

DOI: 10.15593/2224-9982/2015.41.07

УДК 532.517.4:536.24

И.Е. Лобанов

Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), Москва, Россия

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО НАПОРА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБАХ С ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

Проведено аналитическое исследование стратификационного распределения температурного напора в трубах с диафрагмами, на основании которого даны исчерпывающие рекомендации, на каких режимах течения оптимальнее всего интенсифицировать определенные подслои. Главной установленной в аналитическом исследовании зависимостью следует признать выявленную закономерность влияния поверхностных поперечно расположенных турбулизаторов потока на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям: перераспределение температурного напора из вязкого подслоя (в меньшей степени) и из турбулентного ядра (в большей степени) как в промежуточный подслой, так и в вихревое ядро во впадине. Установлено, что влияние геометрической формы турбулизаторов на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям для различных относительных высот и чисел Рейнольдса при одинаковых относительных шагах между турбулизаторами в подавляющем числе случаев довольно незначительно и снижается при увеличении числа Прандтля. Установлено, что влияние профиля поперечного сечения турбулизаторов на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям в трубах с турбулизаторами для различных относительных шагов между турбулизаторами при прочих равных условиях почти для всех случаев достаточно невелико. Установлено более рациональное распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям для труб с турбулизаторами по отношению к гладким трубам для всех режимов течения и геометрических характеристик труб с турбулизаторами.

Ключевые слова: анализ, тепловой поток, плотность теплового потока, температурный напор, интенсификация, турбулентность, течение, круглая труба, турбулизатор, теплообмен.

I.E. Lobanov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation

ANALYTICAL STUDY OF TEMPERATURE DIFFERENCE DISTRIBUTION FOR TURBULENT FLOW IN TUBES WITH TURBULATORS

It is conducted analytical study of stratified distribution of the temperature difference in the tubes with diaphragms, which are based on the comprehensive recommendations on flow regimes to optimal intensify certain sublayers. The main dependence determined by analytical study is the regularity of influence of surface transverse flow turbulators on distribution of mean-temperature difference across

sublayers; that is redistribution of the temperature difference from the viscous sublayer (to a lesser extent) and the turbulent core (to a greater extent) to both intermediate sublayer and vortex core in the cavity. It is found that the influence of the geometric shape of the turbulators on the distribution of mean-temperature difference across sublayers for different relative heights and Reynolds numbers at the same relative distance between the vortex generators in the majority of cases is quite insignificant and it decreases while increasing Prandtl number. It is found that the effect of cross-sectional profile vortex generators on the distribution of mean-temperature difference across sublayers in tubes with turbulators for different relative pitches between turbulators all other things being equal is small in almost all cases. It is established more rational distribution of mean-temperature difference across sublayers for tubes with turbulators relative to smooth pipes for all flow regimes and geometrical characteristics of tubes with turbulators.

Keywords: analysis, heat flux, heat flux density, temperature difference, intensification, turbulence, flow, circular tube, turbulator, heat exchange.

Введение

Во многих отраслях техники широко применяются трубчатые теплообменники, в которых, в результате интенсификации теплообмена, может быть достигнуто снижение их массогабаритных показателей при заданных значениях теплового потока, гидравлических потерь, расходов и температур теплоносителей; в ряде случаев задачей является снижение температурного уровня поверхности теплообмена при фиксированных режимных и конструктивных характеристиках.

Теоретические методы исследования интенсификации теплообмена при турбулентном течении в трубах разработаны еще неполно, так как они основаны на упрощенных моделях сложных физических явлений, поэтому следует генерировать новые, более точные, чем имеющиеся, теоретические методы исследования интенсификации теплообмена.

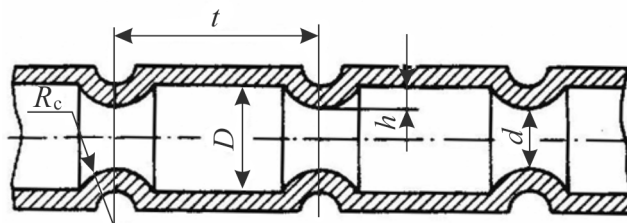


Рис. 1. Продольный разрез трубы с турбулизаторами

В исследовании рассматривается применение искусственных турбулизаторов потока на поверхности [1, 2] (рис. 1).

Теоретически рассматриваются случаи с интенсификацией теплообмена с относительно невысокими турбулизаторами со средним шагом [3–7].

