

УДК 621.7.1

DOI 10.47367/0021-3497_2023_1_139

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
КОЛЛЕКТОРОВ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ВОЗДУХА
ДЛЯ ЗАВОДОВ ПО ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

**INCREASING THE DURABILITY
OF AIR HEATER MANIFOLDS
FOR NEW GENERATION THERMAL WASTE PROCESSING PLANTS**

Л.А. КОНДРАТЕНКО¹, Л.И. МИРОНОВА¹, В.Г. ДМИТРИЕВ¹, С.В. ХЕЙЛО²

L.A. KONDRATENKO¹, L.I. MIRONOVA¹, V.G. DMITRIEV¹, S.V. KHEILO²

¹Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
²Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

¹Moscow Aviation Institute (State National Research University),
²Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: kondrat.leonid@yandex.ru; mironova_lub@mail.ru; vga2105@mail.ru; sheilo@yandex.ru

Статья посвящена проблемам надежности коллекторов подогревателей воздуха, которые включены в технологическую схему переработки бытовых и промышленных отходов с целью повышения эффективности процесса горения в котлоагрегатах. Показаны пути повышения долговечности этих теплообменных аппаратов для заводов по термической переработке отходов нового поколения. Изложены причины и определены негативные факторы влияния, снижающие их прочностную надежность. Отмечено, что важнейшим условием эффективности работы всего агрегата является прочность и герметичность узлов крепления теплообменных труб в трубных решетках. Указанные качественные характеристики во многом определяются непосредственно способом закрепления. Приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния узлов крепления труб, изготовленных различными способами. Показано, что роликовое вальцевание труб обеспечивает повышение качества изготовления узлов крепления теплообменных труб и ресурс аппаратов термической обработки бытовых и промышленных отходов.

The article is devoted to the problems of reliability of air heater manifolds, which are included in the technological scheme for processing household and industrial waste in order to increase the efficiency of the combustion process in boiler units.

The ways of increasing the durability of these heat exchangers for plants for the thermal processing of new generation waste are shown. The reasons are stated and the negative factors of influence, which reduce their strength reliability, are determined. It is noted that the most important condition for the efficiency of the entire unit is the strength and tightness of the attachment points of heat exchange pipes in tube sheets. These qualitative characteristics are largely determined directly by the method of fixing. The results of studies of the stress-strain state of pipe attachment points made by various methods are presented. It is shown that roller rolling of pipes provides an increase in the quality of manufacturing of attachment points for heat exchange pipes and a service life of apparatuses for heat treatment of household and industrial waste.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, теплообменная труба, трубная решетка, напряжения, роликное вальцевание, частотная характеристика.

Keywords: heat exchanger, heat exchange tube, tube sheet, stresses, roller rolling, frequency response.

В настоящее время в России, обладающей большими запасами энергоресурсов, задачи снижения углеродной интенсивности производства электроэнергии [1], [2], прежде всего, за счет развития генерации из возобновляемых источников энергии (ВИЭ) не потеряли свою актуальность. Правительство Российской Федерации особое внимание уделяет утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления. Основные положения развития данного направления изложены в Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года [3].

Реализация данной программы возможна преимущественно в построении мусоросжигательных заводов нового поколения и внедрении отечественных передовых технологий переработки твердых бытовых отходов (ТБО), не уступающих по качественным показателям иностранным технологиям, разработанным, например, известной японо-швейцарской фирмой "Hitachi Zosen Inova".

В работе [4] отмечено, что одной из проблем выработки электроэнергии на ТЭС, использующих ТБО, является низкий КПД, обусловленный ограничениями по параметрам пара на выходе из котла вследствие

особенностей конструкции котельных агрегатов, специфических свойств топлива и высокой коррозионной агрессивностью продуктов сгорания. Параметры пара на большинстве ТЭС на ТБО находятся на уровне 1,3...4,0 МПа, 320...420°C [5].

Повышение параметров пара на выходе из котла возможно не только за счет внедрения мероприятий, направленных на снижение высокотемпературной газовой коррозии пароперегревателей, но и также за счет повышения эффективности процесса горения. С этой целью в технологическую схему котельного оборудования включают подогреватель воздуха горения, в котором воздух подогревается до температуры 170°C и далее подается в зону горения котла.

Подогреватель воздуха горения состоит из нескольких теплообменных секций – подогревателей воздуха высокого, среднего и низкого давления. Каждая из ступеней состоит из трубных пучков различной конструкции. Нагрев воздуха осуществляется при его прохождении между рядами теплообменных труб, внутри которых протекает горячая вода или подается отборный пар. Конструктивная схема теплообменной секции подогревателя воздуха приведена на рис. 1, где 1 – входной коллектор; 2 – выходной коллектор; 3, 4 – трубные решетки;

5 – теплообменные трубы; 6 – дистанцирующие решетки.

