

УДК 532.517.4 : 536.24

Лобанов Игорь Евгеньевич,

д.т.н., ведущий научный сотрудник ПНИЛ-204

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
тел.: 89055896006; e-mail: llobbaapnooff@live.ru

К ВОПРОСУ МОДИФИЦИРОВАННОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБАХ С
ШЕРОХОВАТЫМИ СТЕНКАМИ НА ОСНОВЕ ТРЁХСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ
ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Lobanov I.E.

DEVELOPMENT OF BIFUNCTIONAL ADDITIVES TO DIESEL FUELS
ON THE BASIS OF PETROCHEMICAL PRODUCTS

Аннотация. Сгенерирована методика теоретического расчёта для гидравлических сопротивлений и теплоотдачи для круглых труб с шероховатыми поверхностями на базе многослойных моделей для турбулентных пограничных слоёв, которая преимущественным образом отличается от существующей теории на основе учёта долей объёмов впадин в подслоях и отношению гладкой и шероховатой поверхностей канала, что может привести к снижению расчётной теплоотдачи на порядка 15%; особенно это необходимо учитывать при режимах развитых шероховатостей.

Ключевые слова: моделирование, математический, теплообмен, турбулизатор, труба, шероховатость, течение, стенка, пограничный слой, многослойный, трёхслойный.

Abstract. The developed method of determining the theoretical calculated hydraulic resistance and heat transfer for round pipes with rough walls based on multilayer models of turbulent boundary layer, mainly different from existing theories by taking into account the share volume of cavities in the sublayer, and the rough and smooth surfaces of the channel that can lead to a reduction of heat transfer of about 15%, it is necessary to consider the mode of developed roughness.

Keywords: modeling, mathematical, heat transfer, turbulator, pipe, roughness, flow, wall, boundary layer, multi-layer, three-layer.

Основа актуальности статьи заключается в исследовании закономерности течения в шероховатой трубе, которая рассматривается в качестве интенсификатора теплоотдачи. Установление теоретической закономерности потоков и теплоотдачи при турбулентных режимах в шероховатой трубе важно, так как они применяются в теплообменниках и теплообменных устройствах, реализуемых в современной индустрии.

В настоящей статье теоретически изучается теплоотдача в прямой круглой трубе с шероховатой внутренней поверхностью. Шероховатость стандартно дефинируются совокупностью неравномерностей на поверхности (к примеру, системы впадин и выступов) с сравнительно малым шагом, по базовой длине [15]. Конкретно труба с выступами, в которой шаг между выступами довольно широкий, в настоящей статье исследованию не подвергаются.

Размещение неравномерностей шероховатостей в трубах допускается одинако-

вым, а шаги между зубцами выступов довольно небольшие — это обуславливает то, что они взаимно влияют друг на друга.

Общеизвестно, что шероховатости поверхности оказывают незначительное воздействие на поток, если толщины вязких подслоёв превышают высоты выступов. Однако, для режимов с развитой шероховатостью, где реализуется автомодельность коэффициентов гидравлических сопротивлений от критерия Рейнольдса, высоты выступов значительно выше толщин вязких подслоёв. В ряде исследований экспериментального характера были выявлены генерации во впадине изолированного вихреобразного течения [1]. При рассмотрении обтекания одиночных турбулизаторов можно постулировать, что для небольших чисел Рейнольдса имеют место безотрывные обтекания; с увеличением чисел Рейнольдса имеет место генерация одиночного вихря, который теряет устойчивость и становится турбулентными с дальнейшим увеличением чисел

Рейнольдса. В результате турбулентных перемешиваний вихреобразование диффундирует в ядро течения.

Сходные картины имеют место во впадинах шероховатостей: при небольших критериях Рейнольдса течения у шероховатых стенок почти не отличаются от течений у гладких поверхностей, так как высоты выступов менее толщин вязких подслоёв. С увеличением критерия Рейнольдса снижаются толщины вязких подслоёв и становятся сопоставимыми с высотами выступов. Обтекания происходят со скоростями, сопоставимыми со средними скоростями потоков, следовательно, во впадинах генерируются вихри, что обуславливает приближение переходных режимов течений. С дальнейшим увеличением чисел Рейнольдса повышаются пульсации во внешних ядрах потоков, течения во впадинах становятся неустойчивыми, что характерно развитому турбулентному режиму течений.

