

УДК 532.542

ТРЕХСЛОЙНОЕ МОДИФИЦИРОВАННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБАХ С ШЕРОХОВАТЫМИ СТЕНКАМИ

И. Е. ЛОБАНОВ

loobbaannooff@live.ru

ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Поступила в редакцию 28.11.2016

Аннотация. Представлена разработанная методика теоретического расчетного детерминирования гидравлического сопротивления и теплообмена для круглых труб с шероховатыми стенками на основе многослойных моделей турбулентного пограничного слоя, преимущественно отличающаяся от существующих теорий посредством учета доли объема впадин в подслое и отношению шероховатой и гладкой поверхностей канала, который может привести к уменьшению теплообмена порядка 15 %, что необходимо учитывать в режиме развитой шероховатости. Полученные результаты расчета теплообмена для расширенного диапазона определяющих параметров для круглых шероховатых труб, в известной степени детерминируют уровень интенсификации теплообмена.

Ключевые слова: аналитический; интенсификация; канал; математический; моделирование; модель; относительный; пограничный слой; схема; теплообмен; труба; турбулентный; турбулизатор; трехслойный.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования закономерностей течений в шероховатых трубах основывается на том, что шероховатость может быть интенсификатором теплообмена. Выявление теоретических закономерностей течения и теплообмена при турбулентном режиме в шероховатых трубах являются важным, поскольку эти каналы используются в теплообменных аппаратах и устройствах, применяемых в различных областях техники.

В данной работе теоретическим образом исследуется теплообмен в прямых круглых трубах с шероховатыми стенками, стандартное определяемое как совокупность неровностей поверхности (например, система выступов и впадин) с относительно малыми шагами, выделенной с помощью базовой длины [1]. Непосредственно трубы с турбулизаторами, где шаги между турбулизаторами относительно велики в данной работе не исследуются.

Распределение неровностей шероховатости в трубе принимается равномерным, а расстояния между выступами относительно невелики, поэтому они оказывают взаимное влияние.

Известно, что шероховатость поверхности практически не оказывает влияние на течение, когда толщина вязкого подслоя больше высоты

выступов. Напротив, для режима развитой шероховатости, характеризующейся автомодельностью коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса, высота выступов гораздо больше толщины вязкого подслоя. В некоторых экспериментальных работах наблюдается генерация во впадинах изолированных вихреобразных течений [2]. Если рассмотреть обтекание одиночного турбулизатора, то при малых числах Рейнольдса наблюдается безотрывное обтекание; при увеличении числа Рейнольдса генерируется одиночный вихрь, теряющий устойчивость и становящийся турбулентным при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса. Вследствие турбулентного перемешивания вихреобразования диффундируют в ядро потока.

Сходная картина имеет место во впадине шероховатости: при малых числах Рейнольдса течение у шероховатой стенки практически не отличается от гладкой, поскольку высота выступов меньше вязкого подслоя. При увеличении числа Рейнольдса уменьшается толщина вязкого подслоя и становится сопоставимой с высотой выступов. Обтекание происходит со скоростью, сопоставимой со средней скоростью потока, поэтому во впадине генерируется вихрь, что характеризует наступление переходного ре-

жима течения. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса увеличиваются возмущения во внешнем ядре потока, которые проникают во впадину, течение во впадине становится неустойчивым, что характеризуют развитой турбулентный режим течения.

Для турбулентного ядра основного потока [2] характерно повышение интенсивности пульсаций при наличии шероховатости. Максимальные пульсации находятся в области вершин выступов и составляет десятые части от средней скорости потока (нормальная к стенке пульсационная скорость может составлять даже половину средней скорости в канале [2]). Следовательно, поперечные пульсации, проникающие во впадины шероховатости, будут интенсивно перемешивать теплоноситель в них. Перетекание теплоносителя из ядра потока в зоны завихрений между выступами шероховатости, а также в обратном направлении, может быть неустойчивым и происходить в форме беспорядочного турбулентного обмена.

В ядре потока масштаб возмущений имеет порядок характерного размера канала, а собственных пульсаций во впадине имеет порядок высоты впадины. Следовательно, если высота впадины мала по сравнению с характерным размером канала, то процессы перемешивания во впадине и процессы теплопереноса детерминируются, в основном, внешними пульсациями, из-за которых теплоноситель будет выбрасываться из впадины шероховатости. На основании этого вязкий подслоя во впадине формируется не от осредненного течения в ней, а детерминируется взаимодействием внешних пульсаций со стенкой. Если высота выступа сопоставима с размером канала, то процессы перемешивания в ней детерминируются не только внешними, но и собственными пульсациями; более того, в глубине впадины шероховатости в непосредственной близости от стенки влияние собственных пульсаций определяюще, поэтому толщина вязкого подслоя во впадине связана с осредненным течением во впадине.

