

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ ТРУБ КАПЛЕОБРАЗНОЙ ФОРМЫ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИХ ОБТЕКАНИЯ

А. М. Терех

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*
 Контактный тел. (044) 454-97-87
 e-mail: teram57@meta.ua

А. И. Руденко

Кандидат технических наук, доцент**
 Контактный тел. (044) 454-97-87
 e-mail: teram57@meta.ua

Ю. В. Жукова

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Лаборатория турбулентности
 Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси
 ул. П. Бровки, 15, 220072, г. Минск, Республика Беларусь
 Контактный тел. +375-17-235-62-24
 e-mail: julia_zhukova@rambler.ru

А. В. Семеняко

Ассистент*
 Контактный тел. (044) 454-97-87 e-mail: lab_tpi@email.ua

В. А. Кондратюк

Аспирант*
 Контактный тел. (044) 454-97-87
 e-mail: teram57@meta.ua

*Кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики
 **Кафедра экономики и предпринимательства
 Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
 пр. Победы, 37, г. Киев, Украина 03056

Приведені результати експериментального дослідження аеродинамічного опору поодиноких труб каплеподібної форми в діапазоні зміни чисел Рейнольдса від 9000 до 45000. Виконано порівняння отриманих результатів з експериментальними даними для поодинокі труби круглої форми. Проведена візуалізація течії в сліди та на поверхні труби каплеподібної і круглої форми

Ключові слова: труба, краплеподібний, круглий, аеродинаміка, опір, течія, візуалізація

Приведены результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления одиночных труб каплеобразной формы в диапазоне изменения чисел Рейнольдса от 9000 до 45000. Выполнено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными для одиночной трубы круглой формы. Проведена визуализация течения в следе и на поверхности труб каплеобразной и круглой формы

Ключевые слова: труба, каплеобразный, круглый, аэродинамика, сопротивление, течение, визуализация

1. Введение

Одним из направлений при решении задач энергосбережения и экономии материально-технических ресурсов в энергетике является применение теплообменного оборудования, обладающего высокой теплоаэродинамической эффективностью и низкими массогабаритными характеристиками. Учитывая, что одним из основных видов технологического оборудования энергогенерирующих предприятий являются теплообменные аппараты рекуперативного типа, решением данной проблемы может быть применение в них в качестве теплопередающих поверхностей труб некруглого сечения (рис. 1).

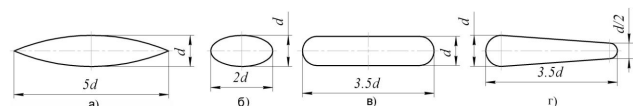


Рис. 1. Трубы некруглого сечения [1]: а – двухугольные; б – овальные; в – плоско овальные; г – каплеобразные

Исследованиям теплоаэродинамических характеристик различного типа одиночных труб некруглого сечения (рис. 1, а, б, в), помещенных в канал, посвящено достаточно большое количество работ, например [1-7]. В тоже время для труб каплеобразной формы (рис. 1, г) подобных исследований практически не проводилось [8-9].

Целью данной работы является восполнение пробела в экспериментальных данных по аэродинамическому сопротивлению одиночных труб каплеобразной формы при поперечном их обтекании в закрытом канале, а также данных по визуализации течения в ближнем следе и на поверхности таких труб.

2. Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Эксперименты по исследованию аэродинамического сопротивления и визуализации течения при обтекании одиночных труб каплеобразного профиля (рис. 2) в сравнении с одиночной трубой круглого сечения проводились в аэродинамической трубе разомкнутого типа прямоугольного сечения шириной 70 мм и высотой 60 мм (рис. 3). Проточная часть состояла из рабочего участка, в котором располагалась исследуемая труба, двух прямых каналов перед и за рабочим участком и диффузора, который присоединялся одним концом к выходному патрубку вентилятора, а другим – к прямому каналу.

