

# ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.181.123:621.184.64

Петриков С.А., Попов В.С., Хованов Н.Н.

## ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБОПРОВОДНЫХ КАНАЛАХ ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Основываясь на механизме зарождения турбулентности в пограничных слоях потоков теплоносителей [1–3], учитывая исследования отечественных и зарубежных авторов и производственный опыт энергомашиностроительных заводов, поставлена цель работы – разработка оптимальных конструкций энергоэффективных по теплопередаче конвективных труб и технологических процессов их изготовления с решением следующих задач:

- создание конструкций энергоэффективных по теплообмену труб с системой многозаходных, спиралевидно расположенных канавок и выступов на теплообменных поверхностях трубы;
- разработка технологического решения по изготовлению теплообменной трубы с расположением на ее наружной поверхности стальных дисков, соединение которых с трубой обеспечивается с помощью пластически формируемых выступов;

– создание труб конвективного теплообмена с системой выступов и лунок на теплообменных поверхностях;

- исследования силовых характеристик процесса формообразования теплопередающих поверхностей в трубах для определения конструктивных и прочностных характеристик технологических устройств и инструментов;
- изыскание путей по уменьшению разрушающего действия низко температурной коррозии на металл трубного газа хода.

Анализ тепловых и гидравлических параметров, полученных расчетным путем с помощью программы «FlowVision», позволил разработать формы и геометрические размеры теплообменных поверхностей в трубах в виде многозаходных спиралевидно расположенных канавок и выступов (рис. 1, 2).

Установлено, что шаг закрутки спиралевидных неровностей на теплообменной поверхности трубы должен быть в интервале 1,0–1,4 относительно шага накатки, а глубина полусферического или трапециевидного профиля канавки в пределах 0,5–1,0 мм. При этом форму профиля канавки необходимо выполнять в виде радиусного сопряжения или сопряжения двух лучей с углом между ними  $\geq 90^\circ$  [4], что приводит не только к разрыву сплошности пограничного слоя и его закручиванию, но и к заметному смещению теплоносителя из периферийного слоя к оси трубопроводного канала.

В качестве оборудования для разработки технологических процессов изготовления теплообменных поверхностей в длинномерных трубах приняты станки токарной группы с механизмами кинематической и силовой связи заготовки и формообразующих инструментов. Отличительной особенностью выбранной схемы обработки (рис. 3) является фор-

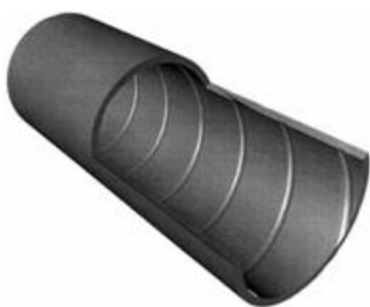


Рис. 1. Конвективная труба с системой многозаходных, спиралевидно расположенных канавок во внутренней полости

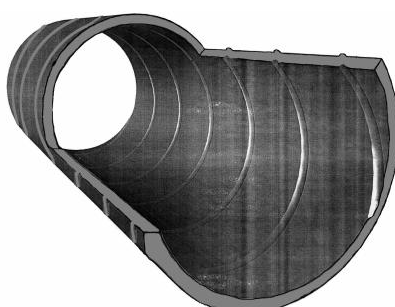


Рис. 2. Конвективная труба с системой многозаходных, спиралевидно расположенных канавок во внутренней полости и ответных выступов на наружной поверхности

