



Термодинамическая эффективность сферической капсулы теплового накопителя энергии

Рецензия эксперта на статью получена 24.12.2021 [The expert review of the article received on December 24, 2021].

УДК 620.97. Научная специальность: 05.14.04.

Термодинамическая эффективность сферической капсулы теплового накопителя энергии

П. Ю. Дворниченко, аспирант; **М. И. Куколев**, д.т.н., [Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого \(СПбПУ\)](#)

В статье предложены зависимости для оценки термодинамической эффективности сферической капсулы с плавящимся теплоаккумулирующим материалом при обтекании её потоком теплоносителя. Рассмотрено влияние на температуры обтекающего потока и стенки капсулы и на эксергетический коэффициент полезного действия процессов конвекции или теплопроводности при использовании капсулы для накопления энергии.

Ключевые слова: тепловой накопитель, термодинамическая эффективность, теплоаккумулирующий материал, капсула.

UDC 620.97. The number of scientific specialty: 05.14.04.

Thermodynamic effectiveness of a spherical capsule for a thermal storage systems at charging

P. Yu. Dvornichenko, postgraduate student; **M. I. Kukolev**, Doctor of Technical Sciences, [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University \(SPbPU\)](#)

The article proposes dependences for assessing the thermodynamic efficiency of a spherical capsule with a melting heat-accumulating material when flowing around it with a coolant flow. The effect on the temperatures of the flow around and the walls of the capsule and on the exergy efficiency of convection or heat conduction processes when the capsule is used for energy storage is considered.

Key words: thermal storage system, thermodynamic effectiveness, thermal storage material, capsule.

В оборудовании различного назначения с успехом применяются теплообменные аппараты, содержащие сферические элементы. Достаточно подробно исследованы процессы теплообмена при обтекании таких элементов потоком теплоносителя энергетической установки [1, 2]. При этом в качестве сферических элементов рассматривались объекты без фазовых переходов внутри них. Представляет интерес оценка влияния на температуру обтекающего потока фазопереходных процессов (плавление, парообразование, затвердевание и конденсация) внутри сферических капсул. Такие капсулы применимы для тепловых накопителей (ТН).

Постановка задачи

Рассмотрим задачу в следующей постановке: сферическая капсула заполнена плавящимся теплоаккумулирующим материалом (ТАМ) — обычно это смесь солей щелочных металлов или кристаллогидраты неорганических солей, но для нашей задачи это неважно; она обтекается потоком горячего теплоносителя; внутри капсулы давление постоянно (рис. 1).

Необходимо оценить влияние процесса переноса теплоты на температуру обтекающего потока.

Набегающий на сферу поток теплоносителя имеет температуру T_{ci} . Температура ТАМ — $T_{ТАМ}$, граница фазового перехода перемещается от внешнего диаметра к внутреннему.

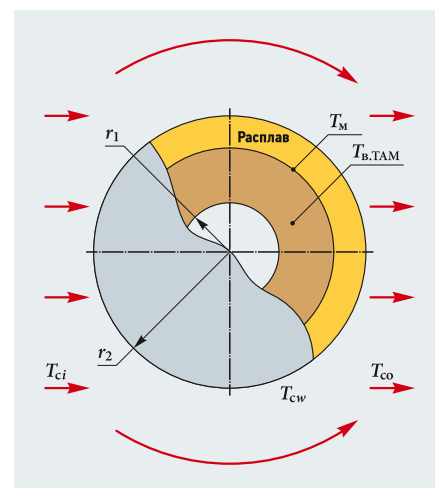


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи о сферической капсуле с плавящимся теплоаккумулирующим материалом

Моделирование

Температура обтекающего потока теплоносителя за сферической капсулой [3]:

$$T_{co} = T_{ci} - (T_{ci} - T_{ТАМ}) \frac{N_c w_c}{\eta_c} R_c, \quad (1)$$

где N_c — безразмерное число теплопередачи; w_c — безразмерная скорость передвижения границы фазового перехода; η_c — энергетический коэффициент полезного действия; R_c — коэффициент формы капсулы.