Для турбулентных ядер в основном потоке [1] является характерным увеличение интенсивностей пульсаций для шероховатых поверхностей. Наивысшие пульсации располагаются в областях, близких к вершинам выступов, и составляют десятые доли от средних скоростей потоков (нормальные к стенкам пульсационные скорости могут составить порядка половины средних скоростей в трубах [1]). Вследствие этого проникающие во впадину шероховатостей пульсации в поперечном направлении сильно перемешивают в них теплоноситель. Перетекания теплоносителей из ядер течения в зону завихрения в зазоре выступов шероховатости, равно как и в противоположную сторону, могут быть неустойчивыми и происходят в виде беспорядочных турбулентных обменов.

В ядрах течений масштабы возмущения имеют порядок характерного размера трубы, а собственные пульсации во впадинах имеют порядок высот впадин. Поэтому, когда высоты впадин малы в сравнении с характерными размерами каналов, процесс перемешиваний во впадинах и процессы теплопереносов определяются, главным образом, наружными пульсациями, в результате чего теплоносители будут выбрасываться из впадин шероховатостей. По этой причине вязкие подслой во впадинах формируются не благодаря осреднённым в них течениям, а определяются взаимодействием со стенками

трубы внешних пульсаций. Когда высоты выступов сопоставимы с размерами каналов, процесс перемешиваний определяется как наружными, так и имманентными пульсациями; кроме этого, в глубинах впадин шероховатостей в конкретной близости от стенок определяющим становится влияние собственных пульсаций, поэтому толщины вязких подслой во впадинах связаны с осреднёнными течениями в них.

Опытные и теоретические исследования закономерностей течения и теплоотдачи в шероховатых каналах (соответственно, в [1] и [2–6]) отличны от аналогичных законов для каналов с отдельными выступами.

Имеющиеся теории по исследованию течений и теплоотдачи в трубах с шероховатыми стенками в подоснове своей базируются на логарифмическом профиле скоростей, что в немалой степени упрощает математическое моделирование и обуславливает дополнительные расхождения для больших относительных (в отношении к диаметрам труб) шероховатостей.

Большие относительные шероховатости могут быть реализованы, в частности, в трубе с малым диаметром, что сравнимо с аналогичными условиями в трубах с малым диаметром с выступами [7].

Математические моделирования потоков и теплоотдачи в шероховатой трубе были проведены в довольно незначительном числе научных работ (в достаточной мере работы по данной тематике приводятся в монографиях [8–10]) и не заходят за рамки логарифмических профилей скоростей.

В данной статье были выявлены более усложнённые, чем имеющиеся, законы по теплоотдаче для труб с шероховатыми стенками, следовательно, они являются более обоснованными и их можно применять для расширенного диапазона определяющих параметров. Перед этим, при теоретических исследованиях теплоотдачи для каналов с отдельными выступами в [2–6] уже были реализованы закономерности, более глубокие, нежели при применении логарифмических профилей скоростей.

Существующие опытные работы по течению и теплообмену в шероховатой трубе показывают, что для довольно высоких выступов шероховатостей турбулентные течения в существенной степени различны относительно течений в каналах с гладкими стенками.

В опытных работах по исследованию течений и теплоотдачи в трубах с шероховатыми стенками, которые проанализированы в [11–13], выделяются 4 режима течения теплоносителя:

1) осуществляющийся по закономерности Пуазеля при небольших критериях Рейнольдса Re автомодельным образом от высот шероховатости – ламинарный поток;

2) осуществляющийся по закономерности гидравлических сопротивлений для гладкой трубы при промежуточных критериях Рейнольдса Re – турбулентный поток;

3) осуществляющийся по закономерности гидравлических сопротивлений, являющихся функциями промежуточных критериев Рейнольдса Re и безразмерной шероховатости $\bar{h} = h/R_0$ (отношение средних высот выступа шероховатости к внутреннему радиусу трубы; $D=2\cdot R_0$ – внутренний диаметр (больший) трубы) – турбулентный поток;

4) осуществляющийся по закономерности гидравлических сопротивлений, являющихся функциями лишь безразмерной шероховатости при больших критериях Рейнольдса Re — автомодельный поток.

