

УДК 697.329

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ НА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИБОРОВ СТАРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Докторова О.А., студент
кафедры «Стартовые ракетные комплексы»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Кобызев С.В., старший преподаватель
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
sm8@sm8.bmstu.ru*

Введение

Система автономного охлаждения приборов стартового оборудования расположена в стартовом сооружении. Температура воздуха в отсеке приборов по требованиям завода-изготовителя должна поддерживаться в пределах 15-25°С. Основной задачей исследуемой системы является поддержание заданных температур в приборном отсеке.

Требования к системе особо точных приборов:

1. Температура внутри всего отсека не должна превышать 20°С, иначе произойдет сбой аппаратуры или выход ее из строя;
2. Трубки с теплоносителем, которыми осуществляется охлаждение приборов, должны быть герметичными и изолированными;
3. Для обеспечения необходимых температур требуется создать систему, в которой расход теплоносителя будет не менее 360 л/ч при напоре порядка 0,09 МПа (0,9 кгс/см²);
4. В качестве теплоносителя применяется антифриз Лена-40.

Принципиальная схема системы автономного охлаждения приборов представлена на рис. 1. Система состоит из автономной холодильной машины (АХМ), которая охлаждает непосредственно приборы (потребитель) и аккумулятора тепла (АТ), который является тепловым стоком для холодильной машины. Блок регулирующий соединен параллельными трубопроводами с потребителем и АХМ. Его основная задача – регулировка расхода, температуры и давления хладоносителя, поступающего непосредственно к приборам.