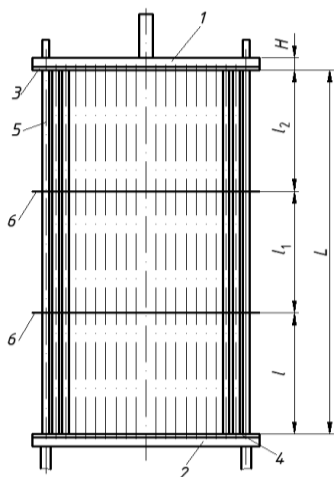


Рис. 1

Особенностью теплообменных секций является наличие большого количества труб, закрепленных в коллекторах или трубных досках. Обеспечение прочности и герметичности узлов крепления труб в процессе изготовления является одним из важнейших условий эффективности работы всего агрегата, и во многом определяет его ресурс. Оценка показателей качества изготовления узлов крепления труб необходимо проводить с учетом особенностей технологии сборки.

Методы закрепления труб в трубных решетках и оценка остаточного напряженно-деформированного состояния узлов крепления достаточно полно изложены в работах [6...13].

Следует отметить, что теплообменные процессы в аппаратах сопровождаются колебаниями нагрузки и температуры, выпадением осадка. На трубы в поперечном и осевом направлениях действуют переменные силы. Сочетание колебаний силовых факторов, наличие или образование между

контактирующими поверхностями щелей, в которые проникает осадок, либо приводит к щелевой коррозии с последующей разгерметизацией теплообменных контуров, либо к быстрой потере плотности и прочности узла крепления труб.

В связи с этим исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) теплообменных труб с учетом технологических напряжений и деформаций является актуальной задачей в обеспечении надежности энергоустановок. При этом разработка и внедрение мероприятий по снижению уровней остаточных напряжений в узлах заделки становится одним из путей повышения долговечности коллекторов подогревателей воздуха для заводов по термической переработке отходов нового поколения.

Вследствие силовых и температурных воздействий потоков среды развиваются различные напряжения на участке закрепления трубы [14] (рис. 2 – узел крепления трубы в трубной доске: а – крепление трубы только сваркой; б – крепление трубы сваркой и вальцовкой с выходом развальцованного участка в затрубное пространство; в – крепление трубы сваркой и вальцовкой с развальцованным участком менее высоты трубной доски; 1 – трубная доска; 2 – труба; 3 – сварной шов). Здесь показаны три возможных варианта узлов крепления труб. Первый (рис. 2-а) осуществляется только сваркой, второй (рис. 2-б,с) – сваркой и механическим способом крепления (вальцеванием) [9].

В принципе можно применять и гидравлическую раздачу. Однако эта операция обычно применяется в досках большой толщины и требует селективного подбора инструмента.

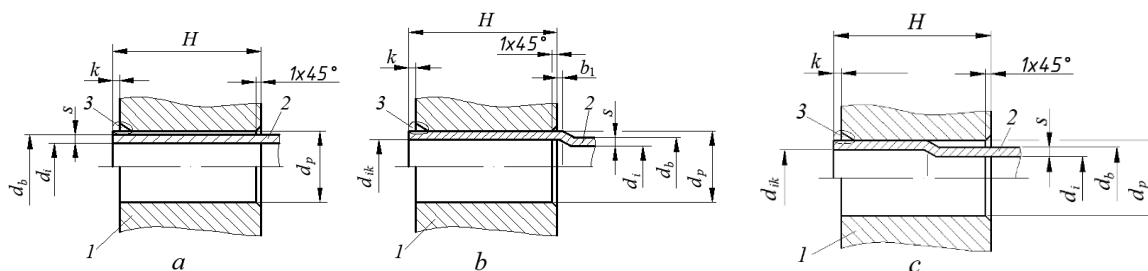


Рис. 2

Регулярные поперечные колебания приводят к усталостному износу, снижая ресурс изделия. Наиболее опасными с точки зрения прочности являются участки заделки концов труб (рис. 2). Поскольку в нашем случае подогреватель воздуха в схеме котельного оборудования имеет горизонтальное расположение, то вопросы надежности приобретают особую остроту.

