

А. В. Черноглазова, Б. Е. Байгалиев, С. В. Темникова

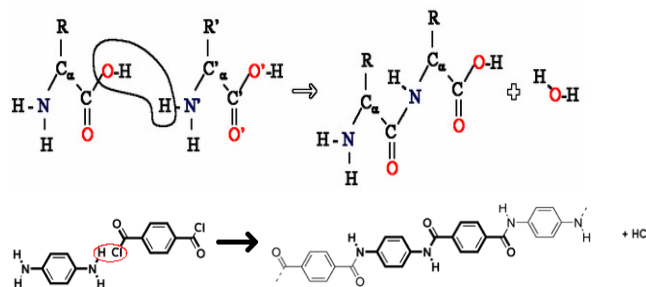
ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ХОЛОДИЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ*Ключевые слова: холодильник, конденсатор, теплопроводность, теплоотдача, полимеры.**Исследуется возможность замены конденсатора холодильника изготовленного из металла на конденсатор изготовленного из полимерного материала.**Keywords: refrigerator, condenser, thermal conductivity, heat transfer, polymers.**The possibility of replacing the capacitor refrigerator manufactured from a metal to a capacitor made of a polymeric material.*

Преимущество полимерных материалов по сравнению с другими материалами обеспечивается их невысокой плотностью, возможностью регулирования свойств путем введения различных модифицирующих добавок (наполнителей, пластификаторов, стабилизаторов и др.), высокими диэлектрическими свойствами, усталостной и химической стойкостью, антифрикционными свойствами и дешевизной исходного сырья.

Полимерные материалы имеют высокую технологичность, поскольку при переработке в готовые изделия отличаются малой операционностью и низкой энергоемкостью: по сравнению с алюминиевыми сплавами - в 5 раз, со сталью - в 3 раза.

Снижение эксплуатационных затрат на антикоррозионную защиту, смазку и замену изношенных деталей делает выбор полимерных материалов экономически наиболее предпочтительным [1-3].

Предметом наших исследований является изготовление конденсатора холодильного агрегата из полимерных материалов. В качестве материала змеевика использовали полимер полиамидной группы. Полимерная трубка кольцевого сечения марки НТР изготовлена из полиэстера марки НУТ-504 и предназначена для транспортирования воздуха, воды и агрессивных сред к которым полиэстер технически устойчив. Материал трубки рассчитан на применение при температуре окружающей среды от минус 40°С до +100°С, при статическом положении до минус 60°С. Труба соответствует DIN 74324-1 и ГОСТ Р 51190-98 и сертифицирована на соответствие ГОСТ Р 51190-98. Предприятие-изготовитель: «ZEC S.p.A.» - Италия Strada Lungolomo, 11 4305 Colomo (Parma) - Italy Поставщик: «Aircrafter» - Россия. Отечественный аналог данной трубки является полиамидная трубка производства фирмы Технокам. Диапазон рабочих температур от -50 до +120°С. При повышении температуры понижается рабочее давление. Максимальное рабочее давление для трубки 8*1=8МПа. Минимальный радиус изгиба 30 мм. Трубы из полиамида имеют очень хорошую стойкость к воздействию к солям, щелочам, озона, масел, топлив, УФ лучам. Цена за 50 метров составляет 10,28 рублей.



При замене конденсатора изготовленного из металла на конденсатор из полимерного материала были изучены следующие вопросы:

- сопротивление течения хладагента по трубам (по металлическим и полимерным);
- повышение коэффициента теплоотдачи с целью уменьшения длины конденсатора;
- оценка энергозатрат при течении хладагента по металлическим трубам и полимерным;
- ресурс конденсатора при замене металла на полимерный материал.

Рассмотрим сопротивление течения теплоносителя по металлическим трубам и полимерным трубам. Согласно данным работы [4] коэффициент трения при течении по металлическим трубам λ равен 0,0525, а коэффициент трения при течении по полимерным трубам λ равен 0,0257.

