

УДК 532.542

А.А. Баскова, аспирант, ORCID 0000-0003-2864-8995
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБАХ С ГОФРИРОВАННЫМИ ВСТАВКАМИ «ЗАГРОМОЖДАЮЩЕГО» ТИПА

Проведено численное моделирование теплогидравлических характеристик потока на начальных участках труб с гофрированными вставками, «загромождающими» расходное сечение трубы. Исследована структура течения и процесс генерации возмущений с сопутствующим изменением теплообмена при различной степени локального пережатия расходного сечения трубы в диапазоне переходных чисел Рейнольдса. Показано изменение теплогидравлических характеристик труб с гофрированными вставками в зависимости от значений параметра загромождения a_2 и числа Рейнольдса в рассмотренных диапазонах геометрических параметров при переходном режиме течения. Проведено сравнение интенсивности теплообмена и значений гидравлического сопротивления частично гофрированных труб с аналогичными параметрами в гладких трубах. Определены пороговые значения параметра загромождения a_2 и числа Рейнольдса, при которых возможно достижение наибольшей интенсивности теплоотдачи при минимальных гидравлических потерях в рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса, Прандтля и геометрических параметров.

Ключевые слова: вихревая структура течения, интенсификация теплообмена, гидравлическое сопротивление, гофрирование, пережатие сечения, переходные числа Рейнольдса

Введение

На сегодняшний день около 80% теплообменного оборудования составляют трубчатые теплообменные аппараты [1]. Их масса и габариты определяют соответствующие параметры всей установки, ровно как и их эффективность является основополагающей для успешной работы оборудования в целом. Повышение энергоэффективности можно осуществить, увеличивая площадь теплообменной поверхности и/или разрушая ламинарный пограничный слой, выступающий в роли дополнительного термического сопротивления. Для интенсификации теплообмена разработано немало методов, условно подразделяемых на три категории: активные, пассивные и комбинированные. Активные и комбинированные методы требуют подвода дополнительной энергии извне, пассивные же увеличивают теплообмен изменяя структуру потока за счет геометрии теплоотдающей поверхности. Одним из широко используемых методов пассивной интенсификации, наряду с оребрением, является гофрирование поверхности. Исследованию энергетической эффективности гофрированных поверхностей посвящено достаточно много работ, в частности [1-6]. Эффективность использования такого типа структурирования определяется следующими основными факторами: физические свойства теплоносителя, режим течения, геометрия исследуемой поверхности. Варьирование геометрическими параметрами поверхности гофрированных труб позволяет интенсифицировать теплообмен до 3 и более раз, по сравнению с гладкой трубой эквивалентного радиуса, при сопутствующем увеличении гидравлических потерь до 6 раз.

Частичное гофрирование поверхности при сохранении интенсивности теплообмена позволяет в несколько раз сократить гидравлические потери, что открывает широкие перспективы для его применения в теплообменном оборудовании.

Цель и задание

Целью исследования является оценка влияния геометрических параметров труб со структурированной поверхностью в виде синусоидальных гофров на теплогидравлические характеристики потока. Задание исследования – на основании численного моделирования течений на начальных участках труб определить связь структуры течения и его теплогидравлических характеристик с геометрическими параметрами гофрирования «загромождающего» типа в диапазоне переходных чисел Рейнольдса.

Постановка задачи

Рассматривается осесимметричное течение вязкого несжимаемого теплоносителя (вода) в трубе с гофрированной вставкой (рис. 1):