В связи с тем, что наружный диаметр труб имеет определенный допуск, также с соответствующим допуском изготавливают отверстия в трубных досках, то между поверхностями трубы и отверстия всегда будет кольцевая щель. В случае ее пренебрежения все осевые и колебательные движения малой амплитуды участков трубы будут восприниматься только сварным швом. Если же применять конструктивные исполнения узла крепления согласно рис. 2-б,с, то при правильной технологии роликового вальцевания [9], [11] можно снизить нагрузки на сварной шов и повысить ресурс изделия. Кроме того, второй вариант, несмотря на более высокую трудоемкость, позволяет снизить опасность щелевой коррозии. Однако при этом необходимо правильно оценивать динамические нагрузки в рассматриваемом узле.

Следуя работе [14], оценим динамические особенности первого пролета, как наиболее опасного участка теплообменной секции подогревателя воздуха. Из рис. 1 видно, что труба размещена в значительном количестве опор. Поэтому в качестве расчетной модели принимаем многопролетную балку, предполагая, что наибольшие

напряжения возникают в узле заделки, в точке D. Расчетная схема первого пролета приведена на рис. 3.

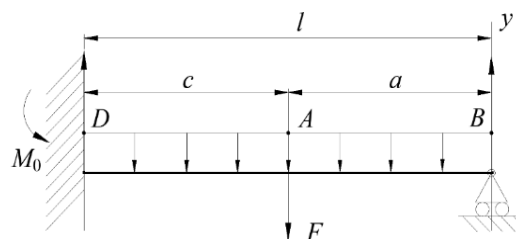


Рис. 3

Постановка задачи

Пусть в качестве расчетной модели принимается многоопорная статически неопределимая балка [15]. Левый конец балки имеет жесткую заделку, правый конец балки свободно лежит на опоре В и может перемещаться в осевом направлении (рис. 3). Предположим, что последующие пролеты вследствие упругой связи демфируют колебания трубы первого пролета, поэтому влиянием последующих пролетов пренебрегаем, считая, что динамичность рассматриваемой системы будет выше и напряжения также окажутся выше. Принимаем, что интенсивность распределенной нагрузки будет постоянной, $q = \text{const}$, и что в пролете трубы действует переменная сосредоточенная сила F. Возможными реакциями опор являются силы D, В и изгибающий момент M_0 в заделке.

Из решения статически неопределимой задачи по методу сил, используя теорему Кастельяно, получим следующие соотношения [14]:

$$M_1 = Vx - \frac{qx^2}{2}; M_2 = Vx - \frac{qx^2}{2} - F(x - a); V = C_1q + C_2F; C_1 = \frac{1}{8}; C_2 = 1 + \frac{a^3}{2l^3} - \frac{3a}{2l}. \quad (1)$$

Здесь M_1, M_2 – изгибающие моменты на первом и втором участках; В – реакция опоры; x – текущая координата в продольном направлении; a и l – расстояния на схеме рис. 3.

Прогиб в точке А определяется формулой:

$$y_A = - \vartheta_q q - \vartheta_F F, \quad (2)$$

где ϑ_q, ϑ_F – коэффициенты упругости, определяемые выражениями

$$\vartheta_q = \frac{C_2 a^4}{8} + \frac{(C_2 - 1)[\ell^4 - a^4]}{8} + \frac{a[\ell^3 - a^3]}{6},$$

$$\vartheta_F = \frac{1}{EJ} \left\{ \frac{C_2^2 a^3}{3} + \frac{(C_2 - \ell)^2 [\ell^3 - a^3]}{3} + ca^2 + a(C_2 - 1)[\ell^2 - a^2] \right\}.$$

Используя дифференциальное уравнение движения точки А под действием переменной силы F и решение, изложенное в ра-

боте [14], запишем уравнения в операторной форме для моментов M(t) и напряжения $\sigma(t)$ в сечении узла заделки труб:

$$M(t) = C_3 [F_0(t) + h_A v(t) + mpv(t)] - \frac{\ell^2}{8} q, \quad C_3 = c - C_2 \ell,$$

$$v(t)(1 + h_A \vartheta_F p + m \vartheta_F p^2) = -\vartheta_F p F_0(t), \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \frac{M(t)}{W_z}. \quad (4)$$

Здесь m – масса пролета трубы, сосредоточенная в точке А (центр пролета); h_A – коэффициент потерь на трение, приведенных к точке А; v – скорость поперечного движения точки А; p – оператор, $p \equiv d/dt$; $F_0(t)$ определяется из краевых условий; W_z – геометрический момент сопротивления сечения трубы.