В случае с большими относительными высотами шероховатостей происходит исключение областей с турбулентными режимами течения, закономерности для которых характерны для труб с гладкими стенками; такое же исключение будет происходить в трубах с выступами [1–6].

Теплоотдача при течениях в канале теплоносителя с неизменными теплофизическими характеристиками при условиях интенсификации теплообмена в прямой круглой шероховатой трубе моделируется на основе многослойной схемы турбулентных пограничных слоёв на той основе, что турбулентная вязкость и профиль скорости в турбулентном пограничном слое уже определены.

Подобная модель для расчёта интенсифицированного теплообмена была выполнена в научных работах [2–6] при расчёте теплоотдачи в трубе с выступами, что даёт возможность её дальнейшего применения для расчётов теплоотдачи в шероховатой трубе с соблюдением идентичных допущений [2–6], так как условия течения процессов теплоотдачи имеют сходный (кроме специфических особенностей) характер.

Решения проблемы об интенсификаци-

рованной теплоотдаче в настоящей статье получаются при помощи интеграла Лайона с принятием допущений $w/\bar{w}_x \cong 1$ (w_x/\bar{w}_x – соотношения аксиальных составляющих скоростей к среднерасходным) которые, как показали теоретические научные работы [2–6] для круглой трубы и канала с некруглым поперечным сечением с выступами, мало влияют на осреднённую интенсифицированную теплоотдачу:

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

где $R=r/R_0$ – относительный (безразмерный) радиус для трубы (отношения расстояний от оси трубы r к радиусам труб R_0); Pr_T и Pr – турбулентный и молекулярный критерий Прандтля соответственно; Nu – критерий Нуссельта; μ_T и μ – турбулентная и молекулярная динамическая вязкость соответственно.

В отличие от гладких труб, в шероховатых трубах толщины вязких подслоёв будут непостоянны по поверхностям впадин и выступов, поэтому возникает необходимость введения средней толщины для каждого из подслоёв.

Плотности тепловых потоков на всём протяжении толщины ламинарного подслоя могут быть признаны практически постоянными.

Следует ввести следующие обозначения: $n_F=F_{gl}/F_{sh}$ (F_{gl} , F_{sh} – соответственно, площадь гладких и шероховатых стенок трубы).

Для вязких подслоёв плотности тепловых потоков q равны: $q=q_{ct}(F_{gl}/F_{sh})=q_{ct}n_F$ (q_{ct} – плотности тепловых потоков в стенки), так как толщины вязких подслоёв малы в сравнении с высотами выступов.

Для тепловых потоков во впадинах плотности тепловых потоков q_{vp} зависят от форм впадин и переменны по глубинам впадин.

Фактически возможно считать, что теплоперенос происходит при постоянных тепловых потоках через плоский слой от высоты вязкого подслоя до суммарной высоты выступа и высоты вязкого подслоя.

На границах с ядрами потоков плотности тепловых потоков составят:

$q_{ct}/[1-(h+h_v)/R]$, где h_v – толщины вязких подслоёв.

На границах с вязкими подслоями плотности тепловых потоков составят:

$q_{ct}(F_{\text{пп}}/F_{\text{ш}})$.

Плотности тепловых потоков во впадинах есть среднее от вышеуказанных значений, а конкретно: $\frac{q_{ct}}{2} \left(\frac{1}{1 - \frac{h+h_e}{R}} + \frac{F_{\text{ш}}}{F_{\text{пп}}} \right)$.