Теплообмен при такого рода интенсификации описывался в работах [3–5, 8–18] четырехслойной схемой с турбулентным ядром во впадине, которая может быть модельно справедливой, как было доказано в этих работах, как для полукрытых, так и для открытых и закрытых впадин.

Аналитическое исследование стратификации теплового (температурного) напора

Теплообмен при течении в каналах теплоносителей с постоянными теплофизическими свойствами в условиях интенсификации теплообмена моделируется четырехслойной схемой турбулентного потока (рис. 2). Впервые подобная схема расчета теплообмена была использована в работах [6, 7], а затем существенным образом усложнена в исследованиях [3–5, 8–18].

При большом относительном шаге между турбулизаторами $t/D = 1,00$ (t – шаг между турбулизаторами; D – внешний диаметр диафрагмы) и небольшом числе Рейнольдса $Re = 10\,000$ часть среднего теплового или температурного напора вязкого подслоя при увеличении относительной высоты турбулизаторов снижается незначительно; часть промежуточного подслоя снижается тоже незначительно; часть вихревого ядра во впадине ощутимо увеличивается; часть турбулентного ядра снижается приблизительно в полтора раза.

До перехода высоты турбулизаторов через промежуточный подслоя часть турбулентного ядра незначительно увеличивается, а после перехода – неуклонно снижается и увеличивается часть вихревого ядра во впадине.

Влияние числа Рейнольдса на распределение температурного напора

По сравнению с $Re = 10\,000$ для $Re = 20\,000$ часть вязкого подслоя незначительно снижается; часть промежуточного подслоя незначительно увеличивается; часть вихревого ядра во впадине увеличивается ощутимо; часть турбулентного ядра несколько больше для высот турбулизаторов вплоть до промежуточного подслоя; при увеличении высоты турбулизаторов происходит выравнивание частей с расхождением в пределах 1 %. Таким образом происходит перераспределение температурного напора из турбулентного ядра в вихревое ядро во впадине.

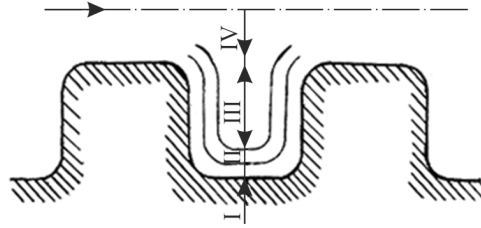


Рис. 2. Схемы разбивки потока на подслои

В сравнении с $Re = 20\ 000$ для $Re = 40\ 000$ можно сказать, что часть вязкого подслоя продолжает снижаться, часть промежуточного подслоя снижается для небольших высот, а при их увеличении она остается почти такой же; часть вихревого ядра во впадине увеличивается в пределах 1 %; часть турбулентного ядра увеличивается только для небольших высот турбулизаторов, при больших относительных высотах турбулизаторов увеличение составляет порядка 0,5 %.

После перехода высоты турбулизаторов пристенного слоя характер изменения частей подслоев остается неизменным.

Для $Re = 100\ 000$ в сравнении с $Re = 40\ 000$ часть вязкого подслоя уменьшается довольно ощутимо, особенно с увеличением высоты турбулизаторов; часть промежуточного подслоя значительно повышается; часть вихревого ядра во впадине достигает почти 20 %; часть турбулентного ядра снижается с увеличением высоты турбулизаторов.

При увеличении высоты турбулизаторов вплоть до границы пристенного слоя часть вязкого подслоя возрастает незначительно, в пределах 1,5 %, затем она снижается.

Таким образом, после выхода турбулизаторов за границу пристенного слоя происходит перераспределение температурного напора из вязкого подслоя и турбулентного ядра в промежуточный подслой и вихревое ядро во впадине.

Характер изменения частей температурных напоров по подслоям для $Re = 200\ 000$ остается таким же; часть вязкого подслоя продолжает снижаться; часть промежуточного подслоя увеличивается в пределах 1 %; часть вихревого ядра во впадине становится больше, чем 20 %; часть турбулентного ядра снижается еще на 1 %.

При увеличении числа Рейнольдса до $Re = 400\ 000$ часть вязкого подслоя еще сильнее снижается; часть промежуточного подслоя увеличивается; часть вихревого ядра во впадине становится еще больше; часть турбулентного ядра еще больше снижается.

