

УДК 622.692.4.076:62-533.65

Повышение эффективности теплообменников подогревателей газа газораспределительной станции за счет использования труб с внутренним оребрением

В.М. Янчук^{1*}, И.В. Шишкин², П.А. Кузьбожев², А.В. Сальников³

¹ ООО «Газпром трансгаз Ухта», Российская Федерация, 169300, Республика Коми, г. Ухта, наб. Газовиков, д. 10/1

² Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, Российская Федерация, 169330, Республика Коми, г. Ухта, ул. Севастопольская, д. 1-а

³ ООО «Транснефть – Порт Приморск», Российская Федерация, 188910, Ленинградская обл., Выборгский р-он, пр. Портовый (Приморская тер.), д. 7

* E-mail: v.yanchuk@sgp.gazprom.ru

Тезисы. Теплообменное оборудование подогревателей газа с промежуточным теплоносителем, как правило, выполнено по стандартной схеме и представляет собой трубные сборки (пучки), погруженные в общий объем промежуточного теплоносителя.

С целью интенсификации режима теплопередачи между двумя средами, находящимися в разном агрегатном состоянии, предлагается использование труб с повышенной площадью поверхностей теплообмена. Для анализа и оценки полей распределения температур и параметров теплопереноса через стенку трубы с повышенной площадью поверхностей теплообмена (внутреннее оребрение) были выполнены расчетные модели.

По результатам проведенного расчетного моделирования установлено, что применение в теплогенераторе подогревателя труб с внутренними ребрами позволяет интенсифицировать процесс теплопередачи от продуктов сгорания промежуточному теплоносителю. Так, при прохождении потока через дымогарную трубу с десятью внутренними пирамидальными ребрами максимальная температура продуктов сгорания на 48...50 °С ниже температуры продуктов сгорания на выходе трубы без ребер (310 °С).

Теплообменное оборудование подогревателей газа с промежуточным теплоносителем, как правило, выполнено по стандартной схеме и представляет собой трубные сборки (пучки), погруженные в общий объем промежуточного теплоносителя.

Газовый теплообменник выполняется из стальных трубок, удерживаемых двумя противоположно расположенными трубными досками, одна из которых присоединяется к камере подключения (оснащенной двумя патрубками с фланцами и разделенной на два изолированных объема), а вторая к поворотной камере.

К недостаткам газового теплообменника следует отнести следующие особенности конструкции:

- плотная укладка трубок (обусловленная размерами приемной и поворотной камер), вследствие чего нагрев газа во внутренних трубках сборки происходит с меньшей эффективностью;
- необходимость использования узлов сложной формы (поворотной и разделительной камер), имеющих значительный вес и материалоемкость;
- необходимость выполнения большого объема сварочных работ при сборке теплообменника.

Для повышения эффективности работы газового теплообменника подогревателя ГТМ-ПТПГ-30 специалистами предприятия ООО «Завод «Газпромаш» (А.Г. Маслин, П.В. Хворостян) предложен газовый U-образный теплообменник новой конструкции.

В результате предлагаемой модернизации достигается:

- снижение трудоемкости изготовления (уменьшение объема сварочных работ в два раза);
- снижение веса конструкции за счет отказа от использования толстостенных деталей сложной формы (поворотных камер);

Ключевые слова: подогреватель газа, теплообмен, расчетное моделирование.

- повышение надежности (снижение количества сварных соединений);
- снижение гидравлических сопротивлений;
- повышение эффективности работы теплообменника за счет уменьшения плотности укладки труб в сборке.

В дальнейшем в качестве совершенствования конструкции газового теплообменника может стать использование труб с повышенной площадью поверхностей теплообмена. Основная достигаемая при этом цель – интенсификация режима теплопередачи между двумя средами, находящимися в разном агрегатном состоянии.

Повышение интенсивности теплообмена между сжатым газом и стенкой трубы может быть выполнено за счет использования в газовом теплообменнике труб с внутренними ребрами (продольными или винтовыми).

Использование внутренних ребер в трубах теплообменника обеспечивает увеличение площади поверхности теплообмена со стороны теплоносителя с меньшей теплоотдачей, в результате чего достигается повышение теплопередачи. При использовании внутренних ребер имеет место искажение режима движения нагреваемой (охлаждаемой) среды в пристенной зоне, сопровождающееся общим замедлением потока и, как следствие, повышением интенсивности его нагрева. В итоге при использовании внутренних ребер повышается как теплообмен, так и гидравлическое сопротивление теплообменника.