Так как впадины занимают лишь часть поверхностей, а в конкретном подслое на часть впадин приходятся лишь части объёмов конкретного подслоя, то, чем менее впадин на поверхностях теплоотдачи, тем менее их объёмы, и тем менее именно на впадины приходятся термические сопротивления; и напротив: чем более впадин на поверхностях теплоотдачи, тем более их объёмы, тем больше вклад в общие термические сопротивления относятся к впадинам.

Данные изменения термических сопротивлений впадин учитываются введениями коэффициентов объёмов n_V , отражающих доли объёмов впадин в подслоях.

Коэффициенты n_F и n_V для шероховатой трубы детерминируются или на основе известных геометрических характеристик шероховатостей, или на основе анализа профилограмм каналов.

К примеру, для шероховатостей в форме метрических резьб вышеупомянутые коэффициенты составляют:

$$n_F = 0,58 \text{ и } n_V = 0,50.$$

Если отнести коэффициенты теплоотдачи к гладким поверхностям, то $\alpha_{\text{ш}} = \frac{q_{cm}}{\Delta T}$, а если к шероховатым поверхностям, то $\alpha_{\text{ш}} = \frac{q_{cm} F_{\text{ш}}}{\Delta T F_{\text{ш}}} = \frac{q_{cm}}{\Delta T} n_F$ (ΔT – средние суммарные температурные напоры).

Динамические скорости ("скорости трения") для шероховатых поверхностей в нашем случае будут различаться с соответствующими значениями для гладких поверхностей: $w_*^u = w_*^{\text{ш}} \sqrt{n_F}$.

Далее следует рассмотреть существующие эмпирические зависимости по гидравлическим сопротивлениям для труб с шероховатыми стенками.

Для шероховатых труб с относительно небольшой высотой выступа асимптотические зависимости коэффициентов гидравлических сопротивлений описываются общеизвестной эмпирической формулой Никурадзе:

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

Зависимости коэффициентов гидрав-

лических сопротивлений для шероховатой трубы не только от относительных шероховатостей, но и от критериев Рейнольдса $\xi = f \left(\frac{h}{R_0}; \text{Re} \right)$, описываются эмпирически адекватнее по формуле Колброка, которую можно записать в следующей форме:

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

Можно подытожить, что и в эмпирических формулах для коэффициентов гидравлических сопротивлений при течениях в шероховатой трубе используются логарифмические профили скоростей.

Необходимо использование для расчётов теплоотдачи для рассматриваемых условий интенсификации теплоотдачи величины гидравлических сопротивлений в прямой круглой шероховатой трубе, так как стратификации потоков зависят от гидросопротивлений.

Теплоотдача при течениях в трубах с неизменными теплофизическими свойствами теплоносителя для условий интенсификации теплоотдачи в прямой круглой шероховатой трубе моделируем на основе многослойной схемы турбулентных пограничных слоёв на том основании, что величины турбулентных вязкостей и профиль скорости в турбулентном пограничном слое считаются уже известными.

В дальнейшем необходимо конкретно подробно рассмотреть каждый из подслоёв.

1. Ламинарный (вязкий) подслой.

Вязкие подслой располагаются в следующих окрестностях:

$$Re \left[1 - \frac{\eta_1}{Re \sqrt{n_F}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} - \frac{h}{R_0}; 1 \right],$$

где $\eta_1 = 5$ — константа, которая характеризуется как безразмерная толщина вязких подслоёв [14].

В областях вязких подслоёв принимаем:

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

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

где μ/μ_T – отношения турбулентных и молекулярных динамических вязкостей; w_x/\bar{w}_x – отношения аксиальных составляющих скоростей к среднерасходным; $\eta = (1-R)^3 Re \sqrt{n_F} \sqrt{\frac{\xi}{32}}$ – безразмерные координаты; β

— константы в законах "3-ей степени":
 $\frac{\mu}{\mu_T} = \beta \frac{\eta^3}{\eta_1^2}$ [14].

2. Буферный (промежуточный подслой).