Таким образом, при течении хладагента по каналу конденсатора потери напора в стальных трубах больше, чем в пластмассовых.

$$\frac{h_{ДС}}{h_{ДП}} = \frac{\lambda_c}{\lambda_n} = \frac{0.0525}{0.0257} = 2.04,$$

Это позволяет сделать вывод, что можно сократить длину труб конденсатора из полимеров в 2.04 раза по сравнению с длиной труб из металла. Следовательно, при прочих равных условиях (коэффициент теплопроводности металла и полимера) длину труб конденсатора можно сократить длину труб конденсатора из полимеров в 2.04 раза по сравнению с длиной труб из металла.

Однако, коэффициент теплопроводности полимеров (0,1-0,3 Вт/(м·К)), значительно меньше чем у металлов (57-400 Вт/(м·К)) и следовательно коэффициент теплопередачи в конденсаторе изготовленном из полимерного материала значительно меньше, чем изготовленного из металла. Для обеспечения теплоотвода, такого же, как для металлического, от конденсатора из

полимеров необходимо увеличить длину трубы до 10 метров при длине металлической 8 метров. Увеличение трубы на 2 метра возможно из-за меньшего коэффициента путевых потерь.

1. Средняя (определяющая) температура теплоносителя с заданными концевыми температурами

$$T_{2cp} = (T_2' + T_2'') / 2 = (293,15 + 295,15) / 2 = 294,15K$$

2. Тепловой поток в ТА

$$Q = W_2 (T_2'' - T_2') = 10,01 \cdot (295,15 - 293,15) = 20,02 \text{ Дж} / \text{с}$$

$$W_2 = G_2 \cdot C_{p2} = 0,01 \cdot 1001 = 10,01 \text{ Дж} / \text{К} \cdot \text{с}$$

3. Выходная температура греющего теплоносителя

$$T_1'' = \left(T_1' - \frac{Q}{W_1} \right) = 305,141K$$

$$\text{где } W_1 = G_1 \cdot C_{p1} = 0,0002051 \cdot 1841 = 0,37767 \text{ Дж} / \text{К} \cdot \text{с}.$$

4. Средняя (определяющая) температура греющего теплоносителя

$$t_{1cp} = (T_1' + T_1'') / 2 = 331,64K.$$

5. Плотность греющего теплоносителя

$$\rho_1 = \frac{P_1}{R_1 T_{1cp}} = 6,303 \text{ кг} / \text{м}^3$$

6. Для теплоносителя, движущегося внутри труб, задаем скорость $W_1 = 4,58 \text{ м} / \text{с}$
Найдем расход хладагента.

$$G_1 = p \cdot F \cdot w = 0,0002051 \text{ кг} / \text{с}$$

$$Re = \frac{\rho_1 \cdot W_1 \cdot d_e}{\mu_1} = 10826,58$$

$$Pr_1 = \frac{\mu_1 C_{p1}}{\lambda_1} = 0,8$$

7. Определяют число Нуссельта греющего теплоносителя для соответствующего режима течения Nu_2 .

$$Nu = \frac{(\xi/8) \cdot Re \cdot Pr}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \sqrt{\xi/8} (Pr^{0,66} - 1)} = 35,186$$

8. Коэффициент теплоотдачи от греющего теплоносителя

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_e} = 215,8 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

9. Числа Грасгофа и Прандтля для нагреваемого теплоносителя.

$$Gr = \beta \cdot g \cdot l \cdot \Delta^3 / \nu^2 = 157,71$$

$$Pr_2 = \frac{\mu_2 \cdot C_{p2}}{\lambda_2} = 0,657.$$

10. Определяют число Нуссельта нагреваемого теплоносителя для соответствующего режима течения Nu_2 .

$$Nu = 0,63 \cdot (Gr \cdot PR)^{0,25} = 2,01$$

11. Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемому теплоносителю

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_n} = 14,14 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

