

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ. ВОДО-ВОДЯНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ И НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

### АННОТАЦИЯ

На крупномасштабных теплообменных аппаратах подтверждена высокая эффективность методов интенсификации теплообмена, разработанных в МАИ, применительно к водо-водяным теплообменникам различного назначения.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Работы по интенсификации теплообмена в каналах в МАИ ведутся с 60-х годов прошлого столетия. В результате комплекса научно-исследовательских работ разработаны и внедрены следующие наиболее эффективные методы интенсификации теплообмена в каналах применительно к трубчатым теплообменным аппаратам:

– метод искусственной турбулизации потока в пристенной зоне, основанный на периодическом создании небольших вихревых зон около стенки, являющихся источниками дополнительной турбулизации потока. Для трубчатых теплообменных аппаратов метод реализован путем накатки труб на автоматизированных станах, обеспечивающей двухстороннюю интенсификацию теплообмена - внутри труб и в межтрубном пространстве. Этим методом достигается преимущественная интенсификация теплообмена внутри труб;

– метод закрутки потока внутри витых овальных труб при продольном и поперечном обтекании плотноупакованных пучков витых труб и стержней, реализован протягиванием круглых труб через фильеру, придающую им заданную овальную форму и закрутку. Метод обеспечивает интенсификацию теплообмена и внутри труб, и, преимущественно, в межтрубном пространстве за счет возникающих упорядоченных вихревых структур, приводящих, в частности, к струйному натеканию теплоносителя на поверхность теплообмена и общей дополнительной турбулизации потока. Этим методом достигается преимущественно интенсификация теплообмена в межтрубном пространстве теплообменных аппаратов;

– рассмотренные методы также используются в комбинации друг с другом, в частности, использованием витых труб овального профиля с накаткой канавок на внешней поверхности и одновременным образованием поперечных выступов на внутренней поверхности труб.

Использование таких труб в теплообменных аппаратах обеспечивает высокую интенсификацию теплообмена и внутри труб (преимущественно за счет накатки), и в межтрубном пространстве (преимущественно за счет перемешивания потока). Такие трубы изготавливаются накаткой канавок на автоматизированных станах с последующей завивкой их протягиванием через фильеру по технологии изготовления витых труб.

Среди многочисленных областей техники и народного хозяйства, использующих разнообразное теплообменное оборудование и, особенно, теплообменные аппараты, наибольший удельный вес этого оборудования имеют предприятия атомной энергетики и АЭС, а также коммунального хозяйства. В свою очередь, среди многочисленных теплообменников, в основном, используются трубчатые водо-водяные теплообменники, эффективность которых может быть значительно повышена за счет использования методов интенсификации теплообмена, разработанных в МАИ.

### 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования явилось экспериментальное обоснование целесообразности использования методов интенсификации теплообмена, разработанных в МАИ, в водо-водяных теплообменных аппаратах различного назначения. Для этого на примере водо-водяных теплообменников АЭС проанализированы условия теплообмена и передачи тепла, на основе полученных данных выбран типичный теплообменный модуль. Применительно к нему разработана конструкция трех опытных модулей повышенной эффективности из труб с кольцевыми турбулизаторами, витых гладких труб овального профиля, а также витых труб с накаткой. Выбраны оптимальные параметры турбулизаторов - высота кольцевых выступов и их шаг, форма поперечного сечения для труб с накаткой (рис. 1), шаг закрутки

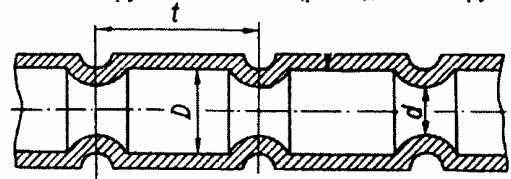


Рис. 1. Продольный разрез накатанной трубы

витых труб, а также параметры выступов - турбулизаторов на витых трубах (рис.2).