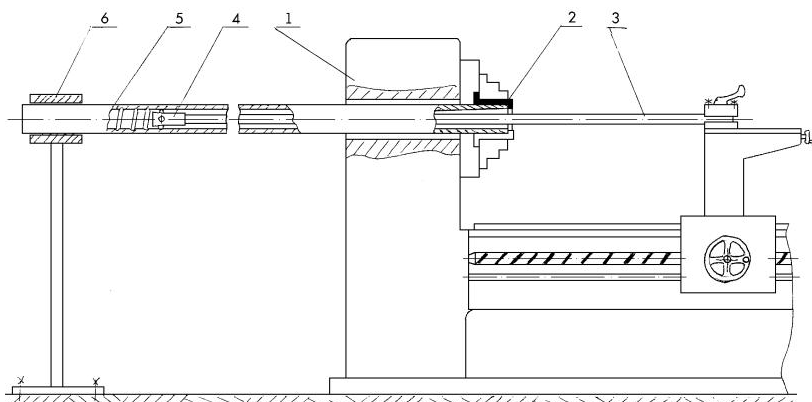


Рис. 3. Технологическая схема изготовления турбулизирующих канавок в трубе: 1 – токарно-винторезный станок; 2 – разжимная оправка; 3 – тяга; 4 – инструментальная головка; 5 – труба; 6 – выносной люнет

моообразование теплообменных поверхностей за пределами габаритных размеров станка.

При исследовании и разработке технологических процессов формирования теплообменных поверхностей в трубах применялись специально спроектированные плавающие инструментальные головки, конструктивное исполнение которых позволяло стабилизировать условия пластической деформации, контролировать износ инструментов и выдерживать размеры обработанных поверхностей.

Для исследования силовых параметров деформирующей обработки применен ряд аналитических и экспериментальных методов. При этом составляющие силы, действующие в процессе обработки (тянущее усилие и крутящий момент), определялись с использованием механического динамометра, который крепился как промежуточное звено между тянущей оправкой и резцедержателем станка, а также электромагнитным методом с использованием сконструированного датчика из пермаллоя (78% Ni; Fe; Mo).

Расчетные значения главной составляющей силы деформирования  $P_z$  для глубин профилей  $h=0,1-0,5$  мм при формировании трехзаходной теплообменной поверхности давилым инструментом с радиусом рабочей поверхности  $r_{ш} = 2; 4$  и  $5$  мм представлены графически на рис. 4. Увеличение радиуса с 2 до 5 мм при равных значениях глубины обрабатываемого профиля приводит к увеличению  $P_z$  приблизительно в 1,7 раза, а радиальное усилие возрастает в 2,6 раза.

Характер изменения осевой и радиальной сил в зависимости от угла подъема витка  $\omega$  обрабатываемых канавок в пределах от 15 до 45° практически одинаков (рис. 5).

Равномерное повышение сил деформирования металла наблюдается при увеличении толщины стенки от 1 до 2 мм, после чего рост усилия происходит в значительно меньшей степени, что объясняется уменьшением доли упругих деформаций.

Превышение расчетных данных над экспериментальными при определении сил деформирования достигали 12–15%, что допустимо для определения требуемой мощности оборудования и проведения прочностных расчетов конструктивных элементов технологической оснастки и инструмента.

Существенным резервом повышения эффективности теплопередачи, снижения металлоемкости и габаритных размеров теп-

лообменных аппаратов является увеличение площади наружной поверхности конвективной трубы путем ее оребрения металлической лентой или дисками. В работе технологически разработан и практически апробирован способ изготовления теплообменных труб с наружными дисками [5], соединенными между собой с использованием формообразования спиралевидно направленных выступов.

Оребрение трубы осуществляется на токарно-винторезном станке в следующей последовательности (рис. 6) [5]. Трубную заготовку 3 с размещенными на ней металлическими дисками 4 устанавливают в ложемент гребенки 5, обеспечивающей осевую фиксацию стальных дисков вдоль оси трубной заготовки 3 с шагом  $t$ . Гребенка 5 закреплена на станине токарно-винторезного станка. Трубная заготовка 3 через разрезную втулку 2, имеющую кольцевой буртик для предотвращения осевого сдвига трубы в процессе оребрения,