Колебания напряжения в заделке можно описать с помощью уравнения в операторной форме:

$$\Delta \sigma(t) = \frac{C_3}{W_z} \cdot \frac{F_0(t)}{1 + h_A \vartheta_F p + m \vartheta_F p^2}. \quad (5)$$

Полученная формула, помимо геометрической характеристики сечения, включает величину C_3 , которую следует рассматривать как комбинацию алгебраических операций параметров a и c.

Из выражения (5) следует, что на НДС заделки влияют конструктивные параметры трубы, самого узла, физические процессы, протекающие в межтрубном пространстве. При колебаниях, близких резонансной частоте $\omega = (m \vartheta_F)^{-1/2}$, напряжения могут стать причиной поломки.

На рис. 4 приведена, в качестве примера, амплитудная частотная характеристика изменения нормальных напряжений при изгибе в сечении трубы, закрепленной в трубной решетке по варианту рис. 2-с (на

границе ее выхода из трубной решетки) [13]. При исследовании динамических явлений в трубных пучках использовались следующие исходные данные: труба $\varnothing 16 \times 1,5$ мм; материал трубы – сталь 08X18H10T; материал трубной доски – сталь 09Г2С; метод закрепления – механическое вальцевание; форма трубного пучка – U-образная; длина 1-го пролета $L = 400$ мм; действующие нагрузки: $q = 0,2$ Н/мм, $p_c = 10$ МПа.

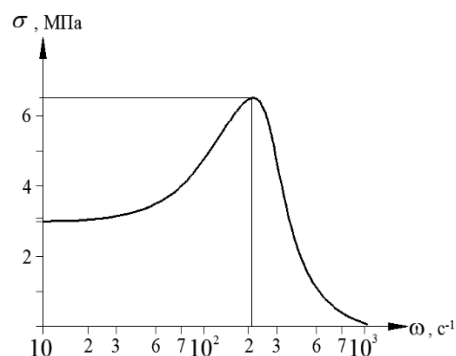


Рис. 4

Очевидно, что величина нормальных напряжений при изгибе по сравнению со статическими напряжениями даже в зоне резонанса невелика ($\sigma_{\max} = 6,5$ МПа при $\omega_p = 204$ с⁻¹), и поэтому их влияние на значение интенсивности напряжений мало. Но, несмотря на малые значения амплитуд напряжений, при длительной эксплуатации колебания с частотой, близкой к резонансной,

могут оказывать существенное влияние на ресурс изделия.

Следует отметить также, что динамические особенности конечного пролета теплообменного аппарата от первого будут отличаться незначительно.

Кроме этого, сравнительный анализ полученных результатов исследования НДС узлов крепления труб механическими методами закрепления [13], [14], таких как, гидравлическая раздача и роликовое вальцевание, показал, что при гидрораздаче на внутренней поверхности узла крепления образуются нормальные окружные и радиальные напряжения растяжения, а при роликовом вальцевании в тонком слое образуются радиальные напряжения сжатия.

По характеру возникающих остаточных напряжений в зонах технологического влияния второй случай более предпочтителен, т.к. повышает коррозионную устойчивость детали.

Таким образом, следует отметить, что долговечность теплообменных аппаратов во многом определяется технологией изготовления трубных пучков, а именно, способом закрепления теплообменных труб в трубных досках или коллекторах. Применительно к коллекторам подогревателей воздуха для заводов по термической переработке отходов способы закрепления труб в трубных решетках должны определяться еще на стадии проектирования котельного оборудования с учетом трудоемкости изготовления при совместном участии технологической службы заводов-изготовителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веселов Ф., Соляник А., Уврацева Л. Низкоуглеродная перестройка электроэнергетики России до 2035 года: потенциал снижения эмиссии CO₂ и его "цена" для потребителя // Энергетическая политика. – 2021, № 11.
2. Tugov A.N. Modern Technologies for the Thermal Treatment of Municipal Solid Waste, and Prospects for Their Implementation in Russia (Review) // Thermal Engineering. – 2021. Vol. 68. P. 1...16.
3. Распоряжение Правительства РФ N 84-р от 25 января 2018. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года.
4. Зеликов Е.Л. Повышение надежности пароперегревателей котлов ТЭС для сжигания твердых бытовых отходов: Дис.... канд. техн. наук. – 2008.

5. Тугов А.Н. Исследование процессов и технологий энергетической утилизации бытовых отходов для разработки отечественной ТЭС на ТБО: Дис. ... докт. техн. наук. – М., 2012.

6. Krips H., Podhorsky M. Hydraulisches Aufweiten - ein neues Verfahren zur Befestigungen fñn Rohren // VGB Kraftwerkstechnik. – 56. 1976. № 7. S.456...464.