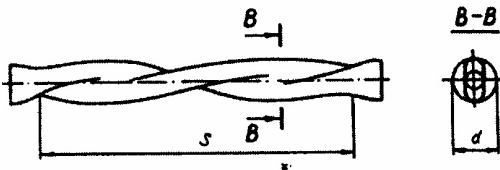


Рис. 2. Витая труба

Теплообменники - прототипы диаметром 133, 325, 1200, 1800 мм представляли собой противоточные горизонтальные кожухотрубные аппараты с продольно-поперечным обтеканием трубного пучка в межтрубном пространстве, за исключением теплообменника  $\varnothing 133$  мм с чисто продольным течением сред. В аппаратах использовались трубы диаметром 16 ... 25 мм, с толщиной стенки 1,0 и 1,4 мм. Для всех теплообменников течение в трубах характеризуется числом  $Re = 900 \dots 10^4$ , и в межтрубном пространстве -  $Re = 3400 \dots 9,2 \cdot 10^4$ . Температура воды на входе в трубы -  $33 \dots 55$  °С, а на входе в межтрубное пространство -  $54 \dots 175$  °С.

Опытный теплообменник из труб с накаткой (рис.3) по конструкции практически не отличается от штатного модуля диаметром 325 мм. Трубный пучок содержит 129 труб диаметром 16 мм и толщиной стенки 1мм, трубы расположены по

вершинам равностороннего треугольника со стороной 21мм, образуя уплощенный пучок. Сегментные перегородки, помещенные в кожух, обеспечивают продольно-поперечное обтекание трубного пучка. Параметры кольцевых турбулизаторов -  $d/D=0,935$ ;  $t/D=0,5$ . С учетом ожидаемой интенсификации теплообмена поверхность опытного теплообменника была уменьшена на 26,4 % по сравнению со штатным модулем.

Опытные теплообменники из витых гладких труб и витых труб с накаткой (рис.4) имеют одинаковую конструкцию, которая, за исключением трубного пучка, аналогична конструкции теплообменника из труб с накаткой. Они представляют собой горизонтальные теплообменные аппараты с продольным обтеканием трубного пучка. Трубный пучок состоит из 91 витой трубы (исходная круглая труба диаметром 18мм с толщиной стенки 1мм), расположенных по вершинам равностороннего треугольника со стороной 21 мм, а концы труб постепенно переходят в цилиндр. Для организации течения пучок помещен в шестигранный кожух, стянутый для исключения вибраций бандажами с клиновыми зажимами в шести сечениях по длине.

Параметры витых труб -  $S/d=6,25$ ;  $d/\Delta=1,65$ , что согласуется с рекомендациями [2], а параметры