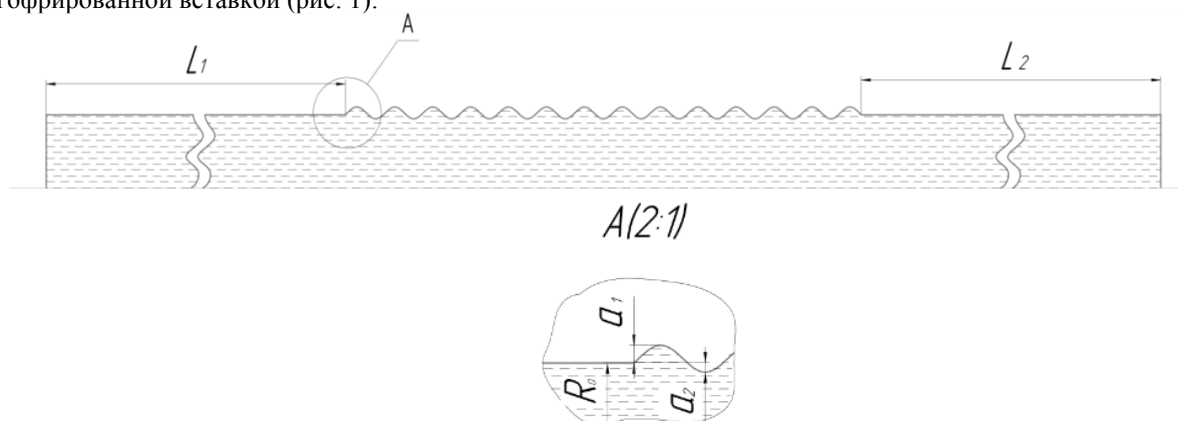


Рисунок 1 – Геометрия исследуемой трубы

Геометрические параметры исследуемой трубы:

- радиус гладкой части трубы, $R_0 = 35$ мм;
- длина входного патрубка, $L_1 = 1500$ мм;
- длина гофрированной вставки, $S = 295$ мм;
- длина выходного патрубка, $L_2 = 1345$ мм.

Геометрические параметры гофрированной вставки приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Геометрические характеристики гофрированной поверхности

Длина волны гофра l, мм	Глубина гофра		Отношение высоты загромождающей части гофра к радиусу, $k=a_2/R_0$	Степень развития поверхности по сравнению с гладкой трубой	Степень пережатия расходного сечения, d_0/d
	a_1 , мм	a_2 , мм			
20	6	0	0	1,30	1,00
		1,5	0,043	1,37	1,04
		2,25	0,064	1,37	1,07
		3	0,086	1,45	1,09

Математическая постановка задачи представлена в виде следующей классической системы нестационарных уравнений Навье-Стокса, записанной в осесимметричном виде:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{\mu V_r}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \right),$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right),$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

где μ – переменный коэффициент динамической вязкости представлен зависимостью [7]:

$$\mu = 2,791 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 1,885706 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,03231448.$$

На входе задавалась постоянная скорость $u = (0,03 \dots 0,1)$ м/с и температура $T_0 = 333$ К теплоносителя, на стенке – условия прилипания и постоянная температура $T_w = 283$ К, на выходе - условие “outflow”. Моделирование проводилось в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 1,6 \cdot 10^3 \dots 5,4 \cdot 10^3$ при соответствующем изменении диапазона чисел Прандтля $Pr = 3,0 \dots 9,4$ в пакете Fluent. Использовался Pressure-Based алгоритм в сочетании с алгоритмом связи полей давления и скорости - Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE, стандартные коэффициенты релаксации). Параметры разностных сеток определялись числом Рейнольдса и локальными толщинами динамического и теплового пограничных слоев при соответствующем изменении шага по радиусу трубы. Использовался генератор разностных сеток Gambit. Минимальному динамическому шагу у стенки соответствовало значение параметра $h^+ = (u^* \cdot \Delta r)/\nu = 0,1$. В области гофрирования использовались эквидистантные сетки. Шаг по времени выбирался таким образом, чтобы обеспечить наименьшие затраты машинного времени и при этом удовлетворить условию Куранта: $Co < 2$.

Результаты численного моделирования

При проведении численного моделирования течения на начальных участках труб с гофрированными вставками в диапазоне переходных чисел Рейнольдса отмечены следующие закономерности. Изменение распределения температур, обуславливающее градиент вязкости в пристеночной зоне, существенным образом влияет на структуру и устойчивость потока. По достижении значения числа Рейнольдса $Re = 2000$ поток с негативным градиентом вязкости теряет устойчивость на некотором удалении от входа в трубу, меньшем длины входного патрубка L_1 , и существенно раньше формирования асимптотического профиля. В то же время распределение температур в потоке, обуславливающее положительный градиент вязкости в пристеночной зоне, приводит к запаздыванию начала возникновения возмущений в потоке, более позднему по сравнению с изотермическим течением. В данной работе рассмотрены результаты численного моделирования потоков в гладких трубах и трубах с гофрированными вставками при негативном градиенте вязкости в пристеночной зоне.

