

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Довыденко Е.А.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Институт неразрушающего контроля
Томск, Россия*

CALCULATION OF ELECTRONIC EQUIPMENT THERMOSTATTING SMALL SPACECRAFT

Dovydenko EA

*National Research Tomsk Polytechnic University
Institute of NDT
Tomsk, Russia*

Вопросы охлаждения электроники в космосе возникают у ученых постоянно. С 60-х годов для этого начали применять эффект Пельтье. Элементы радиоэлектронной аппаратуры лучше работают при низких температурах. Но на борту космического аппарата могут находиться устройства, не допускающие сравнительно, большого охлаждения. Для выхода из данной ситуации и используют эффект Пельтье. Во всем гермоотсеке поддерживаются сравнительно высокие значения температур, а элементы, требующие низкие температуры для своей работы, дополнительно охлаждаются с помощью этого эффекта.

С дальнейшим развитием космической техники, ученые стали задумываться о минитюаризация размеров деталей и минимизации веса космических аппаратов.

В 1944 г. американцу Р.С. Гауглеру выдали патент на устройство для отвода тепла, получившее в последнее время название тепловой трубы. Идея, положенная в ее основу, настолько же проста, насколько оригинальна. Труба состоит из корпуса, на внутренней стороне которого располагаются продольные (или другие) микроканалы (капиллярная структура), с рабочим телом внутри трубы. Если один конец этого устройства нагревать, то жидкость может, разумеется, превращаться в пар, который заполнит трубу. Если же другой ее конец при этом охлаждать, то пар будет на нем конденсироваться, и капельки жидкости под действием капиллярного напора будут двигаться по микроканалам к нагреваемому концу, где вновь происходит нагрев, испарение и т.д. Этот процесс непрерывный и сопровождается переносом тепла от горячего к холодному концу трубы.

Объект охлаждения

В качестве объекта охлаждения выбирается электронная аппаратура, размещенная на малых космических аппаратах класса микро и наноспутников. Микроспутником (рис. 1) считается космический аппарат с массой от 10 до 100 кг. Благодаря современному уровню развития науки и техники на спутнике такого класса можно устанавливать практически все присущие большому КА бортовые системы: ориентации (пассивная и активная), электропитания, определения положения, радиосвязи, а также бортовой вычислительный комплекс. Безусловно, микроспутник несет полезную нагрузку, связанную с определенным классом решаемых задач широкого спектра: связь (в том числе радиоловительская), дистанционное зондирование Земли, фотосъемка, научные исследования, технологические и другие эксперименты (в том числе в образовательных целях) и др.

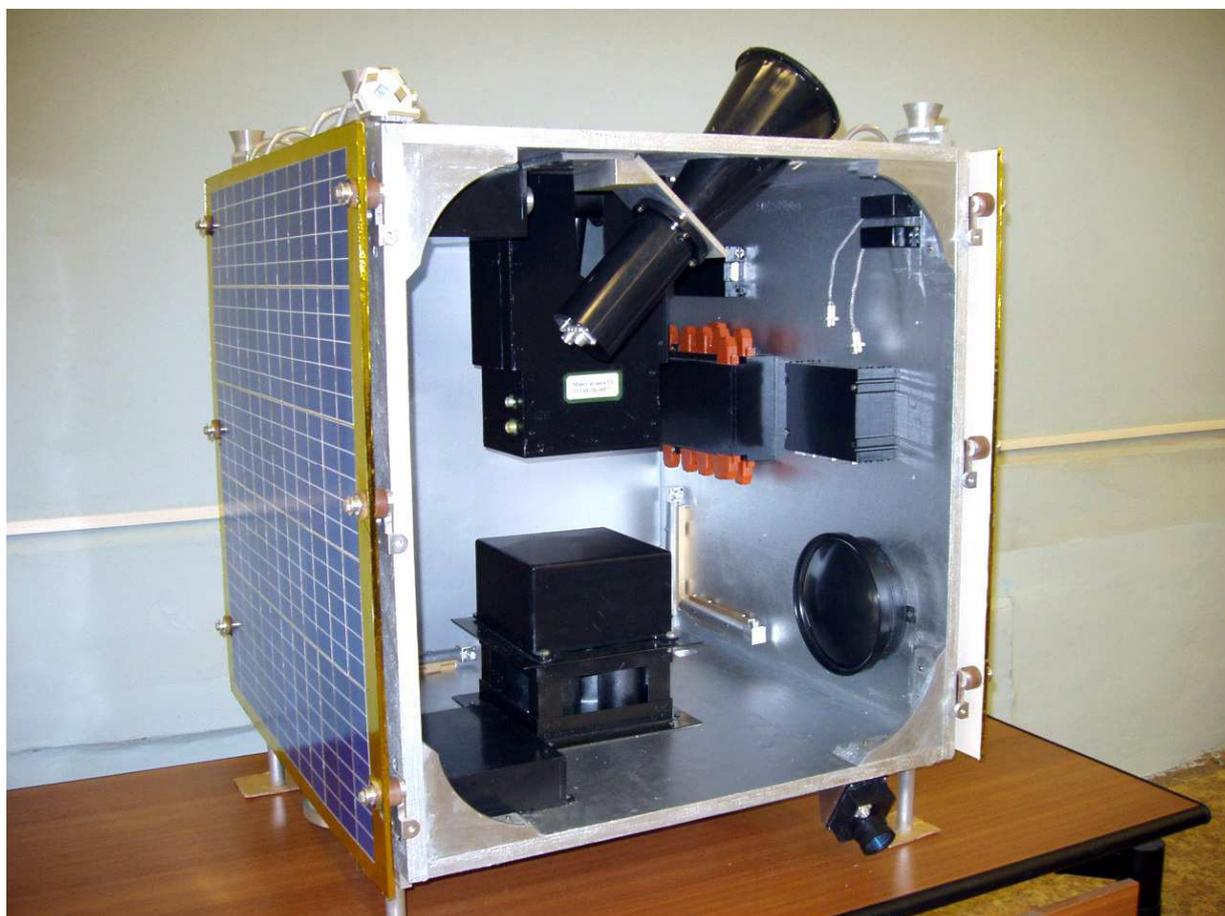


Рис. 1. Микроспутник

Также применение охлаждения с помощью тепловых трубок возможно и в наноспутниках. Наноспутники (рис. 2) имеют массу от 1 кг до 10 кг. Часто проектируются для работы в группе, некоторые группы требуют наличия более крупного спутника для связи с Землей.

Современные наноспутники отличаются относительно большой функциональностью, несмотря на свой малый размер. Их область применения широка — от попыток дистанционного зондирования Земли до космических наблюдений:

- Отработка новейших технологий, методов и программно-аппаратных решений;
- Образовательные программы;
- Экологический мониторинг;
- Исследования геофизических полей;
- Астрономические наблюдения.

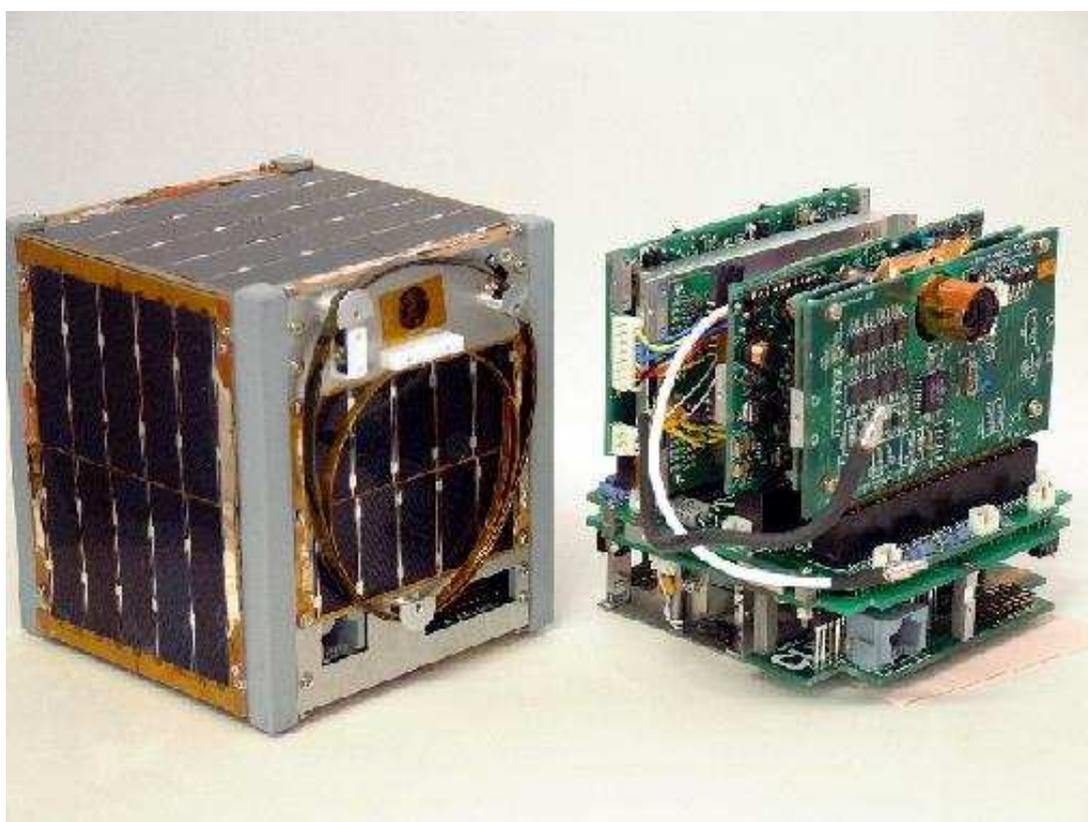


Рис. 2. Наноспутник

Объектом для охлаждения был выбран одноплатный компьютер Raspberry Pi (рис. 3).