Конструкция оребренных труб может быть различной. Например, для снижения трудоемкости исполнения трубы могут быть использованы вставные ребра, выполненные в виде трубчатых вставок с внутренними

ребрами из теплопроводного материала (рис. 1а). Основным недостатком данной конструкции – значительное увеличение металлоемкости получаемых труб. Пример технологии изготовления теплообменных труб со спиральными ребрами продемонстрирован на рис. 1б. Технология предполагает последовательное деформирование (обжатие и винтовое скручивание) в специальном устройстве трубной заготовки с внутренними продольными выступами. Применение указанных труб является предпочтительным, так как при наличии развитой внутренней поверхности теплообмена они будут характеризоваться металлоемкостью, близкой к гладким трубам.

Использование оребренных труб в теплогенераторе подогревателя газа также может быть оправданным решением. Оценка эффективности применения в теплообменниках труб с внутренними продольными ребрами показана в работе [1]. Исследования выполнены для теплообменника, используемого при нагреве воды за счет сжигания природного газа или пропана с воздухом. В принятой расчетной модели продукты сгорания проходят по трубам с внутренними ребрами, а нагреваемая среда взаимодействует с их наружной стенкой.

По результатам проведенных исследований авторами [1] было установлено, что лучшей эффективностью будет обладать теплообменник, снабженный сплошными продольными ребрами высотой $0,08d$ (d – наружный диаметр трубы) и шириной основания $0,025d$.

Расчетная модель

Теплогенератор подогревателя газа типа ПТПГ-30 стандартно оснащен стальными дымогарными трубами наружным диаметром 76 мм, с толщиной стенки 4 мм. Теплообмен

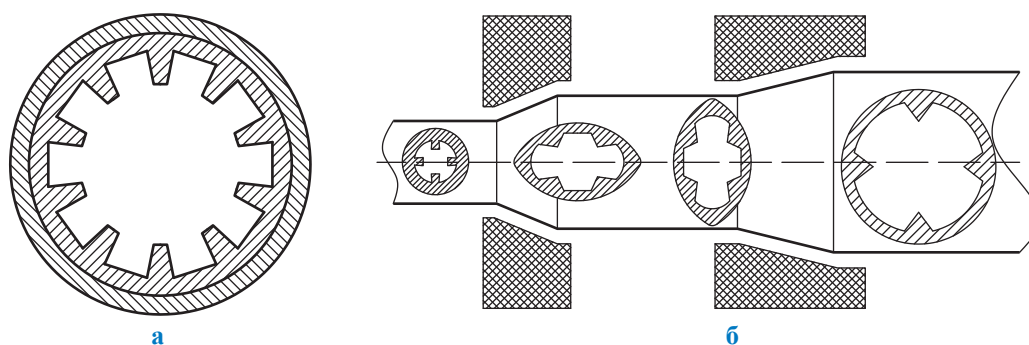


Рис. 1. Исполнение труб с внутренними ребрами: а – составная конструкция; б – технология исполнения труб с винтовыми внутренними ребрами

в системе «продукты сгорания – стенка трубы – промежуточный теплоноситель» осуществляется за счет конвекции (тепломассопереноса).

Оценка эффективности применения в дымогарных трубах внутренних ребер выполнена по результатам расчетного моделирования процесса теплопередачи между средами, находящимися в разном агрегатном состоянии (газообразном и жидком), через стальную стенку сложной формы. Для проведения анализа использован расчетный комплекс Ansys Thermal (стационарный теплообмен). Коэффициент теплоотдачи в системе «продукты сгорания – стенка трубы» принимается равным $70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, в системе «стенка трубы – промежуточный теплоноситель» – $4000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Теплопроводность стали составляет $50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

При выполнении анализа использованы три расчетные модели:

- исходная модель, представляющая собой фрагмент дымогарной трубы диаметром 76 мм, с толщиной стенки 4 мм;
- модель, содержащая 10 внутренних пирамидальных ребер, высотой $0,04D_{\text{в}}$ ($D_{\text{в}}$ – внутренний диаметр трубы), с шириной основания $0,08D_{\text{в}}$;
- модель, содержащая 20 внутренних пирамидальных ребер, высотой $0,04D_{\text{в}}$, с шириной основания $0,08D_{\text{в}}$.