Наличие гофрированной вставки приводит к искажению собственных возмущений потока в гладкой трубе. Незагромождающее гофрирование определенных геометрических параметров в определенном диапазоне чисел Рейнольдса способствует регуляризации возмущений в потоке, навязывая свои масштабы возмущений и изменяя их структуру [8]. Гофрирование, пережимающее проходное сечение трубы, изменяет масштабы собственных возмущений потока и увеличивает их интенсивность как в гофрированной вставке, так и в следе за ней, что показано на примере мгновенных значений давления и аксиальной скорости на оси труб разной геометрии (рис. 2).

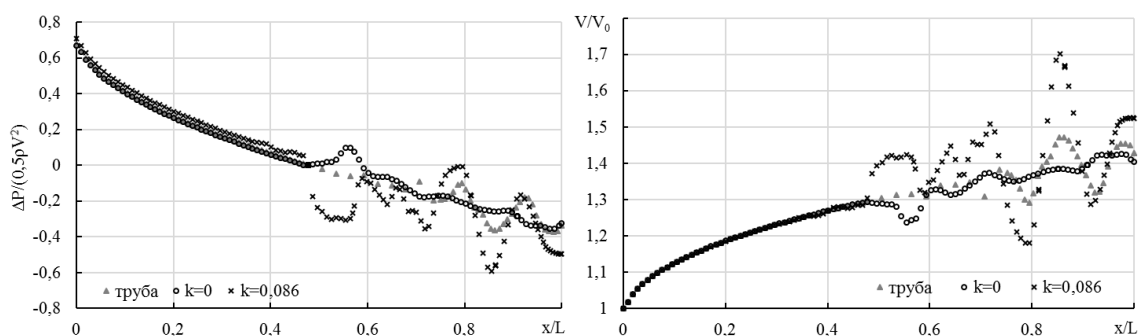


Рисунок 2 – Мгновенные значение давления и аксиальной составляющей скорости на оси трубы при числе $Re = 5 \cdot 10^3$

Спектральный анализ мгновенного значения давления в точке на удалении полудлины волны гофра после гофрированной вставки показал, что при введении гофрированной вставки «незагромождающего» типа ($a_2=0$ мм), появляется ярко выраженный дискрет в районе 1 Гц, что говорит о генерации возмущений определенного масштаба, сам спектр характеризуется сужением диапазона по сравнению с гладкой трубой (рис. 3).

