

УДК 666.762.11:621.3.453].007.24

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ ТРУБЧАТОГО КЕССОНА С ОГНЕУПОРНОЙ НАБИВКОЙ ПО ШИПАМ С ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ РАБОТЫ В СИЛИКАТНОМ РАСПЛАВЕ

Существуют различные конструкции ограждений печи. Применительно к высокофорсированным плавильным агрегатам наиболее целесообразно применять охлаждаемые металлические кессоны с огнеупорной набивкой по шипам на рабочей стороне. В статье представлен конструктивный расчет такого кессона применительно к стекловаренной печи будущего.

Ключевые слова: трубчатый кессон, стекловаренная печь, огнеупорная набивка, водяное охлаждение, силикатный расплав.

Существуют различные конструкции ограждений печи (стен, свода и пода). Применительно к высокофорсированным плавильным агрегатам наиболее целесообразно применять охлаждаемые металлические кессоны с огнеупорной набивкой по шипам на рабочей стороне [1]. Ниже представлен конструктивный расчет такого кессона применительно к стекловаренной печи будущего.

Охлаждаемую металлическую поверхность изготавливаем из стальных труб (Ст20 ГОСТ 21729, ТУ 14-3-460-75 [2]); трубы диаметром $d = 0,042$ м с толщиной стенки 0,005 м. Шаг между осями труб $S = 0,107$ м. Трубы соединены между собой перемычками (плавниками) из полос углеродистой стали толщиной $\delta_{пл} = 0,008$ м, приваренными к трубам с двух сторон сплошным швом. Узлы кессона показаны на рисунке.

Панель сваривают, после чего производят ее ошиповку (приваривание шипов). Принимаем [1] диаметр шипа $d_{ш} = 0,01$ м. При относительной длине шипа, равной 1,6, определяем длину шипа $l_{ш} = 0,01 \cdot 1,6 = 0,016$ м. При относительном шаге шипов $\bar{S} = 3,2$ шаг шипа $S = 0,01 \cdot 3,2 = 0,032$ м. Расположение шипов на обогреваемой стороне труб шахматное. Угол между осями центрального и бокового рядов шипов 45° . Толщину огнеупорной набивки над средним шипом $\delta_{н1}$ принимаем равной 0,003 м. Толщина огнеупорной набивки над плавником между трубами

$$\delta_{н2} = 0,5d + l_{ш} + \delta_{н1} - 0,5\delta_{пл} = 0,5 \cdot 0,042 + 0,016 + 0,003 - 0,5 \cdot 0,008 = 0,036 \text{ м.}$$

Для слабокислой среды выбираем [2] корундовую набивку плотностью $\rho_n = 2150$ кг/м³ и теплопроводностью $\lambda_n = 0,593 + 0,907 \cdot 10^{-3} T$, Вт/(м·К). Расчетное число труб в кессоне $n = 12$. Расстояние от оси крайней трубы до торца кессона:

$$l_T = \frac{l_T - S(n-1)}{2} = \frac{1,25 - 0,107 \cdot 11}{2} = 0,0365 \text{ м.}$$

Панели газоплотные и при водяном охлаждении не нуждаются в теплоизоляции с наружной стороны. Габаритная толщина кессона с набивкой (без слоя гарнисажа): $\delta_3 = d + l_{ш} + \delta_{н1} = 0,042 + 0,016 + 0,003 = 0,061$ м.

Площадь проходного сечения одной трубы кессона внутренним диаметром $d_T = 0,042 - 0,01 = 0,032$ м:

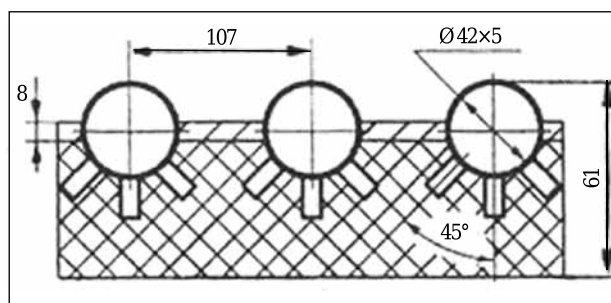
$$f_T = \frac{\pi d_T^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{0,032^2}{4} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Суммарная площадь проходного сечения всех труб кессона:

$$f_{\Sigma} = n f_T = 12 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 96 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Объем кессона, заполняемый водой:

$$v_k = f_{\Sigma} \cdot h_k = 96 \cdot 10^{-4} \cdot 3,3 = 0,03 \text{ м}^3.$$



Узел панели трубного набивного кессона

✉
А. Ю. Терехова
E-mail: terekhova.nastya@mail.ru

Выбор скорости воды в трубах кессона

Надежная работа кессона обеспечивается при умеренной температуре наружной поверхности труб. Для стали Ст20 допустимая температура равна 450 °С [2]. Температура поверхности трубы при минимальной рекомендуемой скорости воды $w_b = 0,6$ м/с.

Определяем теплофизические параметры воды при следующей температуре $T_b = 50$ °С: кинетический коэффициент вязкости $\nu_b = 0,556 \cdot 10^{-6}$ м²/с, теплопроводность $\lambda_b = 0,648$ Вт/(м·К), критерий Прандтля $Pr_b = 3,54$, а при температуре, равной температуре стенки $T_{ст} \approx 100$ °С, критерий Прандтля $Pr_b = 1,75$.

Определяем число Рейнольдса при вынужденном движении воды по трубе с внутренним диаметром d_t со скоростью w_b :

$$Re_b = \frac{w_b \cdot d_t}{\nu_b} = \frac{0,6 \cdot 0,032}{0,556 \cdot 10^{-6}} = 34500.$$

Режим движения воды в трубе турбулентный, поэтому безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта) от поверхности трубы к потоку охлаждающей воды в трубе кессона определяем по формуле

$$Nu = 0,23 Re_b^{0,8} \cdot Pr_b^{0,4} \left(\frac{Pr_b}{Pr_{ст}} \right)^{0,06} = 0,023 \cdot 34500^{0,8} \cdot 3,54^{0,4} \left(\frac{3,54}{1,75} \right)^{0,06} = 170.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_b = \frac{\lambda \cdot Nu}{d_t} = \frac{0,648 \cdot 170}{0,032} = 3442 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Температуру стенки трубы определяем по формуле

$$T_{ст} = T_b + \frac{q}{\alpha_b},$$

где q — плотность теплового потока, переносимого от стенки трубы к охлаждающей воде.

Для участка трубы под уровнем расплава ($q_1 = 40$ кВт/м²):

$$T_{ст1} = 50 + \frac{40000}{3442} \approx 62 \text{ °С}.$$

Для участка трубы над уровнем расплава ($q_2 = 80$ кВт/м²):

$$T_{ст2} = 50 + \frac{80000}{3442} \approx 73 \text{ °С}.$$

Расчет показывает, что температура наружной поверхности трубы как под расплавом, так и в надслоевом пространстве существенно ниже допустимого значения ($T_{ст} = 450$ °С). Это обеспечивает надежную работу труб кессона в заданных условиях. Окончательно принимаем скорость в трубах равной наименьшему из рекомендуемых значений $w_b = 0,6$ м/с.

Определяем расход воды через кессон, обеспечивающий расчетный режим охлаждения:

$$V_b = W_b \cdot f_{\Sigma} = 0,6 \cdot 96 \cdot 10^{-4} = 57,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}, \text{ или } 20,74 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Определение общего количества теплоты, отводимой кессоном

Площадь поверхности кессона, расположенной под уровнем барботажного слоя,

$$F_1 = 1,25 \cdot (3,1 - 1,77) = 1,66 \text{ м}^2.$$

Тепловой поток, отводимый кессоном из рабочего пространства печи:

$$Q_k = 80000 \cdot 2,21 + 40000 \cdot 1,66 = 243200 \text{ Вт} = 243,2 \text{ кВт}.$$

Тепловой расчет огнеупорной набивки

В соответствии с практикой проектирования принимаем, что температура рабочей поверхности кессона $T_{ст}$ в 1,5 раза превышает температуру труб над уровнем расплава $T_{ст2}$: $T_{ст} = 1,57 \cdot 73 = 110$ °С. Определяем предельную температуру горячего конца шипа:

$$T_{ш}^{\max} = T_{ст} + 0,8 \cdot \frac{q_2}{\alpha_b} = 110 + 0,8 \cdot \frac{80000}{3430} = 129 \text{ °С}.$$