Промежуточные подслои располагаются в следующих окрестностях: $R\epsilon \left[1 - \eta_2 \text{RenF3}2\xi - hR0; 1 - \eta_1 \text{RenF3}2\xi - hR0 \right]$,

где $\eta_1 = 30$ константа, которая характеризуется как безразмерная толщина промежуточных подслоёв [14].

В областях промежуточных подслоёв принимаем:

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

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

3. Турбулентное ядро потока.

Турбулентные ядра потока располагаются в следующих окрестностях:

$$R\epsilon \left[0; 1 - \frac{\eta_2}{\text{Re}\sqrt{n_F}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} - \frac{h}{R_0} \right].$$

В областях турбулентных ядер потока принимаем:

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

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

Соответственно с вышеприведённой стратификацией течения, осреднённая теплоотдача (1) будет следующей:

$$\text{Nu} = 2 \times \\ 1 - \eta_1 \text{RenF3}2\xi - hR01R31 + \text{PrPrT}\beta\eta_12\text{Re}3nF3 \\ 21 - R3\xi3232dR +$$

$$+ n_V \frac{\left(n_F + \frac{1}{1 - \frac{\eta_1}{\text{Re}\sqrt{n_F}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} - \frac{h}{R_0}} \right)}{2} \times \quad (10)$$

$$1 - \eta_2 \text{RenF3}2\xi - hR01 - \eta_1 \text{RenF3}2\xi - hR0R31 + \\ \text{PrPrT}151 - R\text{RenF}\xi32 - 1dR + \\ + 01 - \eta_2 \text{RenF3}2\xi - hR0R31 + \text{PrPrT}25R1 - R\text{Re} \\ nF\xi32dR - 1.$$

Можно сгенерировать аналитические закономерности для интегралов (10) анало-

гично работам [16–24], где была решена проблема теплоотдачи для труб с выступами.

По разработанной модели были выполнены расчёты теплоотдачи для шероховатой трубы с шероховатостями в форме треугольных резьб, что характерно для работы [1].

Наибольшие расхождения полученных результатов расчёта, которые были получены по разработанной модели с результатами расчётов, полученных по модели, разработанной для труб с выступами $\text{Nu}_{(10)}/\text{Nu}_{[16–24]}$, для критериев Рейнольдса, которые больше критических значений Re_{kp} , характерных для режима развитой шероховатости, довольно значительны:

от $-17,1\%$ (при $h/R_0=0,016$) до $-7,2\%$ (при $h/R_0=0,066$); среднее: $-11,7\%$.

Следовательно, ввод в модель поправок на поверхности шероховатостей n_F и n_V при соответствующем изменении стратификации течения ощутимо уточняют критерии Нуссельта для шероховатой трубы в сравнении с методиками, характерными для каналов с выступами [16–24], что обосновывает преимущественное использование разработанной модели (особенно для режимов развитых шероховатостей) в области этого специфического условия.

Для примера были проведены сравнения разработанной модели с экспериментальными данными, приведёнными в [1], для шероховатой поверхности в форме треугольных резьб: критерий Нуссельта составил $\text{Nu}=251$ для $\text{Pr}=0,7$, $\text{Re}=87300$ и $h/R_0=0,037$, $n_F=0,58$, $n_V=0,50$; расчёты по предложенным методикам при расчёте гидравлических сопротивлений по зависимости (2) дают параметр Нуссельта 250,4, что коррелируют с экспериментом при погрешности порядка четверти процента.

Для иных параметров потоков и характеристик шероховатостей (для $h/R_0=0,037$ и $h/R_0=0,073$) разработанная методика расчёта хорошо согласуется с экспериментом [1] для широкого диапазона критериев Рейнольдса.

Резюмируя можно сказать, что предлагаемая модель точнее описывает теплоотдачу для шероховатой трубы, чем модель, специфическая для трубы с выступами [16–24], по той причине, что турбулентный пограничный слой моделируется на основе стратификации, которая в определённой степени отличается от стратификации в трубах

с выступами; кроме того, и по причине ввода поправок на наличие дополнительных поверхностей в шероховатой трубе.