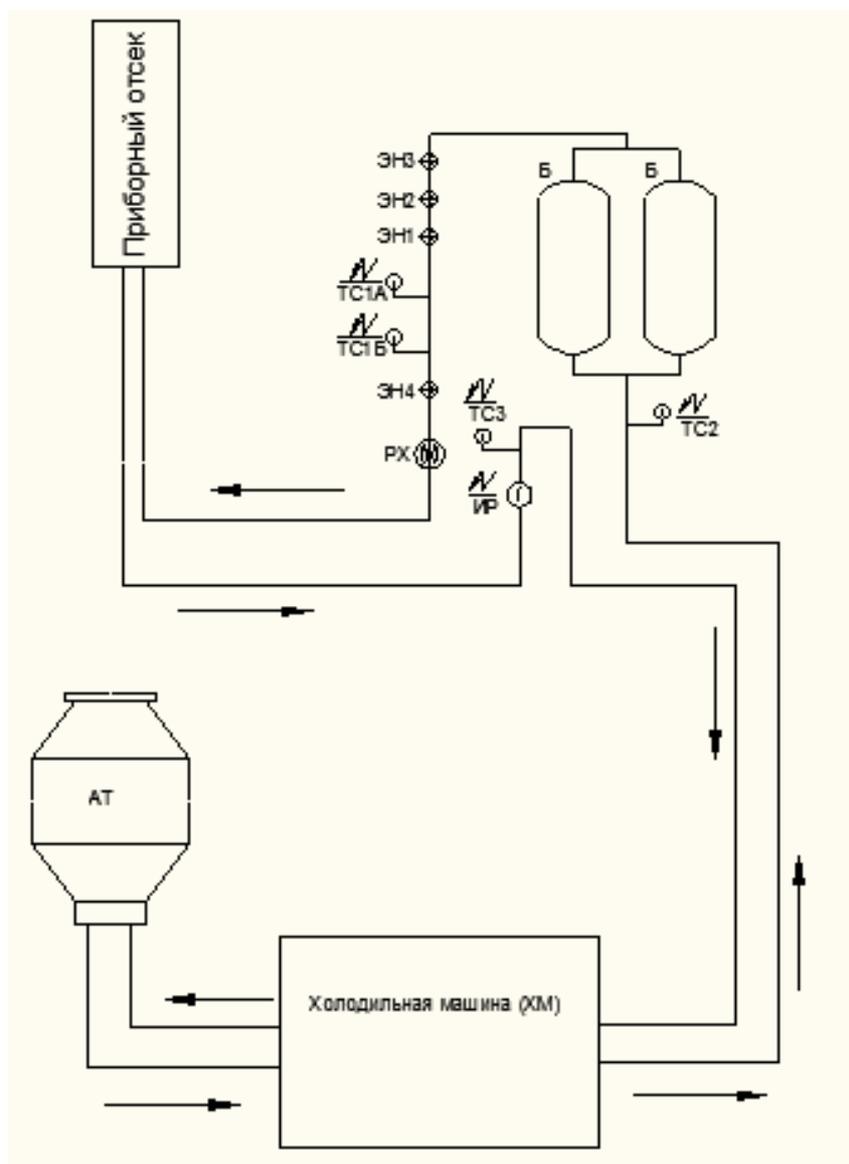


Рис. 1. Схема системы автономного охлаждения приборов стартового оборудования

Нагнетательная ветвь включает термометры сопротивления (ТС) ТС2, ТС3, ТС4, ТС5, контролирующие температуру хладоносителя. Контроль температуры осуществляется за счет изменения сопротивления ТС, которое пропорционально изменению температуры хладоносителя. По сигналам ТС4 и ТС5 блок управления включает или отключает регулирующие нагреватели ЭН1, ЭН2, ЭН3, работа которых поддерживает требуемую температуру хладоносителя. Сигналы ТС2 и ТС3 - контрольные и используются для определения работоспособности АХМ.

Сливная ветвь включает индикатор расхода (ИР), сигнализирующий о наличии или отсутствии минимального допустимого расхода хладоносителя в контуре. Сигнализация об этом осуществляется путем замыкания или размыкания герметичных контактов,

размещенных в неподвижном корпусе ИР, под действием магнитного поля постоянного магнита, находящегося на подвижном штоке поплавка;

- регламентные электронагреватели ЭН4, ЭН5, ЭН6, имитирующие подвод тепла от потребителя;

- термометр сопротивления ТС1, сигналы которого (совместно с ТС2) используются для контроля разности температуры хладоносителя на входе и выходе от АХМ и к АТ.

Допустимая температура теплоносителя на входе в АХМ должна находиться в пределах 25-35°C. В теплообменнике холодильной машины теплоноситель охлаждается до 13°C. Затем насосным агрегатом по трубопроводам подается в гидроблок (ГБ) через буферные сосуды Б. Регулирующие электронагреватели (первая группа ЭН1 и ЭН2, вторая – ЭН3), входящие в состав гидроблока, обеспечивают плавное изменение подаваемой и рассеиваемой мощности, а, следовательно, и плавное изменение подогрева протекающего через них хладоносителя. ТС4 и ТС5 обеспечивают контроль температуры хладоносителя на выходе из каждой группы ЭН. Из гидроблока хладоноситель поступает в теплообменники потребителя. Отобрав тепло у потребителя, хладоноситель через гидроблок по трубопроводу возвращается в холодильную машину, имеющую в качестве стока АТ. Температура теплоносителя на входе в АТ составляет примерно 60-85°C.

Проектирование аккумулятора тепла на фазовых переходах является основной задачей исследования системы, так как он является стоком тепла холодильной машины. Аккумуляцией (аккумулированием) тепловой энергии или аккумуляцией теплоты называется процесс накопления тепловой энергии в период ее наибольшего поступления для последующего использования, когда в этом возникнет необходимость. В данном случае в качестве теплоаккумулирующего материала используется фазоменяющий материал (ФММ). В таких аккумуляторах тепла (АТ), называемых аккумуляторами теплоты на фазовых переходах (АФП), на единицу объема запасается гораздо большее количество теплоты, чем в теплоаккумуляторах с теплоемким теплоаккумулирующим материалом. При этом процесс зарядки и разрядки может быть осуществлен в узком температурном диапазоне, что оказывается существенным при работе в условиях небольших температурных напоров.

Анализ литературных данных по конструированию аккумуляторов фазового перехода (АФП) капсульного типа.

Разработка конструкции АФП должна производиться с учетом условий его работы и компоновки в системе, для которой он предназначен.

Наибольшее распространение получили АФП с промежуточным теплоносителем, который представляет собой газ или жидкость, осуществляющий перенос теплоты от источника к АФП при его зарядке и от АФП к потребителю при разрядке. Такие системы очень просты в использовании и на их базе патентуются новые конструкции [11, 12, 13, 14].