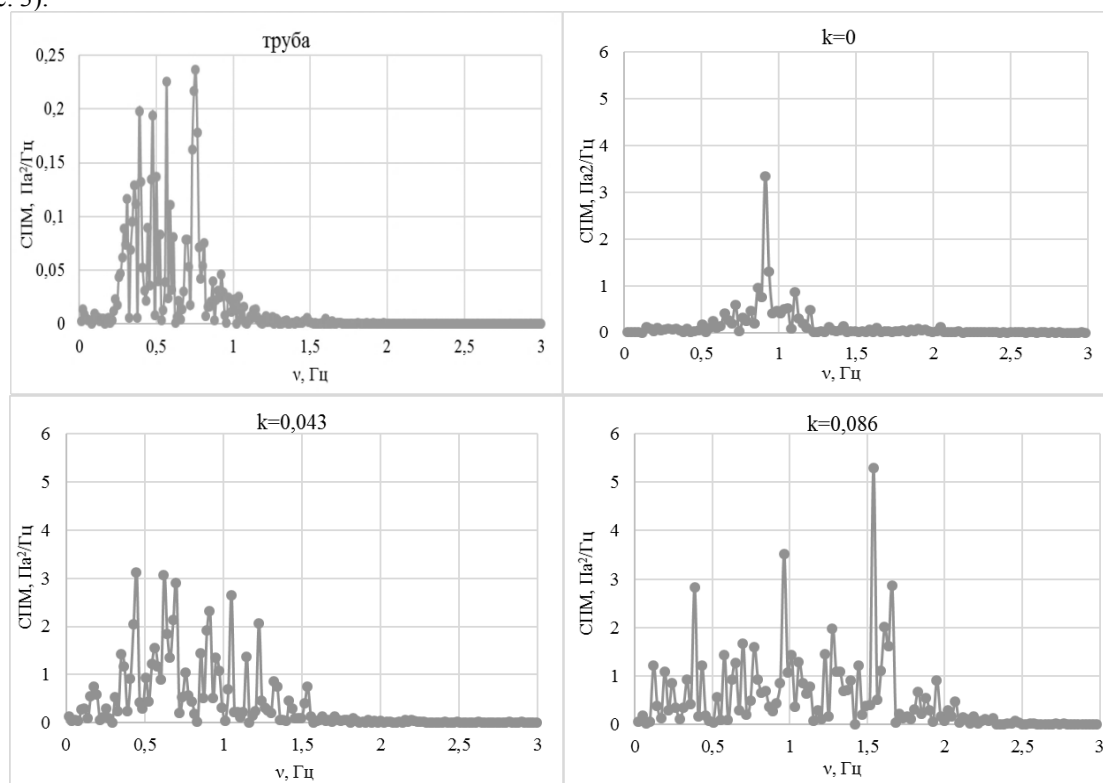


Рисунок 3 - Частотные спектры пульсаций давления в трубах с гофрированной вставкой разной геометрии и в гладкой трубе ($k = 0$) при $Re = 5300$

Спектры пульсаций давления после гофрированной вставки «загромождающего» типа отличаются расширением диапазона частот. С увеличением степени пережатия сечения трубы и амплитуды гофрирования возрастают местные градиенты давления и интенсивность генерации вихревых образований, что проявляется в увеличении спектральной мощности, ширины спектра пульсаций и количества дискретов.

Введение в трубу гофрированных вставок, изменяющих площадь проходного сечения, естественным образом изменило её гидравлическое сопротивление, которое представлено коэффициентом гидравлического сопротивления $f = 2\Delta P/(\rho v^2)$ на рис.4.

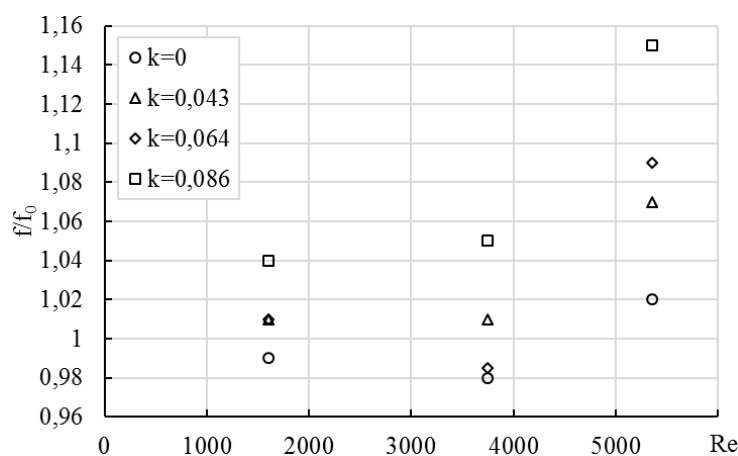


Рисунок 4 – Гидравлическое сопротивление труб с гофрированными вставками разных геометрических параметров, отнесенное к аналогичным коэффициентам гладкой трубы f_0 в диапазоне переходных чисел Рейнольдса

При малых числах Рейнольдса, когда поток практически не возмущен, в трубах с гофрированными вставками рассмотренных параметров диапазон изменения значений гидравлического сопротивления не превышает 6%. С ростом числа Рейнольдса и появлением возмущений при таком же гофрировании увеличивается диапазон изменения гидравлического сопротивления, что связано с потерей устойчивости вихревой структуры, её разрушением внутри гофров и выбросом в след, обуславливающим существенные локальные градиенты давления. С появлением пережатия сечения происходит интенсификация возмущений уже в первых углублениях за счет увеличения локального числа Рейнольдса, что приводит к увеличению скорости нарастания возмущений и их масштабов, большим локальным градиентам давления. При этом в рассмотренном диапазоне геометрических параметров и чисел Рейнольдса диапазон изменения гидравлического сопротивления не превысил 15%.