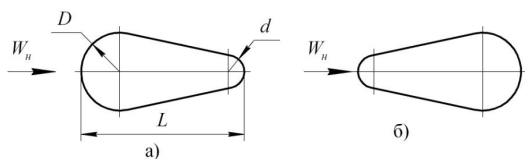


Рис.2 Труба каплеобразного профиля: а – «прямой» каплеобразный профиль; б – «обратный» профиль

В прямой канал вмонтировано впрыскивающее устройство ввода в поток саже-керосиновой взвеси для визуализации течения на поверхности труб каплеобразного профиля, а также для визуализации процессов, происходящих в ближнем следе при поперечном обтекании труб каплеобразного профиля.

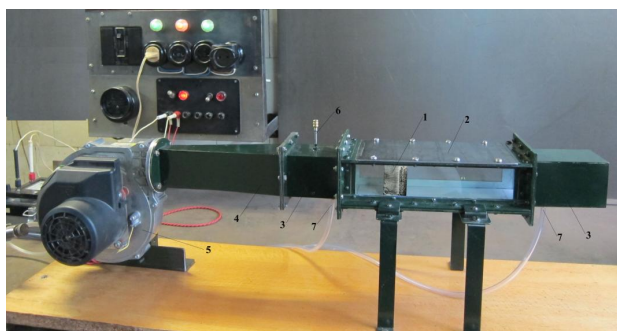


Рис.3 Экспериментальная установка: 1 – модель трубы; 2 – рабочий участок; 3 – прямой канал; 4 – диффузор; 5 – вентилятор; 6 – устройство впрыска; 7 – отборы давления

Для отбора статического давления до и после исследуемой модели поверхности впаены два штуцера с внутренним диаметром отверстия 0.5 мм. Перепад давлений определялся с помощью микроманометра ММН-240 по разнице статических давлений до и после

исследуемой модели трубы с учетом потерь на трение в проточной части стенда согласно методике [10]

$$\Delta P = \Delta P_{\epsilon} - \left(\frac{\lambda_{тр} \cdot L_c}{d_c} \right) \cdot \frac{\rho \cdot W_H^2}{2} \tag{1}$$

Максимальная производительность вентилятора составляла 0.085 м³/с, что позволяло достичь скорости потока в свободном сечении рабочего участка до 20 м/с. Расход воздуха через аэродинамическую трубу регулировался автотрансформатором путем изменения напряжения, подаваемого на двигатель вентилятора.

Исследования аэродинамического сопротивления проводились в диапазоне изменения скоростей 4...18 м/сек, что соответствует числам Рейнольдса $Re_D = (9...45) \cdot 10^3$.

Для исследований выбрано четыре типа труб каплеобразного сечения, различающихся большим диаметром D : $D = 38$ мм; 28 мм; 24 мм; 18 мм. Малый диаметр d и полная длина трубы каплеобразного сечения L полагались постоянными и равными $d = 10$ мм и $L = 51$ мм соответственно. Для сравнения результатов выбирались трубы круглого сечения с соответствующими диаметрами D . Для исследований влияния на аэродинамическое сопротивление ориентации профиля каплеобразной трубы к потоку выбрано обтекание со стороны большого диаметра (прямой профиль) и обтекание со стороны малого диаметра (обратный профиль), причем поток набежал на трубу под углом 0°.

Эксперименты по визуализации картины обтекания, отрыва пограничного слоя и ближнего следа выбранных каплеобразных и круглых труб проводились при одной фиксированной скорости набегающего потока $W_H = 15$ м/с с использованием методики проведения исследований, подробно описанной в [11, 12].