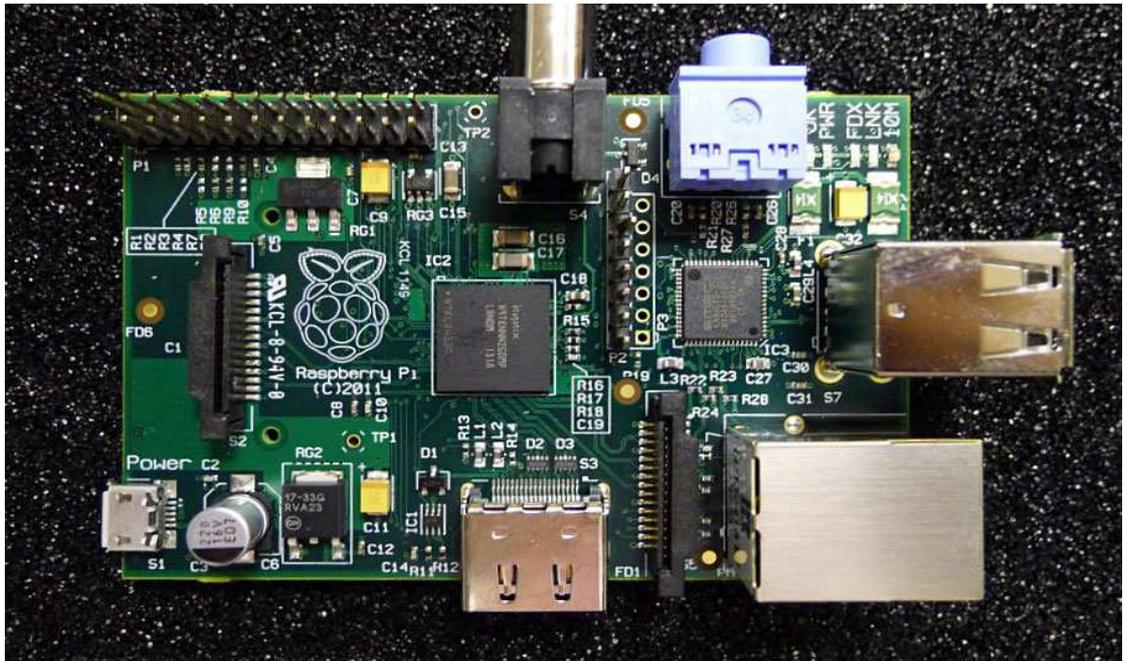


Рис. 3. Внешний вид Raspberry Pi

Компьютер распространяется полностью собранным на четырёхслойной печатной плате размером с банковскую карту.

Экспериментальное определение теплового поля компьютера

Компьютер подключили к питанию и совершали некоторые операции, чтобы получить рабочую температуру данного компьютера. Доведя температуру до определенного состояния, с помощью инфракрасного пирометра CONDROLIR-T2 измерили ее в нескольких местах и получили следующую картину(рис. 4).

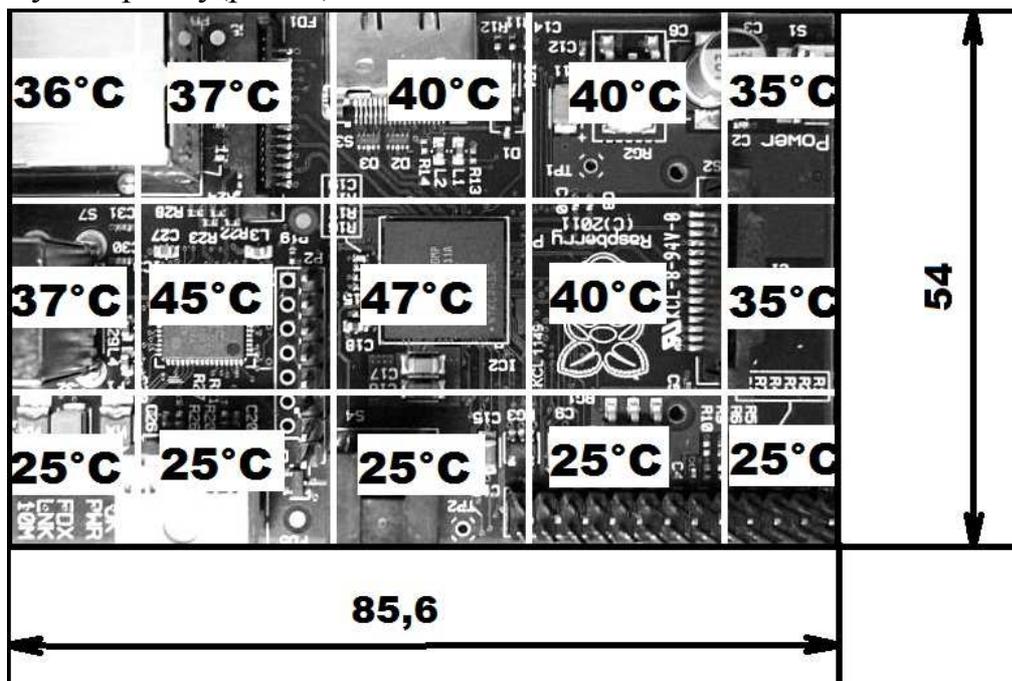


Рис. 4. Сетка распределения температур

Температура нагрева колеблется в диапазоне температур 25-47 °С. Наибольшие температуры наблюдаются в 4 зонах. Именно для охлаждения этих зон и нужно будет спроектировать контурные тепловые трубы.

Расчет тепловых труб

Расчет лучше начать с выбора теплоносителя и материала. Выбранная труба работает при температуре 423 К (температура в космосе на солнечной стороне), подходящими теплоносителями являются метан и метиловый спирт (рис.5). Но из графиков на рис. 6 и рис. 7 видно, что метиловый спирт в жидкой фазе обладает лучшими теплопроводностью и другими свойствами переноса. Таким образом, останавливаем выбор на метиловом спирте как теплоносителе тепловой трубы. Из таблицы 1 находим, что такие материалы, как медь, никель и алюминий, совместимы с водой, а из рис. 8 видно, что у меди теплопроводность выше при 423 К.