Рассмотрим более подробно АФП с промежуточным теплоносителем. Основным типом таких АФП является капсульный (по данным работы [4]).

Они состоят из корпуса 1, заполненного термоаккумулирующим материалом 2. Подвод или отвод теплоты в АФП производится посредством теплоносителя 3, протекающего через него. Теплоноситель протекает между капсулами с термоаккумулирующего материала, расположенными в корпусе АФП.

В представленной конструкции на рис. 2 теплоноситель и термоаккумулирующий материал разделены непроницаемой стенкой. В результате этого не происходит его засорения примесями теплоносителя.

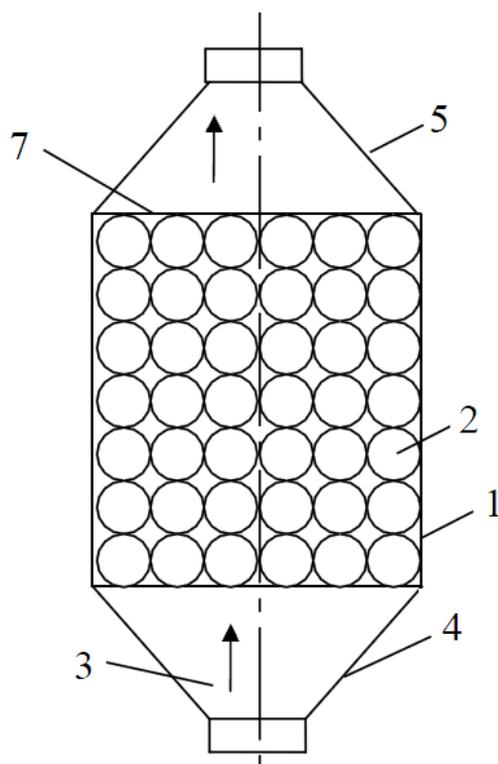


Рис. 2. Устройство аккумулятора теплоты капсульного типа

1 – корпус; 2 – термоаккумулирующий материал; 3 – теплоноситель; 4 – входной патрубок; 5 – выходной патрубок; 7 – ограничительная сетка

В то же время используются АФП и с прямым контактом теплоносителя с термоаккумулирующим материалом. Преимуществом в данном случае является снижение материалоемкости конструкции. Данные конструкции применяются при создании Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

теплоаккумуляторов в швейной промышленности, сельском хозяйстве и теплоэнергетике [12, 13, 14].

АФП капсульного типа, основным достоинством которых является простота конструкции и возможность гибкого выбора компоновочных решений, поскольку капсулами с термоаккумулирующим материалом (ТАМ) могут заполняться контейнеры произвольной формы.

АФП капсульного типа представляет собой емкость, заполненную теплоаккумулирующими элементами, представляющими собой сферические, цилиндрические или другой формы капсулы с ТАМ (см., например, работы [4, 5, 6, 7]). Оболочка капсул может быть жесткой или мягкой, например, выполненной из полиэтилена или фольги. При этом жесткую капсулу можно сделать герметичной или сообщающейся с атмосферой через отверстие в верхней части, что не скажется на ее функциональной пригодности. Изображение таких капсул и их размещение в АТ представлено на рис. 3 (по данным работы [4]).



Рис. 3. Размещение сферических капсул с ТАМ в АТ

Одним из важных этапов проектирования АФП является выбор термоаккумулирующего материала. От удачного решения этого вопроса зависит его стоимость и надежность работы.

При разработке АФП необходимо руководствоваться следующими основными требованиями к термоаккумулирующим материалам [1, 2, 3, 4]:

а) температура фазового перехода должна быть увязана с рабочими параметрами теплоносителя в режимах зарядки и разрядки, такими, например, как температура на входе, расход, теплоемкость и т.д.;

б) термоаккумулирующий материал должен иметь возможно более высокое значение удельной энтальпии фазового перехода;

в) а также иметь низкий коэффициент объемного расширения и по возможности меньшую разницу плотностей жидкой и твердой фаз;

г) термоаккумулирующий материал должен быть химически совместимым с конструкционными материалами;

д) иметь стабильность состава и теплофизических свойств при эксплуатации АФП в условиях термоциклирования;

е) должен быть доступным и обладать низкой стоимостью;

ж) кроме того, в выбранном термоаккумулирующем материале должен отсутствовать или мало проявлять себя эффект переохлаждения при затвердевании. В противном случае нужно предусматривать меры по снижению эффекта переохлаждения.

