

ЗАРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОАККУМУЛЯТОРА С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ «ТВЕРДОЕ ТЕЛО — ЖИДКОСТЬ» ЛУННОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

© Л. И. Кныш, В. А. Габринец

Дніпропетровський державний університет

Розглянуто проблеми інтенсифікації теплообміну в теплоаккумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло — рідина» сонячної енергетичної установки на поверхні Місяця. Врахована знижена гравітація Місяця. Вільна конвекція розглядається як основний механізм теплопередачі. Приводяться рекомендації щодо конструкції теплоаккумулятора.

Одним из основных направлений современной космической науки является освоение ближайших к Земле космических объектов. Первостепенное значение в этой области занимает изучение и освоение Луны. Существует множество концепций и теоретических разработок в этом направлении. Одна из них — строительство технологических и научно-исследовательских баз на Луне. Для нормального функционирования этих объектов необходима постоянная подача тепловой и электрической энергии.

Одним из возможных источников энергии в этом случае может быть энергия Солнца, отличающаяся экологической чистотой и безопасностью. Однако использование солнечной энергии, как в условиях Земли, так и в условиях Луны, имеет ряд недостатков, основным из которых является периодичность поступления. Для обеспечения бесперебойной работы возникает необходимость аккумулировать энергию при помощи специальных устройств теплоаккумуляторов (ТА).

Длительность лунных суток составляет 28 земных, из которых 14 суток база будет находиться в освещенном состоянии, а 14 — в тени. При таком режиме поступления энергии удобно использовать ТА, в котором аккумулирование энергии осуществляется посредством использования теплоты фазового перехода — «твердое тело — жидкость».

Такие ТА обеспечивают высокую плотность энергии при постоянной температуре фазового перехода, стабильность характеристик при длительном циклировании. Конечно, наряду с положительными качествами, этим устройствам присущи и отрицательные свойства. Для высокотемпературных теплоаккумулирующих материалов (ТАМ) характерна повышенная коррозионная активность, из-

менение объема при переходе из одного состояния в другое, трудности отвода и подвода тепла для крупногабаритных ТА, дороговизна.

В качестве перспективного материала в ТА используется LiF, имеющий теплоту фазового перехода 850°C .

При использовании ТА с фазовым переходом, возникает ряд конструктивных трудностей, одна из которых — обеспечение максимальной площади теплообменной поверхности, что существенно интенсифицирует процесс теплообмена. Поэтому аккумулирующую среду размещают в специальные цилиндрические капсулы, внутри которых проходит канал с теплоносителем. Для увеличения интенсификации теплообмена внутри теплоаккумулирующей среды размещают ребра или теплопроводящие вставки в виде тепловых труб.

Для оценки возможных параметров ТА в условиях Луны была выбрана типичная для лунной базы полезная мощность СЭУ 10 кВт. Согласно литературным данным КПД СЭУ принимается равным 40 %. Тогда тепловая мощность ТА на нормальном режиме будет равна $Q = N/\eta = 25$ кВт. Для 14 суток работы ТА масса ТАМ вычислялась по формуле

$$M_{\text{ТАМ}} = Q_{\Sigma}/r,$$

где Q_{Σ} — суммарная теплота за все время работы ТА, Вт·ч; r — теплота фазового перехода ТАМ, Дж/кг;

Исходя из предварительных расчетов условий теплосъема, требуемое количество ТАМа предполагается разместить в 40 капсулах, геометрические размеры которых приведены на рис. 1.

В качестве теплоносителя СЭУ была выбрана смесь газов гелия и ксенона (He + Xe). Эта смесь

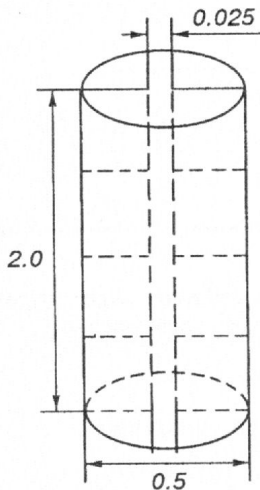


Рис. 1. Геометрические размеры капсулы

используется в машинных преобразователях, работающих по циклу Брайтона. Она не подвержена влиянию пониженной гравитации. Ее компоненты в больших количествах содержатся в лунных породах [3].