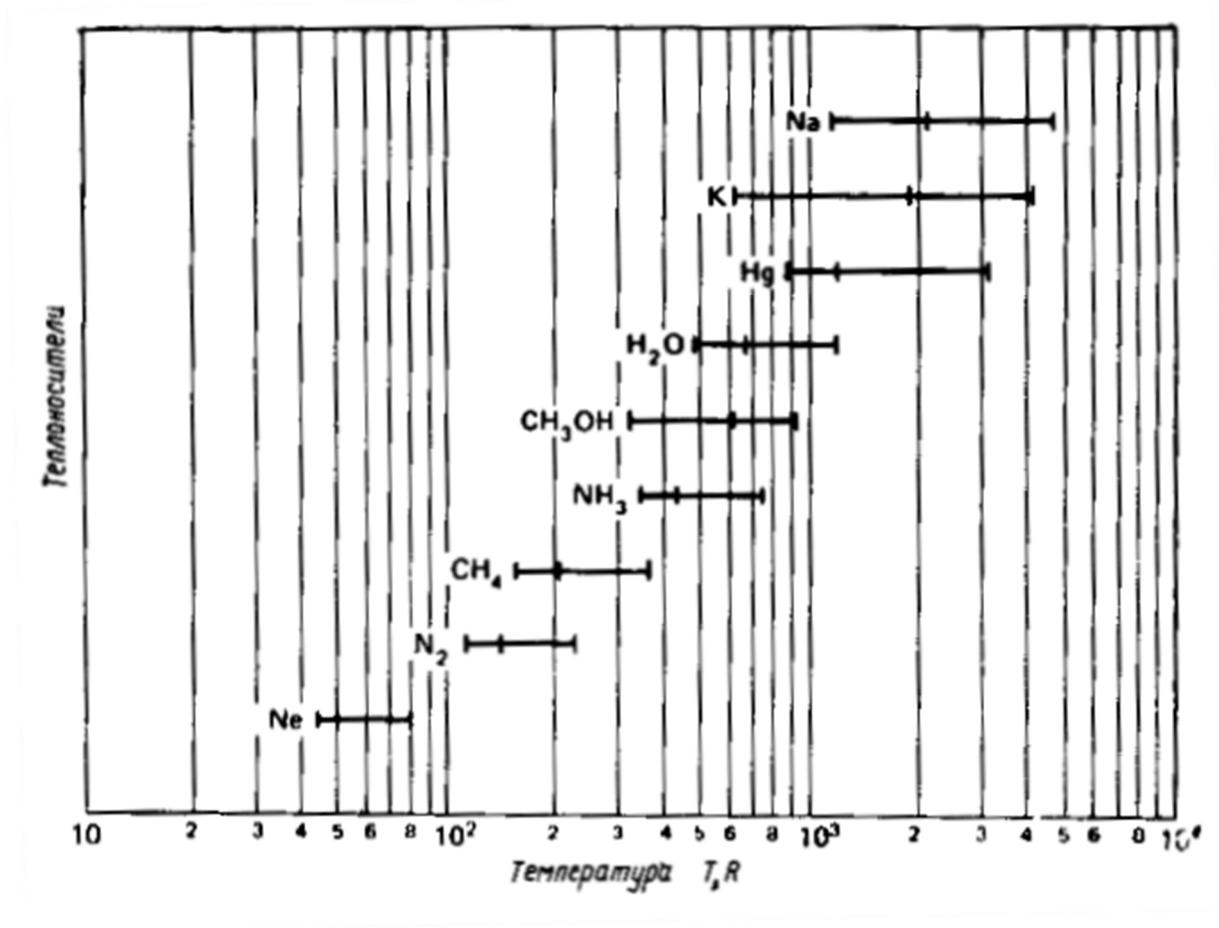


Рис. 5. Температура нормальной точки плавления, кипения и критических точек для нескольких теплоносителей тепловых труб ($1R=0,5556$ К)

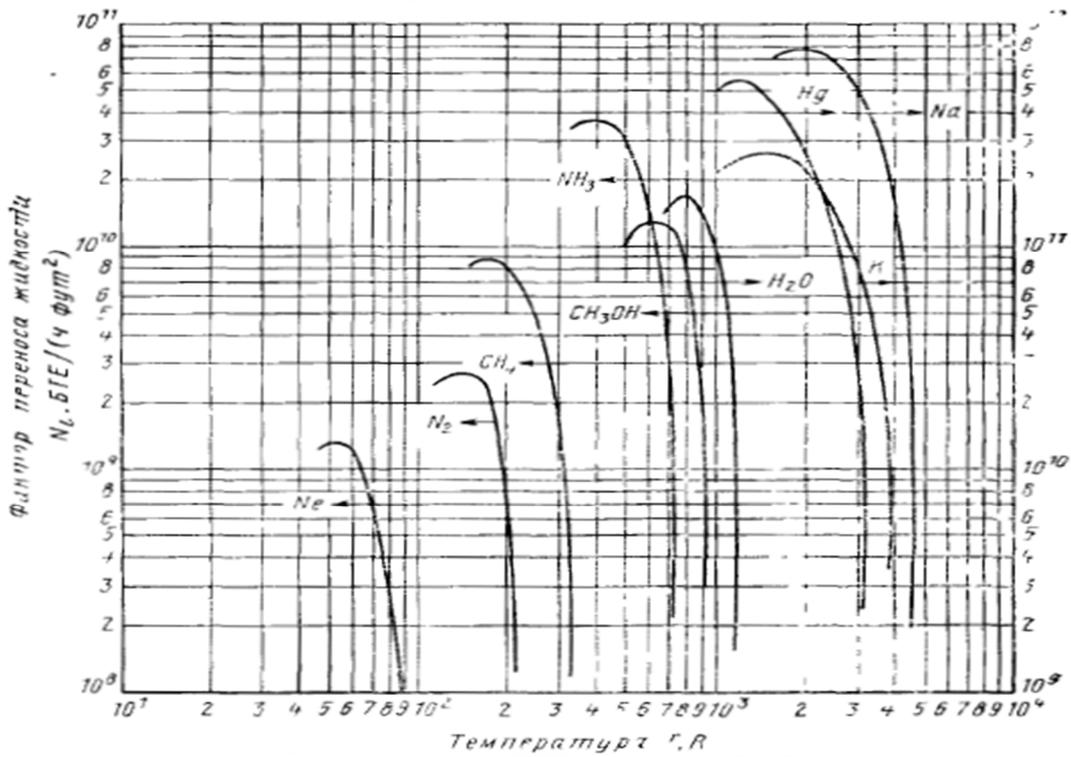


Рис.6. Зависимость фактора переноса жидкости от температуры

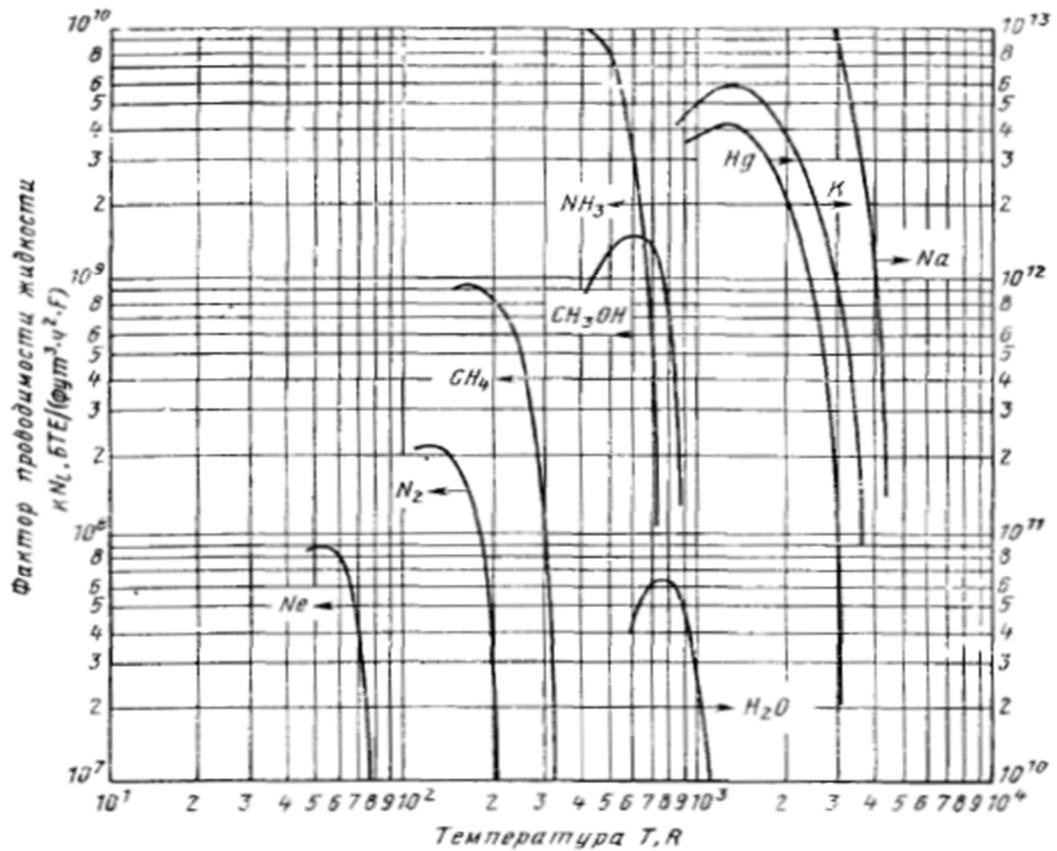


Рис.7. Зависимость фактора проводимости жидкости от температуры для нескольких теплоносителей тепловых труб