В настоящее время наиболее пригодными для низкотемпературных АФП считаются парафины, представляющие собой смесь алифатических углеводородов ряда C_nH_{2n+2} , также называемые предельными углеводородами. Может применяться другая органика, например, эффективным оказывается применение восков или других органических материалов с близкими свойствами.

Достоинства парафинов:

Физические свойства:

- большая теплота фазового перехода;
- отсутствие эффекта переохлаждения;
- низкий коэффициент вязкости;
- парафин в жидком состоянии – неполярная жидкость и поэтому не смешивается с полярными, такими как вода и спирт.

- низкая электропроводность, из-за которой их относят к хорошим электроизоляторам;

Химические свойства:

- химически инертны по отношению к почти всем материалам;
- парафины долговечны и стабильны при циклическом изменении агрегатного состояния;

- парафины воспламеняемы, однако температура воспламенения у них намного выше 250°C ;

- стабильность при нагреве примерно до 250°C;
- парафины не кипят, т.о. нет опасности возникновения высокого давления пара даже при высоких рабочих температурах.

Экологически безопасные материалы:

- экологически безвредные продукты, которые не оказывают неблагоприятного воздействия на поля, животных и микроорганизмы. Они классифицируются как нулевой уровень вреда воде и 100% регенерируемые;
- не токсичны и не вредны для здоровья;
- очищенные парафины используются в качестве материалов, контактирующих с продуктами.

По сравнению с кристаллогидратами парафины обладают меньшей удельной теплотой плавления, но являются устойчивыми по отношению к термоциклированию и химически инертны.

Вязкость жидкой фазы низкая, что приводит к более интенсивной конвекции в жидкой фазе, следовательно, к более интенсивному теплообмену при плавлении.

В процессе работы АФП в них не происходит химических реакций, поэтому тепловая мощность АФП остается на высоком уровне в течение всего срока службы.

Плотность термических парафинов в жидком состоянии колеблется от 750 до 850 кг/м³ и в твердом от 800 до 900 кг/м³ [4]. Кривая теплоёмкости парафинов приведена на рис. 4.

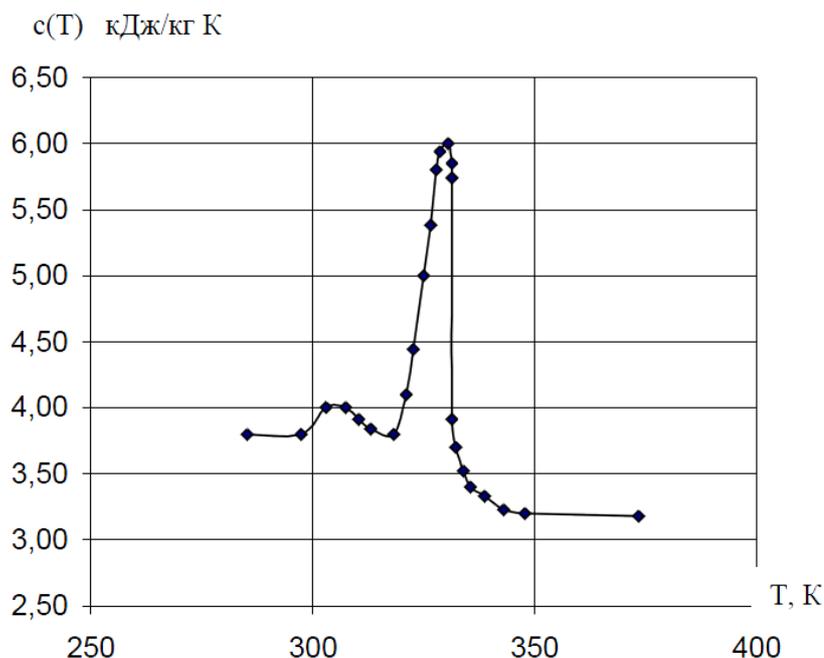


Рис. 4. Кривая теплоёмкости парафинов

Перечисленные свойства парафина делают его идеальным материалом для различных приложений, связанных с низкотемпературной аккумуляцией теплоты. Однако, у парафинов, как и у многих органических ТАМ, имеется один существенный недостаток – низкий коэффициент теплопроводности.

