

Strength of Silicate-Enamel Coating of Heat Exchanger Pipe

E.N. İbrahimli

Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig ave., 16/21, Baku, AZ 1010, Azerbaijan)

For correspondence:

İbragimov Nazim / e-mail: nazim.ibragimov.2015@mail.ru

Abstract

The examination of the stress state and strength of the silicate-enamel coating of the heat exchanger tube are presented. Formulas are obtained for determining the longitudinal, radial and tangential stresses arising in the sections of the pipe coating. The condition for the strength of the silicate-enamel coating of the pipe under conditions of high temperatures and pressures is presented. The study of the stress state of the silicate-enamel coating of the pipe makes it possible to determine the condition of the strength of the coating of the heat-exchange pipe under the influence of high temperatures and pressures. Analysis of the calculation results shows that the strength of the silicate-enamel coating mainly depends on the geometric dimensions and physical and mechanical characteristics of the heat-exchange tube coating. The obtained calculations make it possible to determine the condition for the destruction of the silicate-enamel coating of the heat exchange tube of the apparatus.

Keywords: longitudinal, radial and tangential stresses of the coating, deformation, ultimate strength, high temperature and pressure, destruction of the silicate-enamel coating, heat exchanger.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_04_21_25

Received 13.10.2020

Revised 15.12.2023

Accepted 20.12.2023

For citation:

İbrahimli E.N.

[Strength of Silicate-Enamel Coating of Heat Exchanger Pipe]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 21-25 (in Russian)

İstilik mübadilə aparatlarının silisium-əmal örtüklü borularının möhkəmliyi

E.N. İbrahimli

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 16/21, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

İbrahimov Nazim / e-mail: nazim.ibragimov.2015@mail.ru

Xülasə

İstilik mübadilə aparatlarının silisium-əmal örtüklü borularının gərginlik və möhkəmliyinə baxılmışdır. Məqalədə istilik mübadilə aparatlarının silisium-əmal örtüklərində yaranan radial, tangensial və ox boyu istiqamətlərində gərginliklərin təyini üçün ifadələr təqdim edilmişdir. Eyni zamanda yaranan deformasiyaları nəzərə alaraq möhkəmlik şərtləri əsasında silisium-əmal ölüyün hesabı verilmişdir. Aparılan tədqiqatlar istilik mübadilə aparatlarının yüksək temperatur və təzyiq altında işlənməsi də nəzərə alınmışdır. Aparılan hesablamaların təhlili göstərir ki, silisium-əmal örlü boruların möhkəmliyi əsasən boruların həndəsi ölçülərindən və onların fiziki mexaniki xassələrindən tam asılıdır. Alınan hesablamalar istilik mübadilə borularının dağılma həddinin təyin edilməsinə zəmin yaradır.

Açar sözlər: ölüyün radial, ox boyu və tangensial gərginlikləri, deformasiyalar, möhkəmlik həddi, yüksək temperaturalar və təzyiqlər, istilik mübadilə aparatının silisium-əmal örtüklü borularının dağılması.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_04_21_25

УДК 621. 03.622.08

Прочность силикатно-эмалевого покрытия трубы теплообменного аппарата

Э.Н. Ибрагимли

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг, 16/21, Баку, AZ1010, Азербайджан)

Для переписки: Ибрагимов Назим / e-mail: nazim.ibragimov.2015@mail.ru

Аннотация

Приведены исследования напряжённого состояния и прочности силикатно-эмалевого покрытия трубы теплообменного аппарата. Получены формулы для определения продольных, радиальных и тангенциальных напряжений, возникающих в сечениях покрытия трубы. Представлено условие прочности силикатно-эмалевого покрытия трубы в условиях высоких температур и давлений. Исследование напряжённого состояния силикатно-эмалевого покрытия трубы даёт возможность определить условие прочности покрытия теплообменной трубы под действием высоких температур и давлений. Анализ результатов расчёта показывает, что прочность силикатно-эмалевого покрытия в основном зависит от геометрических размеров и физико-механических характеристик покрытия теплообменной трубы. Полученные расчёты позволяют определить условие разрушения силикатно-эмалевого покрытия теплообменной трубы аппарата.

Ключевые слова: продольные, радиальные и тангенциальные напряжения покрытия, деформация, предел прочности, высокая температура и давление, разрушения силикатно-эмалевого покрытия, теплообменный аппарат.