Таблица 1

Совместимость материалов теплоноситель — металл

Рабочее тело	Металлы					
	Al	Cu	Fe	Ni	SS* 304	Ti
Азот	C**	C	C	C	C	
Метан	C	C			C	
Аммиак	C		C	C	C	
Метанол	H	C	C	C	C	
Вода	H	C		C	C***	C
Калий				C		H
Натрий				C	C	H

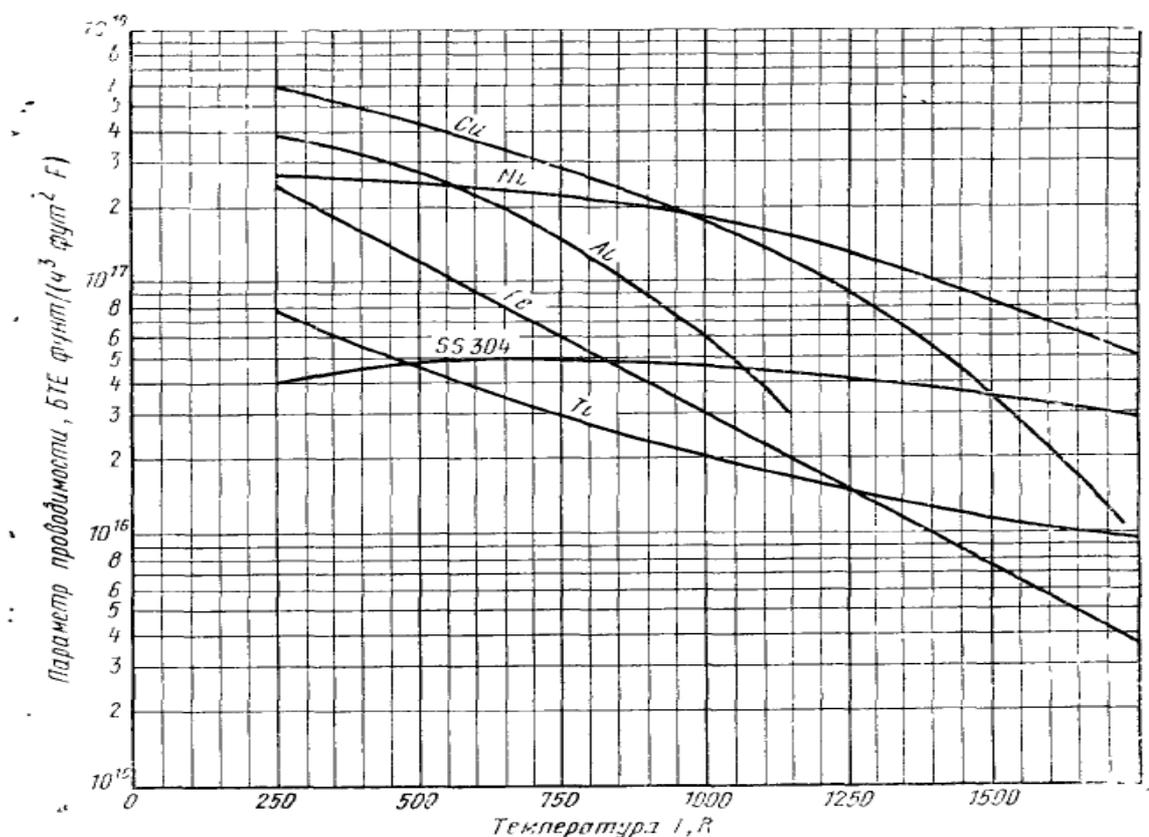


Рис. 8. Зависимость параметра проводимости от температуры для нескольких материалов тепловых труб

По рис. 9 находим, что при числе Маха, равном 0,2, осевой тепловой поток в тепловой трубе диаметром 4 мм с метиловым спиртом в качестве теплоносителя составляет $0,6 \cdot 10^4$ Вт. Таким образом, сжимаемостью при расчетных значениях теплового потока 6 Вт можно пренебречь.

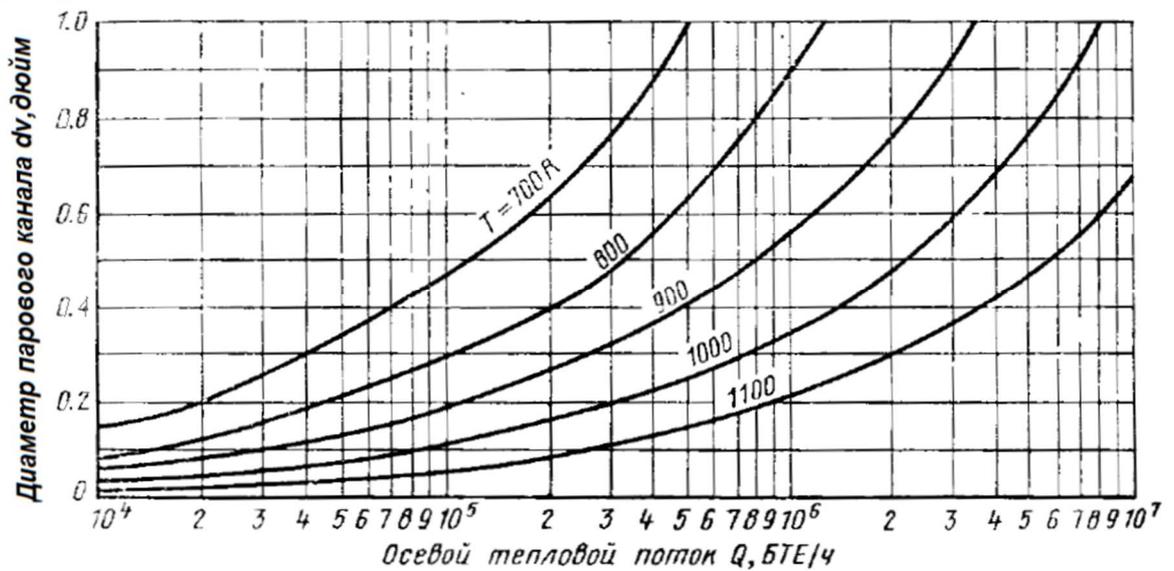


Рис.9. Зависимость диаметра парового канала от передаваемого теплового потока при числе Маха парового потока, равном 0,2

Размеры корпуса тепловой трубы теперь могут быть определены следующим образом. При 423 К давление пара составляет $1,72 \text{ Н/м}^2$ (рис.13), а предельное напряжение на разрыв для меди равно $1,24 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ (рис. 10, 11, 12).

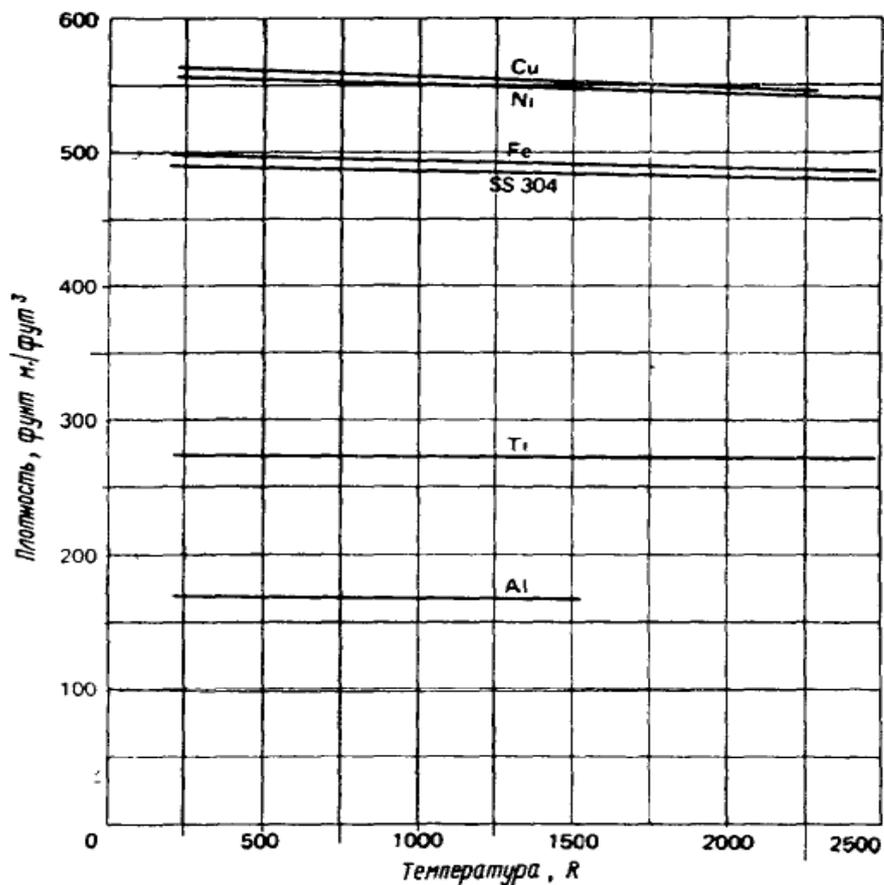


Рис.10. Плотность нескольких твердых материалов.