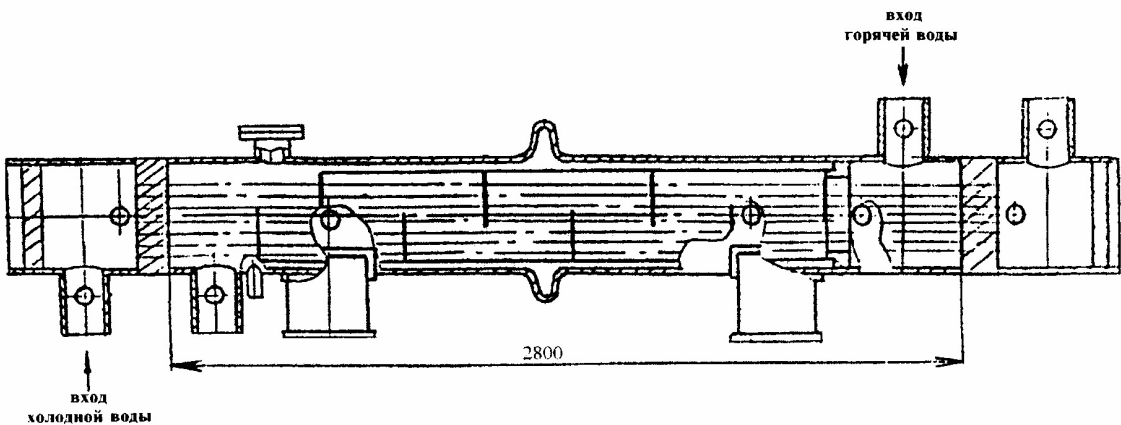


Рис.3. Опытная модель теплообменника с накатанными трубами

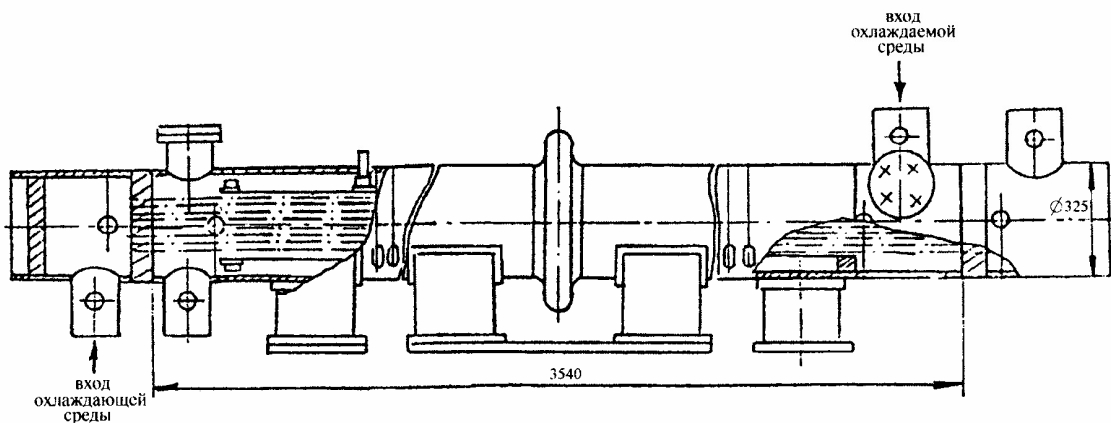


Рис.4. Опытная модель теплообменника с витыми трубами (гладкими и с накаткой)

$t/D=0,375$ . С учетом ожидаемой интенсификации теплообмена поверхность теплообменника была уменьшена на 29,2% по сравнению со штатным гладкотрубным модулем.

Испытания опытных теплообменников проводилась на стенде теплообменного оборудования ПО "Атоммаш". Системы измерений стенда позволяли измерять расход воды в трубах и межтрубном пространстве с помощью мерной диафрагмы с предельной относительной погрешностью не более 4,4%. Температура воды на входе и выходе теплообменника измерялась лабораторными термометрами ТЛ-4 с соответствующими пределами измерений. Предельная относительная погрешность измерения температуры любым термометром не превышала 0,9%.

Эффективность интенсификации теплообмена оценивалась соотношением коэффициентов теплопередачи, рассчитанных для труб с интенсификацией теплообмена по методикам [1,2] или полученных экспериментом, а также гладких труб для тех же режимов.

Коэффициент теплопередачи определялся по результатам измерений

$$K = \frac{Q}{F \Delta t_{\text{лог}}}, \quad (1)$$

где  $F$  – поверхность теплообмена опытного теплообменника;

$$\Delta t_{\text{лог}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\lg(\Delta t_6 / \Delta t_m)}$$

среднелогарифмический температурный напор;

$$\Delta t_6 = t_{MTP}^{ex} - t_{TP}^{вых}; \quad \Delta t_m = t_{MTP}^{вых} - t_{TP}^{ex};$$

$$Q = 0.5(Q_{TP} + Q_{MTP}) - \text{тепловая мощность}$$

теплообменника;  $Q_{TP} = G_{TP} (t_{TP}^{вых} - t_{TP}^{ex});$

$$Q_{MTP} = G_{MTP} (t_{MTP}^{ex} - t_{MTP}^{вых}).$$

Сходимость теплового баланса оценивалась по формуле

$$\Delta Q = \frac{|Q_{TP} - Q_{MTP}|}{\min(Q_{TP}, Q_{MTP})} \cdot 100. \quad (2)$$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытаний опытного аппарата из труб с накаткой для серии экспериментов с температурой воды на входе в межтрубное пространство -  $50^{\circ}\text{C}$  приведены на рис.5. За исключением отдельных режимов сходимость теплового баланса в ходе эксперимента не превышала 6%. Для иллюстрации эффективности интенсификации теплообмена во всем диапазоне чисел  $Re$  в трубах и в межтрубном пространстве на рис.5 приведены расчетные [1] и экспериментальные зависимости  $K/K_T$ , причем коэффициент теплопередачи для гладкотрубного аппарата в аналогичных условиях определялся расчетом. Методика расчета гладкотрубного аппарата подтверждена экспериментом на аппарате диаметром 325 мм на одном из режимов. Различие коэффициентов теплопередачи - опытного и расчетного не более 1,3%.