Введение

В условиях дефицита пресной воды в регионах Каспийского моря (Азербайджан, Туркменистан, Казахстан, Россия, Дагестан и т.д.) морская вода является охлаждаемой средой для работы как нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ), так и тепловых электрических станций (ТЭС). В большинстве случаев в этих регионах отложения накипи и продуктов коррозии наиболее интенсивно протекают со стороны внутренней поверхности малого диаметра и малой толщины трубного пучка аппарата, эксплуатируемого в широком диапазоне температур, давления и скоростей потока теплоносителей, в результате чего ухудшается коэффициент теплопередачи. Уменьшается живое сечение труб и тем самым снижается тепловая эффективность. В этих условиях длительной эксплуатации поверхностных теплообменных аппаратов установлено, что тепловая эффективность в большей мере зависит от солевых отложений и продуктов коррозии в процессе соприкосновения с различными теплоносителями. В зависимости от условий технологического процесса теплообменного аппарата в основном получают рыхлые порошкообразные и пористые твердые частицы.

Наиболее эффективный и универсальный метод борьбы с отложением накипи и коррозией труб теплообменного аппарата – использование защитных металлических, лакокрасочных, полимерных, эмалевых покрытий и т.д.

Постановка задачи

Обследования, проведенные в технологических цехах НПЗ и ТЭС, показали, что трубы теплообменного аппарата раз-

личных диаметров, изготовленные из стали, разрушаются под действием коррозионно-механического износа. Наиболее интенсивно эти процессы протекают по внутренней поверхности теплообменных труб подогревателя и конденсаторов в результате контакта металлической поверхности с минерализованными водами в широком диапазоне температур (300-400°C) и давлений (20-40) МПа. В настоящее время в теплообменных аппаратах для защиты теплообменных труб от коррозии и механического повреждения в высокоминерализованных водах применяются силикатно-эмалевые покрытия [1, 2].

В период эксплуатации покрытия трубы подвергаются резким перепадам температуры, что может вызвать в покрытиях термические напряжения, превышающие предел прочности покрытия, и привести к разрушению слоев покрытия трубы.

Метод исследования

При повышении температуры высокоминерализованной воды деформации покрытия и металла трубы определяются их коэффициентами линейного расширения. В этом случае равновесие двухслойных систем трубы наступает после того, как в покрытии и металле создаются термические напряжения разного знака.

Следует отметить, что при высокой температуре нагревания либо остывании между металлической трубой и силикатно-эмалевым покрытием возникает контактное давление, определяемое по формуле [3, 4]:

$$P_k = \frac{E_1 \delta (R_2^2 - R_1^2) (R_3^2 - R_2^2)}{2R_2^2 (R_3^2 - R_1^2)}, \quad (1)$$

где P_k – контактное давление между покрытием и металлом трубы; R_1, R_2, R_3 – соответственно внутренний, пограничный и наружный радиусы покрытия и металла трубы, δ – зазор между металлом и покрытием трубы.

δ вычисляется по формуле [4, 5]:

$$\delta = U_2 - U_1$$

где U_1, U_2 – радиальные перемещения покрытия и металла.

$$U_1 = -\frac{1-\mu_1}{E_1} \frac{R_3^2}{R_3^2 - R_1^2} P_b - \frac{1+\mu_1}{E_1} \frac{R_1^2}{R_3^2 - R_1^2} P_b$$

$$U_2 = \frac{1-\mu_2}{E_2} \frac{R_3^2}{R_2^2 - R_1^2} P_n + \frac{1+\mu_2}{E_2} \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} P_n \quad (2)$$

где P_b, P_n – внутренние и наружные давления покрытия и металлической трубы, E_1, E_2 – модули упругости покрытия и металла трубы, μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона покрытия и металла трубы.

Радиальные и тангенциальные напряжения, возникающие в поперечных сечениях силикатно-эмалевого покрытия трубы, определяются по формулам [4, 6]:

$$\sigma_r = \frac{P_k R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2}\right); \quad \sigma_t = \frac{P_k R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_2^2}{r^2}\right) \quad (3)$$

Опыты показали, что это напряженное состояние по величине иногда превосходит напряжения допустимого значения растяжения (сжатия) покрытия и наблюдаются трещины, отслаивания и разрушения поверхности покрытия трубы.

При охлаждении (нагревании) в поверхностных слоях покрытий возникают продольные термические остаточные напряжения сжатия (растяжения). Эти остаточные напряжения определяются следующим образом [5, 6]:

$$\sigma_0 = \frac{E(R_2^2 - R_1^2) \int_{R_2}^{R_3} \alpha_2 T r dr - E_1(R_3 - R_1^2) \int_{R_1}^{R_2} \alpha_1 T r dr}{(1-\mu_1)R_2^2 (R_2^2 - R_1^2)} \quad (4)$$

Поэтому прочность силикатно-эмалированных труб будет зависеть от остаточных напряжений, возникающих на поверхности покрытия. Кроме того, напряжение по продольной поверхности покрытий определяется по известной формуле [6, 7]:

$$\sigma_{nr} = \frac{\beta_1 E_1 T}{1-\mu_1} Bi \quad (5)$$

где r – текущий радиус покрытия трубы, β_1 – коэффициент линейного расширения покрытия трубы; T – температура нагрева покрытия трубы; Bi – критерий ВИО.

$$Bi = \frac{\alpha_1 \delta}{\lambda_1},$$

где α_1, λ_1 – коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности покрытия трубы.