3. Результаты исследования и их анализ

3.1 Аэродинамическое сопротивление

Как правило, аэродинамическое сопротивление одиночных труб представляется в виде зависимости коэффициента полного сопротивления C_D от числа Рейнольдса Re_D [2, 5, 13]. Коэффициент полного сопротивления является суммой коэффициентов сопротивления давления (формы) C_p и сопротивления трения C_f ($C_D = C_p + C_f$). Коэффициент сопротивления трения в области изменения чисел Рейнольдса от 5000 до 10^6 составляет (2-3)% от полного сопротивления для труб круглого профиля [5]. Нами при экспериментальном исследовании аэродинамического сопротивления одиночных труб круглого и каплеобразного сечения в качестве критерия использовалось

число Эйлера $Eu = \frac{\Delta P}{\epsilon W_H^2}$, а результаты исследований

были представлены в виде критериального уравнения $Eu = f(Re_D)$ (рис. 4). Число Рейнольдса определялось по большому диаметру D . За определяющую скорость в выражениях для Eu и Re_D принималась скорость в свободном сечении канала рабочего участка W_H .

Для труб круглой формы поперечного сечения кривые качественно согласуются с кривыми зависимости полного сопротивления от чисел Рейнольдса представленных в [5]. Наблюдается падение сопротивления при уменьшении большего диаметра D , происходит расхождение кривых по коэффициенту загромождения k_q , так как эксперименты проведены при фиксированных размерах рабочего канала. С уменьшением k_q аэродинамическое сопротивление уменьшается.

Аэродинамическое сопротивление труб прямой и обратной каплеобразной формы с $D = 38$ мм практически такое же как и для трубы круглой формы. Влияние ориентации трубы на аэродинамическое сопротивление в этом случае минимальное (рис. 4, кривые 1, 2, 9).

Уменьшение большего диаметра трубы каплеобразного профиля $D \in 28$ мм сопровождается падением аэродинамического сопротивления. При обтекании со стороны большего диаметра аэродинамическое сопротивление таких труб существенно ниже по сравнению с сопротивлением трубы каплеобразного профиля при обтекании со стороны малого диаметра и по сравнению с трубой круглого профиля соответствующего диаметра. Влияние ориентации каплеобразной трубы на сопротивление профиля становится ощутимым. Необходимо отметить (рис. 4), что если наклон кривых $Eu=f(Re_D)$ при обтекании труб каплеобразного профиля со стороны малого диаметра и круглых труб близок к нулю, то для труб каплеобразного профиля, обтекаемых со стороны большего диаметра, он изменяется от -0.2 до -0.35 при разных значениях D .

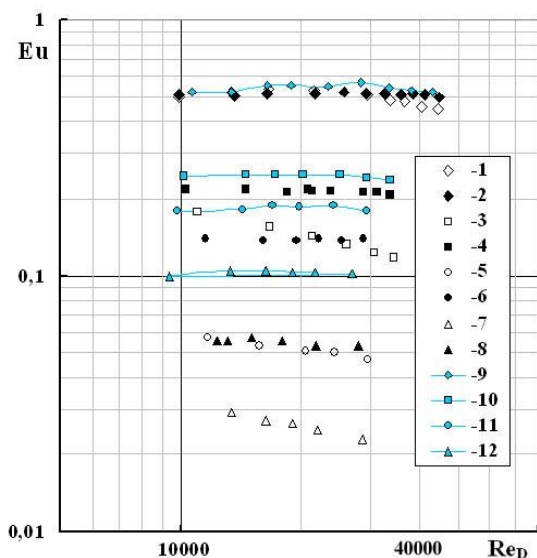


Рис.4 Результаты исследования аэродинамического сопротивления одиночных труб: 1 – прямой каплеобразный профиль, $D=38$ мм; 2 – обратный, $D=38$ мм; 3 – прямой, $D=28$ мм; 4 – обратный, $D=28$ мм; 5 – прямой, $D=24$ мм; 6 – обратный, $D=24$ мм; 7 – прямой, $D=18$ мм; 8 – обратный, $D=18$ мм; 9 – круглая труба, $D=38$ мм; 10 – круглая труба, $D=28$ мм; 11- круглая труба, $D=24$ мм; 12 – круглая труба, $D=18$ мм