Здесь часть среднеинтегрального температурного напора с увеличением высоты турбулизатора в вязком подслое снижается приблизительно на $1/3$; в промежуточном подслое увеличивается примерно на $2/3$; часть вихревого ядра во впадине достигает $1/4$; часть турбулентного ядра снижается примерно в $7,5$ раз.

Для случая с минимальным рассмотренным числом Рейнольдса распределение температурного напора будет другим: для вязкого подслоя снижение составляет немногим более $1/10$; в промежуточном подслое часть снижается примерно на $1/20$; часть вихревого ядра во впадине достигает примерно $1/8$; часть турбулентного ядра снижается приблизительно в $7/4$.

Таким образом, максимальное влияние на стратификацию температурного напора оказывает граница пристенного слоя.

Сравнивая данные для минимального и максимального чисел Рейнольдса при максимальной высоте турбулизаторов при прочих равных условиях, можно сделать следующий вывод: при увеличении числа Рейнольдса часть вязкого подслоя снижается почти в 2 раза; часть промежуточного подслоя увеличивается примерно на 15 %; часть вихревого ядра во впадине увеличивается почти в 2 раза; во столько же раз снижается часть турбулентного ядра.

Отмечается различие в изменении распределения среднего температурного напора по подслоям для гладкой трубы и для трубы с турбулизаторами при увеличении числа Рейнольдса.

Для гладкой трубы часть температурного напора вязкого подслоя снижается более чем на $2/3$; для трубы с турбулизаторами – почти в 2 раза. Для гладкой трубы часть промежуточного подслоя снижается примерно в 1,5 раза. Для трубы с турбулизаторами – увеличивается примерно на $1/7$. В гладкой трубе часть турбулентного ядра увеличивается почти в 2,5 раза. В трубе с турбулизаторами – снижается практически в 2 раза.

При меньших числах Рейнольдса основа температурного напора срабатывается в промежуточном подслое, а при больших – в турбулентном ядре; для труб с турбулизаторами – более равномерное распределение температурного напора по подслоям (для больших чисел Рейнольдса основной температурный напор будет срабатываться в промежуточном подслое; в турбулентном ядре часть температурного напора будет минимальной).

Следовательно, имеет место более рациональное распределение температурного напора по подслоям для труб с турбулизаторами по сравнению с гладкой трубой.

Распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям для труб с турбулизаторами при $t/D = 0,50$ и $Re = 10\,000$ на воздухе в зависимости от $d/D = 0,86 \dots 1,00$ (d – внутренний диаметр диафрагмы) указывает на то, что часть среднего температурного напора вязкого подслоя при увеличении относительной высоты турбулизаторов снижается в пределах 3 %.

Снижение части температурного напора для промежуточного подслоя еще ниже и составляет примерно 2 %; часть вихревого ядра во впадине увеличивается почти до 12 %; часть турбулентного ядра снижается более чем в 1,5 раза.

Для средних шагов до перехода высоты турбулизаторов через промежуточный подслоя часть турбулентного ядра увеличивается, а затем происходит ее снижение с увеличением части вихревого ядра во впадине.

Для $Re = 20\,000$ по сравнению с $Re = 10\,000$ часть вязкого подслоя снижается в пределах 1 %; часть промежуточного подслоя увеличивается в пределах 1 %; часть вихревого ядра во впадине увеличивается в пределах 2 %; часть турбулентного ядра снижается на 0,5 %; снижение доли турбулентного ядра с увеличением высоты турбулизатора составляет порядка двух раз.

Для $Re = 40\,000$ по сравнению с $Re = 20\,000$ часть вязкого подслоя снижается крайне незначительно; часть промежуточного подслоя увеличивается менее чем на 1 %; часть вихревого ядра во впадине увеличивается примерно на 0,5 %; снижается часть турбулентного ядра немногим более 0,5 %; снижение доли турбулентного ядра с увеличением высоты турбулизатора – примерно в 3 раза.

Для $Re = 100\,000$ по сравнению с $Re = 40\,000$ часть вязкого подслоя снижается уже достаточно сильно, что связано с выходом высоты турбулизатора за пристенный слой; часть промежуточного подслоя увеличивается в пределах 5 %; часть вихревого ядра достигает почти 1/5; снижение доли турбулентного ядра составляет более 3 %; уменьшение доли турбулентного ядра с увеличением высоты турбулизаторов составляет примерно 4,5 раза.