Суммарные напряжения по продольной поверхности силикатного покрытия трубы рассчитываются следующим образом:

$$\sigma_n = \sigma_{nr} \pm \sigma_0 \quad (6)$$

Результаты расчета

Для иллюстрации полученных формул (3), (4), (5), (6) проведён расчёт. Учитывая напряжения, возникающие в радиальных, продольных и тангенциальных направлениях силикатно-эмалевого покрытия теплообменной трубы, можно представить условие разрушения покрытия по энергетической теории прочности [5, 7]:

$$\sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_r^2 + \sigma_t^2 - \sigma_n \sigma_r - \sigma_n \sigma_t - \sigma_r \sigma_t} \leq [\sigma]$$

Расчет прочности силикатно-эмалевого покрытия теплообменной трубы выполнен при следующих данных:

$T=300\div 400^{\circ}\text{C}$; $\mu_1=0,280$; $\mu_2=0,207$;
 $E_1=0,75\times 10^5\text{МПа}$; $E_2=2,1\times 10^5\text{МПа}$;
 $\alpha_1=8,13\times 10^{-3}\text{c}^{-1}$; $\alpha_2=13,6\times 10^{-3}\text{c}^{-1}$

В таблице приведены результаты расчетов покрытия трубы. Полученные расчеты позволяют определить условие разрушения силикатно-эмалевого покрытия теплообменной трубы аппарата.

Таблица – Параметры и расчётные значения предела прочности покрытий труб

Table – Parameters and calculated values of the ultimate strength of pipe coatings

Размеры Труб, мм	Толщины покрытия, мм	Температурные напряжения покрытия, Мпа			Остаточные напряжения σ_0 , Мпа	Предел прочности покрытия [σ_n], МПа
		σ_n	σ_r	σ_t		
Ø 19×1,5	0,1÷0,2	28,5	35,4	16,2	21,4	46,2
Ø 25×2,5	0,2÷2,5	32,4	40,2	18,5	24,6	58,4
Ø 32×4,0	0,3÷0,4	38,5	46,3	20,4	26,2	61,2
Ø 27×3,5	0,4÷0,5	40,2	51,2	22,5	30,5	70,3
Ø 57×3,5	0,5÷0,8	42,3	56,5	28,4	32,4	75,1

Закключение

Исследование напряженного состояния силикатно-эмалевого покрытия трубы даёт возможность определить предел прочности покрытия теплообменной трубы под ее действием в условиях высоких температур и давлений.

Анализ результатов расчёта показывает, что прочность силикатно-эмалевого

покрытия в основном зависит от геометрических размеров и физико-механических характеристик покрытия трубы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

REFERENCES

1. **Petcold A.** Emal i emalirovanie. M: *Metallurgiya*. 1990. – 446 s. (in English)
2. **Ibragimov N.Yu.** Vliyaniye sherohovatosti poverhnosti na perepad temperatury v steklo-emalirovannykh pokrytiyakh trub. *Promyshlennaya energetika*. M., 2013, №4. s.33-35(in Russian)
3. **Maksutov R.A., Kan A.G.** Osteklovannye truby v neftyanoy promyshlennosti. M., 1973. – 203 s. (in Russian)
4. **Belyaev N.M.** Soprotivleniye materialov. M.: *Mashinostroenie*. 2001. – 576 s. (in Russian)
5. **Ibragimov N.Yu.** Vyyavleniye treshchin na poverhnosti silikatnykh pokrytij trub. *Promyshlennaya energetika*. Moskva: *NPO*, 2019, №9, s. 21-23 (in Russian)
6. **Mamedtagizade A.M., Babaev E.F., Jabbarova G.V.** Prakticheskoe vnedreniye tekhnologii rasshiryaemykh trub neftegazovykh mestorozhdenij. *Vestnik Azerbajjanskoj Inzhenernoj Akademii*. Tom 10, №1, s.63-75 (in Russian)
7. **Həbibov İ.Ə., Nəcəfquliyeva R.S.** Soyuducu qurğuda istilikötürmə prosesin odelləşməsi əsasında yekun temperaturun paylanmasının qiymətləndirilməsi. *Cild11. №2*, s.47-51. (in Azerbaijani)