1. Сгенерирована теория для расчёта интенсифицированной теплоотдачи для круглой трубы с шероховатыми внутренними стенками на базе 3-х-слойной модифицированной математической модели для турбулентных пограничных слоёв.

2. Выгодное особенное отличие представленной теории от известных теорий, которые характерны для каналов с выступами, заключается в модификации стратификации течения, которая учитывает девиацию скоростей трения для шероховатой трубы.

3. При расчёте теплоотдачи в шероховатой трубе модифицированная 3-х-слойная математическая теория турбулентных пограничных слоёв в статье усложняется при учёте соотношений гладких и шероховатых площадей поверхностей труб, а ещё вводом коэффициентов объёмов впадин, отражающих доли объёмов впадин в подслоях.

4. Произведённые расчётные результаты по интенсифицированной теплоотдаче для круглой шероховатой трубы для широких диапазонов определяющих характеристик хорошо согласуются с существующим экспериментальным материалом.

5. Выявлено, что разработанная теория более точно описывает теплоотдачу для шероховатой трубы, чем теории, характерные для трубы с выступами, к примеру [16—24],

так как позволяет учесть специфику процессов теплоотдачи в трубе с шероховатыми внутренними поверхностями, поскольку теории для трубы с выступами разрабатывались, если расстояние между выступами сравнительно велико.

6. Установлено, что превосходство представленной специфической теории теплоотдачи для шероховатой трубы перед теориями для трубы с выступами довольно ощутимо в режимах с развитой шероховатостью.

7. Произведённые расчётные результаты осреднённой теплоотдачи для круглой шероховатой трубы для расширенных диапазонов определяющих характеристик значительно различаются с соответствующими данными для круглой гладкой трубы, но косвенно показывают уровень интенсификации теплоотдачи из-за применения шероховатой трубы взамен гладкой.

8. Сгенерированная в статье специфическая теория для расчёта осреднённой теплоотдачи для круглой трубы с шероховатыми внутренними поверхностями на базе 3-х-слойной модифицированной математической модели для турбулентных пограничных слоёв имеет выгодные отличия от существующей теории и её необходимым образом следует применять для расчёта интенсифицированной теплоотдачи для рассматриваемых условий течения теплоносителя, даже при её более высокой сложности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З.Копп и др. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.
2. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. – М., 2005. – 632 с.
3. 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 томах. Том I. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. — 290 с.
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 томах. 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.
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 томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. — 290 с.

при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 405 с.

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 томах. 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.

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 томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. — 290 с.

фицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. 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.

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 томах Том IV. Специальные аспекты математического моделирования гидрогазодинамики, теплообмена, а также теплопередачи в теплообменных аппаратах с интенсифицированным теплообменом. – М.: МГАКХиС, 2011. – 343 с.

7. Лобанов И.Е., Доценко А.И. Математическое моделирование предельного теплообмена для турбулизированного потока в каналах. – М.: МИКХиС, 2008. – 194 с.

8. Иевлев В.М. Численное моделирование турбулентных течений. – М.: Наука, 1990. – 215 с.

9. Ляхов В.К. Метод относительного соответствия при расчётах турбулентных пристеночных потоков. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1975. – 123 с.

10. Ляхов В.К., Мигалин В.К. Эффект тепловой, или диффузационной, шероховатости. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1989. – 176 с.

11. Миллионников М.Д. Турбулентные течения в пограничном слое и в трубах. – М.: Наука, 1969. – 52 с.

12. Миллионников М.Д. Турбулентные течения в пристеночном слое и в трубах // Атомная энергия. – 1970. – Т. 28. – Вып. 3. – С. 207–220.

13. Миллионников М.Д. Турбулентный тепло- и массообмен в трубах с гладкими и шероховатыми стенками // Атомная энергия. – 1971. – Т. 31. – Вып. 3. – С. 199–204.

14. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

15. Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

16. Лобанов И.Е. Теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах на базе четырёхслойной схемы турбулентного пограничного слоя // Современные проблемы науки и образования. – 2010. – № 3. – С. 81–89.

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 четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя // Техника и технология. – 2010. – № 3. – С. 67–77.