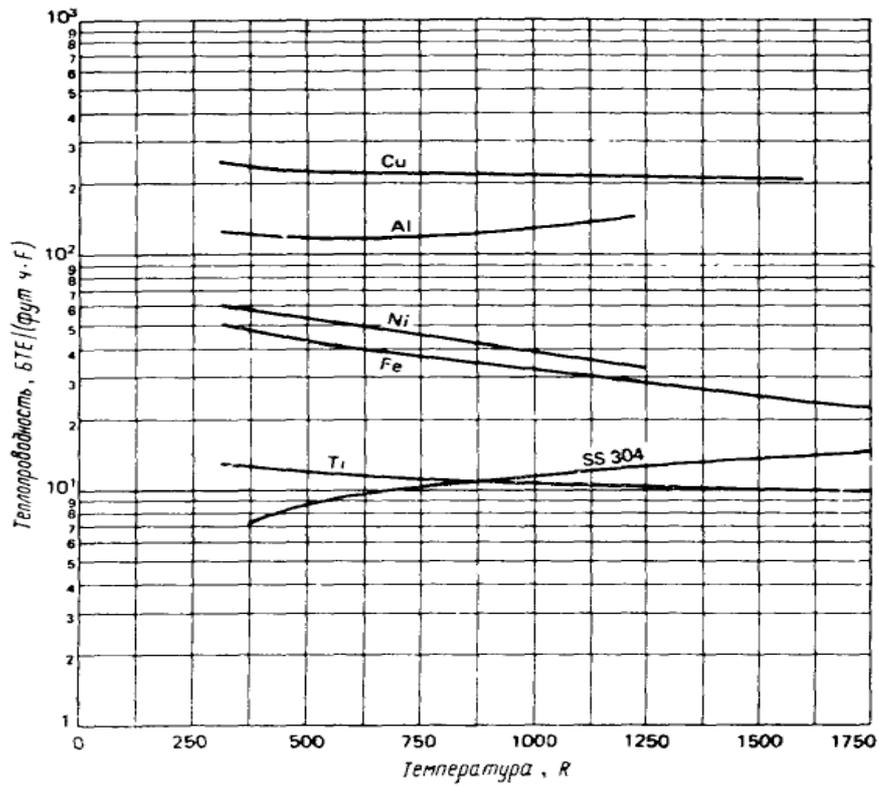


Рис.11. теплопроводность нескольких твердых материалов.

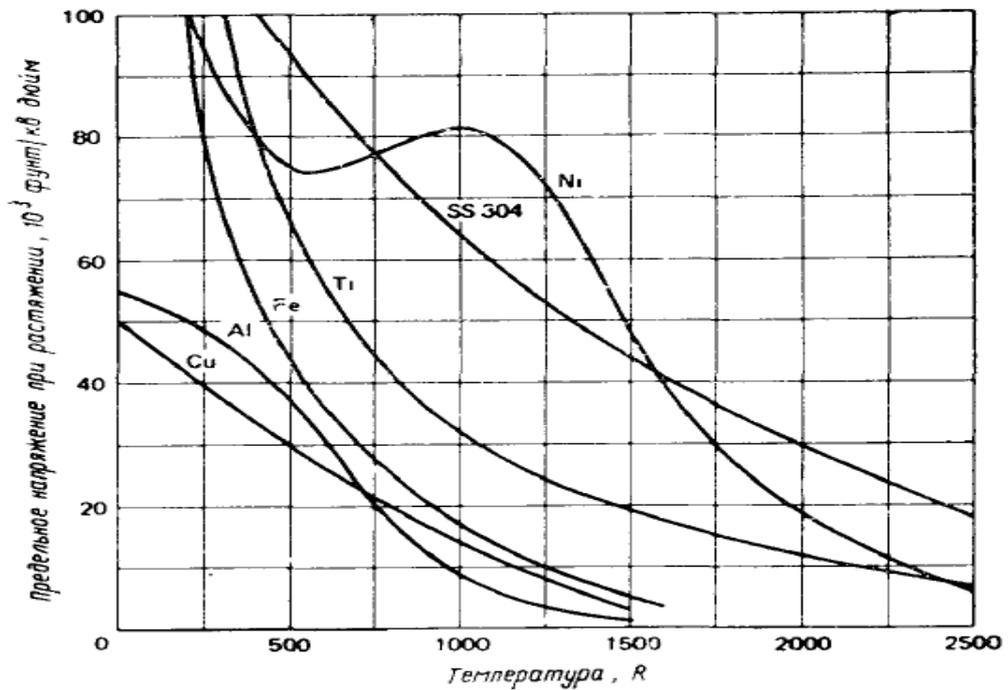


Рис.12. Предельное напряжение при растяжении нескольких твердых материалов

Из рис. 18 находим, что при внешнем диаметре трубы 4 мм и толщине стенки $0,26 \cdot 10^{-3}$ м отношение d_0/d_1 равно 1,15 и d_1 равно $3,48 \cdot 10^{-3}$ м. Такая труба окончательно выбирается в качестве корпуса тепловой трубы. При $P_1 =$

$1,72 \cdot 10^6$ Н/м² и предельном напряжении на разрыв, равном $1,24 \cdot 10^8$ Н/м², отношение толщины стенки к диаметру концевой крышки по рис. 19 равно 0,08. Следовательно, требуемая толщина стенки равна $1,52 \cdot 10^{-3}$ м.

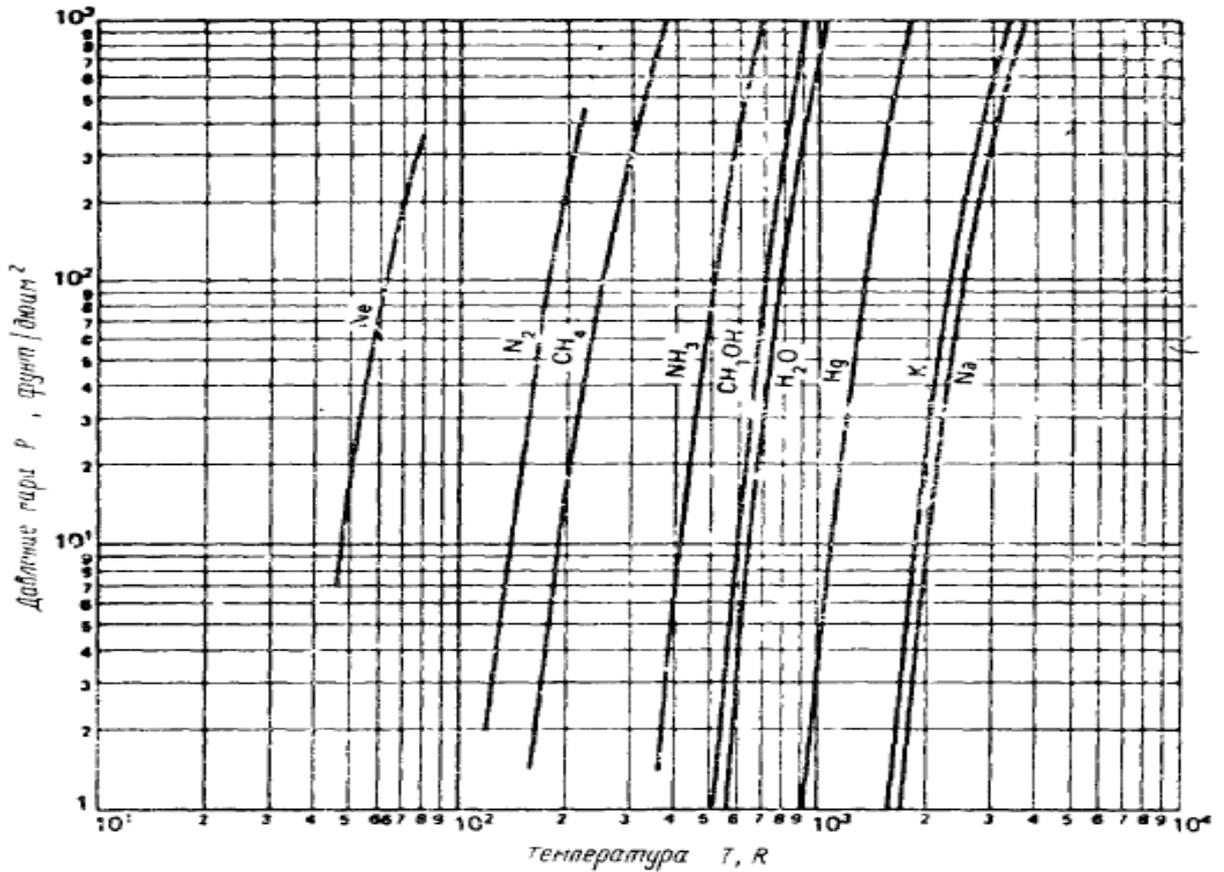


Рис. 13. Зависимость давления пара от температуры для нескольких теплоносителей, применяемых в тепловых трубах