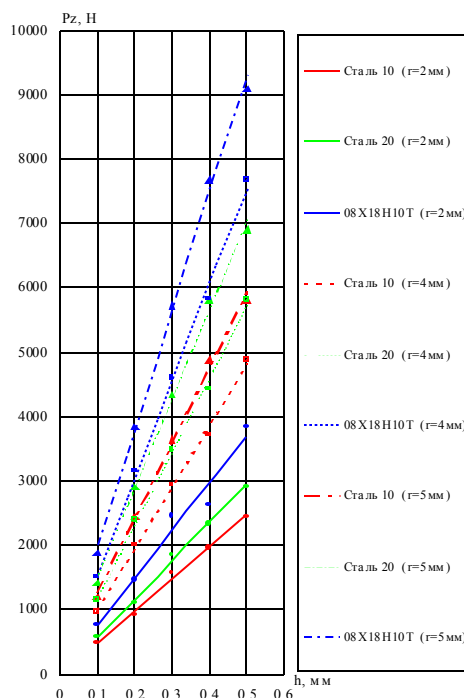


Рис. 4. Расчетные зависимости сил деформирования  $P_z$  от глубины и радиуса канавки

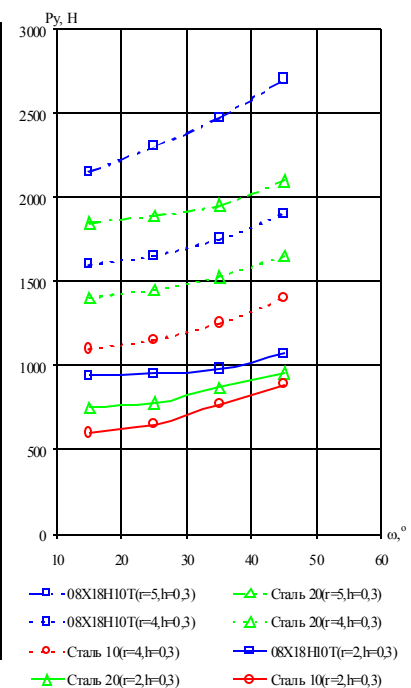


Рис. 5. Расчетные изменения составляющих сил деформирования от угла подъема витка канавки

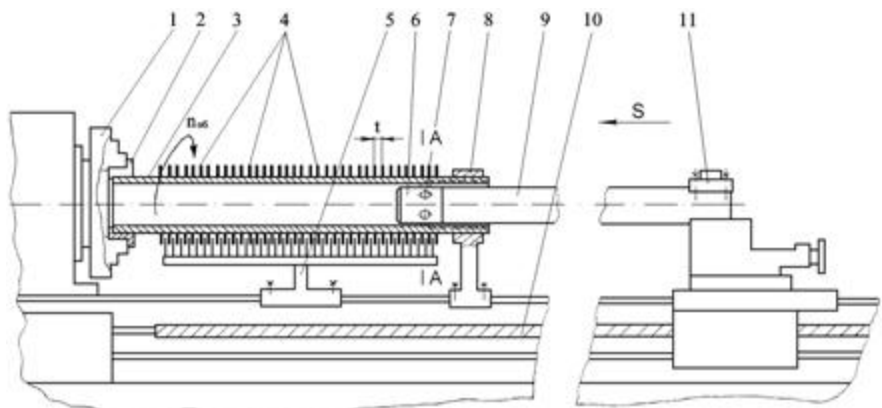


Рис. 6. Технологическая схема оребрения трубы металлическими дисками

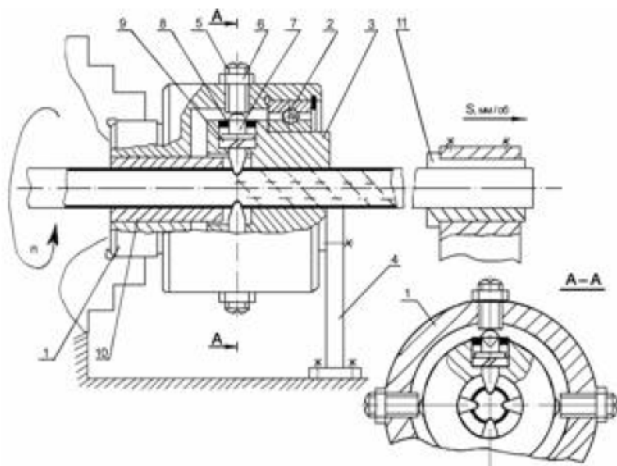


Рис. 7. Устройство для ударного формообразования каверн и выступов на теплообменных поверхностях тонкостенных труб