7. Юзык С.И. Развальцовка труб в судовых теплообменных аппаратах. – Л.: Судостроение, 1978.

8. Ткаченко Г.П., Бриф В.М. Изготовление и ремонт кожухо-трубной теплообменной аппаратуры. – М.: Машиностроение, 1980.

9. Кондратенко Л.А. Механика роликового вальцевания теплообменных труб. – М.: Спутник, 2015.

10. Терехов В.М., Смирнов А.М., Хижев М.Ю. Закрепление теплообменных труб в толстостенных трубных решетках комбинированным способом // Тяжелое машиностроение. – 2019, №4. С. 10...14.

11. Смирнов А.М., Терехов В.М., Аверин А.С. Особенности технологии раздачи теплообменных труб достаточной толщины и оценка качества пресовых соединений // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019, №1. С. 150...155.

12. Kondratenko L. A., Mironova L. I. and Vinnikov V. S. Deformations and Stresses of Thick-Walled Heat Exchange Pipes during Hydraulic Expansion // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. Vol.50, No. 8. P.703...709.

13. Кондратенко Л.А., Миронова Л.И. Динамика создания напряженно-деформированного состояния в трубной доске при закреплении теплообменных труб методом гидрораздачи // Тяжелое машиностроение. – 2022, № 1. С. 2...7.

14. Кондратенко Л.А., Смирнов А.М., Терехов В.М., Миронова Л.И. Динамические особенности первого пролета теплообменных труб энергетических установок // Тяжелое машиностроение. – 2018, №6. С. 36...40.

15. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1972.

REFERENCES

1. Veselov F., Solyanik A., Uvravceva L. Low-carbon restructuring of the Russian electric power industry until 2035: the potential for reducing CO₂ emissions and its "price" for the consumer // J. Energy Policy. – 2021 (11).
2. Tugov A.N. Modern Technologies for the Thermal Treatment of Municipal Solid Waste, and Prospects for Their Implementation in Russia (Review) // Thermal Engineering. – 2021. Vol. 68. P. 1...16.
3. Decree of the Government of the Russian Federation N 84-p of January 25, 2018. Strategy for the development of industry for the processing, recycling and disposal of production and consumption waste for the period until 2030.
4. Zelikov. E.L. Increasing the Reliability of Superheaters of Boilers at TPPs for Solid Domestic Waste Combustion. Dis. cand. tech. Sciences, Moscow, 2008.

5. Tugov A.N. Research of processes and technologies of energy utilization of household waste for the development of a domestic thermal power plant on solid waste. Dis. cand. tech. Sciences, Moscow, 2012.
6. Krips H., Podhorsky M. Hydraulisches Aufweiten - ein neues Verfahren zur Befestigung von Röhren. // VGB Kraftwerkstechnik. – 56. 1976. №7. P.456...464.
7. Yuzik S. I.. Tube expanding in ship heat exchangers. Shipbuilding, – Leningrad, 1978.
8. Tkachenko G. P., Brif V. M. Manufacturing and repair of shell-and-tube heat-exchange equipment. Machine-building. – Moscow, 1980.
9. Kondratenko L.A. Mechanics roller rolling heat exchange tubes. – Sputnik, Moscow, 2015.
10. Terekhov V.M., Smirnov A.M., Hizhov M.YU. Combined fastening of heat exchange tubes in thick-walled tube sheets. J. Heavy Machine Building. 2019 (4). P.10.
11. Smirnov A.M., Terekhov V.M., Averin A.S. Estimation of quality of heat exchange pipes with external ribs for the separator-superheater. J. Engineering & Automation Problems. – 2019 (1). P. 150.
12. Kondratenko L. A., Mironova L. I. and Vinnikov V. S. Deformations and Stresses of Thick-Walled Heat Exchange Pipes during Hydraulic Expansion // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021, Vol. 50, (8). P. 703.
13. Kondratenko L.A., Mironova L.I. Dynamics of creating a stress-strain state in a tube sheet when fixing heat-exchange tubes by hydraulic expansion // J. Heavy Machine Building. – 2022 (1). P. 2.
14. Kondratenko L.A., Smirnov A.M., Terekhov V.M., Mironova L.I. Dynamic features of the first span of heat exchange tubes of power plants. // J. Heavy Machine Building. – 2018 (6). P. 36.
15. Feodos'ev V.I. Strength of materials. Nauka, FML. – Moscow, 1963.

Рекомендована кафедрой теоретической и прикладной механики РГУ имени А.Н. Косыгина. Поступила 17.01.23.