Для $Re = 200\,000$ по сравнению с $Re = 100\,000$ часть вязкого подслоя снижается меньше, так как выход высот турбулизаторов за пределы пристенного слоя меньше; часть промежуточного подслоя незначительно увеличивается; часть вихревого ядра во впадине уже выходит за пределы $1/5$; часть турбулентного ядра снижается еще больше, но в пределах $1,5\%$; часть турбулентного ядра снижается при увеличении высоты турбулизаторов приблизительно в 6 раз.

Для $Re = 400\,000$ по сравнению с $Re = 200\,000$ часть вязкого подслоя снижается почти на 3% ; часть промежуточного подслоя увеличивается более чем на 1% ; часть вихревого ядра во впадине увеличивается в пределах $2,5\%$; часть турбулентного ядра снижается в пределах $1,5\%$.

При максимальном числе Рейнольдса часть среднеинтегрального температурного напора с увеличением высоты турбулизатора в вязком подслое снижается приблизительно на $2/5$; в промежуточном подслое она увеличивается меньше чем на $2/3$; часть вихревого ядра во впадине составляет порядка $1/4$; часть турбулентного ядра снижается примерно в 8 раз.

Сравнительный анализ минимального и максимального чисел Рейнольдса при прочих равных условиях указывает, что с увеличением числа Рейнольдса часть вязкого подслоя снижается примерно в 2 раза; часть промежуточного подслоя увеличивается примерно на 15% ; часть вихревого ядра во впадине увеличивается более чем в 2 раза; часть турбулентного ядра снижается более чем в 2 раза.

Таким образом, для труб с турбулизаторами со средними шагами по сравнению с большими шагами увеличивается только снижение доли турбулентного ядра.

Сравнительный анализ распределения среднего температурного напора по подслоям для труб с турбулизаторами при малом относительном шаге между турбулизаторами $t/D = 0,25$ и $Re = 10\,000$ на воздухе в зависимости от относительной высоты турбулизаторов $d/D = 0,86 \dots 1,00$ показывает, что часть среднего температурного напора вязкого подслоя при увеличении относительной высоты турбулизаторов незначительно снижается; часть промежуточного подслоя снижается мало; часть вихревого ядра во впадине сильно увеличивается; часть турбулентного ядра снижается немногим более чем в $1,5$ раза.

Для $Re = 20\,000$ по сравнению с $Re = 10\,000$ часть вязкого подслоя снижается в пределах $0,5\%$; часть промежуточного подслоя оста-

ется практически постоянной; часть вихревого ядра во впадине увеличивается приблизительно на 2 %; часть турбулентного ядра снижается примерно на 2 %.

Для $Re = 40\,000$ по сравнению с $Re = 20\,000$ часть вязкого подслоя снижается почти в 2 раза; часть промежуточного подслоя увеличивается примерно на 10 %; часть вихревого ядра во впадине увеличивается примерно в 1,5 раза; часть турбулентного ядра снижается примерно в $8/5$ раз.

Вышесказанное объясняется выходом турбулизаторов за границу пристенного слоя. Для $Re = 100\,000$ по сравнению с $Re = 40\,000$ часть вязкого подслоя увеличивается примерно на $1/3$; часть промежуточного подслоя снижается в пределах $1/20$; часть вихревого ядра во впадине снижается в пределах $1/40$; часть турбулентного ядра увеличивается более чем на $1/3$.

Для $Re = 200\,000$ по сравнению с $Re = 100\,000$ часть вязкого подслоя снижается в пределах $1/40$; часть промежуточного подслоя снижается в пределах $1/50$; часть турбулентного ядра во впадине увеличивается примерно на $1/50$; часть турбулентного ядра снижается менее чем на 1,5 %.

Для $Re = 400\,000$ по сравнению с $Re = 200\,000$ часть вязкого подслоя снижается примерно на 3 %; часть промежуточного подслоя увеличивается почти на 2 %; часть вихревого ядра во впадине увеличивается более чем на 2,5 %.

При увеличении числа Рейнольдса для случаев малых шагов между турбулизаторами часть вязкого подслоя уменьшается менее чем в 2 раза; часть промежуточного подслоя повышается приблизительно на 12 %; часть вихревого ядра во впадине увеличивается почти в 2 раза; часть турбулентного ядра снижается более чем в 2 раза.