Наибольший эффект от интенсификации теплообмена наблюдается в области  $Re_{TP}=(8...24) \cdot 10^3$ , причем, начиная с  $Re_{TP}=4000$  экспериментальные данные превышают расчетные значения, что, по-видимому, можно объяснить большей интенсификацией теплообмена в межтрубном пространстве, нежели 15% по данным [1].

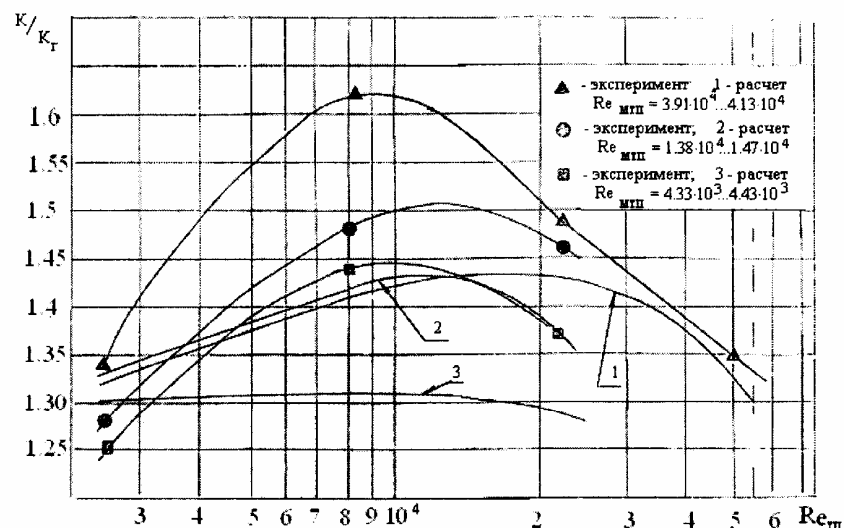


Рис.5. Модель с накатанными теплообменными трубами ( $t^{ex}=50^{\circ}\text{C}$ )

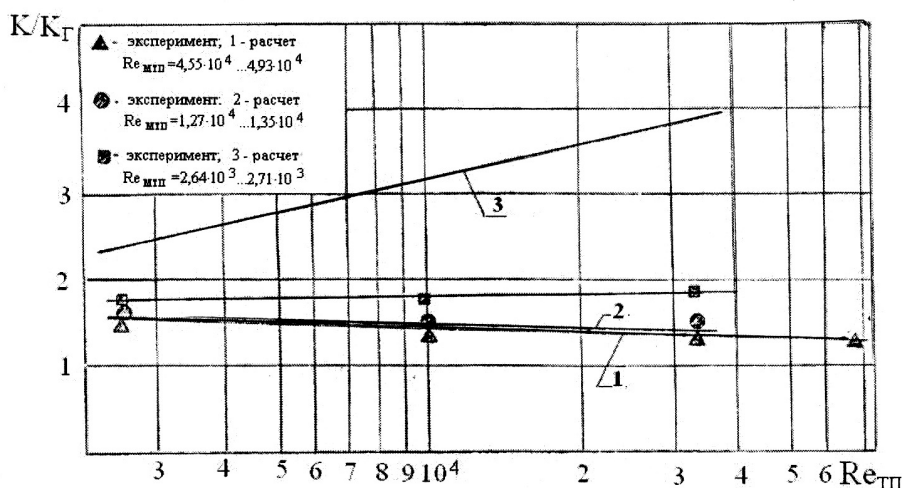


Рис.6. Модель с витыми теплообменными трубами ( $t^{вх}=80^{\circ}\text{C}$ )

Аналогичные результаты для опытного аппарата с витыми трубами приведены на рис.6. За счет интенсификации теплообмена в основном в межтрубном пространстве коэффициент теплопередачи опытного аппарата в 1,3...1,9 раза больше гладкотрубного. Опытные данные хорошо согласуются с расчетными [2] за исключением низких чисел  $Re$  в межтрубном пространстве, где отличия значительны и данные по теплотдаче нуждаются в уточнении.