Структура потока оказывает непосредственное влияние на теплообменные процессы. При числах Рейнольдса $Re < 2000$ течение в трубах рассмотренной геометрии упорядоченное, слоистое, без возмущений. Загромождение потока не приводит к его турбулизации, более того, в рассмотренном диапазоне геометрических параметров внутри углублений формируются застойные зоны. В зоне застоя жидкость почти неподвижна и имеет незначительный градиент температуры, по сравнению с общим температурным напором. Из-за малых скоростей внутри углубления практически отсутствует конвективный теплообмен, передача тепла осуществляется кондуктивным способом и менее интенсивна, чем в гладкой трубе. Развитие теплообменной поверхности при увеличении параметра a_2 из-за наличия у поверхности слоя жидкости с температурой стенки также не приводит к существенному повышению теплообмена.

Интенсификация теплообмена при введении гофрированных вставок, по сравнению с гладкой трубой, проявляется при $Re > 2000$, что обусловлено более интенсивным вихревым движением с турбулизацией пристеночного слоя жидкости как внутри самих углублений, так и в следе после них. Пережатие проходного сечения при «загромождающем» типе гофрирования приводит к более раннему развитию возмущений. Температурные поля и поля радиальной скорости при «загромождающем» типе гофрирования демонстрируют сложную многовихревую структуру в углублениях, обеспечивающую достаточное промывание гофра, чтобы препятствовать формированию изотермической зоны застоя жидкости, ухудшающей теплообменные характеристики структурированной поверхности. В зависимости от параметров гофрирования изменяется количество «эффективных» с точки зрения теплообмена (локальное число Нуссельта по длине углубления превышает число Нуссельта в гладкой трубе на том же расстоянии от входа в трубу) гофров во вставке, увеличивается осредненное по площади значение теплоотдачи. При «незагромождающем» типе гофрирования, в отсутствие пережатия проходного сечения трубы, из-за медленного накопления возмущений «эффективных» углублений меньше, чем в «загромождающих» поток вставках (рис. 5) и выход на установившееся значение теплообмена в углублениях происходит позднее.

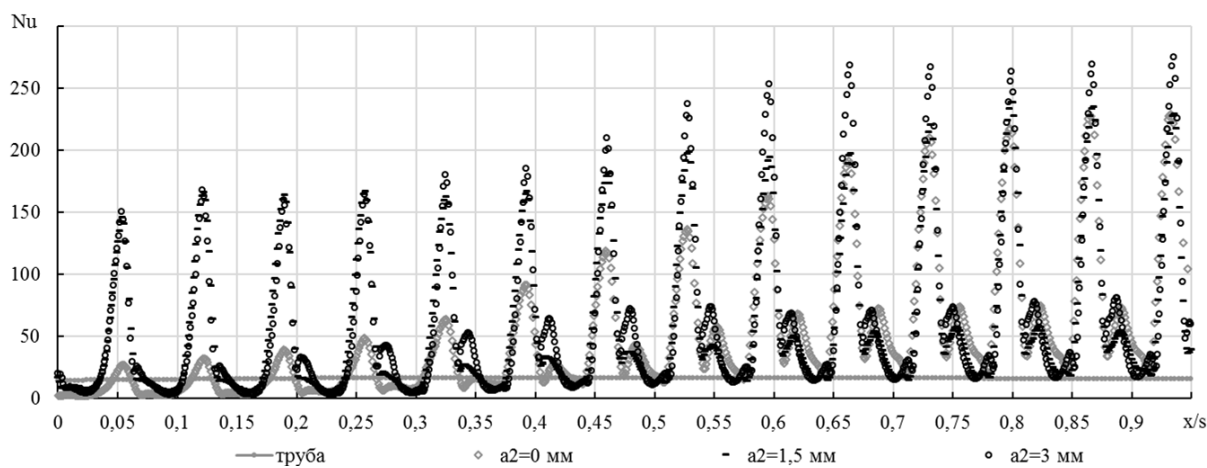


Рисунок 5 – Теплообмен на гофрированной вставке при числе $Re = 5 \cdot 10^3$

Интенсивное вихревое движение, перемешивающее жидкость и разрушающее пограничный слой внутри гофра, приводит к появлению максимумов теплоотдачи не только на стыках гофров, где толщина теплового пограничного слоя минимальна, но и внутри самих углублений.