Экспериментальные и теоретические исследования закономерностей течения и теплообмена в шероховатых трубах указывают на то, что они коренным образом отличны от соответствующих закономерностей для труб с турбулизаторами ([2] и [3–7] соответственно).

Существующие теоретические исследования течения и теплообмена в шероховатых трубах имеют в своей подоснове использование логарифмического профиля скорости, что существенно упрощает математическую модель, что приводит к дополнительным расхождениям для

большой относительной (по отношению к диаметру трубы) шероховатости.

Большая относительная шероховатости может быть реализована, например, в трубах малых диаметров, что можно сравнить с соответствующими условиями для труб малых диаметров с турбулизаторами [8].

Математическое моделирование течения и теплообмена в шероховатых трубах было проведено в относительно небольшом числе исследований (достаточно полный список работ по этой теме содержится в монографиях [9–11]), которые не выходят за рамки логарифмического профиля скорости. В данном исследовании были получены более сложные закономерности по теплообмену для шероховатых труб, чем существующие, поэтому они более обоснованы и могут использоваться для более широкого определяющего диапазона. Ранее, при теоретическом исследовании теплообмена для труб с турбулизаторами [3–7] были получены более сложные зависимости, чем при использовании логарифмического профиля скорости.

Имеющиеся экспериментальные исследования течения и теплообмена в шероховатых каналах указывают на то, что при относительно больших выступах шероховатости турбулентное течение существенно различно по отношению к течениям в гладкотрубных каналах.

В экспериментальных исследованиях течения и теплообмена в шероховатых трубах, анализ которых приводится в [12–14], выделяется четыре режима течения:

1) происходящее по закону Пуазейля при малых числах Рейнольдса Re автомодельно от высоты шероховатости – ламинарное течение;

2) происходящее по закону гидравлического сопротивления для гладких труб при промежуточных числах Рейнольдса Re – турбулентное течение;

3) происходящее по закону гидравлического сопротивления, являющегося функцией промежуточных чисел Рейнольдса Re и относительной шероховатости $\bar{h} = h/R_0$ (отношения средней высоты выступов шероховатости к радиусу трубы; $D=2R_0$ – больший внутренний диаметр трубы) – турбулентное течение;

4) происходящее по закону гидравлического сопротивления, являющегося функцией только относительной шероховатости при высоких числах Рейнольдса Re – автомодельное течение.

В случае большой относительной высоты шероховатости имеет место элиминирование области с турбулентным режимом, закономерность для которого характерна для гладких

труб; аналогичное элиминирование имеет место также для труб с турбулизаторами [2–7].

Теплообмен при течении в каналах теплоносителей с постоянными теплофизическими свойствами для условий интенсифицированного теплообмена в прямых круглых шероховатых трубах моделируется многослойной схемой турбулентного пограничного слоя на основании того, что величина турбулентной вязкости и профили скоростей турбулентного пограничного слоя уже детерминированы.

Подобная схема расчета интенсифицированного теплообмена была использована в работах [3–7] для расчета теплообмена в трубах с турбулизаторами, что позволяет в дальнейшем ее использовать при расчете теплообмена в трубах с шероховатыми стенками при соблюдении соответствующих ограничений [3–7], поскольку условия протекания процесса теплообмена сходны.

Решение задачи об интенсифицированном теплообмене в данной работе получается с помощью интеграла Лайона при принятии допущения $w/\bar{w}_x \cong 1$ (w_x/\bar{w}_x – отношение аксиальной составляющей скорости к среднерасходной) которое, как показывают теоретические исследования [3–7] для круглых труб и каналов некруглого поперечного сечения с турбулизаторами, незначительно влияет на осредненный интенсифицированный теплообмен:

$$\text{Nu} = \frac{2}{\int_0^1 \left(\frac{R^3}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \mu} \right) dR}, \quad (1)$$

где $R=r/R_0$ – безразмерный радиус трубы (отношение расстояния от оси трубы r к радиусу трубы R_0); Pr и Pr_T – молекулярное и турбулентное числа Прандтля; Nu – число Нуссельта; μ и μ_T – молекулярная и турбулентная динамические вязкости.

В отличие от гладкой трубы, в шероховатой трубе толщина вязкого подслоя будет непостоянной по поверхности выступов и впадин. Следовательно, необходимо ввести среднюю толщину всякого подслоя. Плотность теплового потока по толщине вязкого подслоя можно считать практически постоянной.

Введем следующее обозначение: $n_F = F_{\text{гл}}/F_{\text{ш}}$ ($F_{\text{гл}}$ и $F_{\text{ш}}$ – площади гладкой и шероховатой поверхностей соответственно).