Исходя из значения $T_{ш}^{\max}$, для изготовления шипов выбираем [2] конструкционную углеродистую сталь с температурой жаростойкости 450 °С и теплопроводностью $\lambda = 58 + 40,7 \cdot 10^{-3} T$, Вт/(м·К). Определяем теплопроводность шипа при его средней температуре $\bar{T}_{ш} = \frac{110 + 129}{2} = 119,5$ °С:

$$\lambda_{ш} = 58 + 40,7 \cdot 10^{-3} \cdot 119,5 = 62,9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Задаем [2] приближенное значение температуры на границе огнеупорной набивки и гарнисажа $T'_{гр} = 800$ °С и определяем среднюю температуру слоя набивки:

– над шипом

$$\bar{T}_{ш1} = \frac{T_{ш}^{\max} + T'_{гр}}{2} = \frac{129 + 800}{2} = 465 \text{ °С},$$

– между шипами

$$\bar{T}_{ш2} = \frac{T_{ст} + T'_{гр}}{2} = \frac{110 + 800}{2} = 455 \text{ °С}.$$

Определяем теплопроводность слоя набивки:

– над шипом

$$\lambda'_{ш1} = 0,593 + 0,907 \cdot 10^{-3} T_{ш1}^{\text{ср}} = 0,596 + 0,907 \cdot 10^{-3} \cdot 465 = 1,014 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

– между шипами

$$\lambda'_{ш2} = 0,593 + 0,907 \cdot 10^{-3} T_{ш2}^{\text{ср}} = 0,593 + 0,907 \cdot 10^{-3} \cdot 455 = 1,006 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Вычисляем тепловые сопротивления части поверхности кессона, покрытой шипами:

$$R'_1 = \frac{l_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{\delta_{ш1}}{\lambda'_{ш1}} = \frac{0,016}{62,9} + \frac{0,003}{1,014} = 32,13 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$$

и находящейся между шипами:

$$R_2 = \frac{\delta_{ш2}}{\lambda'_{ш2}} = \frac{0,036}{1,006} = 357,85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Определяем эффективное тепловое сопро-

тивление ошипованной поверхности кессона, покрытой огнеупорной набивкой:

$$R'_{\text{эф}} = \frac{R'_1 \cdot R'_2}{R'_1 \cdot f_{\text{ш}} + R'_2 \cdot (1 - f_{\text{ш}})} =$$

$$= \frac{32,13 \cdot 10^{-4} \cdot 357,85 \cdot 10^{-4}}{32,13 \cdot 10^{-4} \cdot 34,4 \cdot 10^{-3} + 357,85 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 34,4 \cdot 10^{-3})} =$$

$$= 3,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт},$$

где $f_{\text{ш}}$ — плотность ошиповки по выделенному элементу двух соседних труб

$$f_{\text{ш}} = \frac{F_{\text{ш}}}{F_{\text{ст}}} = \frac{d_i^2 \cdot n_{\text{ш}}}{8 \cdot S \cdot l_{\text{тр}}} = \frac{0,01^2 \cdot 3}{8 \cdot 0,032 \cdot 0,107} = 34,4 \cdot 10^{-3}.$$

Уточняем значение $T_{\text{гр}}$:

$$T''_{\text{гр}} = T_{\text{ст}} + q_2 \cdot (R'_{\text{эф}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}) =$$

$$= 110 + 80000 \cdot (3,25 + 10^{-4} + \frac{1}{3430}) = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

и пересчитываем теплопроводность

$$\lambda''_{\text{Н1}} = 0,593 + \frac{0,907 \cdot 10^{-3} (130 + 400)}{2} = 0,833 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\lambda''_{\text{Н2}} = 0,593 + \frac{0,907 \cdot 10^{-3} (110 + 400)}{2} = 0,824 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Проверяем сходимость результатов расчетов:

$$\left| \frac{\lambda''_{\text{Н1}} - \lambda'_{\text{Н1}}}{\lambda''_{\text{Н1}}} \right| = \left| \frac{0,833 - 1,014}{0,833} \right| = 0,217;$$

$$\left| \frac{\lambda''_{\text{Н2}} - \lambda'_{\text{Н2}}}{\lambda''_{\text{Н2}}} \right| = \left| \frac{0,824 - 1,006}{0,824} \right| = 0,221.$$