Влияние шага между турбулизаторами на распределение температурного напора

Для труб с турбулизаторами малых, больших и средних шагов установлено, что в первых имеет место снижение доли турбулентного ядра почти такое же, что и для труб с большими шагами, но меньшее, чем в трубах со средними шагами.

Анализ распределения среднего температурного напора по подслоям в трубах с турбулизаторами в зависимости от относительного

шага между ними при прочих равных условиях показывает, что оно различно для гладких труб и для труб с турбулизаторами для всех относительных шагов.

Различия в частях подслоев в зависимости от расстояния между турбулизаторами составляют меньше 2 % для всех подслоев при числах Рейнольдса $Re = 10\,000$, относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,99$; при относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,95$ расхождение в частях подслоев составляет меньше 5 %; при относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,90$ это расхождение составит примерно 1 %; при относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,86$ расхождение составит приблизительно 0,5 %.

Следовательно, при малых числах Рейнольдса расхождение между распределением температурного напора по подслоям в зависимости от относительного шага мало; оно максимально при средних относительных высотах турбулизаторов.

Для чисел Рейнольдса $Re = 100\,000$ и высотах турбулизаторов $d/D = 0,99$ расхождение в зависимости от относительного шага в частях подслоев в среднеинтегральном температурном напоре составляет примерно 0,2 %; при относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,95$ данное расхождение составит примерно 0,5 %; при относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,90$ расхождение составляет менее 0,7 %; при относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,86$ расхождение уже составило 2,5...3 %.

Для чисел Рейнольдса $Re = 40\,000$ при относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,99$ зависимость частей подслоев от шага между турбулизаторами составляет менее 0,1 %; при относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,95$ расхождение составляет около 3 %; при относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,90$ расхождение не превышает 3 %; при относительных высотах турбулизаторов $d/D = 0,86$ данное расхождение не превышает порядка 0,75 %.

Следовательно, влияние относительного шага на распределение температурного напора относительно невелико, но влияние на уровень интенсификации теплообмена велико, на что указывает как теория [3–5, 8–18], так и эксперимент [1, 2, 6, 7].

Влияние относительной высоты турбулизаторов на распределение температурного напора

Относительные высоты турбулизаторов влияют на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям значительно сильнее, чем относительные шаги между ними.

Для труб с большими шагами между турбулизаторами для всех случаев будет иметь место довольно равномерное распределение температурного напора по подслоям: для больших чисел Рейнольдса основной температурный напор будет срабатываться в промежуточном подслое, а в турбулентном ядре часть температурного напора будет минимальной, в то время как в гладкой трубе при меньших числах Рейнольдса основная часть температурного напора срабатывается в промежуточном подслое, а при больших – в турбулентном ядре.

Для труб со средними шагами между турбулизаторами по сравнению с большими шагами между турбулизаторами происходит дальнейшее снижение доли турбулентного ядра.

В трубах с турбулизаторами малых шагов имеет место примерно такое же снижение доли турбулентного ядра, что и для труб с большими шагами между турбулизаторами, и несколько меньшее, чем в трубах со средними шагами между турбулизаторами.

Относительная высота турбулизаторов оказывает значительно большее влияние на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям, чем относительный шаг между ними.

Влияние числа Прандтля на распределение температурного напора

Анализ влияния числа Прандтля на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям для труб с турбулизаторами показал, что при прочих равных условиях часть вязкого подслоя увеличивается на 3 % при увеличении числа Прандтля на каждую единицу; часть промежуточного подслоя снижается на 1,6 % с каждым единичным увеличением числа Прандтля; часть турбулентного ядра во впадине снижается примерно на 0,5 % с каждым единичным увеличением числа Прандтля; часть турбулентного ядра при увеличении числа Прандтля на единицу снижается примерно на 1 %, если турбулизаторы выше промежуточного подслоя, и на $\frac{4}{3}$ %, когда турбулизаторы ниже промежуточного подслоя.

Анализ для гладкой трубы показывает, что влияние числа Прандтля на распределение температурного напора почти такое же, что и для труб с турбулизаторами, когда высоты ниже промежуточного подслоя, поэтому влияние числа Прандтля на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям существенно как для труб с турбулизаторами, так и для гладкой трубы.