Безразмерное число теплопередачи зависит от числа теплопередачи K_c , площади поверхности теплообмена $F(r_1)$, секундного массового расхода обтекающего ячейку потока m_c и его удельной теплоёмкости c_p :

$$N_c = \frac{K_c F(r_1)}{m_c c_p}. \quad (2)$$

В свою очередь, безразмерная скорость передвижения границы фазового перехода для процесса конвекции:

$$w_{cI} = \frac{1 - \exp(-N_c)}{N_c R_{cI}} \eta_c, \quad (3.1)$$

и теплопроводности:

$$w_{cII} = -0,5 \frac{N_c + 1}{\tau_c \eta_c} + \sqrt{\left(0,5 \frac{N_c + 1}{\tau_c \eta_c}\right)^2 + \frac{1}{R_{cII} \tau_c}}. \quad (3.2)$$

Безразмерное время процесса τ_c зависит в том числе и от теплофизических свойств ТАМ:

$$\tau_c = \frac{t_c K_c^2 (T_{ci} - T_{TAM})}{\lambda_l \rho_l L}, \quad (4)$$

где t_c — размерное время протекания процесса; λ_l , ρ_l и L — теплопроводность, плотность и скрытая удельная теплота плавления теплоаккумулирующего материала, соответственно.

Представляет интерес оценка влияния на температуру обтекающего потока фазопереходных процессов внутри сферических капсул с плавящимся теплоаккумулирующим материалом, которые применимы для тепловых накопителей

Коэффициент формы ячейки R_c учитывает соотношение начальной и конечной площадей границы фазового перехода и зависит от безразмерного времени τ_c :

$$R_c = \left(\frac{w_c \tau_c}{p_c} - 1 \right)^2, \quad (5)$$

причём комплекс p_c зависит от начального диаметра границы фазового перехода d_{c1} и отношения коэффициента теплопередачи K_c к коэффициенту теплопроводности расплава:

$$p_c = \frac{K_c d_{c1}}{2 \lambda_l}. \quad (6)$$

Тогда зависимость безразмерной скорости передвижения границы фазового перехода для сферической ячейки при конвекции:

$$w_{cI} = \frac{p_c^2 - \sqrt{p_c^3 \left(p_c + 4 \frac{b}{\tau_c} \right)}}{2b} + \frac{p_c}{\tau_c}, \quad (7.1)$$

где $b = \frac{1 - \exp(-N_c)}{N_c} \tau_c^2 \eta_c$,

и теплопроводности:

$$w_{cII} = \frac{ap_c^2 + p_c}{\tau_c - p_c^2} - \frac{\sqrt{a^2 p_c^4 + 2ap_c^3 + p_c^4 - 2p_c^2 \tau_c + p_c^2 + \tau_c^2}}{\tau_c - p_c^2}, \quad (7.2)$$

где $a = 0,5 \frac{N_c + 1}{\tau_c \eta_c}$.

Затем определим температуру стенки ячейки с теплоаккумулирующим материалом:

$$T_{cw} = T_{TAM} + (T_{ci} - T_{TAM}) w_c^2 \tau_c R_c. \quad (8)$$

Эффективность процесса заряда оценивается эксергетическим коэффициентом полезного действия:

$$\psi_c = \eta_c \frac{\bar{T}_{TAM} - 1}{\bar{T}_{TAM}} \frac{\bar{T}_{ci} A}{\bar{T}_{ci} A + \eta_c \ln \left(1 - \frac{A}{\eta_c} \right)}, \quad (9)$$

где $A = \left(1 - \frac{\bar{T}_{TAM} - 1}{\bar{T}_{ci}} \right) N_c w_c R_c$,

$$\bar{T}_{TAM} = \frac{T_{TAM}}{T_{ds}} \text{ и } \bar{T}_{ci} = \frac{T_{ci}}{T_{ds}}.$$

Теперь задаёмся значениями числа теплопередачи K_c , площади поверхности теплообмена $F(r_1)$, секундного массового расхода обтекающего ячейку потока m_c и его удельной теплоёмкости c_p .

По формуле (2) рассчитываем безразмерное число теплопередачи.

Далее, используя теплофизические свойства расплавленного ТАМ (температуру плавления T_{TAM} , теплопроводность λ_l , плотность ρ_l и скрытую удельную теплоту фазового перехода L), число теплопередачи K_c , время заряда t_c и температуру потока перед капсулой T_{ci} , вычисляем по формуле (4) безразмерное время процесса.