Длина участка выходного патрубков, подверженного воздействию гофрированной вставки, зависит от масштабов генерированных гофрированной вставкой возмущений и частоты их выхода из гофрированной вставки. В гофрировании «загромождающего» типа возмущенная зона пристеночного течения существенно больше благодаря более интенсивной генерации вихревых образований и удлиняется

с возрастанием степени пережатия сечения трубы. Так в таблице 2 приведены безразмерные значения протяженности зоны влияния гофрированной вставки $\text{L}\phi/\text{s}$, где интенсивность теплообмена в следе после неё выше значения теплообмена в гладкой трубе.

Таблица 2 – Протяженность зоны влияния гофрированной вставки в зависимости от параметра загромождения

Параметр загромождения	$\text{L}\phi/\text{s}$
$a_2=0$ мм	1,034
$a_2=1,5$ мм	1,556
$a_2=2,25$ мм	2,695
$a_2=3$ мм	3,373

При оценке эффективности гофрированных вставок необходимо учитывать не только увеличение теплообмена, но и возрастание гидравлических потерь. В таблице 3 приведены отнесенные к гладкой трубе значения перепада давления и плотности теплового потока (на гофрированной вставке и выходном патрубке):

Таблица 3 – Интенсивность теплоотдачи и гидравлическое сопротивление в частично гофрированных трубах по отношению к гладким трубам

Число Рейнольдса	Параметр загромождения	$\Delta P/\Delta P_{\text{гл}}$	$\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{гл}}$
1600	$a_2=0$ мм	0,99	0,95
	$a_2=1,5$ мм	1,01	0,94
	$a_2=2,25$ мм	1,01	0,94
	$a_2=3$ мм	1,04	0,92
3750	$a_2=0$ мм	0,98	1,14
	$a_2=1,5$ мм	1,01	2,00
	$a_2=2,25$ мм	0,97	1,99
	$a_2=3$ мм	1,05	2,09
5300	$a_2=0$ мм	0,98	1,44
	$a_2=1,5$ мм	1,04	1,74
	$a_2=2,25$ мм	1,07	1,74
	$a_2=3$ мм	1,12	2,00

При низких числах Рейнольдса в трубах рассмотренной геометрии из-за отсутствия возмущений в потоке и наличии зоны застоя в углублениях гофрированной вставки теплообмен менее интенсивен, чем в гладкой трубе, и уменьшается с увеличением параметра a_2 из-за роста застойных зон в углублениях, в то время как гидравлическое сопротивление при этом незначительно возрастает.

С увеличением числа Рейнольдса до значений $3000 < \text{Re} < 4000$ влияние «загроможденности» потока на теплообменные процессы проявляется более явно. Так в «незагромождающих» вставках рост теплообмена составляет порядка 20%, в то время как при пережатии сечения увеличение теплообмена достигает 2,1 раза, что объясняется существенным ростом его конвективной составляющей благодаря большей турбулизации потока в пристеночной области как в зоне гофрированной вставки, так и в следе за ней, а также более раннему развитию возмущений.

Однако при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса разница между конвективной составляющей теплообмена при «загромождающем» гофрировании и в гладкой трубе несколько уменьшается. Так при $\text{Re} = 5300$ благодаря существенному росту собственных возмущений гладкой трубы интенсификация теплообмена составляет всего лишь 75%, при этом гидравлическое сопротивление продолжает возрастать. Таким образом, можно говорить о существовании для каждого соотношения амплитуды и длины волны

гофра, а также параметра a_2 гофрированной поверхности своего наиболее энергоэффективного диапазона чисел Рейнольдса.