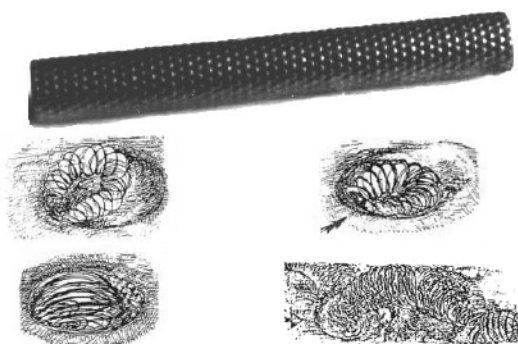


Рис. 8. Вид трубы с лунками и выпорами и фазы обтекания лунок газовым теплоносителем

крепится в патроне 1 токарно-винторезного станка и поддерживается лонетом 8. Внутри трубной заготовки вводят со стороны задней габки станка оправку 9, соединенную с раскатной головкой 6, оснащенной давящим инструментом с формообразующими телами сферической формы 7, выставленными на размер требуемой величины канавок и выпоров в стенке трубной заготовки. Другой конец оправки 9 крепится в резцедержателе 11 станка.

Трубной заготовке 3 сообщают вращение  $\omega_{об}$ , согласованное с осевой подачей  $S$  оправки 9 от ходового винта 10 токарного станка. Формообразующие тела 7 раскатной головки 6 формируют многозаходные спирально-видно направленные канавки во внутренней полости трубы и спиральные выпоры на ее наружной поверхности, закрепляющие металлические диски 4.

Проведенные оптимизационные расчетно-теоретические исследования с использованием пакета «FlowVision» показали – эффективность разрушения ламинарного пограничного слоя и создание условий для турбулизации потоков теплоносителей в теплообменных аппаратах, оснащенных трубами, при использовании в качестве возмущающего фактора лунок различной геометрической формы, расположенных на внешней поверхности трубы, и выпоров на внутренней поверхности существенно зависят от количества и расположения

лунок  $a_l$  и выпоров  $a_v$  на единице длины трубы, скоростей потоков теплоносителей  $V_{тепл.внутр}$ ,  $V_{тепл.внешн}$ , геометрических форм лунки и выпора  $F_l$  и  $F_v$ , глубины профиля лунки  $h_l$  и высоты выпора  $h_v$  на внутренней поверхности трубы.

$$G=f\{V_{тепл.внутр}, a_l, F_l, h_l + V_{тепл.внешн}, a_v, F_v, h_v\}.$$

Формирование на теплообменных поверхностях труб с толщинами стенки менее 1 мм каверн и выпоров различной формы, плотности, осевого или винтообразного расположения осуществлялось с помощью разработанного приспособления (рис. 7) [6, 7]. На рис. 8 представлены вид обработанной трубы и выявленные схемы фаз процесса обтекания сферической лунки газовым теплоносителем.

Устройство содержит наружную обойму 1, закрепленную в патроне токарно-винторезного станка, в полости которой через подшипник 2 размещена неподвижная внутренняя обойма 3. Обойма 3 в круговом и осевом направлении фиксируется с помощью размещенной на станине станка стойки 4.

В наружной обойме 1 находятся нажимные штифты 5, радиальное положение которых фиксируется гайками 6, а в обойме 3 – формообразующие бойки 7, удерживаемые в расточках с помощью резьбовых втулок 8. Бойки 7 при работе взаимодействуют с тарельчатыми пружинами 9.

В расточке обоймы 1 размещена бронзовая втулка 10, обеспечивающая центрирование трубы при ее продольном перемещении, а также радиальную жесткость при формировании каверн.