Внешний вид расчетных моделей показан на рис. 2. Для труб с внутренними ребрами подбор геотермических параметров внутренней поверхности стенки выполнялся с учетом сохранения площади проходного сечения трубы, а также площади поперечного сечения стенки (за счет некоторого утонения в промежутках между ребрами).

Геометрические характеристики труб приведены в таблице. Форма ребра принимается

из условия минимизации накапливаемых в пространстве между ребрами твердых продуктов сгорания, препятствующих теплообмену.

Результаты расчетного моделирования процесса теплообмена между газообразными продуктами сгорания природного газа и жидким промежуточным теплоносителем через стенку трубы с внутренними пирамидальными ребрами показаны на рис. 3.

Установлено, что увеличение площади внутренней поверхности стенки дымогарной трубы на 10,5 % (от $0,2136$ до $0,2360 \text{ м}^2$ на 1 м длины) способствует увеличению теплоотдачи на 15,5 %. При увеличении площади поверхности теплообмена на 20,8 % (от $0,2136$ до $0,2581 \text{ м}^2$ на 1 м длины) теплоотдача возрастает на 22,5 %.

Особенности распределения температур в поперечном сечении дымогарной трубы с внутренними ребрами, а также параметры теплоотдачи через стенку трубы показаны на рис. 4.

При температуре $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ наиболее термонагруженными участками трубы являются вершины ребер, температура которых на $7 \text{ }^\circ\text{C}$ превышает температуру внутренней поверхности стенки трубы без оребрения. Теплоотдача с внешней поверхности трубы распределена неравномерно и имеет максимум в основании ребер.

Для оценки особенностей теплообмена в потоке, проходящем по трубе сгорания, выполнено расчетное моделирование процесса истечения разогретой газообразной среды (дымового газа) через дымогарную трубу протяженностью 3,8 м (стандартная длина дымогарной трубы подогревателя типа ПТПГ-30) с площадью проходного сечения $\approx 0,00365 \text{ м}^2$. Расчет выполнен в программном комплексе конечно-элементного анализа Ansys Fluent.

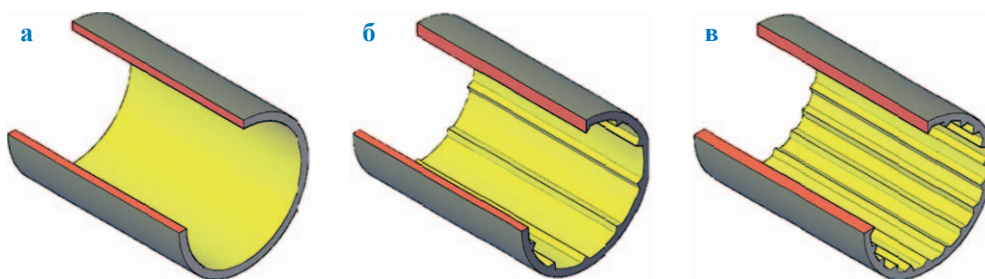
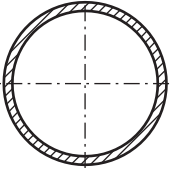
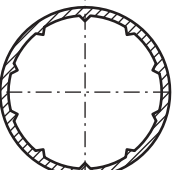
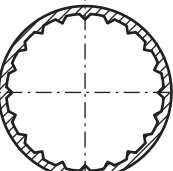


Рис. 2. Принимаемые к анализу расчетные модели:

- а – гладкая труба; б – труба с 10 внутренними пирамидальными ребрами;
в – труба с 20 пирамидальными ребрами

Геометрические характеристики расчетных моделей дымогарных труб теплогенератора

Схема	Геометрические характеристики, вес
	<p>Площадь проходного сечения трубы – 0,003632 м². Площадь поперечного сечения стенки – 0,0009045 м². Вес трубы (фрагмента длиной 1 м) – 7,1 кг. Площадь внутренней поверхности теплообмена (на 1 м длины трубы) – 0,2136 м²</p>
	<p>Площадь проходного сечения трубы – 0,0036352 м². Площадь поперечного сечения стенки – 0,0009013 м². Вес трубы (фрагмента длиной 1 м) – 7,1 кг. Площадь внутренней поверхности теплообмена (на 1 м длины трубы) – 0,2360 м²</p>
	<p>Площадь проходного сечения трубы – 0,0036376 м². Площадь поперечного сечения стенки – 0,0008989 м². Вес трубы (фрагмента длиной 1 м) – 7,1 кг. Площадь внутренней поверхности теплообмена (на 1 м длины трубы) – 0,2581 м²</p>