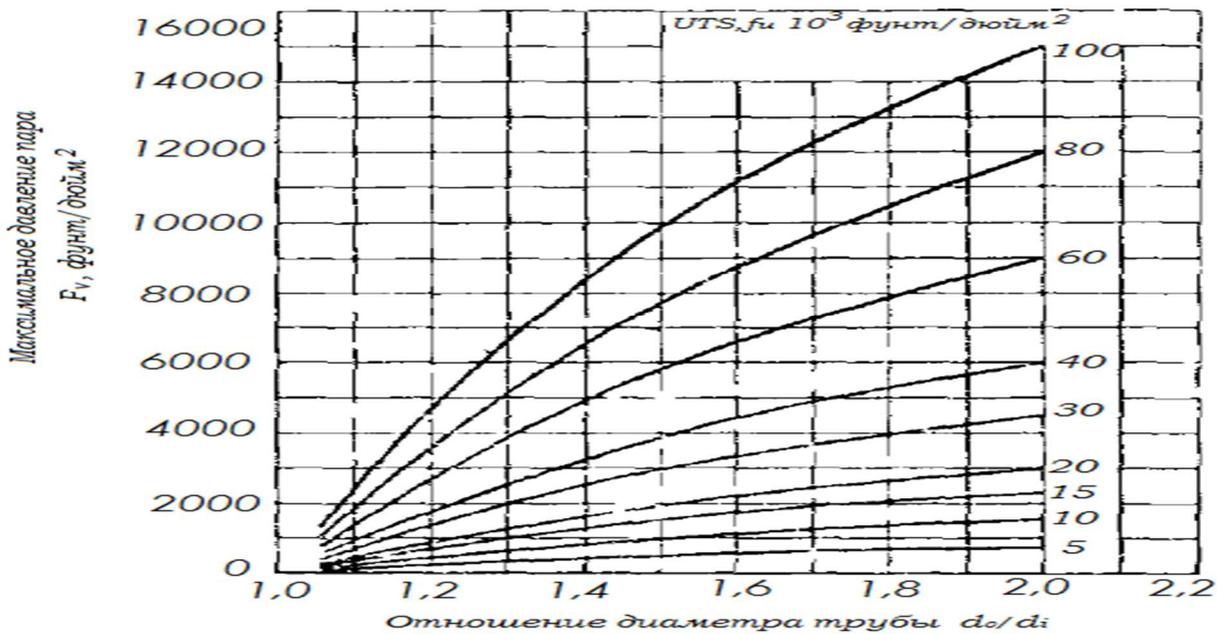


Рис. 14. Расчетный график для выбора труб в качестве корпуса тепловых труб

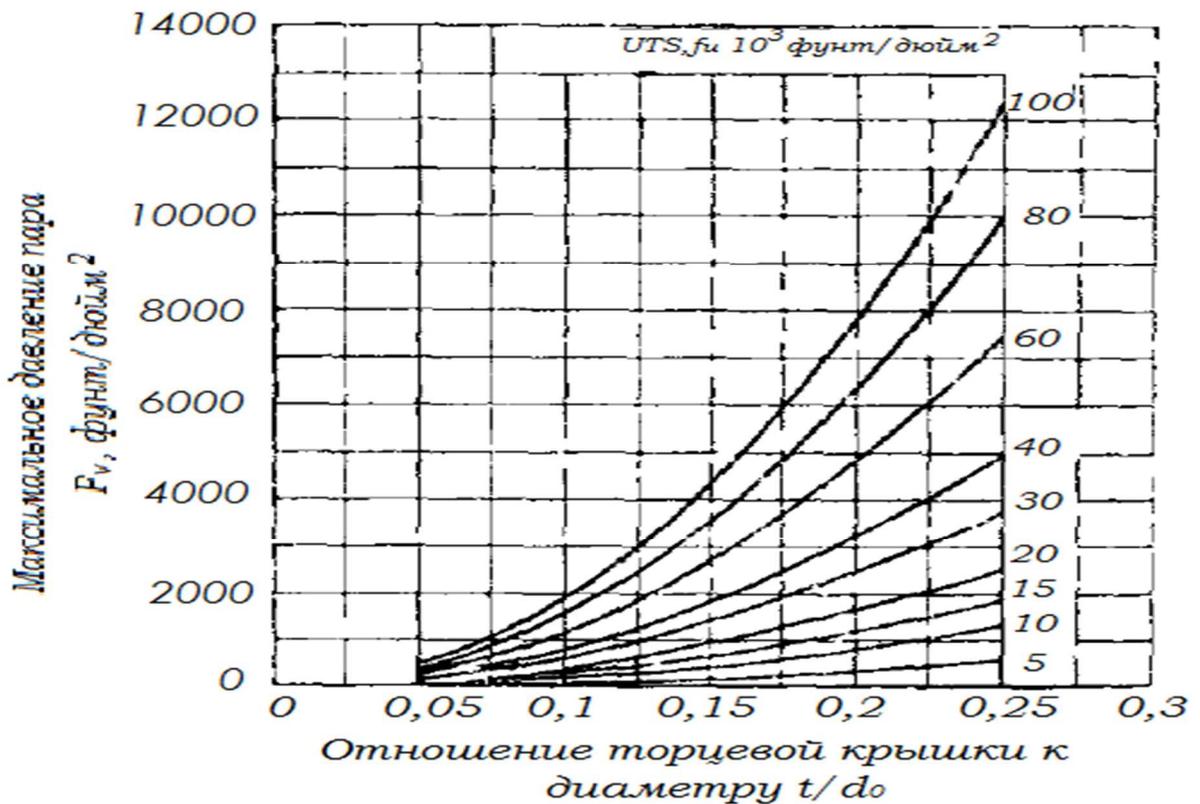


Рис. 15. Расчетный график для определения толщины торцевых крышек тепловых труб

После сделанного выбора размеров корпуса тепловой трубы можно определить размеры фитиля. Труба имеет наклон, при котором испаритель на $7,62 \cdot 10^{-2}$ м выше конденсатора, общая длина ее равна 0,3 м, а $d_1 = 3,48 \cdot 10^{-3}$ м. Необходимо преодолеть гидростатическую высоту $h_r = 9,3 \cdot 10^{-2}$ м. Так как гидростатическое давление 1м метана при 423 К равно $2,68 \cdot 10^3$ Н/м² (рис. 16), общее гидростатическое давление, которое требуется преодолеть, составляет $8,14 \cdot 10^2$ Н/м². Теперь можно выбрать фитиль из сетки с помощью рис. 19 из такого расчета, чтобы максимальное капиллярное давление было примерно в два раза больше $8,14 \cdot 10^2$ Н/м². Этому условию удовлетворяет проволочная сетка с размером ячеек 250 меш ($9,84 \cdot 10^3$ м⁻¹) с P_4 м, равным $1,53 \cdot 10^3$ Н/м². Теперь можно определить необходимую толщину фитиля следующим образом:

$$(QL)_{c \max} = \frac{P_{ст} - \Delta P_1 - \rho * g * L_t * \sin \varphi}{F_l + F_g} \quad [1]$$

Значение $(P_{ст} - \Delta P_1 - \rho * g * L_t * \sin \varphi)$ для данного случая равно $7,18 \cdot 10^2$ Н/м². Значение F_g для воды при $d_1 = 1,27 \cdot 10^{-2}$ м. и $T_g = 478$ К равно $2,2 \cdot 10^{-3}$ (Н/м²)/(Вт·м) из рис. 20. Значение $F_l A_\omega$ равно $2,29 \cdot 10^{-3}$ Н/(Вт·м). Принимая d_ω равным $1,27 \cdot 10^{-3}$ м, находим, что $A_\omega = 8,87 \cdot 10^{-5}$ м². Тогда $F_l = F_l A_\omega / A_\omega = 25,9 \left(\frac{Н}{м^2} \right) / (Вт \cdot м)$. Подставив найденные значения в уравнение,

найдем, что $(QL)_{с max} = 27,8 \text{ Вт} \cdot \text{м}$. Требуемое значение для рассматриваемой конструкции равно $17,9 \text{ Вт} \cdot \text{м}$, т.е.
 $(QL) = 0,5(L_e + L_c)Q = 17,9 \text{ (Вт} \cdot \text{м)}$.
 Следовательно, принятое значение $d_{п}=1,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ подходит для рассматриваемой конструкции трубы.