По предлагаемым зависимостям (7.1) и (7.2) находим значения безразмерной скорости передвижения границы фазового перехода при конвекции w_{cI} и теплопроводности w_{cII} .

Следует отметить, что, если определяющим механизмом переноса теплоты в капсуле является конвекция, то, подставив формулу (3.1) в формулу (1), получим зависимость:

$$T_{co} = T_{ci} - (T_{ci} - T_{TAM}) [1 - \exp(-N_c)], \quad (10)$$

из которой видно, что T_{co} не зависит от формы капсулы и безразмерной скорости границы фазового перехода, что совпадает с результатами работы [4].

Выражения (7.1) и (7.2) потребуются для определения температуры стенки капсулы и эксергетического коэффициента полезного действия.

Режим №2

Посмотрим, как будет работать автономная система отопления после остывания помещения до температуры 5–7°C.

На рис. 1 эта зона выделена диапазоном «Б». В этом диапазоне температуры помещения в момент старта работы котла большое значение имеет тип антифриза. Если у этиленгликолей при +5°C кинематическая вязкость составляет около 3,5 мм²/с, то у пропиленгликолей — 8 мм²/с, при том, что вязкость воды для этих значений температуры — всего 1,6 мм²/с. Запуск котла при данной температуре (+5°C) может привести к слишком медленному движению теплоносителя в первичном теплообменнике, что приведёт к его перегреву и остановке работы газовой горелки. Через некоторое время, в зависимости от алгоритма запуска котла, может произойти повторный запуск работы устройства, но некоторые модели котлов в своих алгоритмах имеют ограничения на количество повторных пусков. То есть рассматриваемый нами теплоагрегат прекратит работу, так и не перейдя в установившийся режим работы.

К сожалению, у пропиленгликолей вязкость по сравнению с этиленгликолями повышена в несколько раз, хотя это экологически безопасные антифризы, которые рекомендуются к использованию в системах отопления многими компаниями. Но чем ниже температура, тем хуже ситуация.

В связи с этим запуск котлов в системах отопления, заполненных пропиленгликолевыми антифризами, при температуре менее +10°C без специалиста — это, увы, задача неординарная. Сама зона «Б», указанная на рис. 1, соответствует зоне неустойчивого применения котельного оборудования. Чем ближе температура запуска системы к 0°C, тем больше проблем. Но всё-таки запуск системы может произойти, как и возможен выход котла на устойчивый рабочий режим.

Режим №3

Теперь рассмотрим работу автономной системы отопления после остывания помещения ниже температуры 0°C.

Использование воды в качестве теплоносителя при данных условиях невозможно. Но что произойдёт, если в качестве теплоносителя выступает антифриз? Если посмотреть на рис. 1 при отрицательной температуре, например, –10°C, то становится понятно, что кинематическая вязкость для пропиленгликолей равняется 20 мм²/с, что в 20 раз (!) превышает вязкость воды, для которой и рассчитаны все рабочие характеристики настенных



котлов. Это значение не позволяет осуществлять движение теплоносителя по каналам первичного теплообменника с заданной скоростью, которая обеспечивает нагрев теплоносителя. При горении газа температура в зоне первичного теплообменника конвекционного газового котла составляет около 900°C. При низкой скорости движения антифриза по каналам теплообменника неминуемо произойдёт его перегрев и закипание.

Применение антифризов даёт возможность сохранения системы отопления в случае отключения электричества и не допускает разрушение контура отопления и его элементов, но только для одноконтурных котлов без систем горячего и холодного водоснабжения

В работе [3] указано: «Важнейший параметр для антифризов — максимальная рабочая температура. Так, большинство этиленгликолевых растворов начинает кипеть при 104–112°C при атмосферном давлении. Принципиальное значение этот параметр имеет потому, что, в отличие от воды, при превышении допустимой температуры происходит необратимое разложение гликолевых растворов. Если температура в какой-либо точке системы превысит критическое (для данной марки антифриза) значение, произойдёт термическое разложение гликоля и антикоррозионных присадок с образованием кислот и выпадением твёрдого осадка».