Эффективность интенсификации теплообмена за счет применения накатки на витых трубах в диапазоне изменения чисел  $Re$  в трубах и межтрубном пространстве может быть оценена соотношением коэффициентов теплопередачи, рис.7.

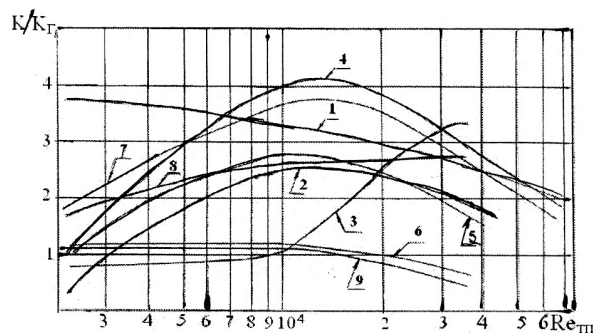


Рис. 7. Модель с витыми с накаткой теплообменными трубами, где 1 —  $Re_{МТП}=(53,9-54,4) \cdot 10^3$ ; 2 —  $Re_{МТП}=(13,3-13,9) \cdot 10^3$ ; 3 —  $Re_{МТП}=(2,72-3,02) \cdot 10^3$ ; 4 —  $Re_{МТП}=(43,5-45,8) \cdot 10^3$ ; 5 —  $Re_{МТП}=(12,7-13,5) \cdot 10^3$ ; 6 —  $Re_{МТП}=(2,64-2,71) \cdot 10^3$ ; 7 —  $Re_{МТП}=(35,9-37,6) \cdot 10^3$ ; 8 —  $Re_{МТП}=(10,4-10,7) \cdot 10^3$ ; 9 —  $Re_{МТП}=(2,34-2,46) \cdot 10^3$

Видно, что накатка витых труб приводит к увеличению коэффициента теплопередачи в 1,04...1,41 раза относительно витых труб при тех же числах  $Re$  в трубах и межтрубном пространстве, причем область наибольшей интенсификации соответствует тем же числам  $Re$  в трубах, что и в аппарате с накаткой, так что, видимо, накатка — основной механизм интенсификации теплообмена

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опытным путем на крупномасштабных теплообменных аппаратах подтверждена высокая эффективность методов интенсификации теплообмена, разработанных в МАИ. В исследованном диапазоне чисел  $Re$  коэффициент теплопередачи увеличивается в аппарате из труб с накаткой в 1,2...1,62 раза, в аппарате с витыми трубами в 1,2...1,9 раза и в 1,25...2,6 раза в аппарате из витых труб с накаткой по сравнению с аналогичным гладкотрубным аппаратом в сопоставимых условиях.

Выполненное исследование является надежным экспериментальным обоснованием целесообразности использования теплообменных труб в водо-водяных теплообменниках повышенной эффективности различного назначения. Опытные модели уменьшенных геометрических размеров с учетом ожидаемой интенсификации теплообмена в ходе испытаний обеспечили требуемую передачу тепла, тепловую мощность, как и штатные гладкотрубные модули АЭС.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$i$  - удельная энтальпия, Дж / кг;  
 $K$  - коэффициент теплоотдачи, Вт / ( $\text{m}^2\text{K}$ );  
 $t$  - температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $Q$  - тепловая мощность, Вт.

Индексы:

$вх$  - вход;  
 $вых$  - выход;  
 $\Gamma$  - для гладкой трубы  
 $ТП$  - трубное пространство;  
 $МТП$  - межтрубное пространство.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интенсификация теплообмена в каналах / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярхо. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
2. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы / Ю.И. Данилов, Б.В. Дзюбенко, Г.А. Дрейцер и др.; Под ред. В.М. Иевлева. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.