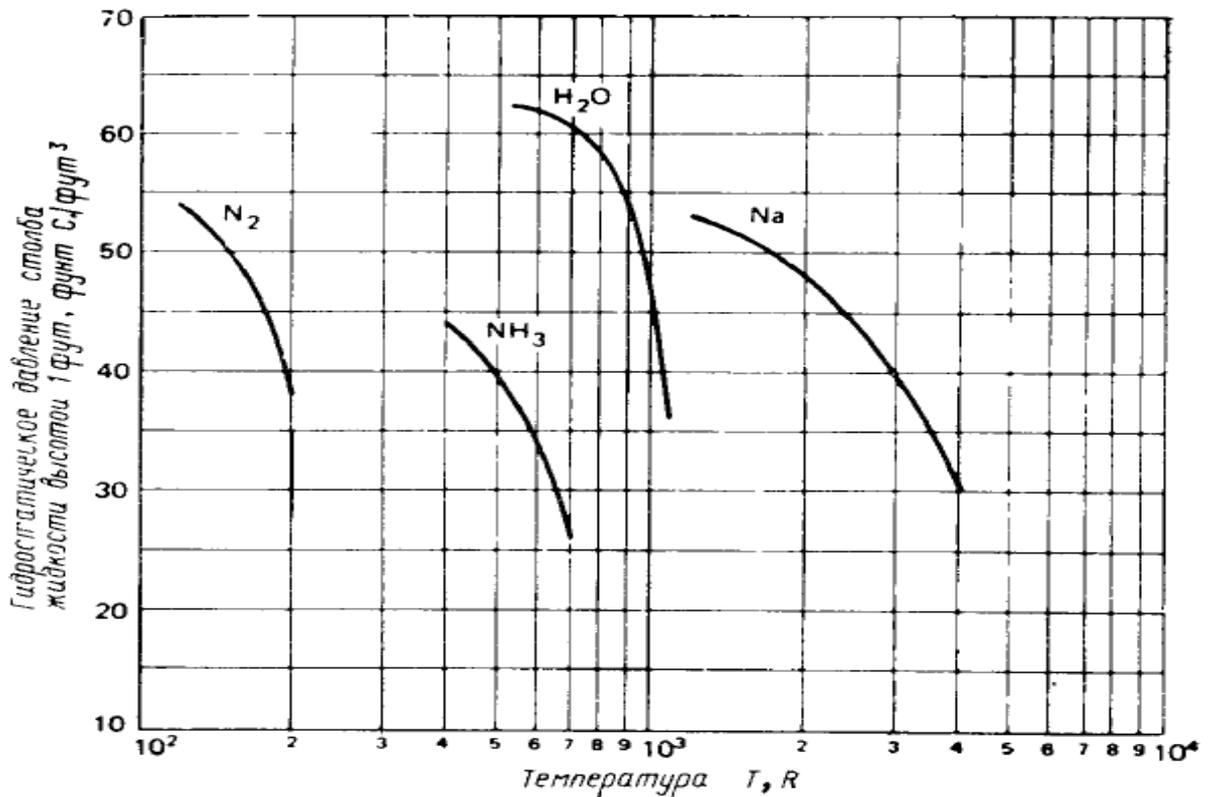


Рис. 16. Зависимость гидростатического давления столба жидкости единичной высоты от температуры в стандартном поле тяготения