Для вязкого подслоя плотность теплового потока q равна: $q = q_{\text{ст}}(F_{\text{гл}}/F_{\text{ш}}) = q_{\text{ст}} n_F$ ($q_{\text{ст}}$ – плотность теплового потока в стенку), поскольку толщина вязкого подслоя бесконечно мала по сравнению с высотой выступа.

Для теплового потока во впадине плотность теплового потока $q_{\text{вл}}$ зависит от формы впадины и переменна по глубине впадины. Практически можно принять, что перенос теплоты имеет место при постоянном тепловом потоке через плоский слой от толщины вязкого подслоя до суммы высоты турбулизатора и толщины вязкого подслоя.

На границе с ядром потока плотность теплового потока равна: $q_{\text{ст}}/[1-(h+h_b)/R]$, где h_b – толщина вязкого подслоя. На границе с вязким подслоем плотность теплового потока равна: $q_{\text{ст}}(F_{\text{гл}}/F_{\text{ш}})$. В качестве плотности теплового потока во впадине можно принять среднюю от вышеприведенных величин, а именно:

$$\frac{q_{\text{ст}}}{2} \left(\frac{1}{1 - \frac{h+h_b}{R}} + \frac{F_{\text{гл}}}{F_{\text{ш}}} \right).$$

Поскольку впадинами занята только часть поверхности, а в рассматриваемом подслое на долю впадин приходится только часть объема данного подслоя, постольку, чем меньше впадин на поверхности теплообмена, тем меньше их объем, тем меньше термическое сопротивление приходится на впадины; и наоборот: чем больше впадин на поверхности теплообмена, тем больше их объем, тем больший вклад в общее термическое сопротивление приходится на впадины. Вышеуказанное изменение термического сопротивления впадин можно учесть введением коэффициента объема n_V , отражающего долю объема впадин в подслое.

Коэффициенты n_F и n_V для шероховатых труб рассчитываются либо на основании известных геометрических параметров шероховатости, либо из обработки профилограмм труб. Например, для шероховатости в виде метрической резьбы вышеуказанные коэффициенты равны: $n_F = 0,58$ и $n_V = 0,50$.

Если относить коэффициент теплоотдачи к гладкой поверхности, то $\alpha_{\text{гл}} = \frac{q_{\text{ст}}}{\Delta T}$, а если к шероховатой поверхности, то $\alpha_{\text{ш}} = \frac{q_{\text{ст}} F_{\text{гл}}}{\Delta T F_{\text{ш}}} = \frac{q_{\text{ст}}}{\Delta T} n_F$ (ΔT – средний суммарный температурный напор). Динамическая скорость («скорость трения») для шероховатой поверхности в данном случае будет отличаться от соответствующего значения для гладкой поверхности: $w_*^{\text{ш}} = w_*^{\text{гл}} \sqrt{n_F}$.

Рассмотрим некоторые эмпирические соотношения по гидравлическому сопротивлению для шероховатых труб.

Для труб с шероховатостью с относительно небольшими высотами выступов асимптотическое поведение коэффициента гидравлического

сопротивления описывается известной эмпирической зависимостью Никурадзе:

$$\xi = \frac{1}{\left\{1,74 + 2 \lg \left[\frac{1}{\left(\frac{h}{R_0} \right)} \right] \right\}^2}. \quad (2)$$

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления для шероховатых труб не только от относительной шероховатости, но и от числа Рейнольдса $\xi = f\left(\frac{h}{R_0}; \text{Re}\right)$, описывается эмпирическим образом лучше всего формулой Колбрука, которая может быть записана в следующем виде:

$$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = 1,74 - 2 \lg \left(\frac{18,7}{\text{Re} \sqrt{\xi}} + \frac{h}{R_0} \right). \quad (3)$$

Следовательно, и в эмпирических соотношениях для коэффициента гидравлического сопротивления при течении в шероховатых трубах используется логарифмический профиль скорости.

ТРЕХСЛОЙНОЕ МОДИФИЦИРОВАННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБАХ С ШЕРОХОВАТЫМИ СТЕНКАМИ

Значения гидравлического сопротивления в прямых круглых шероховатых необходимо использовать для расчета теплообмена для этих условий интенсификации, поскольку стратификация потока зависит от гидросопротивления.

Теплообмен при течении в каналах теплоносителей с постоянными теплофизическими свойствами для условий интенсифицированного теплообмена в прямых круглых шероховатых трубах моделируется многослойной схемой турбулентного пограничного слоя на основании того, что величина турбулентной вязкости и профили скоростей турбулентного пограничного слоя считаются уже детерминированными.

Теперь следует перейти к непосредственному подробному рассмотрению каждого из вышеуказанных подслоев.