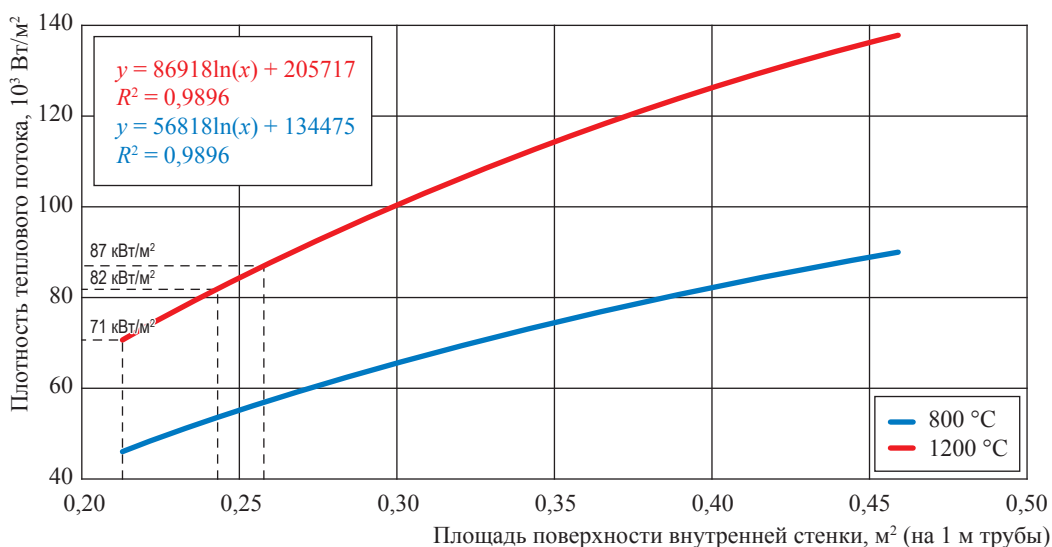


Рис. 3. Результаты расчетного моделирования процесса теплообмена между продуктами сгорания топливного газа и промежуточным теплоносителем через стенку трубы с внутренним оребрением

Исходные данные для расчета следующие:

- расход топливного газа – 30 $\text{нм}^3/\text{ч}$ (загрузка 40 % – среднестатистический режим работы стандартного подогревателя типа ПТПГ-30);
- объем продуктов сгорания (на 1 нм^3 природного газа) – 12,0 нм^3 ;

- скорость потока продуктов сгорания в дымогарной трубе при рассматриваемом режиме работы – 0,55 м/с;
- режим теплообмена между продуктами сгорания и стенкой дымогарной трубы – конвективный, коэффициент теплоотдачи – 70 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура стенки – 45 $^\circ\text{C}$;

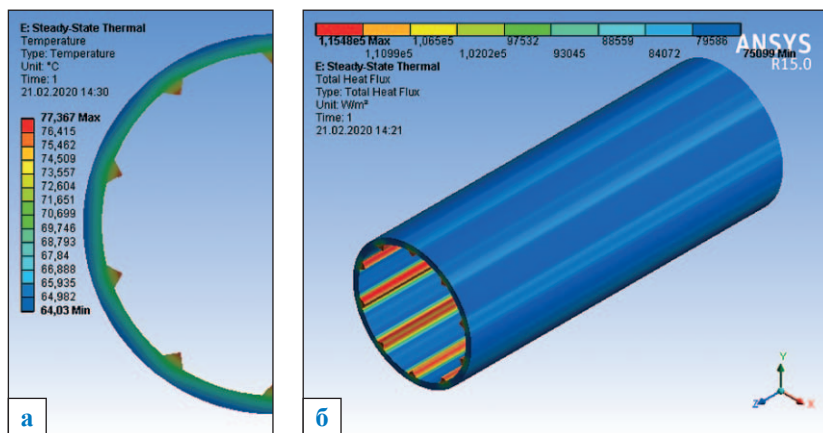


Рис. 4. Поле температур (а) и параметры теплопереноса через стенку трубы с внутренними ребрами (б) при температуре продуктов сгорания 1200 °С

• температура дымовых газов на входе дымогарной трубы – 1200 °С.