Влияние геометрической формы поперечного сечения турбулизаторов на распределение температурного напора

Анализ позволяет заключить, что для условий $d/D = 0,94$, $t/D = 1,00$, $Re = 100\ 000$, $Pr = 0,72$ часть вязкого подслоя для труб с турбулизаторами квадратного поперечного сечения по сравнению с турбулизаторами с сегментным поперечным сечением, у которого высота в 8 раз меньше радиуса, увеличивается примерно на 0,5 %; часть промежуточного подслоя увеличивается примерно на 1 %; часть турбулентного ядра снижается примерно на 1,5 %, т.е. примерно на 1/17.

Для числа Рейнольдса $Re = 20\ 000$ часть вязкого и промежуточного подслоев увеличиваются менее чем на 1 %; часть вихревого ядра во впадине снижается на 3 %; часть турбулентного ядра увеличивается почти на 1,5 %; для числа Рейнольдса $Re = 40\ 000$ части вязкого и промежуточного подслоев увеличиваются менее чем на 0,5 %; часть вихревого ядра во впадине снижается менее чем на 1,5 %; часть турбулентного ядра остается практически неизменной.

Для числа Рейнольдса $Re = 100\ 000$ часть вязкого подслоя увеличивается ощутимо, т.е. почти на 4 %; часть промежуточного подслоя сильно снижается, почти на 5 %; часть вихревого ядра во впадине заметно снижается, почти на 4 %; увеличение части турбулентного ядра происходит также значительно, более чем на 4 %.

Таким образом, влияние геометрической формы турбулизаторов на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям для различных относительных высот и чисел Рейнольдса на воздухе при одинаковых относительных шагах между турбулизаторами незначительно, кроме влияния на часть турбулентного ядра во впадине, а также для вязкого подслоя и турбулентного ядра при больших числах Рейнольдса. Для больших чисел Прандтля это влияние еще меньше.

Влияние профиля поперечного сечения турбулизаторов на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям в трубах с турбулизаторами для различных относительных шагов между ними при прочих равных условиях довольно невелико, не более 1,5 %, за исключением части турбулентного ядра при $t/D = 0,25$, которая снижается примерно на 2,5 %, что составляет около 1/10.

Влияние геометрической формы турбулизаторов на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям для различных относительных высот и чисел Рейнольдса при одинаковых относительных шагах между турбулизаторами в подавляющем числе случаев довольно незначительно и снижается при увеличении числа Прандтля.

Влияние профиля поперечного сечения турбулизаторов на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям в трубах с турбулизаторами для различных относительных шагов между турбулизаторами при прочих равных условиях почти для всех случаев достаточно невелико.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Главной установленной в аналитическом исследовании зависимостью следует признать выявленную закономерность влияния поперечных поперечно расположенных турбулизаторов потока на распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям: перераспределение температурного напора из вязкого подслоя (в меньшей степени) и из турбулентного ядра (в большей степени) как в промежуточный подслей, так и в вихревое ядро во впадине.

2. Установлено более рациональное распределение среднеинтегрального температурного напора по подслоям для труб с турбулизаторами по отношению к гладким трубам для всех режимов течения и геометрических характеристик труб с турбулизаторами.

Библиографический список

1. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.

3. Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е. Моделирование изотермического теплообмена при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена // Теплоэнергетика. – 2003. – № 1. – С. 54–60.

4. Лобанов И.Е. Моделирование теплообмена и сопротивления при турбулентном течении в каналах теплоносителей в условиях интенсификации теплообмена // Тр. Третьей Рос. нац. конф. по теплообмену: в 8 т. Т. 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – С. 140–143.

5. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2005. – 632 с.

6. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. – Л.: Энергия, 1980. – 144 с.

7. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 263 с.

8. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве). – М.: АСВ, 2009. – Т. I. – 405 с.

9. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве). – М.: АСВ, 2010. – Т. II. – 290 с.

10. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве). – М.: МГАКХиС, 2010. – Т. III. – 288 с.

11. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве). – М.: МГАКХиС, 2011. – Т. IV. – 343 с.

12. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при течении в каналах на ос-

нове сложных моделей турбулентного пограничного слоя. – М.: Изд-во МАИ, 2011. – 160 с.

13. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах с турбулизаторами с применением четырехслойной модели турбулентного пограничного слоя для относительно невысоких выступов // Актуальные проблемы российской космонавтики: материалы XXXVI акад. чтений по космонавтике, Москва, январь 2012 г. / под общ. ред. А.К. Медведевой; Комиссия РАН по разработке науч. наследия пионеров освоения космич. пространства. – М., 2012. – С. 198–199.