Общая теплота, которая снимается теплоносителем, вычисляется из формулы

$$Q_{\text{сним}} = GC_p \Delta T,$$

где $G = \rho F w n$ — общий расход теплоносителя в каналах, кг/с; ρ — плотность теплоносителя, кг/м³; w — скорость движения, м/с; n — количество каналов; C_p — теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); ΔT — максимальная разность температур входа в канал и выхода, °С.

При средней скорости теплоносителя в канале 20 м/с и максимальной разности температур входа и выхода 185 °С, общая снимаемая теплота $Q_{\text{сним}} = 25$ кВт, что соответствует теплоте, необходимой для нормальной работы СЭУ. Был рассмотрен случай, когда ТАМ находится в расплавленном состоянии, т. е. на режиме разрядки ТА.

Теплообмен в ТА сопровождается сложными физическими процессами: теплопроводностью, излучением, конвекцией, изменением объема при переходе из одного состояния в другое, анизотропией и т. д. Точный учет влияния механизма этих процессов осуществить затруднительно из-за громоздкости их математического описания.

Для оценочных расчетов ТА обычно используют упрощенные математические модели, в которых отражаются только наиболее существенные процессы и закономерности.

Рассмотрим процесс свободной конвекции в расплаве. Известно, что свободная конвекция возникает

из-за различия плотностей нагретых и холодных частиц ТАМ в поле сил гравитации. Ускорение свободного падения на Луне составляет 1/6 земного [3].

Условия однозначности рассмотренной задачи включают в себя форму и размеры капсулы с ТАМ, распределение температуры на ее поверхности и ее абсолютный уровень, температуру невозмущенной части ТАМ, теплофизические свойства его и значение ускорения свободного падения g . Скорость движения теплоаккумулирующей среды в данном случае является функцией процесса, т. е. не входит в условия однозначности, а полностью определяется заданием перечисленных выше независимых переменных.

При этих условиях система уравнений свободной конвекции дает две критериальные величины: число Прандтля $Pr = \nu/a$ и число Грасгофа $Gr = (gl^3/\nu^2)\beta\Delta T$. При не очень больших разностях температур возмущенной и невозмущенной части среды определяемое число Нуссельта Nu является функцией чисел Прандтля Pr и Грасгофа Gr , как и для наземных условий.

Если предположить, что решающее значение для теплообмена при свободной конвекции имеет термическое сопротивление ламинарного слоя около стенки, т. е. мы пренебрегаем тепловой инерционностью [1], то система уравнений свободной конвекции упрощается и дает определяющий критерий — число Релея Ra , представляющее собой произведение критериев Грасгофа и Прандтля. Таким образом, $Nu = \Phi(CrPr)$ или $Nu = \Phi(Ra)$,

$$Ra = (gl^3/\nu a)\beta\Delta T,$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; l — характерный размер, в рассматриваемом случае это высота капсулы, м; ν — кинематический коэффициент вязкости, м²/с; a — коэффициент температуропроводности, м²/с; β — коэффициент объемного расширения, 1/К; ΔT — разность температур возмущенной и невозмущенной частей жидкости, К.

Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции в зависимости от высоты теплосъемной поверхности графически показан на рис. 2. Видно, что коэффициент теплоотдачи будет наибольшим при ламинарном течении жидкости, но по мере увеличения толщины пограничного слоя коэффициент теплоотдачи уменьшается. При турбулентном режиме он резко увеличивается и затем остается постоянным по высоте.