К недостаткам парафинов как термоаккумулирующего материала относятся:

– низкий коэффициент теплопроводности (примерно 0,15 Вт/(м К)). Это приводит к усложнению и удорожанию парафиновых АФП;

- изменение плотности при фазовом переходе также играет отрицательную роль, поскольку приводит к необходимости компенсации изменения объема;

- низкая теплопередающая способность приводит к усложнению конструкции, поскольку возникает необходимость предусмотреть меры по улучшению теплообмена между ТАМ и теплоносителем.

Описание системы и расчёт основных параметров АФП

В системе автономного охлаждения приборов избыточное давление, создаваемое насосным агрегатом комплекта на входе во внутренний контур трубопроводов приборного отсека, должно быть порядка 0,1 – 0,17 МПа (1 – 1,7 кгс/см²). Насосный агрегат должен обеспечивать расход не менее 360 л/час при напоре не менее 0,09 МПа (0,9 кгс/см²).

Создаваемая система должна обеспечивать при задействовании одного насосного агрегата (второй находится в холодном резерве) прокачку по внутреннему контуру охлаждающей жидкости (ОЖ) со следующими параметрами:

тип ОЖ – жидкость охлаждающая низкотемпературная ОЖ-40 ГОСТ 28084-89 (ОЖ-40 «Лена» по ТУ 113-07-02-88).

Характеристики при $t = 10^{\circ}\text{C}$:

$$\gamma = 1064 \text{ кг/м}^3;$$

$$C_p = 0,812 \text{ ккал/ кг}\cdot^{\circ}\text{C};$$

$$\lambda = 0,332 \text{ ккал/ м}\cdot\text{час }^{\circ}\text{C};$$

$$\nu = 7,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Все устройства комплекта, связанные с внутренним контуром, должны быть плотными (герметичными) в процессе и после воздействия внутреннего избыточного испытательного давления 5 МПа (50 кгс/см²). Гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата по внутреннему контуру должно быть не более 0,004 МПа.

Теплообменник и трубопроводы комплекта со стороны наружного контура должны обеспечивать:

- гидравлическое сопротивление не более 0,003 МПа (0,03 кгс/см²) при номинальном расходе теплоносителя (дистиллированной воды) 500 л/час;

- плотность (герметичность) в процессе и после воздействия внутреннего избыточного испытательного давления 1,25 МПа (12,5 кгс/см²).

При течении ОЖ по трубопроводу её температура будет изменяться в результате теплообмена с приборным отсеком и окружающей средой. По этой причине температура на входе в АХМ будет находиться по следующей формуле:

$$t_{\text{выхПО}} = t_{\text{но}} + (t_{\text{вх}} - t_{\text{но}}) \exp(-m_1 \cdot l_{\text{тр}}), \left(^{\circ}\text{C}\right),$$

где

$t_{\text{ПО}}$ – средняя температура приборного отсека при работе особо точных приборов, °С;

$t_{\text{ВХ}}$ – температура на входе в приборный отсек, °С;

$l_{\text{ТР}}$ – длина трубопровода, который обвивает приборный отсек, м.

$$m_1 = \frac{k \cdot \pi \cdot D_{\text{вн}}}{C_p \cdot G}$$

k – коэффициент теплопередачи через стенку трубопровода, Вт/м²·К;

$D_{\text{вн}}$ – наружный диаметр трубопровода, м;

C_p – теплоёмкость ОЖ, Вт·ч/кг·К;

G – расход ОЖ, кг/ч.

Для нахождения чисел подобия необходимо определить скорость течения ОЖ в трубке:

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}, \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right),$$

где

Q - расход ОЖ, л/час,

D - диаметр приборного отсека, м.