Аэродинамическое сопротивление каплеобразных труб при обтекании со стороны малого диаметра уменьшается по сравнению с трубами круглого профиля для $D = 28$ мм – в 1.15 раза, для $D = 24$ мм в – 1.3 раза,

для $D = 18$ мм – в 1.75 раза; при обтекании со стороны большего диаметра снижение сопротивления по сравнению с трубой круглого профиля составляет для $D = 28$ мм – от 1.4 до 2.0 раз, для $D = 24$ мм – от 3 до 3.8 раз, для $D = 18$ мм – от 3.4 раза до 4.3 раза в зависимости от числа Рейнольдса.

3.2 Визуализация течения

Процесс обтекания тела любой формы очень сложен и, как сказано в [5], зависит от многих факторов: числа Re , степени турбулентности Tu набегающего потока, высоты цилиндра и др. Значительное влияние эти факторы оказывают на характер обтекания, на отрыв пограничного слоя, на формирование ближнего следа за цилиндром (рис.5, 6).

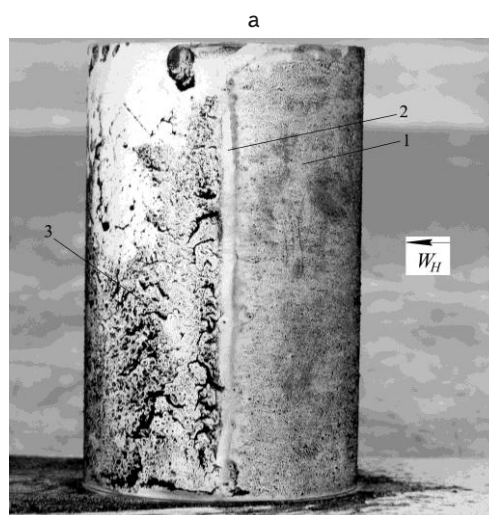
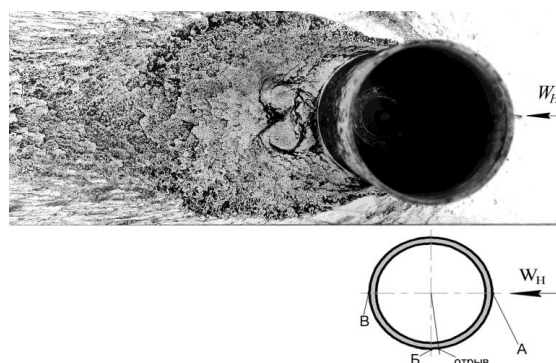


Рис.5 Визуализация течения в ближнем следе (а) и отрыв пограничного слоя (б) на трубе круглого профиля $D = 38$ мм: 1 – область ламинарного пограничного слоя; 2 – линия отрыва пограничного слоя; 3 – область формирования вихрей

В лобовой точке (А) ($\varphi=0^\circ$) при встрече потока с преградой – с поперечно расположенным к потоку цилиндром – скорость потока равна нулю. С увеличением угла φ поток ускоряется, касательная скорость возрастает и в миделевом сечении в точке (Б) ($\varphi=90^\circ$) она удваивается ($W_H = 2W \sin \varphi$) [5].

При взаимодействии сил вязкости потока с цилиндром на его лобовой поверхности образуется ламинарный пограничный слой по линии А-Б до точки отрыва (рис. 5, а), толщина которого увеличивается вниз по течению. Основными параметрами влияющими на этот слой являются Re_D и Tu набегающего потока [5, 13]. При увеличении числа Re_D течение в следе становится неустойчивым, вихри начинают отрываться от поверхности цилиндра. С дальнейшим увеличением числа Рейнольдса ($Re_D = 300$) в следе за цилиндром происходит переход к турбулентному обтеканию в области формирования вихрей (линия Б-В, рис. 5). В этом режиме существует трехмерная структура следа [5, 13]. Такая картина в следе сохраняется до критического режима обтекания ($Re_D \approx 2 \cdot 10^5$). Отрыв пограничного слоя от поверхности обусловлен силами трения, изменением давления и скорости. При обтекании лобовой области давление падает $\frac{dP}{dx} < 0$, скорость