1. Вязкий подслой.

Вязкий подслей располагается в следующей окрестности: $R \in \left[1 - \frac{\eta_1}{\text{Re} \sqrt{n_F}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} - \frac{h}{R_0}; 1 \right]$, где $\eta_1 = 5$ – постоянная, характеризующая безразмерную толщину вязкого подслоя [15].

В области вязкого подслоя принимается, что:

$$\frac{\mu}{\mu_T} = \beta \frac{\eta^3}{\eta_1^2} = \frac{\beta}{\eta_1^2} \text{Re}^3 n_F^{\frac{3}{2}} (1-R)^3 \left(\frac{\xi}{32} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad (4)$$

$$\frac{w_x}{\bar{w}_x} = \frac{\xi}{16} \text{Re} \sqrt{n_F} (1-R), \quad (5)$$

где μ/μ_T – отношение турбулентной и молекулярной динамических вязкостей; w_x/\bar{w}_x – отношение аксиальной составляющей скорости к среднерасходной; $\eta = (1-R)^3 \text{Re} \sqrt{n_F} \sqrt{\frac{\xi}{32}}$ – безразмерная координата; β – постоянная в законе "третьей степени": $\frac{\mu}{\mu_T} = \beta \frac{\eta^3}{\eta_1^2}$ [14].

2. Промежуточный подслей.

Промежуточный подслей располагается в следующей окрестности: $R \in \left[1 - \frac{\eta_2}{\text{Re} \sqrt{n_F}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} - \frac{h}{R_0}; 1 - \frac{\eta_1}{\text{Re} \sqrt{n_F}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} - \frac{h}{R_0} \right]$, где $\eta_1 = 30$ постоянная, характеризующая безразмерную толщину буферного (промежуточного) подслоя [15].

В области промежуточного подслоя принимается, что:

$$\frac{\mu}{\mu_T} = \frac{\eta}{5} - 1 = \frac{1}{5} (1-R) \text{Re} \sqrt{n_F} \sqrt{\frac{\xi}{32}} - 1; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{w_x}{\bar{w}_x} &= 5 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left(1 + \ln \left(\frac{\eta}{5} \right) \right) = \\ &= 5 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left(1 + \ln \left(\frac{1}{5} (1-R) \text{Re} \sqrt{n_F} \sqrt{\frac{\xi}{32}} \right) \right); \end{aligned} \quad (7)$$

3. Турбулентное ядро.

Турбулентное ядро располагается в следующей окрестности: $R \in \left[0; 1 - \frac{\eta_2}{\text{Re} \sqrt{n_F}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} - \frac{h}{R_0} \right]$.

В области турбулентного ядра принимается, что:

$$\frac{\mu}{\mu_T} = \frac{2}{5} R (1-R) \text{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}}; \quad (8)$$

$$\frac{w_x}{\bar{w}_x} = (1,325 \sqrt{\xi} + 1) (1-R) \sqrt{\xi}. \quad (9)$$

В соответствии с приведенной стратификацией потока, осредненный теплообмен (1) будет следующим:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 2 \times \\ &\times \left[\int_{1 - \frac{\eta_1}{\text{Re} \sqrt{n_F}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} - \frac{h}{R_0}}^1 \left(\frac{R^3}{1 + \frac{\text{Pr} \beta}{\text{Pr}_T \eta_1^2} \text{Re}^3 n_F^{\frac{3}{2}} (1-R)^3 \left(\frac{\xi}{32} \right)^{\frac{3}{2}}} \right) dR + \right. \\ &\quad \left. + n_V \frac{\left(n_F + \frac{1}{1 - \frac{\eta_1}{\text{Re} \sqrt{n_F}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} - \frac{h}{R_0}} \right)}{2} \right] \times \end{aligned} \quad (10)$$

$$\times \int_{1-\frac{\eta_2}{\text{Re}\sqrt{n_F}\sqrt{\frac{32}{\xi}}\frac{h}{R_0}}}^{1-\frac{\eta_1}{\text{Re}\sqrt{n_F}\sqrt{\frac{32}{\xi}}\frac{h}{R_0}}} \left(\frac{R^3}{1+\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \left(\frac{1}{5}(1-R)\text{Re}\sqrt{n_F}\sqrt{\frac{\xi}{32}}-1 \right)} \right) dR +$$

$$+ \int_0^{1-\frac{\eta_2}{\text{Re}\sqrt{n_F}\sqrt{\frac{32}{\xi}}\frac{h}{R_0}}} \left(\frac{R^3}{1+\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} R(1-R)\text{Re}\sqrt{n_F}\sqrt{\frac{\xi}{32}}} \right) dR \Bigg]^{-1}.$$

Можно получить аналитические зависимости для интегралов (10) точно так же, как в работах [16–24], в которых решалась задача теплообмена для труб с турбулизаторами.