Результаты расчетного моделирования (поле температур в потоке продуктов сгорания) приведены на рис. 5 и 6.

Для оценки эффективности применения в газовом теплообменнике подогревателя ПТПГ-30 труб с внутренними ребрами выполнено расчетное моделирование процесса теплопередачи между жидким промежуточным теплоносителем и сжатым природным газом через стенку трубы теплообменника.

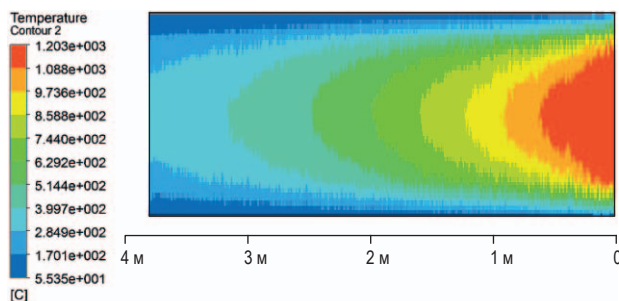


Рис. 5. Поле распределения температур в потоке продуктов сгорания, проходящих через дымогарную трубу

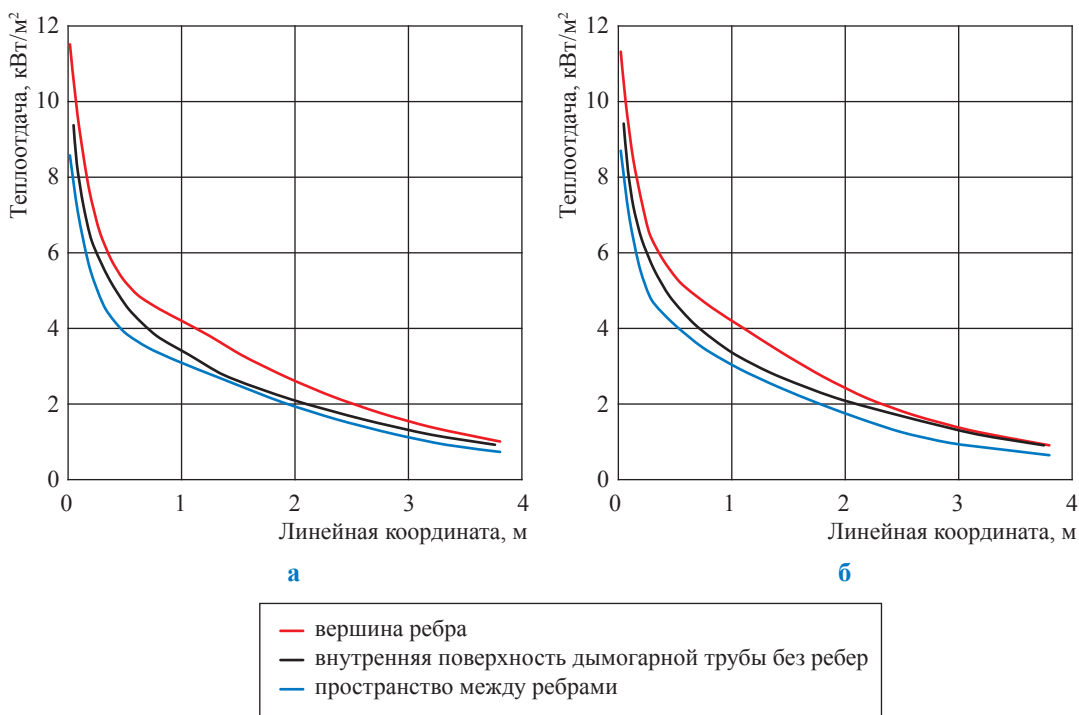


Рис. 6. Плотность теплового потока на внутренней (орезренной) поверхности дымогарной трубы: а – 10 ребер; б – 20 ребер