возрастает и, несмотря на действие вязких сил, среда продолжает двигаться вдоль поверхности цилиндра. Над кормовой частью цилиндра давление потока увеличивается $\frac{dP}{dx} > 0$, а скорость по направлению движе-

ния уменьшается. Движение среды постепенно замедляется и останавливается, среда начинает двигаться в обратном направлении, пограничный слой отрывается, формируя вихрь. Для докритических чисел Re отрыв происходит на угловой координате $\varphi \approx (82^\circ - 83^\circ)$ при загромождении канала $k_q < 0.1$. С увеличением коэффициента загромождения k_q от 0.1 до 0.833 точка отрыва ламинарного пограничного слоя при докритическом режиме обтекания сдвигается от $\varphi \approx (82^\circ - 83^\circ)$ до $\varphi = 95^\circ$ (рис. 5) [13].

Для выбранных четырех трубчатых профилей этот коэффициент соответственно равен: для $D = 38$ мм - $k_q = 0.543$; $D = 28$ мм - $k_q = 0.4$; $D = 24$ мм - $k_q = 0.343$; $D = 18$ мм - $k_q = 0.257$.

Подобный круглой трубе с $D = 38$ мм характер обтекания наблюдается для прямого и обратного каплеобразного профиля диаметром $D = 38$ мм. Ширина и длина вихревой зоны в ближнем следе примерно соответствует аналогичным величинам для круглого цилиндра. Однако присутствуют и некоторые существенные различия при обтекании труб каплеобразного и круглого профиля. При обтекании со стороны большого диаметра D , наличие удлиненного участка («носика») за миделевым сечением трубы каплеобразного профиля в кормовой части. По мере уменьшения диаметра D от 38 мм до 18 мм вихревая область в корме существенно уменьшается (рис. 6, а-г), что приводит к уменьшению аэродинамического сопротивления при обтекании трубы каплеобразного профиля со стороны большого диаметра (рис. 4).

При обтекании обратного каплеобразного профиля картина в кормовой области мало чем отличается от вихревой кормовой зоны круглой трубы (рис. 6, д-з).

Различия в характере обтекания со стороны большого и малого диаметров трубы каплеобразного профиля наблюдаются на боковых прямых участках удлиненной части (рис. 7, 8).

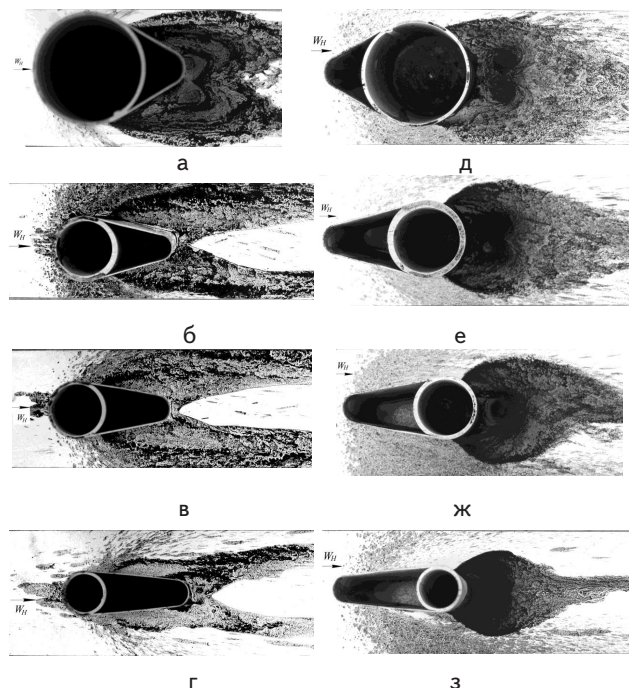


Рис.6 Визуализация течения каплеобразных трубчатых профилей; а), б), в), г) — прямой тип профиля, соответственно $D = 38, 28, 24, 18$ (мм); д), е), ж), з) — обратный тип профиля, соответственно $D = 38, 28, 24, 18$ (мм)