Запустить в работу систему отопления с газовым котлом при температурах ниже нуля в помещении практически невозможно. Даже если он запустится, то сразу остановится по причине перегрева. А при повторных запусках перейдёт в режим «тактования» (постоянного включения-выключения), сопровождаемого закипанием антифриза, выпадением осадка

и зарастанием каналов теплообменника, падением давления в системе за счёт удаления образовавшегося при кипении кислорода, с необходимостью последующей подпитки системы водой. Но откуда её взять — непонятно, ведь для наличия воды в системе должен быть какой-то её источник, не замерзающий при отрицательных температурах.

Запуск газового котла автономной системы отопления из состояния с длительным охлаждением системы при отрицательных температурах с заполнением контура антифризами без контроля специалиста вообще невозможен. Для запуска системы в этих условиях нужно как минимум: а) нагреть помещение, выждать четыре часа, б) открыть котёл, феном прогреть его внутренности, в) постепенно, с маленькими интервалами, попытаться запустить котёл. Вопрос удалённого (через Интернет) запуска котла, остывшего до минусовых температур в промёрзшем помещении, рассматривать не имеет смысла даже теоретически.

Вывод

Если планируется использовать автономную систему отопления с газовым котлом, то, как в случае заполнения контура отопления в качестве теплоносителя антифризом, так и в случае использования для этой цели воды, нужно учитывать, что котёл должен работать постоянно. Температура в отапливаемом помещении при запуске котлов не должна быть ниже +10°C. Допускать охлаждение помещения ниже нуля с целью экономии денежных средств на отопление при отсутствии жильцов нельзя категорически.

Применение антифризов даёт возможность сохранения системы отопления в случае отключения электричества и не допускает разрушение контура отопления и его элементов — причём только для одноконтурных котлов без систем горячего и холодного водоснабжения. Но применение антифризов значительно снижает энергоэффективность системы теплоснабжения и требует установки дополнительных устройств — как минимум, более мощных циркуляционных насосов. ●

1. Торопов А.Л. Настенные газовые котлы автономных систем теплоснабжения. История создания. Основные элементы. Классификация. Ч. 1. Конвекционные настенные газовые котлы: учебное пособие. — М.: ИД Академии естествознания, 2020. 60 с.
2. Торопов А.Л. Настенные газовые котлы автономных систем теплоснабжения. История создания. Основные элементы. Классификация. Ч. 2. Конденсационные настенные газовые котлы: учебное пособие. — М.: ИД Академии естествознания, 2020. 60 с.
3. Беликов С.Е. Незамерзающие теплоносители. — М.: Изд-во «Аква-Терм», 2013. 56 с.

Thermodynamic effectiveness of a spherical capsule for a thermal storage systems at charging. Pp. 54–56.

Pavel Yu. Dvornichenko, postgraduate student; **Maxim I. Kukolev**, Doctor of Technical Sciences, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

1. S.L. Demenok, V.V. Medvedev, S.M. Sivuha. *Gidrodinamika i teploobmen v sharovykh uk-ladkah: monografija* [Hydrodynamics and heat transfer in ball packings: A monograph]. St. Petersburg. *Strata* ["Stratum" Publishers]. 2012. 192 p. [In Russian]
2. V.V. Sorokin. *Gidravlika i teploobmen sharovykh zasypok v usloviyakh aktivnoy zony vodo-vod-janykh jadernykh reaktorov s mikroTVJeLami* [Hydraulics and heat exchange of spherical fill-ings in the core conditions of pressurized water nuclear reactors with micro-fuel elements]. Minsk. *Belarus. navuka* ["Science of the Republic of Belarus" Publishers]. 2010. 191 p. [In Russian]
3. M.I. Kukolev. *Osnovy proektirovaniya teplovykh nakopitelej jenergii* [Basics of designing thermal energy storage devices]. Petrozavodsk. *PetrGU* [Petrozavodsk State University]. 2001. 240 p. [In Russian]
4. S. Aceves-Saborio, H. Nakamura, G. Reistad. Optimum efficiencies and phase change tem-peratures in latent heat storage systems. *Journal of Energy Resources Technology*. 1994. Vol. 116. Pp. 79–86.