12. Коэффициент теплопередачи, отнесенный,

например, к внутренней поверхности труб κ_b .

$$\kappa_b = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_e}{2 \cdot \lambda_w} \ln \frac{d_n}{d_e} + \frac{d_e}{\alpha_2 d_n}} = 10,449 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$$

13. По соответствующим формулам или с помощью графиков определяют средний температурный напор Δt .

$$\frac{\Delta t}{\Delta t} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = 29,37K,$$

$$\text{где } \Delta t' = t_1' - t_2' = 65K; \Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 9,991K.$$

Температуры на внутренней и наружной поверхностях труб (со стороны греющего и нагреваемого теплоносителя)

$$t_{w8} = t_{1cp} - \frac{\kappa_b \Delta t}{\alpha_1} = 330,22K;$$

$$t_{w11} = t_{2cp} + \frac{\kappa_b \Delta t}{\alpha_2} \cdot \frac{d_e}{d_n} = 310,419K.$$

В результате дальнейших приближений вычислили температуры внутренней и наружной поверхности труб.

$$t_{w8} = 328,95K \quad t_{w11} = 310,419K$$

По этой методике рассчитываем конденсатор из полимерных трубок.

1. Средняя (определяющая) температура теплоносителя с заданными концевыми температурами

$$T_{2cp} = (T_2' + T_2'') / 2 = (293,15 + 295,15) / 2 = 294,15K$$

2. Тепловой поток в ТА

$$Q = W_2 (T_2'' - T_2') = 10,01 \cdot (295,15 - 293,15) = 20,02 \text{ Дж} / \text{с}$$

$$W_2 = G_2 \cdot C_{p2} = 0,01 \cdot 1001 = 10,01 \text{ Дж} / \text{К} \cdot \text{с}$$

3. Выходная температура греющего теплоносителя

$$T_1'' = \left(T_1' - \frac{Q}{W_1} \right) = 307,141K$$

$$\text{где } W_1 = G_1 \cdot C_{p1} = 0,0001616 \cdot 1841 = 0,2975 \text{ Дж} / \text{К} \cdot \text{с}.$$

4. Средняя (определяющая) температура греющего теплоносителя

$$t_{1cp} = (T_1' + T_1'') / 2 = 332,64K.$$

5. Плотность греющего теплоносителя

$$\rho_1 = \frac{P_1}{R_1 T_{1cp}} = 6,28 \text{ кг} / \text{м}^3$$

6. Для теплоносителя, движущегося внутри труб, задаем скорость $W_1 = 2,03 \text{ м} / \text{с}$
Найдем расход хладагента.

$$G_1 = p \cdot F \cdot w = 0,0001616 \text{ кг} / \text{с}$$

$$Re = \frac{\rho_1 \cdot W_1 \cdot d_e}{\mu_1} = 6379,58$$

$$Pr_1 = \frac{\mu_1 C_{p1}}{\lambda_1} = 0,8$$

14. Определяют число Нуссельта греющего теплоносителя для соответствующего режима течения Nu_2 .

$$Nu = \frac{(\xi/8) \cdot Re \cdot Pr}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \sqrt{\xi/8} (Pr^{0,66} - 1)} = 22,99$$

15. Коэффициент теплоотдачи от греющего теплоносителя

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_g} = 105,75 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \cdot$$

16. Числа Грасгофа и Прандтля для нагреваемого теплоносителя.

$$Gr = \beta \cdot g \cdot l \cdot \Delta t^3 / \nu^2 = 295,70$$

$$Pr_2 = \frac{\mu_2 \cdot C_{p2}}{\lambda_2} = 0,657 \cdot$$

17. Определяют число Нуссельта нагреваемого теплоносителя для соответствующего режима течения Nu_2 .

$$Nu = 0,63 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} = 2,35$$

18. Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемому теплоносителю

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_n} = 11,03 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot$$

19. Коэффициент теплопередачи, отнесенный к внутренней поверхности труб k_b .