Работа с использованием разработанного приспособления осуществляется следующим образом.

Приспособление крепится в патроне токарно-винторезного станка. Пропущенная через полый шпиндель станка обрабатываемая труба передним концом закрепляется в резцедержателе станка посредством разрезной втулки 11. Шпинделю станка сообщают вращение с числом оборотов  $n$ , а трубе сообщают продольную подачу  $S_{пр}$  с учетом зависимости  $S_{пр} = nt$ , где  $t$  – шаг расположения лунок, мм.

При вращении обоймы 1 нажимной штифт 5 набегаet своей плоской частью на сферическую поверхность формирующего бойка 7, сообщая ему радиальную подачу внедрения в трубу с формированием лунки заданной геометрической формы, соответствующей геометрической форме рабочей части бойка 7. В зависимости от количества расположенных по окружности обоймы 2 формообразующих бойков 7 и нажимных штифтов 5 в обойме 1 число рядов каверн и выступов на теплообменных поверхностях трубы в сечении может быть 2, 3, 4, 5 и больше.

При малой инерционности формообразующего бойка, большой кинетической энергии удара и высокой скорости деформации обеспечиваются условия, при которых минимизируются возможные деформации трубы в ее сечениях.

Время контакта формообразующего бойка с трубой составляет в зависимости от скорости вращения наружной обоймы 0,0001–0,006 с.

Штучное время изготовления одной трехметровой теплообменной трубы  $\varnothing 16 \times (0,2-1,0)$  мм с кавернами и выпорами составляет не более 3 мин.

Для формирования каверн и выпоров на толстостенных трубных заготовках  $\varnothing 42-60 \times 2,5-3,5$  мм (рис. 9) создан штамп, позволяющий одновременно формировать 10 каверн и выпоров с последующей переустановкой трубы и проведения следующей операции по выдавливанию. В конструкции штампа предусмотрено варьирование геометрических размеров каверны, их количество и расположение, а также глубины вдавливания.

Для защиты металла в местах запрессовки труб в трубную доску от разрушающего действия коррозионных процессов, протекающих в момент запуска в эксплуатацию, например водогрейного котла, разработана конструкция соединительного узла (рис. 10) [8], состоящая из двух concentрично расположенных отрезков толстостенной 2 и тонкостенной 1 труб. На внутренней поверхности толстостенной трубы имеются многозаходные канавки 3 со спиралевидным направлением, а на ее наружной поверхности спиралевидно расположены выступы 5, образующие с внутренней поверхностью тонкостенной трубы 1 воздушные карманы 6. На торцовых участках толстостенной трубы и по ее длине дополнительно выполнены кольцевые канавки 4 и выступы для добавочного разделения воздушных карманов.

Воздушные карманы, образованные при сочленении двух труб, термоизолируют конец толстостенной трубы в момент запуска котлоагрегата, т.е. в начальный период прохождения газообразного теплоносителя, что позволяет интенсивно ее прогреть до температуры выше точки росы и снизить время действия низкотемпературной коррозии, а многозаходное рифление на внутренней поверхности толстостенной трубы в виде спиралевидных и кольцевых канавок способствует созданию вихревых потоков газового теплоносителя, которые содействуют турбулизации и разрушению пристеночных ламинарных зон, что, в



Рис. 9. Вид теплообменной трубы  $\varnothing 60 \times 3,5$  мм с кавернами и выпорами на теплопередающих поверхностях

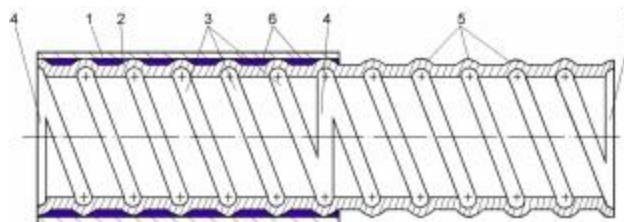


Рис. 10. Вид заделки конвективной трубы в трубную доску

свою очередь, приводит к существенно большему увеличению теплоотдачи от одного теплоносителя к другому.