Число Рейнольдса ОЖ:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

Число Прандтля ОЖ:

$$\text{Pr} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot C_p}{\lambda}$$

Число Нуссельта ОЖ:

$$Nu = 0,3 \cdot (Re)^{0,6} \cdot (Pr)^{0,33}$$

Коэффициент теплоотдачи ОЖ:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}$$

где

d - внутренний диаметр трубки, м;

ν - кинематический коэффициент вязкости, м²/с;

ρ - плотность ОЖ, кг/м³;

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м²·°С.

Зная толщину стенки трубки ($\delta_{ст}$) и коэффициент теплопроводности стенки ($\lambda_{ст}$) можно найти коэффициент теплопередачи.

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}}$$

Также необходимо определить длину трубопровода ($l_{тр}$), который обвивает приборный отсек. Для этого надо взять из технического задания значения диаметра приборного отсека ($d_{по}$) и задаться оптимальным числом витков, которыми обвиваются приборы (n).

$$l_{тр} = d_{по} \cdot n, (м)$$

По полученным значениям можно вычислить температуру на входе в АХМ и после этого для данных значений подобрать (Таблица 1) предельный углеводород, который бы с некоторым запасом попадал в требуемый для стока АХМ температурный диапазон.

Таблица 1

Физические свойства предельных углеводородов [10].

Название	Формула	$t_{пл}, ^\circ C$	$t_{кип}, ^\circ C$	$\Delta H, кДж/кг$
Метан	CH ₄	-182,5	-161,5	0,4150 (при -164 °С)
Этан	C ₂ H ₆	-182,8	-88,6	0,5610 (при -100 °С)

Пропан	C3H8	-187,7	-42	0,5853 (при -44,5 °С)
Бутан	C4H10	-138,3	-0,5	0,6000 (при 0°С)
Пентан	C5H12	-129,7	+36,1	0,6262
Гексан	C6H14	-95,3	68,7	0,6594
Гептан	C7H16	-90,6	98,4	0,6838
Октан	C8H18	-56,8	124,7	0,7025
Нонан	C9H20	-53,7	150,8	0,7176
Декан	C10H22	-29,6	174,0	0,7300
Пентадекан	C15H32	+10	270,6	0,7683
Эйкозан	C20H42	36,8	342,7	0,7780 (при 37 °С)
Пентакозан	C25H52	53,7	400	0,8012
Триаконтан	C30H62	66,1	457	0,8097

Выбираем шарик парафина, а именно его размеры:

$d_{ш.пар}$ – диаметр шарика;

$m_{ш.пар}$ – масса шарика.

После подбора парафина мы можем найти теплоту, приходящуюся на один шарик.

Она будет равна:

$$Q_{ш.} = c_p \cdot m \cdot (t_{пл} - t_{нач}) + \Delta H, \left(\frac{кДж}{кг} \right),$$

где

$t_{пл}$ – температура плавления шариков, °С;

$t_{нач}$ – начальная температура шариков, °С;

ΔH — энтальпия фазового перехода, которая равна удельной теплоте фазового перехода при $p = \text{const}$.

Исходя из полученной теплоты, приходящейся на шарик, мы можем найти общее количество шаров, которые необходимы для понижения температуры в АХМ. Расчетная схема АТ для определения числа шаров приведена на рис. 5.

$$Z_{нар.} = \frac{Q_{АХМ}}{Q_{иш}}, (\text{штук})$$

Тогда масса АТ будет :

$$M_{АТ} = Z_{нар.} \cdot m_{шар}, (\text{кг})$$

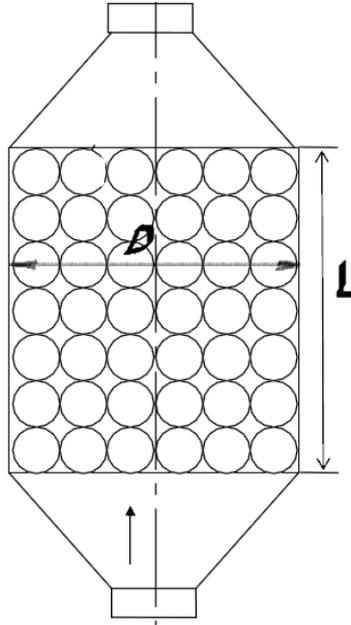


Рис. 5. Расчетная схема АТ для определения числа шаров.