По вышеприведенной методике были проведены расчеты теплообмена для шероховатых труб с шероховатостью в виде треугольной резьбы, характерных для [2].

Максимальные различия расчетных данных, полученных по данной методике с расчетными данными, полученными по методике, характерной для труб с турбулизаторами $\text{Nu}_{(10)}/\text{Nu}_{[16-24]}$, при числах Рейнольдса больших критического $\text{Re}_{\text{кр}}$, характерных для режимов развитой шероховатости, достаточно ощутимы и составляют:

$h/R_0=0,016$: –17,1%; $h/R_0=0,020$: –14,4%;
 $h/R_0=0,027$: –12,3%; $h/R_0=0,028$: –13,4%;
 $h/R_0=0,033$: –13,0%; $h/R_0=0,037$: –15,4%;
 $h/R_0=0,042$: –12,3%; $h/R_0=0,043$: –12,0%;
 $h/R_0=0,046$: –11,3%; $h/R_0=0,048$: –10,8%;
 $h/R_0=0,053$: –10,8%; $h/R_0=0,066$: –7,2%;
 $h/R_0=0,073$: –10,0%; $h/R_0=0,078$: –5,7%;
 $h/R_0=0,107$: –4,9%; $h/R_0=0,160$: –11,7%.

Таким образом, введение в модель поправок на поверхность шероховатости n_F и n_V при соответственно измененной стратификации потока в определенной степени уточняет значения числа Нуссельта для шероховатых труб по сравнению с методикой, характерной для труб с турбулизаторами [16–24], что обуславливает ее преимущественное применение (в особенности для режима развитой шероховатости) для данных специфических условий.

В качестве примера рассмотрим сравнение данной теории с экспериментом, приведенным в [2]. Для шероховатости в виде треугольной резьбы с $h/R_0=0,037$, $n_F=0,58$, $n_V=0,50$, $\text{Pr}=0,7$, $\text{Re}=87300$ число Нуссельта составляет $\text{Nu}=251$; расчет по предложенной методике с детерминированием гидравлического сопротивления по формуле (2) дает значение 250,4, что соответствует эксперименту с погрешностью в четверть процента.

Сравнение теории с экспериментом [2] для $h/R_0=0,037$ (нижние значения –) и $h/R_0=0,073$ (верхние значения С) приведено для различных

чисел Рейнольдса на рис., на котором видна очень хорошая корреляция между ними.

Следовательно, предложенная теория более точно описывает теплообмен для шероховатых труб, чем теория, характерная для труб с турбулизаторами [16–24], за счет специфической стратификации турбулентного пограничного слоя (несколько отличающейся от стратификации в трубах с турбулизаторами), а также за счет введения поправок на изменение поверхности шероховатых труб.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика теоретического расчетного детерминирования интенсифицированного теплообмена для круглых труб с шероховатыми стенками на основе трехслойного модифицированного математического моделирования турбулентного пограничного слоя.

2. Преимущественное специфическое отличие данной методики от существующей, характерной для труб с турбулизаторами, состоит в модифицированной стратификации потока, учитывающей изменение скорости трения для шероховатых труб.

3. Для расчета теплообмена в шероховатых трубах трехслойная модифицированная математическая модель турбулентного пограничного слоя была усложнена учетом соотношения гладкой и шероховатой площадей поверхности трубы, а также введением коэффициента объема впадин, отражающего долю объема впадин в подслое.

4. Полученные результаты расчета интенсифицированного теплообмена для круглых шероховатых труб для расширенного диапазона определяющих параметров хорошо соответствуют существующему эксперименту.

5. Показано, что предложенная модель точнее описывает теплообмен для шероховатых труб, чем теория, характерная для труб с турбулизаторами, например [16–24], поскольку учитывает специфические особенности теплообмена в трубах с шероховатыми стенками, в то время как теория для труб с турбулизаторами была разработана для условий, когда расстояния между турбулизаторами достаточно большое.

6. Выявлено, что преимущество предложенной специфической модели теплообмена для шероховатых труб перед моделью для труб с турбулизаторами особенно заметно в режиме развитой шероховатости.

