266–281.
2. Косой А. С., Монин С. В., Кузнецов А. Н., Синкевич М. В., Цыганков В. В. Система подогрева установки с тепловым двигателем. Патент РФ № 2641775, МПК F24117/00/. Опубликовано 29.01.2018. Бюл. № 3.
3. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949. 393 с.
4. Осокин Н. И., Сосновский А. В., Чернов Р. А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // *Криосфера Земли*. 2017. Т. 21. № 3. С. 60–68.
5. Зейгарник Ю. А., Васильев Н. В., Дружинин Е. А., Калмыков И. В., Ходаков К. А., Косой А. С. Перспективы использования кипения недогретых диэлектрических жидкостей для охлаждения суперкомпьютеров // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 478. № 6. С. 646–648.

## Method of thermostatic control of power plants accumulators at negative ambient temperatures

Yu. A. Zeigarnik, A. S. Kosoi, O. S. Popel, A. B. Tarasenko

*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412, Russia*  
*e-mail: O\_Popel@oivtran.ru*

The method of thermostatic control of accumulator batteries, which are parts of power plants that operate at negative ambient temperatures (in particular, at Arctic conditions) is presented. This method is based on using the heat of water phase transition (freezing). The preliminary estimates were conducted for typical independent power plant of 100 kW capacity supplied with corresponding accumulator battery. The object of thermostatic control is placed in a special double-wall container. The space between the walls is filled with freezing water, which has a very high value of the latent heat of phase transition from liquid to solid state (330 kJ/kg). During the time of water freezing a temperature inside the container remains to be more than 0 °C. After freezing the water should be melted. The waste heat of the power plant and that of its cooling system is utilized for this purpose. The time of freezing the water in the container with bare outer walls is about 6 days. This figure can be considerably improved if we cover the container surface with thermal insulating panels and additionally use natural snow coating, which is typical of the Arctic conditions. In this case, we can speak about the freezing time of more than 2–2.5 months. According to the estimates conducted the melting time of the ice formed is approximately 18 h. It is expedient to apply fluoroketone type refrigerants (Novec 1230 or its Russian analog FK-5–1-12) as an intermediate coolant that transfers the heat of the engine waste gases to the ice to be melted. These coolants have low freezing point, fireproof, environmentally-friendly and provide acceptable heat transfer rate. Special experiments were conducted that confirmed the effectiveness of these coolants in the regime of subcooled-liquid forced-convection boiling. Corresponding data for removing heat fluxes of up to 1 MW/m<sup>2</sup> densities are presented in the paper.

**Keywords:** accumulator battery, thermostatic control, phase transition, power plant.

## REFERENCES

1. Popel O. S., Tarasenko A. B. Hybrid electric energy storages: Their specific features and application (Review). *Thermal Engineering*, 2018, vol. 65, no. 5, pp. 266–281.
2. Kosoy A. S., Monin S. V., Kuznetsov A. N., Sinkevich M. V., Tsygankov V. V. *Sistema podogreva ustanovki s teplovym dvigatelem* [Heating system installation with a heat engine]. Patent RF, no. 2641775, 2016.
3. Mikheev M. A. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. M.-L.: Gosenergoizdat, 1949. 393 p. In Russ.
4. Osokin N. I., Sosnovskiy A. V., Chernov R. A. Koeffitsient teploprovodnosti snega i ego izmenchivost' [Effective thermal conductivity of snow and its variations]. *Kriosfera Zemli – Earth's Cryosphere*, 2017, vol. 21, no. 3, pp. 60–68. In Russ.
5. Zeigarnik Y. A., Vasil'ev N. V., Kalmykov I. V., Kosoi A. S., Khodakov K. A., Druzhinin E. A. Prospects for boiling of subcooled dielectric liquids for supercomputer cooling. *Doklady Physics*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 58–60.