Найдём, сколько шариков уместится в одну линию:

$$K_1 = \frac{D_{АТ}}{d_{ш}}, (\text{штук})$$

тогда длина АТ будет:

$$L_{АТ} = \frac{Z_{нар.}}{K_1} \cdot d_{шар}, (\text{м})$$

Исходя из того, что шары уложены неплотно между собой в ячейках, так как между ними должна протекать ОЖ и отдавать своё тепло, то необходимо задаться расстоянием между шариками парафина. Возьмём

$$\Delta = 0,002 \cdot 40, (\text{м}) ,$$

тогда при пересчёте для числа шаров в одной линии будем иметь:

$$K_1 = \frac{D_{АТ}}{d_{ш} + \Delta}, (\text{штук шаров})$$

длина АТ после пересчета составит

$$L_{AT} = \frac{Z_{нар}}{k_1} \cdot (d_{шар} + \Delta), (М)$$

3 Заключение

При выполнении работы создана методика расчёта аккумулятора теплоты при работе в составе системы поддержания температурного режима точных приборов с использованием автономной холодильной машины.

Выполнен обзор экспериментальных и численных исследований по конструированию аккумуляторов фазового перехода капсульного типа. Приведены сравнительные характеристики материалов, заполняющих АФП и выявлены основные достоинства и недостатки каждого из них. Это помогло подобрать состав теплоаккумулирующего материала и определить геометрические параметры конструкции аккумулятора фазового перехода.

Полученная система отличается малыми габаритами и простотой конструкции по сравнению с системами с теплоемкими термоаккумулирующими материалами и системами без холодильных машин.

Список литературы

1. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. М., Мир, 1987. Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/602994/> (дата обращения: 26.02.2013г).
2. Левенберг В.Д., Ткач М.Р, Гольстрем В.А. Аккумулирование тепла. - К.: «Тэхника», 1991. 112 с.
3. Справочник химика/Под ред. Никольского Б.П. -Л.: 1967. 622 с. Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/70702/> (дата обращения: 26.02.2013г).
4. Россихин Н.А. «Методические указания по проектированию аккумуляторов теплоты на фазовых переходах (капсульного типа)», кафедра Э-6, «Теплофизика», 2007г. 33с.
5. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. - М.: "Высшая школа", 1985. 480 с. Режим доступа: <http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:54255/Source:default> (дата обращения: 26.02.2013г).
6. Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана. - Рига: Звайзгне, 1970. 232 с.
7. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. - М.Л.: Госэнергоиздат, 1961. 521 с. Режим доступа: <http://theorphysics.info/load/17-1-0-151> (дата обращения: 26.02.2013г).

8. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. - М.: Энергоатомиздат, 1990. -368 с. Режим доступа:
 1. <http://biblioal.ru/kutateladze-teploperedacha-i-gidrodinamicheskoe-soprotivlenie.php> (дата обращения:26.02.2013г).
9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/Под ред. Штейнберга М.О. - М., «Машиностроение», 1992. – 672 с. Режим доступа: <http://www.chipmaker.ru/files/file/3342/> (дата обращения: 26.02.2013г).
10. Предельные, или насыщенные, углеводороды ряда метана (алканы, или парафины). Электронный справочник по химии. Режим доступа: <http://www.chemistry.narod.ru/razdeli/Organic/alkans.htm> (дата обращения: 26.02.2013г).
11. Аккумулятор тепла: Патент 2436020 РФ/ А.Л.Наумов, С.В.Серов, В.В.Ефремов, Н.С.Дегтярев. Заявл.08.07.2010; опубл.10.12.2011. Бюлл.№34.
12. Сорокина Д.Н. Разработка и исследование специальной теплозащитной одежды с теплоаккумулирующим материалом: Дис. на соискание ученой степени канд.тех.наук. Шахты, 2012. 102с.
13. Диденко В.Н. О расчете фазовых переходов капсулированных теплоаккумулирующих материалов: УДК а621.1.01. //Промышленная энергетика. - 2011. - № 12. - С. 14-17.
14. Бринк И.Ю. Исследование свойств теплоаккумулирующих материалов для разработки специальной теплозащитной одежды: УДК а687 // Швейная промышленность. - 2011. - N 3. - С. 32-34.