18. Лобанов И.Е. Теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах на основе четырёхслойной схемы турбулентного пограничного слоя для относительно высоких турбулизаторов потока // Актуальные проблемы современной науки. – 2010. – № 6. – С. 248–252.

19. Лобанов И.Е. Общая теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах с турбулизаторами с применением четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. – № 5. – С. 25–32.

20. Лобанов И.Е., Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в трубах с турбулизаторами для теплообменников современного металлургического производства с применением четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя // Альманах современной науки и образования. – 2011. – № 9 (52). – С. 29–35.

21. Лобанов И.Е. Общая теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах с высокими турбулизаторами на базе четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя // Московское научное обозрение – 2011. – № 10. – С. 10–15.

22. Лобанов И.Е. Точное решение задачи об интенсифицированном теплообмене при турбулентном течении в каналах с относительно невысокими турбулизаторами потока на базе четырёхслойной схемы турбулентного пограничного слоя // Техника и

технология. – 2012. – № 2. – С. 26–37.

23. Лобанов И.Е. Общая теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах с относительно высокими турбулизаторами с применением четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя // Отраслевые аспек-

ты технических наук. – 2013. – № 10. – С. 7–13.

24. Лобанов И.Е. Четырёхслойная теория интенсифицированного теплообмена для труб с относительно невысокими турбулизаторами потока // Отраслевые аспекты технических наук. – 2013. – № 11. – С. 3–6.

УДК 536.24

Лучко Михаил Вахидович,

*магистрант кафедры химической технологии топлива,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: rikardo644@gmail.com*

Фомина Лариса Валерьевна,
*к.х.н., доцент кафедры химии,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail:
flybaan@mail.ru*

РАСЧЁТ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТИЛ-ТРЕТ-БУТИЛОВОГО ЭФИРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА УСТАНОВКИ ЛОПАСТЕЙ ВЕНТИЛЯТОРА

Luchko M.V., Fomina L.V.

CALCULATION OF THE HEAT TRANSFER SURFACE OF THE AIR HEAT EXCHANGER USED IN THE PRODUCTION OF METHYL-TET-BUTYL ETHER DEPENDING ON THE ANGLE OF INSTALLATION OF THE FAN BLADES

Аннотация. Выполнены расчёты требуемой поверхности теплопередачи по оребрению при различных углах установки лопастей вентилятора воздушного теплообменника горизонтального типа, применяемого на этапе охлаждения бутадиеновой фракции в производстве метил-трет-бутилового эфира. Найдено, что для эффективной работы установки подготовки углеводородной фракции в летний период требуется замена действующего аппарата на новый, с иными конструктивными характеристиками.

Ключевые слова: воздушный теплообменник, конструктив, теплопередача, эффективность.

Abstract. Calculations have been made of the required heat transfer surface along the ribbing at different angles of installation of the fan blades of a horizontal air heat exchanger used at the stage of cooling the butadiene fraction in the production of methyl tert-butyl ether. It was found that for the effective operation of the hydrocarbon fraction preparation unit in the summer period, it is necessary to replace the existing apparatus with a new one with different design characteristics.

Keywords: air heat exchanger, constructive, heat transfer, efficiency.

Оксигенаты – общее название низших спиртов и простых эфиров, применяемых в качестве высокооктановых компонентов моторных топлив. Самые распространенные из них – метanol, этанол, метил-трет-бутиловый эфир и этил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ и ЭТБЭ) [1]. Содержание МТБЭ в общем бензиновом фонде России не велико (0,5 %). Производство МТБЭ дешевле производства ЭТБЭ из-за высокой стоимости про-

изводства этанола. Добавление МТБЭ к топливу повышает октановое число и препятствует детонации бензина в камере сгорания. Использование МТБЭ значительно снижает содержание оксида углерода, углеводородов и полициклических ароматических соединений в выхлопных газах автомобилей. К достоинствам МТБЭ относятся: отличная смешиваемость с углеводородами; хорошая совместимость с конструкционными и уплот-