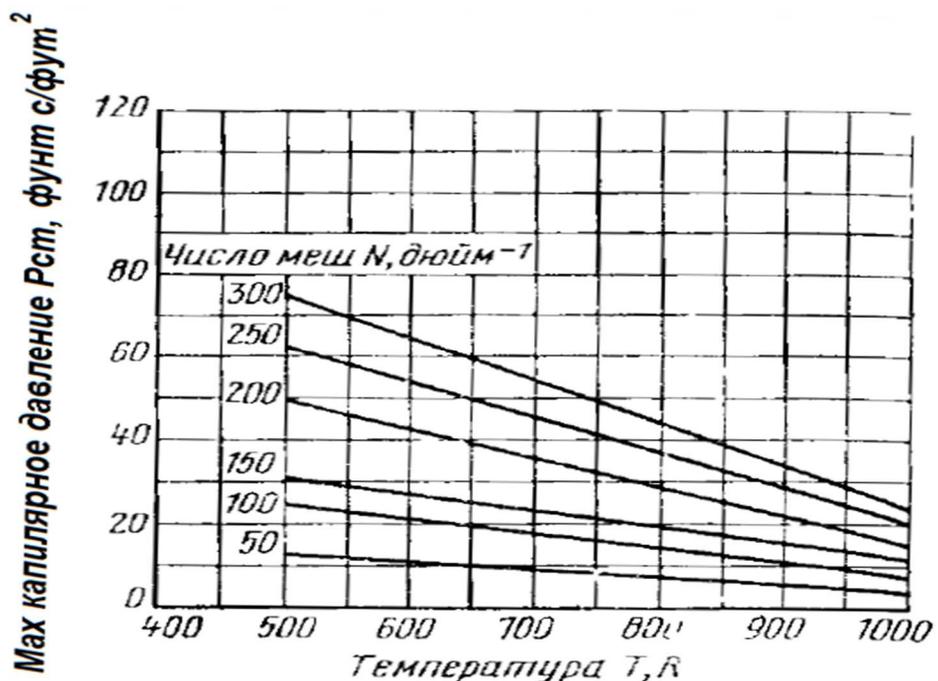


Рис. 17. Максимальное капиллярное давление в сеточных фитилях

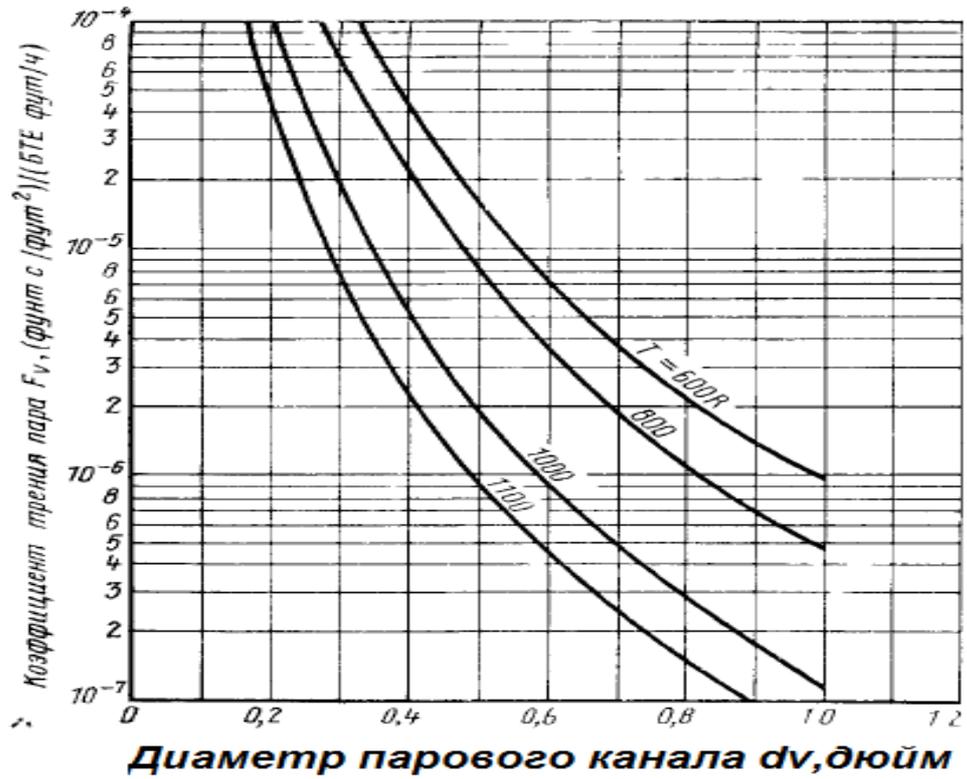


Рис. 18. Коэффициент трения пара при течении пара в круглых труба

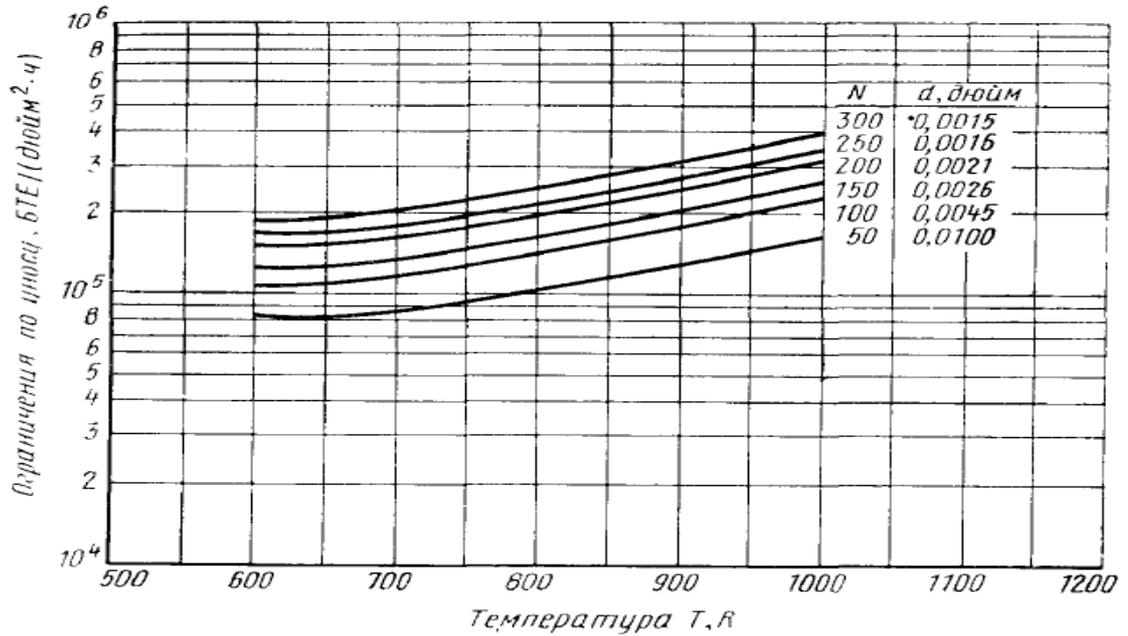


Рис. 19. Ограничение по уносу жидкости на плотность теплового потока в осевом направлении $[1 \text{ БТЕ}/(\text{дюйм}^2 \cdot \text{ч}) = 454 \text{ Вт}/\text{м}^2]$

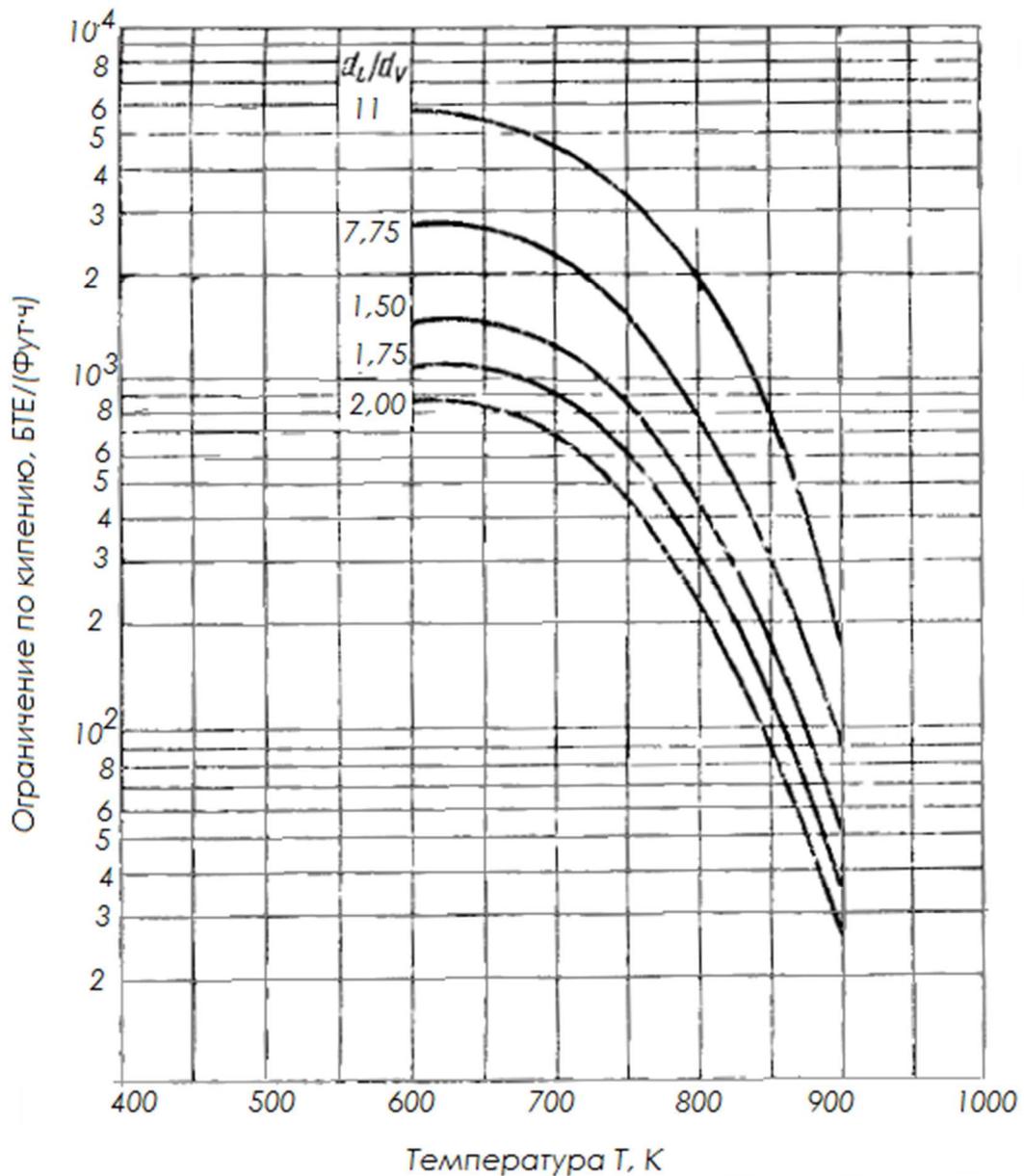


Рис. 20. Ограничение по кипению теплоносителя, накладываемые на тепловой поток на единицу длины испарителя, [1 БТЕ/(фут*ч)= 0,961 Вт/м]

В итоге мы рассчитали тепловую трубу со следующими характеристиками:

Теплоноситель	CH ₃ OH;
Материал корпуса	медь;
Материал фитиля	медь;
Наружный диаметр корпуса	$4 \cdot 10^{-3}$ м;
Внутренний диаметр корпуса	$3,48 \cdot 10^{-3}$ м;
Диаметр парового канала	$1,27 \cdot 10^{-3}$ м;
Толщина торцевой крышки	$1,52 \cdot 10^{-3}$ м;
Ячеистость сетки фитиля	$9,84 \cdot 10^{-3}$ м ⁻¹ ;
Диаметр проволоки фитиля	$4,06 \cdot 10^{-5}$ м;
Толщина фитиля из свернутой сетки	$0,8 \cdot 10^{-3}$ м (10 слоев).

Для проверки ограничений по уносу и по кипению теплоносителя для данной трубы найдем предельные значения составляют $1,13 \cdot 10^5$ Вт на 1 м^2 поперечного сечения парового канала и 202 Вт на 1 м длины испарителя соответственно (рис. 19 и рис. 20). Таким образом, $Q_{l,\max}$ и $Q_{b,\max}$ для выбранной тепловой трубы равны $1,44 \cdot 10^4$ Вт и 404 Вт соответственно. Оба этих предела превосходят требуемое значение передаваемой тепловой мощности, равное 29,3 Вт. Следовательно, выбранная и рассчитанная выше тепловая труба будет удовлетворять работать при передаваемой тепловой мощности 29,3 Вт и температуре 423 К.

Список использованных источников:

1. «Тепловые трубы: теория и практика». /Чи С., пер. с англ. Сидорова В.Я. – М.: «Машиностроение», 1981г. – 207с.