14. Лобанов И.Е. Точное решение задачи об интенсифицированном теплообмене при турбулентном течении в каналах с относительно невысокими турбулизаторами потока на базе четырехслойной схемы турбулентного пограничного слоя // Техника и технология. – 2012. – № 2. – С. 26–37.

15. Лобанов И.Е. Теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах с турбулизаторами с применением четырехслойной модели турбулентного пограничного слоя для выступов различной относительной высоты // Фундаментальные проблемы техники и технологии – Технология – 2012: сб. тез. и аннотаций науч. докл. XV Междунар. науч.-техн. конф., г. Орел, 5–8 июня 2012 / под ред. А.В. Киричека и А.В. Морозовой; Технол. ин-т им. Н.Н. Поликарпова «Госуниверситет–УНПК». – М.; Орел: Спектр, 2012. – С. 226–227.

16. Лобанов И.Е., Низовитин А.А., Парамонов Н.В. Теоретическое исследование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах с турбулизаторами с применением четырехслойной модели турбулентного пограничного слоя для относительно невысоких выступов // Авиация и космонавтика – 2013: тез. докл. 12-й Междунар. конф., 12–15 ноября 2013 г., Москва. – СПб.: Мастерская печати, 2013. – С. 364–366.

17. Лобанов И.Е. Общая теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах с относительно высокими турбулизаторами с применением четырехслойной модели турбулентного пограничного слоя // Отраслевые аспекты технических наук. – 2013. – № 10. – С. 7–13.

18. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах с очень высокими турбулизаторами с применением четырехслойной модели турбулентного пограничного слоя для широкого диапазона чисел Рейнольдса и Прандтля // Актуальные проблемы российской космонавтики: материалы XXXVIII акад. чтений по космонавтике, Москва, январь – февраль 2014 г. / под общ. ред. А.К. Медведевой; Комиссия РАН по разработке науч. наследия пионеров освоения космич. пространства. – М., 2014. – С. 182–183.

References

1. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Kopp I.Z. [et al.]. *Effektivnyye poverkhnosti teploobmena* [Effective heat transfer surfaces]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 408 p.

2. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. *Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh* [Heat transfer enhancement in ducts]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 208 p.

3. Dreytser G.A., Lobanov I.E. *Modelirovanie izotermicheskogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh v usloviyakh intensivatsii teploobmena* [Simulation of isothermal heat transfer in turbulent flow in ducts at heat transfer enhancement]. *Teploenergetika*, 2003, no. 1, pp. 54-60.

4. Lobanov I.E. *Modelirovanie teploobmena i soprotivleniya pri turbulentnom techenii v kanalakh teplonositeley v usloviyakh intensivatsii teploobmena* [Simulation of heat transfer and resistance in turbulent flow in coolant ducts at heat transfer enhancement]. *Trudy Tretey Rossiyskoy natsionalnoy konferentsii po teploobmenu. Tom 6. Intensifikatsiya teploobmena. Radiatsionnyy i slozhnyy teploobmen*. Moscovskiy energeticheskiy institut, 2002, pp. 140-143.

5. Lobanov I.E. *Matematicheskoe modelirovanie intensivirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh* [Mathematical modeling of the intensified heat transfer in turbulent flow in ducts]. Doctor of Technical Sciences Thesis. Moscow, 2005. 632 p.

6. Migay V.K. *Povyshenie effektivnosti sovremennykh teploobmennikov* [Improving the efficiency of modern heat exchangers]. Leningrad: Energiya, 1980. 144 p.

7. Migay V.K. *Modelirovanie teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya* [Modeling of the heat exchanger of power equipment]. Leningrad: Energoatomizdat, 1987. 263 p.

8. Lobanov I.E., Shteyn L.M. Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensivitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensivitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve) [Prospective heat exchangers with intensified heat transfer for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production)]. Moscow: Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov, 2009. Vol. I, 405 p.

9. Lobanov I.E., Shteyn L.M. Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensivitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensivitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve) [Prospective heat exchangers with intensified heat transfer for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production)]. Moscow: Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov, 2010. Vol. II, 290 p.

10. Lobanov I.E., Shteyn L.M. Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensivitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensivitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve) [Prospective heat exchangers with intensified heat transfer for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production)]. Moscow: MGAKKhiS, 2010. Vol. III, 288 p.