#### Заключение

Улучшение эксплуатационных характеристик тепловых энергоустановок, теплообменных аппаратов, снижение их материалоемкости и габаритных размеров являются существенными факторами повышения конкурентоспособности отечественного машиностроения.

#### Список литературы

1. Prandtl L. *Gesammelte Abhandlungen zur angewanten Mechanic, Hydro- und Aerodynamic*, T1 1-3, B, 1961.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А., Воронин Г.И., Дубровский Е.В. Закономерности изменения теплоотдачи на стенках каналов с дискретной турбулизацией потока при вынужденной конвекции: Открытие №242 по заявке № ОТ-9357 от 11.10.76г. с приоритетом: 05.1958 г. – в части теоретического обоснования; 04.1964г. – в части экспериментального подтверждения.
3. Михеев М.А., Михеева И.Н. *Основы теплопередачи*. М.: Энергия, 1978.
4. Пат. 2197683 РФ, МПК 7 F 22 В 9/00, F 28 F 13/02. Дымогарная труба теплообменного аппарата / Петриков С.А., Серов Н.Б., Хованов Н.Н., Петров В.В.
5. Пат. 2182052 РФ, МПК F22B. Способ изготовления оребренной конвективной трубы теплообменного аппарата / Петриков С.А., Серов Н.Б., Хованов Н.Н., Черный А.П., Курмаев Р.К.
6. Пат. 71417 РФ, МПК F28F 1/00 (2006/01). Устройство для ударного формирования каверн и выпоров на теплообменных поверхностях тонкостенной трубы / Петриков С.А., Попов В.С., Спильник Е.Р., Хованов Н.Н.
7. Технологический процесс и оснастка для ударного формирования дискретных неровностей на поверхностях теплообменных труб / Хованов Н.Н., Ефимов В.М., Попов В.С., Петриков С.А. // *Машиностроение и инженерное образование*. 2007. № 2. С. 29-33.
8. Пат. 2269717 РФ, МПК F22B 37/06. Дымогарная конвективная труба стального жаротрубного водогрейного котла и способ ее изготовления / Петриков С.А., Петров В.В., Березной В.Л., Хованов Н.Н.

#### List of literature

1. Prandtl L. *Gesammelte Abhandlungen zur angewanten Mechanic, Hydro- und Aerodynamic*, T1 1-3, B, 1961.
2. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A., Voronin G.I., Dubrovsky E.V. The regularities of the heat transfer fluctuations on the canal walls with discrete stream turbulization at the necessary convection: Open № 242 according to request № OT-9357 dated 11.10.76. with priority: 05.1958 – theoretical explanations, 04.1964 – experimental proof.
3. Mikheev M.A., Mikheeva I.N. *The principles of heat transfer*. M.: Energy, 1978.
4. Pat.2197683 RF, MPK 7 F 22 V 9/00, F 28 F13/02. Smoke tube pipe of the heat exchanging device / Petrov S.A., Serov N.B., Khovanov N.N., Petrov V.V.
5. Pat.2182052 RF, MPK F22V. The way of producing ribbed convection pipe of the heat exchanging device / Petrikov S.A., Serov N.B., Khovanov N.N., Shernyi A.P., Kurmaev R.K.
6. Pat. 71417 RF, MPK F28F 1/00 (2006/01). The device for percussive formation of the cavities and vents on the heat exchanging surfaces of the thin-wall pipe / Petrikov S.A., Popov V.S., Spilnik E.R., Khovanov N.N.
7. The technological process and equipment for percussive formation of the discrete inequalities on the surface of heat exchanging pipes / Khovanov N.N., Efimov V.M., Popov V.S., Petrikov S.A. // *Machine building and engineering education*. 2007. № 2. P. 29-33.
8. Pat. 2269717 RF, MPK F22V 37/06. Smoke tube pipe of the steel water-heating shell boiler and its production way / Petrikov S.A, Petrov V.V., Bereznoi V.L., Khovanov N.N.