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_g}{2 \cdot \lambda_w} \ln \frac{d_n}{d_g} + \frac{d_g}{\alpha_2 d_n}} = 11,01 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$$

20. По соответствующим формулам или с помощью графиков определяют средний температурный напор $\overline{\Delta t}$.

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = 31,36 \text{ К} \cdot$$

где $\Delta t' = t_1' - t_2' = 65 \text{ К}$; $\Delta t'' = t_1'' - t_2'' = 11,7891 \text{ К}$.

Температуры на внутренней и наружной поверхностях труб (со стороны греющего и нагреваемого теплоносителя) в первом приближении.

$$t_{wг} = t_{1cp} - \frac{k_b \cdot \overline{\Delta t}}{\alpha_1} = 329,379 \text{ К};$$

$$t_{wн} = t_{2cp} + \frac{k_b \cdot \overline{\Delta t}}{\alpha_2} \cdot \frac{d_g}{d_n} = 308,1255 \text{ К} \cdot$$

По результатам дальнейших приближений получили температуры внутренней и наружной поверхности трубки:

$$t_{wг} = 329,825 \text{ К} \quad t_{wн} = 307,12526 \text{ К}$$

Требуемая длина труб:

$$l = F_g / \pi / d_g = 9,85 \text{ м}$$

Рассмотрим повышение коэффициента теплоотдачи с целью уменьшения длины конденсатора. В работе [5] рассмотрена интенсификация процессов теплообмена в змеевиках спиралевидной формы (рис 1). При течении хладагента по спиралевидному каналу возрастает коэффициент теплоотдачи.

Таким образом, массовые силы увеличивают коэффициент теплоотдачи змеевика по сравнению с прямой трубой на два метра.

Рассмотрим вопросы оценки энергозатрат при течении хладагента по металлическим и полимерным трубам.



Рис. 1 – Внешний вид конденсатора змеевика спиралевидной формы

Интенсификация теплообмена с помощью вторичных течений, обусловленных искривлением канала, с точки зрения энергетических затрат часто оказывается более целесообразной, чем достижение того же эффекта за счет увеличения скорости.

Так, для исходной системы с $Re=10^4$ увеличение коэффициента теплоотдачи в 1,3 раза вследствие искривления трубы сопровождается увеличением энергетических затрат на перемещение жидкости в 1,37 раза.

Снижение сопротивления на прокачку хладагента уменьшает энергозатраты в процессе эксплуатации холодильного оборудования, что позволит использовать компрессор меньшей мощности и тем самым снизить стоимость холодильника.

Таким образом, интенсификация теплообмена за счет увеличения скорости движения жидкости приводит к уменьшению энергетических затрат в 1,76 раза, за счет этого можно сократить длину канала и, как следствие, снизить энергозатраты на прокачку хладагента по трубке из полимерных материалов.

Потери давления в конденсаторе из стальной трубки будут составлять:

$$\Delta p_{cm} = \lambda_{cm} \frac{L_{cm}}{d_{cm}} \cdot \frac{\rho \omega_{cm}^2}{2} = 4918 \text{ Па}$$

В конденсаторе из полимерных трубок:

$$\Delta p_n = \lambda_n \frac{L_n}{d_n} \cdot \frac{\rho \omega_n^2}{2} = 837 \text{ Па}$$

$$Q_{cm} = \frac{\Delta p_{к.см} G}{\rho \eta} + \frac{\Delta p_{осм.см} G}{\rho \eta}$$

$$Q_n = \frac{\Delta p_{к.н} G}{\rho \eta} + \frac{\Delta p_{осн.н} G}{\rho \eta}$$

$$\Delta Q = Q_{cm} - Q_n = \frac{\Delta p_{к.см} G_{см}}{\rho \eta} - \frac{\Delta p_{к.н} G_n}{\rho \eta} = 0,1980 \text{ Вт}$$

Оценка ресурса конденсатора при замене металла на полимер. Известно, что трубы изготовленные из полимеров более химически стойкие к воздействию кислорода, агрессивных сред и, следовательно, ресурс эксплуатации таких труб более длительный.