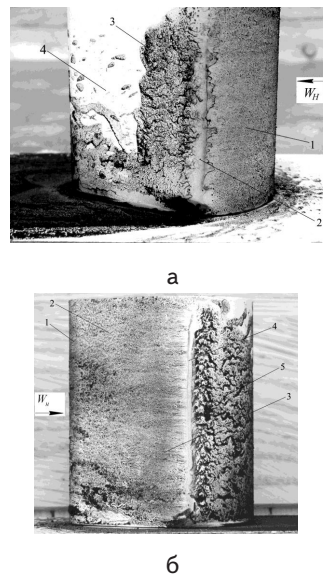


Рис. 7 Визуализация течения на боковой поверхности профилей каплеобразной формы ($D = 38$ мм); а) — прямой профиль: 1 — область ламинарного пограничного слоя; 2 — отрыв; 3 — область присоединения потока; 4 — область течения на боковой стенке. б) — обратный профиль: 1 — область ламинарного пограничного слоя; 2 — область ламинарно-турбулентного перехода на боковой стороне; 3 — область турбулентного пограничного слоя; 4 — отрыв турбулентного пограничного слоя; 5 — область вихревого обтекания кормовой части

При обтекании прямого каплеобразного профиля за областью отрыва происходит падение скорости и возрастание давления на прямых боковых участках удлиненной части (рис. 7, а; рис. 8, а). Используемый метод визуализации по «чувствительности» к потоку рекомендуется применять при скоростях набегающего потока больше 5 м/с. Поскольку вблизи прямых участков скорость потока по видимому меньше 5 м/с, то саже-керосиновая взвесь не может проникнуть вниз по потоку вдоль прямых участков каплеобразных поверхностей, стекает вниз на поверхность пластины на которой установлена труба, оставляя неокрашенными участки боковой поверхности.

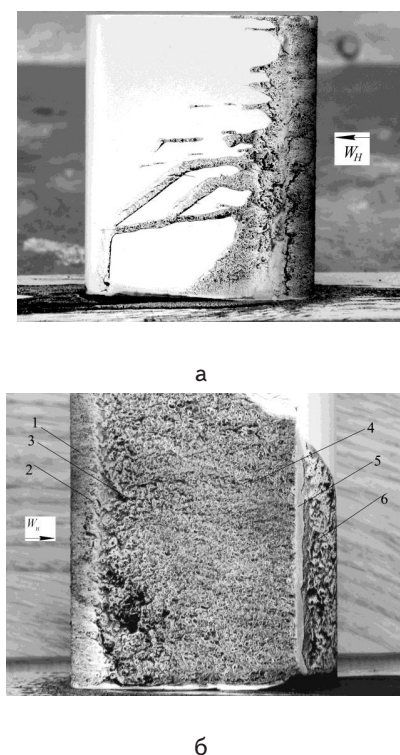


Рис. 8 Визуализация течения на боковой поверхности профилей $D = 18$ мм; а) – прямой; б) – обратный: 1 – область ламинарного пограничного слоя в лобовой части; 2 – первичный отрыв пограничного слоя; 3 – зона присоединения; 4 – область турбулентного пограничного слоя; 5 – вторичный отрыв пограничного слоя; 6 – кормовая вихревая зона

Как отмечалось выше, омывание боковых участков при обтекании труб каплеобразного профиля со стороны большого и малого диаметров существенно отличается (рис. 7,б; рис. 8,б). При обтекании со стороны малого диаметра для профиля $D = 38$ мм (рис. 7,б) не наблюдается первого отрыва ламинарного пограничного слоя. По мере уменьшения большого диаметра профиля D до 18 мм этот отрыв становится более явным (рис. 8, б). Второй отрыв турбулентного пограничного слоя на боковых поверхностях наблюдается в области сопряжения прямых боковых участков и круглого профиля в кормовой части поверхностей независимо от величины диаметра D .