Расхождение недопустимо велико, поэтому повторяем итерацию:

$$R''_1 = \frac{0,016}{62,86} + \frac{0,003}{0,833} = 36,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт},$$

$$R''_2 = \frac{0,036}{0,824} = 436,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт},$$

$$R''_{\text{эф}} = \frac{36,6 \cdot 10^{-4} \cdot 436,9 \cdot 10^{-4}}{36,6 \cdot 10^{-4} \cdot 34,4 \cdot 10^{-3} + 436,9 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 34,4 \cdot 10^{-3})} =$$

$$= 37,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт},$$

$$T'''_{\text{гр}} = 110 + 80000 \cdot (37,79 + 10^{-4} + \frac{1}{3430}) = 436 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\lambda'''_{\text{Н1}} = 0,593 + 0,907 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{130 + 436}{2} = 0,850 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\lambda'''_{\text{Н2}} = 0,593 + 0,907 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{110 + 436}{2} = 0,841 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Проверяем сходимость результатов:

$$\left| \frac{\lambda'''_{\text{Н1}} - \lambda''_{\text{Н1}}}{\lambda'''_{\text{Н1}}} \right| = \left| \frac{0,850 - 0,833}{0,850} \right| = 0,02,$$

$$\left| \frac{\lambda'''_{\text{Н2}} - \lambda''_{\text{Н2}}}{\lambda'''_{\text{Н2}}} \right| = \left| \frac{0,841 - 0,824}{0,841} \right| = 0,02.$$

Расхождение результатов является приемлемым. Таким образом, окончательно принимаем $T_{\text{гр}} = (436 + 400)/2 = 418 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вычисляем толщину слоя гарнисажа, образующегося на поверхности набивки:

$$\delta_{\text{г}} = \frac{\lambda_{\text{г}} \cdot (T_{\text{пл}} - T_{\text{гр}})}{80000} = 0,0096 \text{ м},$$

где теплопроводность монолитного силикатного гарнисажа определяем по формуле

$$\lambda_{\text{г}} = 0,828 \cdot (1 + 0,7 \cdot 10^{-3} T_{\text{г}}) =$$

$$= 0,628(1 + 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot 809) = 0,98 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

при средней температуре $\bar{T}_{\text{г}} = \frac{T_{\text{гр}} + T_{\text{пл}}}{2} =$

$$= \frac{418 + 1200}{2} = 809 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Рассчитанное значение толщины слоя гарнисажа соответствует зоне с самыми высокими тепловыми нагрузками. В зоне кессона, расположенной под уровнем расплава, тепловая нагрузка q_1 вдвое меньше, и согласно формуле $\delta_{\text{г}} = \lambda_{\text{г}} \cdot (T_{\text{пл}} - T_{\text{гр}})/q$ толщина гарнисажа будет вдвое больше. Так как при максимальной тепловой нагрузке толщина гарнисажа превосходит минимально допустимое значение (0,005 м), созданная конструкция набивного кессона в заданных условиях будет работать надежно, и расчет можно считать законченным.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (госконтракт № 14.578.21.0049), соглашение о субсидии ЛЧ.578.21.0049 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0049).

Библиографический список

1. **Кривандин, В. А.** Теплотехника металлургического производства. Т. 2. Конструкция и работа печей: уч. пособие для вузов / В. А. Кривандин, В. В. Белоусов, Г. С. Сборщиков [и др.]. — М.: МИСиС, 2001. — 736 с.
2. **Сборщиков, Г. С.** Теплотехника: расчет и конструирование элементов промышленных печей: уч.-метод. пособие / Г. С. Сборщиков, С. А. Крупенников. — М.: МИСиС, 2004. — 179 с. ■

Получено 07.07.16

© Г. С. Сборщиков, А. Ю. Терехова, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



AluminiumMiddleEast 2017 —
Международная выставка
и конференция по алюминиевой
промышленности

Dubai World Trade Centre, г. Дубай, ОАЭ 15–17 мая 2017 г.

www.aluminium-middleeast.com