11. Lobanov I.E., Shteyn L.M. Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensivitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensivitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve) [Prospective heat exchangers with intensified heat transfer for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production)]. Moscow: MGAKKhiS, 2011. Vol. IV, 343 p.

12. Lobanov I.E., Paramonov N.V. Matematicheskoe modelirovanie intensivitsirovannogo teploobmena pri techenii v kanalakh na osnove slozhnykh modeley turbulentnogo pogranichnogo sloya [Mathematical modeling of the intensified heat exchange flow in a duct based on complex models of turbulent boundary layer]. Moscovskiy aviatsionnyy institut, 2011. 160 p.

13. Lobanov I.E. Matematicheskoe modelirovanie intensivitsirovanogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kruglykh trubakh s turbulizatorami s primeneniem chetyrekhsloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogo sloya dlya otnositelno nevysokikh vystupov [Mathematical modeling of the intensified heat transfer for turbulent flow in circular tubes with turbulators using a four-layer model of the turbulent boundary layer of relatively low projections]. *Materialy XXXVI Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike "Aktualnye problemy rossiyskoy kosmonavtiki"*. Moscow: Komissiya Rossiyskoy akademii nauk po razrabotke nauchnogo naslediya pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva, 2012, pp. 198-199.

14. Lobanov I.E. Tochnoe reshenie zadachi ob intensivitsirovannom teploobmene pri turbulentnom techenii v kanalakh s otnositelno nevysokimi turbulizatorami potoka na baze chetyrekhsloynoy skhemy turbulentnogo pogranichnogo sloya [Exact solution of the heat transfer problem of intensified turbulent flow in ducts with a relatively low flow vortex generators on the basis of four-layer circuit turbulent boundary layer]. *Tekhnika i tekhnologiya*, 2012, no. 2, pp. 26-37.

15. Lobanov I.E. Teoriya intensivitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kruglykh trubakh s turbulizatorami s primeneniem chetyrekhsloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogo sloya dlya vystupov razlichnoy otnositelnoy vysoty [Theory of intensified heat transfer in turbulent flow in circular tubes with turbulators using four-layer model of the turbulent boundary layer for projections with different relative height]. *Sbornik tezisov i annotatsiy nauchnykh dokladov XV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Fundamentalnye problemy tekhniki i tekhnologii – Tekhnologiya – 2012"*. Moscow, Orel: Spektr, 2012, pp. 226-227.

16. Lobanov I.E., Nizovitin A.A., Paramonov N.V. Teoreticheskoe issledovanie intensivitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kruglykh trubakh s turbulizatorami s primeneniem chetyrekhsloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogo sloya dlya otnositelno nevysokikh vystupov [Theoretical study of the intensified heat transfer for turbulent flow in circular tubes with turbulators using a four-layer model of the turbulent boundary layer of relatively low projections]. *Tezisy dokladov 12-y Mezhdunarodnoy konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika – 2013"*. Saint Petersburg: Masterskaya pechati, 2013, pp. 364-366.

17. Lobanov I.E. Obshchaya teoriya intensivitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kruglykh trubakh s otnositelno vysokimi

turbulizatorami s primeneniem chetyrekhsloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogo sloya [General theory of intensified heat transfer for turbulent flow in circular pipes with relatively high turbulators using four-layer model of turbulent boundary layer]. *Otraslevye aspekty tekhnicheskikh nauk*, 2013, no. 10, pp. 7-13.

18. Lobanov I.E. Matematicheskoe modelirovanie intensifitsirovanogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kruglykh trubakh s ochen vysokimi turbulizatorami s primeneniem chetyrekhsloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogo sloya dlya shirokogo diapazona chisel Reynoldsa i Prandtlya [Mathematical modeling of the intensified heat transfer for turbulent flow in circular tubes with very high turbulators using four-layer model of the turbulent boundary layer for a wide range of Reynolds and Prandtl numbers]. *Materialy XXXVIII Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike "Aktualnye problemy rossiyskoy kosmonavtiki"*. Moscow: Komissiya Rossiyskoy akademii nauk po razrabotke nauchnogo naslediya pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva, 2014, pp. 182-183.

Об авторе

Лобанов Игорь Евгеньевич (Москва, Россия) – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ПНИЛ-204 ВГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: lloobbaannooff@live.ru).

About the author

Igor E. Lobanov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: lloobbaannooff@live.ru).

Получено 2.03.2015