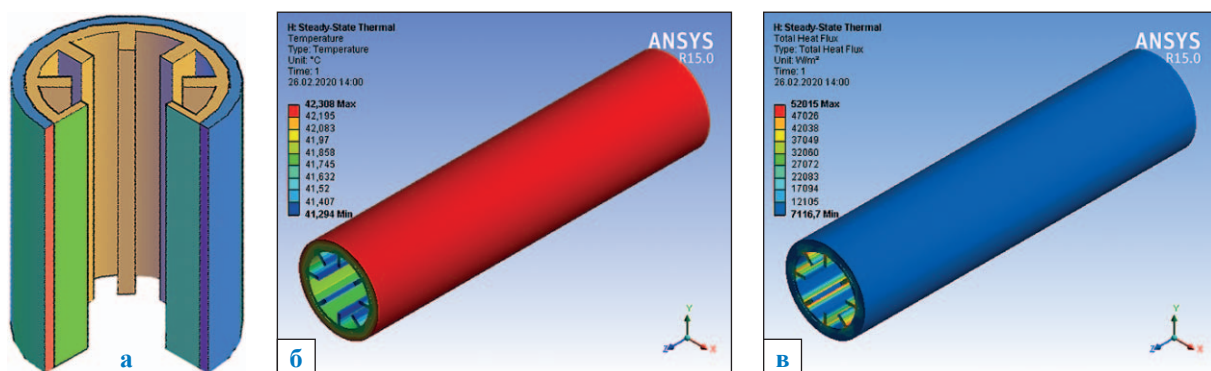


Рис. 7. Результаты расчетного моделирования процесса теплообмена между промежуточным теплоносителем и сжатым газом:

а – расчетная модель; б – поле распределения температур; в – плотность теплового потока

Для повышения теплопередачи в системе «стенка трубы – сжатый газ» предлагается использовать трубы комбинированной конструкции с внешней несущей трубкой из нержавеющей стали и внутренней цилиндрической алюминиевой вставкой с оребренной внутренней поверхностью.

Для проведения анализа использован расчетный комплекс Ansys Thermal (стационарный теплообмен). Исходные данные для расчета следующие:

- тип теплообмена – конвективный (температура промежуточного теплоносителя – 45 °С, температура газа – 10 °С);
- коэффициент теплоотдачи «стенка трубы – сжатый газ» – 250 Вт/(м²·К);
- коэффициент теплоотдачи «стенка трубы – промежуточный теплоноситель» – 4000 Вт/(м²·К).

Результаты расчетного моделирования представлены на рис. 7. В качестве исходного варианта рассматривается труба из нержавеющей стали с внутренним диаметром 20 мм. Несущая труба в предлагаемом варианте имеет внутренний диаметр 22 мм.

По результатам приведенного расчетного моделирования установлено, что применение в теплогенераторе подогревателя труб с внутренними ребрами позволяет интенсифицировать процесс теплопередачи от продуктов сгорания промежуточному теплоносителю.

При прохождении потока через дымогарную трубу с десятью внутренними пирамидальными ребрами максимальная температура продуктов сгорания на 48...50 °С ниже температуры продуктов сгорания на выходе трубы без ребер (310 °С). При наличии в трубе 20 пирамидальных ребер температура дымовых газов на выходе трубы составляет 240 °С, что на 70 °С ниже температуры на выходе трубы с гладкой внутренней стенкой.

При отсутствии оребрения внутренней поверхности стенки теплоотдача дымогарной трубы (для заданного режима работы) составляет 2,2 кВт. При использовании труб с внутренним оребрением указанный параметр повышается до 2,5 кВт (10 ребер, площадь поверхности теплообмена «продукты сгорания – стенка» – 0,9 м²) или 2,7 кВт (20 ребер, площадь поверхности теплообмена «продукты сгорания – стенка» – 1,0 м²). Увеличение теплоотдачи составляет ≈ 15 % при наличии 10 ребер и ≈ 23 % при наличии 20 ребер.

Совершенствование трубок газового теплообменника за счет использования оребренных теплопроводящих вставок (10 прямоугольных ребер высотой 0,4D и шириной 0,1D) обеспечивает повышение теплоотдачи нагреваемому газу не менее чем на 7,5 % (с 6,6 до 7,1 кВт/м²).

Список литературы

1. Жукова Ю.В. Численное моделирование теплообмена при течи теплоносителя в круглой трубе с внутренним оребрением / Ю.В. Жукова, А.Д. Чорный. – <https://www.researchgate.net>.