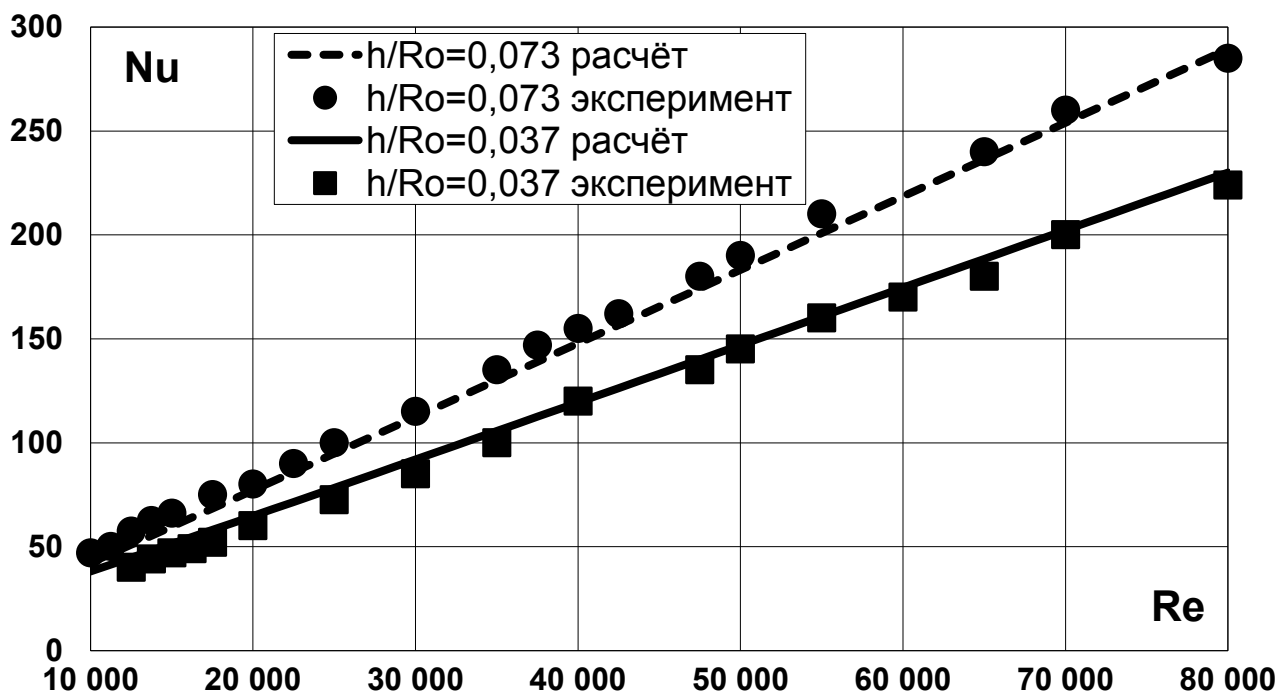


Рис. Сравнение теоретических данных по теплообмену в шероховатых трубах с экспериментом [1] для $h/Ro=0,037$ (нижние значения -) и $h/Ro=0,073$ (верхние значения C) для различных чисел Рейнольдса $Re=10^4 \div 10^5$

7. Полученные результаты расчета осредненного теплообмена для круглых шероховатых труб для расширенного диапазона определяющих параметров существенно отличаются от соответствующих данных для гладких круглых труб, но косвенным образом указывают на уровень интенсификации теплообмена за счет использования шероховатых труб вместо гладких.

8. Разработанная специфическая методика теоретического расчетного детерминирования осредненного теплообмена для круглых труб с шероховатыми стенками на основе трехслойного модифицированного математического моделирования турбулентного пограничного слоя преимущественно отличается от существующих теорий и ее необходимо применять при расчете интенсифицированного теплообмена для данных условий, несмотря на определенно более высокую сложность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушев А. И., Воронцов Л. Н., Федотов Н. М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение, 1986. 352 с. [A. I. Yakushev, L. N. Vorontsov, N. M. Fedotov *Interactiv, standardization and technical measurement*, (in Russian). Moscow: Engineering, 1986. 352 p.]
2. Эффективные поверхности теплообмена / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, И. З. Копп [и др.] М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с. [E. K. Kalinin, G.A. Dreitsler, I.Z. Kopp, et al., *Effective exchange surface*, (in Russian). Moscow: Energoatomisdat, 1998. 408 p.]

3. Лобанов И. Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 632 с. [Lobanov I.E. *Mathematical modeling of intensified heat exchange in turbulent flow in channels: the Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*, (in Russian). Moscow, 2005. 632 p.]

4. 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.) В 4-х т. Том I. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. 405 с. [I. E. Lobanov, L. M. Stein *Prospective heat exchangers with intensified heat transfer for metallurgical production. (General Theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 vols. Volume I. Mathematical modeling of the intensified heat exchange in turbulent flow in channels with the use of basic analytical and numerical methods*, (in Russian). Moscow: Publishing Association building universities, 2009. 405 p.]