Выводы

При проведении численного эксперимента по определению теплогидравлических характеристик на начальных участках труб с гофрированными вставками были получены следующие результаты для степени загромождения не превышающей $k \leq 0,086$ в рассмотренном диапазоне переходных чисел Рейнольдса ($Re = 1500 \dots 5500$):

1. При $Re < 2000$ использование гофрированных вставок рассмотренных геометрических параметров для интенсификации теплообмена нецелесообразно из-за наличия стационарных зон застоя жидкости в углублениях гофра и пренебрежимо малой степени влияния на характеристики потока в следе за гофрированной вставкой.

2. При $Re > 3000$ гофрированные вставки «загромождающего» типа существенно изменяют структуру течения, генерируя вихревые возмущения интенсифицирующие теплообмен внутри гофров и способные на большем (по сравнению с размерами самой вставки) расстоянии возмущать поток в пристеночной области, способствуя интенсивному конвективному теплообмену в следе за гофрированием.

3. Гофрированные вставки рассмотренного диапазона геометрических параметров позволяют повысить теплоотдачу до 200% по сравнению с гладкой трубой на входном участке при незначительном повышении гидравлического сопротивления (до 12%) в диапазоне переходных чисел Рейнольдса ($Re = 3000 \dots 5500$).

Дальнейшее исследование теплоэнергетической эффективности труб с гофрированными вставками на начальном участке может быть направлено на изучение влияния аperiodического гофрирования при переходных и турбулентных числах Рейнольдса. Интерес представляет также исследование энергоэффективности гофрирования при разных значениях температурного напора.

Список использованной литературы

1. Гортышов Ю.Ф. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олишпиев, А.В. Щелчков, С.И. Каськов ; под общ. ред. Ю.Ф.Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
2. Oviedo-Tolentino F. Experimental study of fluid flow in the entrance of a sinusoidal channel / F. Oviedo-Tolentino, R. Romero-Mendez, A. Hernandez-Guerrero, B. Giron-Palomares // International Journal of Heat and Fluid Flow.- 2008.- vol. 29.- N 5, pp. 1233-1239.
3. Niceno B. Numerical analysis of fluid flow and heat transfer in periodic wavy channels / B. Niceno, Nobile E. // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2001. – vol. 22. – P. 156-167.
4. Stasiek J. Investigation of flow and heat transfer in corrugated passages – 1/ Experimental results / J. Stasiek, M. W. Collins, M. Ciofalo, P. E. Chew // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – vol. 52. – P. 3778-3789.
5. Guzman, A. M. Heat transfer enhancement by flow bifurcation in asymmetric wavy wall channels [Text] / A. M. Guzman, Maria J. Cardenas, Felipe A. Urzua, Pablo E. Araya // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Vol. 52. – P. 3778–3789.
6. Vicente, P. G. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers [Text] / P. G. Vicente, A. Garc, A. Viedma // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – Vol. 47. – P. 671–681.
7. Ривкин, С. Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара [Текст] : справочник / С. Л. Ривкин, А. А. Александров ; Рек. Гос. службой стандартных справочных данных – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 80 с. с ил.
8. O. Baskova Investigation of flow structure and heat exchange formation in corrugated pipes at transient Reynolds numbers / Baskova O., Voropaiev G. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – vol. 3/8 (87). – P. 40-45

O. Bascova, Ph.D. student, ORCID 0000-0003-2864-8995
National technical university of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

HEAT TRANSFER INTENSIFICATION IN THE TUBES WITH CORRUGATED INSERTS OF “BLOCKING UP” TYPE

Numerical simulation of the thermal and hydraulic characteristics of the flow in the initial sections of tubes with corrugated inserts "blocking up" the cross section of the tube was carried out. The structure of the flow and the process of disturbance's generation with a concomitant change in heat exchange at different degrees of clamping of the tube cross section in the range of transitional Reynolds numbers are investigated. The change in the thermal and hydraulic characteristics of tubes with corrugated inserts was shown depending on the degree of cross section local blocking and the Reynolds number in the considered ranges of geometric parameters in a transient flow regime. The features of the disturbances formation in the flow and their relationship with the energy efficiency of the heat exchange surface's structuring were considered. The influence of the Reynolds number on the stagnant fluid zone formation in the goffers of considered amplitude and length ratio, as well as the effect of this zone on heat exchange processes, was determined. A comparison of the heat transfer intensity and the hydraulic resistance values of partially corrugated tubes with similar parameters in smooth tubes was made. The effect of perturbation generation beginning on the energy efficiency of tubes with a partially corrugated surface compared to smooth tubes in the range of transition Reynolds numbers was shown. The threshold values of the parameter $k = a_2 / R_0$ and the Reynolds number, at which it is possible to achieve the highest heat transfer intensity with minimal hydraulic losses in the considered range of Reynolds numbers, Prandtl numbers and geometrical parameters were determined.