Примером данного тезиса является следующее, ресурс использования трубопроводов в теплосетях представлен на рис.2, в котором показана долговечность труб из полимерных материалов.

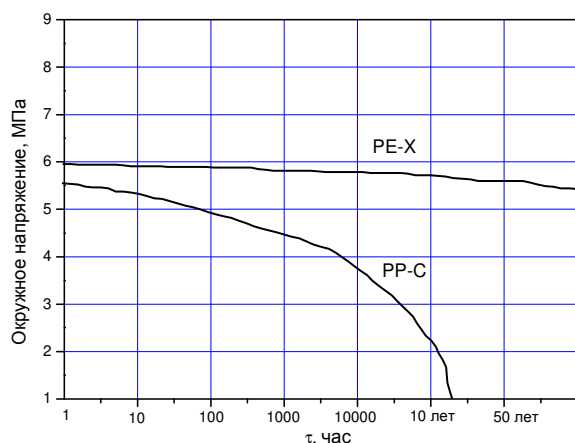


Рис. 2 – Зависимость срока службы различных полимерных материалов от допустимого окружного напряжения: 1 - сшитого полиэтилена (PE-X), 2 - полипропилена (PP-C) при рабочей температуре 95°C

Из рис.2 видно, что ресурс эксплуатации труб при температуре 95°C достигает более 50 лет.

Таким образом, анализ долговечности труб показал, что ресурс полимерных труб конденсатора холодильника составляет 50 лет.

На основании выше изложенного были проведены работы по модернизации холодильника промышленного производства марки «Позис» г. Зеленодольск. Стандартный стальной конденсатор диаметром 4 мм был заменен на конденсатор из полимерной трубки диаметром 6 мм с толщиной стенки 0,5 мм.

После монтажа данного конденсатора на холодильник «Позис» проведены эксплуатационные испытания в течении 240 часов. Температурные режимы в морозильной камере и внутри холодильника имели такие же значения как в контрольном холодильнике с конденсатором из металла. Результаты данной работы показали, что замена конденсатора из металла на конденсатор из полимера не меняет эксплуатационных характеристик холодильника.

Таким образом, предлагаемый способ изготовления конденсатора холодильного агрегата из полимерных материалов позволяет снизить себестоимость продукции, снизить энергозатраты в процессе изготовления и эксплуатации холодильного оборудования.

Литература

1. Б.Е. Байгалиев, А.В. Черноглазова, С.В. Темникова, А.В.Щелчков, И.Р. Тимербулатова, П.Э.Калмыков, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 10, 96-98 (2013).
2. Патент РФ 2404055 (2010).
3. Б.Е. Байгалиев, А.В. Черноглазова, С.В. Темникова, И.Р. Тимербулатова, Д.Р. Биктимиров, *Вестник Казанского технологического университета*, **14**, 7, 93-96 (2011).
4. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Стройиздат. Ленинградское отделение, 1978, 570с.
5. Болграсский А.В., Мухачев Г.А., Шукин В.К. Термодинамика и теплопередача. Высшая школа. Москва, 1975, 496с.

© А. В. Черноглазова - канд. техн. наук, доц. каф. материаловедения, сварки и производственной безопасности КНИТУ – КАИ, alevtinac@mail.ru; Б. Е. Байгалиев - д-р техн. наук, проф., каф. теплотехники и энергетического машиностроения, КНИТУ – КАИ, baigaliev@rambler.ru.; С. В. Темникова - канд. техн. наук, доц. каф. математики, Луганский национальный университет им. Тараса Шевченко.