5. 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.) В 4-х т. Том II. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. 290 с. [Lobanov I. E.,

Stein L. M. *Prospective heat exchangers with intensified heat transfer for metallurgical production. (General Theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.)* In 4 vols. Volume II. *Mathematical modeling of the intensified heat exchange in turbulent flow in channels with the use of non-core analytical and numerical methods*, (in Russian). Moscow: Publishing Association building universities, 2010. 290 p.]

6. **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.) В 4-х т. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и компаундных моделей турбулентного пограничного слоя. М.: МГАКХиС, 2010. 288 с. [I. E. Lobanov, L. M. Stein *Prospective heat exchangers with intensified heat transfer for metallurgical production. (General Theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.)* In 4 vols. Volume III. *Mathematical modeling of the intensified heat exchange in turbulent flow in channels with the use of multi-layered, and supermnogosloynnyh of compound models of the turbulent boundary layer*, (in Russian). Moscow: MGAKHIS, 2010. 288 p.]

7. **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.) В 4-х т. Том IV. Специальные аспекты математического моделирования гидрогазодинамики, теплообмена, а также теплопередачи в теплообменных аппаратах с интенсифицированным теплообменом. М.: МГАКХиС, 2011. 343 с. [I. E. Lobanov, L. M. Stein *Prospective heat exchangers with intensified heat transfer for metallurgical production. (General Theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.)* The 4 volumes Volume IV. *Special aspects of mathematical modeling of fluid dynamics, heat transfer and heat transfer in heat exchangers with intensified heat exchange*, (in Russian). Moscow: MGAKHIS, 2011. 343 p.]

8. **Лобанов И. Е., Доценко А. И.** Математическое моделирование предельного теплообмена для турбулизованного потока в каналах. М.: МИКХиС, 2008. 194 с. [I. E. Lobanov, A. I. Dotsenko *Mathematical modeling of heat transfer limit for turbulize flow in the channels*, (in Russian). Moscow: MIKHIS, 2008. 194 p.]

9. **Иевлев В. М.** Численное моделирование турбулентных течений. М.: Наука, 1990. 215 с. [V.M. Ievlev *Numerical modeling of turbulent flows*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1990. 215 p.]

10. **Ляхов В. К.** Метод относительного соответствия при расчетах турбулентных пристеночных потоков. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1975. 123 с. [V. K. Lyakhov *Practices regarding compliance with the calculation of turbulent wall surface flows*, (in Russian). Saratov: Saratov University Publishing House, 1975. 123 p.]

11. **Ляхов В. К., Мигалин В. К.** Эффект тепловой, или диффузионной, шероховатости. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1989. 176 с. [V. K. Lyakhov, V. K. Migalin *Effect of heat or diffusion, surface roughness*, (in Russian). Saratov: Saratov University Publishing House, 1989. 176 p.]

12. **Миллионщиков М. Д.** Турбулентные течения в пограничном слое и в трубах. М.: Наука, 1969. 52 с. [M. D. Millionshchikov *Turbulent flow in the boundary layer and in the pipes*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1969. 52 p.]

13. **Миллионщиков М. Д.** Турбулентные течения в пристеночном слое и в трубах // Атомная энергия. 1970. Т. 28. Вып. 3. С. 207–220. [M. D. Millionshchikov *Turbulent flow in the boundary layer and in the pipes*, (in Russian), in *Nuclear power*, vol. 28, no. 3, pp. 207-220, 1970.]

14. **Миллионщиков М. Д.** Турбулентный тепло- и массообмен в трубах с гладкими и шероховатыми стенками // Атомная энергия. 1971. Т. 31. Вып. 3. С. 199–204. [M. D. Millionshchikov *Turbulent heat and mass exchange in pipes with smooth and rough walls*, (in Russian), in *Nuclear power*, vol. 31, no. 3, pp. 199-204, 1971.]

15. **Кутателадзе С. С.** Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с. [S. S. Kutateladze *Fundamentals of heat transfer theory* (in Russian). Moscow: Atomizdat, 1979. 416 p.]

16. **Лобанов И. Е.** Теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах на базе четырехслойной схемы турбулентного пограничного слоя // Современные проблемы науки и образования. 2010. № 3. С. 81–89. [I. E. Lobanov *Theory intensified the heat transfer in turbulent flow in the channels on the basis of four-layer circuits of a turbulent boundary layer*, (in Russian), in *Modern problems of science and education*, no. 3, pp. 81-89, 2010.]

17. **Лобанов И. Е., Штейн Л. М.** Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в трубах с турбулизаторами для теплообменников современного металлургического производства с применением четырехслойной модели турбулентного пограничного слоя // Техника и технология. 2010. № 3. С. 67–77. [I. E. Lobanov, L. M. Stein *Mathematical modeling intensified heat exchange with the tour, turbulent flow in pipes with turbulators for heat exchangers modern metallurgical production using a four-layer model of turbulent boundary layer*, (in Russian), in *Engineering and technology*, no. 3, pp. 67-77, 2010.]