В результате обобщения опытных данных получены эмпирические формулы, где за критическое число Ra принимается $Ra_{кр} = 10^9$. Учитывая эту

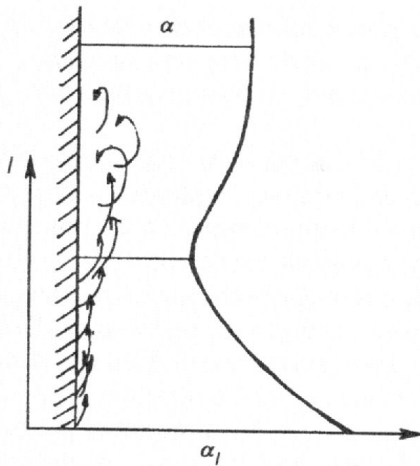


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции от высоты теплосъемной поверхности

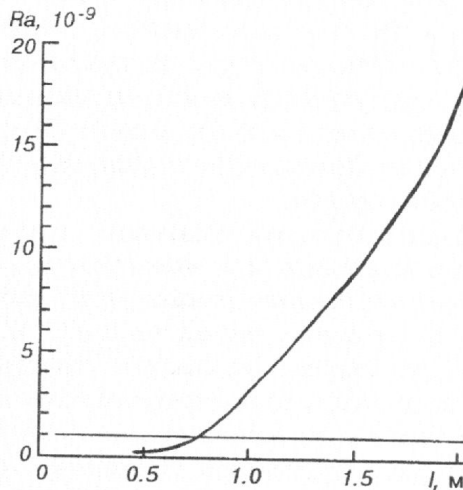


Рис. 3. Зависимость числа Релея от длины теплосъемной поверхности

закономерность, в нашей капсуле предлагается сделать прослойки-ребра, которые будут влиять на развитие турбулентности потока.

Оптимальное расстояние, на котором необходимо устанавливать ребра, находим из соотношений [2]:

$$Nu_l = 0.76Ra^{0.25}(Pr_{\text{ж}}/Pr_c)^{0.25}$$

— для ламинарного режима;

$$Nu_l = 0.15Ra^{0.33}(Pr_{\text{ж}}/Pr_c)^{0.25}$$

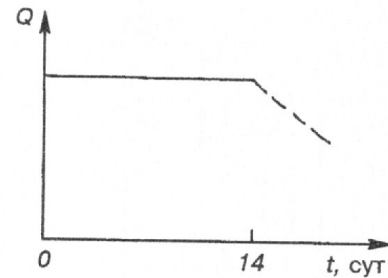


Рис. 4. Зависимость теплового потока, снимаемого с ТА от времени работы при нормальном режиме

— для турбулентного режима;

$$Nu = \alpha l / \lambda,$$

где l — характерный размер, м; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

После составления программы, в которой варьируются различные параметры ТА, была получена кривая, по которой легко определить оптимальную длину, на которой необходимо установить ребра (рис. 3). Для рассматриваемого теплоаккумулятора это расстояние равно 0.5 м. Конструкция такого ТА представлена на рис. 1. Величина теплового потока, снимаемая с ТА в зависимости от времени работы, показана на рис. 4.

Такая конструкция может быть предложена для СЭУ, работающей в условиях Луны.

1. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979.—416 с.
2. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1977.—342 с.
3. Проблемы комплексного исследования Луны / Под. ред. В. В. Шевченко. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986.—176 с.

CHARGE CHARACTERISTICS OF THERMAL ENERGY STORAGE MODULE WITH PHASE-CHANGE MATERIAL SOLAR POWER SYSTEM IN THE MOON

L. I. Knysh, V. A. Gabrynets

Problems of heat transfer intensification in a thermal energy storage module (TES) with a phase-change material for solar power system in the Moon are considered. Low lunar gravitation is taken into account. Natural convection is considered as a main heat transfer mechanism. TES design recommendation are also given.