Keywords: vortex flow structure, heat transfer intensification, hydraulic resistance, corrugation, cross section clamping, transition Reynolds numbers

References

1. YU. F. Gortyshov, I.A. Popov, V.V. Olimpiyev, A.V. Shchelchkov and S.I. Kas'kov, "Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография". Kazan': Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy, 2009. – 531 s.
2. F. Oviedo-Tolentino, R. Romero-Mendez, A. Hernandez-Guerrero and B. Giron-Palomares, "Experimental study of fluid flow in the entrance of a sinusoidal channel," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 29, no 5, pp. 1233-1239, 2008.
3. B. Niceno, E. Nobile, "Numerical analysis of fluid flow and heat transfer in periodic wavy channels," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 22, pp. 156-167, 2001.
4. J. Stasiek, M. W. Collins, M. Ciofalo and P. E. Chew, "Investigation of flow and heat transfer in corrugated passages – 1/ Experimental results," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 3778-3789, 2009.
5. A. M. Guzman, Maria J. Cardenas, Felipe A. Urzua and Pablo E. Araya, "Heat transfer enhancement by flow bifurcation in asymmetric wavy wall channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 3778-3789, 2009.
6. P. G. Vicente, A. Garc and A. Viedma, "Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 671–681, 2004.
7. S. L. Rivkin and A. A. Aleksandrov, "Термодинамические свойства воды и водяного пара". М.: Энергоатомиздат, 1984. - 80 s.
8. O. Baskova and G. Voropaiev, "Investigation of flow structure and heat exchange formation in corrugated pipes at transient Reynolds numbers," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3/8 (87), pp. 40-45, 2017.

УДК 532.542

О.О. Баскова, аспирант, ORCID 0000-0003-2864-8995
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ В ТРУБАХ З ГОФРОВАНИМИ ВСТАВКАМИ «ЗАГРОМАДЖУЮЧОГО» ТИПУ

Проведено чисельне моделювання теплогідравлічних характеристик потоку на початкових ділянках труб з гофрованими вставками, які «загромаджують» витратний перетин труби. Досліджено структуру течії і процес генерації збурень із супутньою зміною теплообміну при різних ступенях

пережиму витратного перетину труби в діапазоні перехідних чисел Рейнольдса. Показано зміну теплогідролічних характеристик труб з гофрованими вставками в залежності від ступеня локального пережиму перетину і числа Рейнольдса в розглянутих діапазонах геометричних параметрів при перехідному режимі течії. Розглянуто особливості формування збурень в потоці і їх зв'язок з енергоефективністю структурування теплообмінної поверхні. Визначено вплив числа Рейнольдса на формування зони застою рідини в поглибленнях розглянутого співвідношення амплітуди і довжини гофра, а також вплив цієї зони на теплообмінні процеси. Проведено порівняння інтенсивності теплообміну і значень гідравлічного опору частково гофрованих труб з аналогічними параметрами в гладких трубах. Показано вплив початку генерації збурень на енергоефективність труб з частково гофрованою поверхнею у порівнянні з гладкими трубами в діапазоні перехідних чисел Рейнольдса. Визначено порогові значення параметра $k = a_2 / R_0$ і числа Рейнольдса, за яких можливе досягнення найбільшої інтенсивності тепловіддачі при мінімальних гідравлічних втратах в розглянутих діапазонах чисел Рейнольдса, Прандтля і геометричних параметрів.

Ключові слова: *вихрова структура течії, інтенсифікація теплообміну, гідравлічний опір, гофрування, пережим перетину, перехідні числа Рейнольдса*

Надійшла 12.10.2018
Received 12.10.2018