18. **Лобанов И. Е.** Теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах на основе четырехслойной схемы турбулентного пограничного слоя для относительно высоких турбулизаторов потока // Актуальные проблемы современной науки. 2010. № 6. С. 248–252. [I. E. Lobanov *Theory intensified the heat-loobmena in turbulent flow in the channels on the basis of four-layer circuits of a turbulent boundary layer of relatively high turbulence flow*, (in Russian), in *Actiual problems of modern science*, no. 6. pp. 248-252, 2010.]

19. **Лобанов И. Е.** Общая теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах с турбулизаторами с применением четырехслойной модели турбулентного пограничного слоя // Авиакосмическое приборостроение. 2011. № 5. С. 25–32. [I. E. Lobanov *General theory of intensified heat exchange in turbulent flow in circular tubes with turbulence using four-layer model of turbulent boundary layer*, (in Russian), in *Avia- and kosmo-mechanical instrument*, no. 5, pp. 25-32, 2011.]

20. **Лобанов И. Е.** Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в трубах с турбулизаторами для теплообменников современного металлургического производства с применением четырехслойной модели турбулентного пограничного слоя // Альманах современной науки и образования. 2011. № 9 (52). С. 29–35. [I. E. Lobanov *Mathematical model-*

ing of intensive heat transfer in turbulent current in tubes for heat exchangers with turbulators modern metallurgical production prima neniem four-layer model of the turbulent border guard-layer, (in Russian), in Almanac of modern science and education, no. 9 (52), pp. 29-35, 2011.]

21. Лобанов И. Е. Общая теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах с высокими турбулизаторами на базе четырехслойной модели турбулентного пограничного слоя // Московское научное обозрение 2011. № 10. С. 10–15. [I. E. Lobanov *General theory of intensified heat exchange in turbulent flow in circular pipes with high turbulence on the basis of four-layer model of turbulent boundary layer, (in Russian), in Moscow scientific review, no. 10, pp. 10-15, 2011.]*

22. 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. [I. E. Lobanov *Exact solution of the problem of infected Intensive heat transfer in turbulent flow in channels with relatively low turbulence flow on the basis of four-layer circuit in the turbulent boundary layer, (in Russian), in Engineering and technology, no. 2, pp. 26-37, 2012.]*

23. 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. [I. E. Lobanov *General theory of intensified heat exchange in turbulent flow in circular pipes with a relatively high turbulence with application four-layer model of the turbulent border guard-layer, (in Russian), in Sectoral aspects of technical sciences, no 10, pp. 7-13, 2013.]*

24. Лобанов И. Е. Четырехслойная теория интенсифицированного теплообмена для труб с относительно невысокими турбулизаторами потока // Отраслевые аспекты технических наук. 2013. № 11. С. 3–6. [I. E. Lobanov *Four-layer theory of intensified heat exchange pipes with relatively low turbulence flow, (in Russian), in Sectoral aspects of technical sciences, no. 11, pp. 3-6, 2013.]*

ОБ АВТОРЕ

ЛОБАНОВ Игорь Евгеньевич, д-р техн. наук, ведущий науч. сотрудник ПНИЛ—204. Дипл. инж.-механик (МВТУ им Н. Э. Баумана, 1994). Д-р техн. наук по теоретической теплотехнике (МАИ, 2006). Иссл. в обл. теории радиационно-конвективного теплообмена и интенсифицированного теплообмена в каналах.

METADATA

Title: Three layer modified mathematical modeling of heat exchange in pipes with rough walls.

Authors: I. E. Lobanov

Affiliation:

Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI), Russia.

Email: lloobbaannooff@live.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 1 (75), pp. 110-117, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The method of theoretical calculation determinacy hydraulic resistance and heat exchange for round tubes with rough walls on the basis of multi-layer models of the turbulent boundary layer, preferably different from existing theories by taking into account the proportion of cavities of volume in the sublayer and against the rough and the smooth surface of the channel, which can lead to a reduction in heat transfer order 15%, which should be considered in the advanced mode of roughness. The results of calculation of heat for an extended range of determining parameters for round rough tubes, to some extent dictate the level of heat exchange.

Key words: Web OLAP; multidimensional data model; ER-model; situation-oriented database.

About authors:

LOBANOV Igor Evgenjevich, Ph.D., lead researcher PLMS-204. Dipl. Inzh. Mechanical (Bauman MSTU, 1994). Dr. Sc. Science in Theoretical Heat Engineering (IAI, 2006). Research in the theory of radiative-convective heat transfer and intensified heat exchange in channels.