При обтекании труб каплеобразного профиля со стороны малого диаметра присутствие удлиненной части приводит к ускорению потока по мере продвижения его вдоль профиля и соответственно к падению давления. В тоже время необходимо отметить образование широкой отрывной зоны, что сопровождается ростом аэродинамического сопротивления. По этой причине полное сопротивление при обтекании трубы каплеобразного профиля со стороны малого диаметра больше, чем со стороны большого диаметра для случаев $D < 38$ мм (рис. 4).

4. Выводы

1. Показана целесообразность использования труб каплеобразной формы в качестве элементов теплообменных поверхностей.
2. Полученные данные свидетельствуют о существенно более низком аэродинамическом сопротивлении труб каплеобразной формы по сравнению с трубами круглого поперечного сечения.
3. Отмечено более низкое аэродинамическое сопротивление при обтекании трубы каплеобразного профиля со стороны большого диаметра (прямой профиль) по сравнению с обтеканием со стороны малого диаметра (обратный профиль).
4. Данные по визуализации выявили существенное различие в гидродинамике обтекания труб прямого и обратного каплеобразного профиля.
5. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, связанных с оптимизацией геометрических размеров труб данного профиля.

Литература

1. Антуфьев, В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева / В.М. Антуфьев – М. Л.: Энергия, 1966. – 184 с
2. Ala Ali Hasan Thermal-hydraulic performance of oval tubes in a cross-flow of air/Ala Ali Hasan // Heat and Mass Transfer, accepted for publication. THP 2004 by author and THP 2004 Springer-Verlag. By permission./ P. 1-32.
3. Ota T. Forced Convection Heat Transfer from an Elliptic Cylinder of Axis Ratio 1:2 / T. Ota, S. Aiba, T. Tsuruta, M. Kaga // Bulletin of JSME.- 1983.- V. 26.- № 212).- P. 262–267.
4. Ota T. Heat transfer and flow around an elliptic cylinder / T. Ota, H. Nishiyama, Y. Taoka // International Journal of Heat and Mass Transfer.- 1984.- V. 27.- № 10.- P. 1771–1779.
5. Жукаускас, А.А. Конвективный перенос в теплообменниках / А.А. Жукаускас - М.: Наука, 1982. – 472 с.
6. Uzol O. Elliptical Pin Fins as an Alternative to Circular Pin Fins for Gas Turbine Blade Cooling Applications Part 1: Endwall Heat Transfer and Total Pressure Loss Characteristics / Uzol O., Camci C.// Proceedings of ASME Turbo Expo 2001 International Gas Turbine Institute Conference, New Orleans, LA. – 2001, June 4-7. – 13 p.

7. Кузнецов, В.В. Исследование теплообмена в пучках профилированных труб / В.В. Кузнецов, А.В. Якимович // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. - №4/6 (40). – С. 44-47.
8. Nouri-Borujerdi A. Drag of a single non-circular cylinder / A. Nouri-Borujerdi, A. M. Lavasani // The Eighteenth International Symposium on Transport Phenomena, 27-30 August, 2007, Daejeon, KOREA – P.2104-2108.
9. Nouri-Borujerdi A. Experimental study of forced convection heat transfer from a cam shaped tube in cross flows / A. Nouri-Borujerdi, A. M. Lavasani // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – №50. – P. 2605-2611.
10. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод). Изд. 3, под редакцией С.И. Мочана – Л.: Энергия, 1977. – 256 с.
11. Руденко, А.И. Метод визуализации течения газового потока на поверхности тел различной формы / А.И. Руденко, А.М. Терех, А.В. Семеняко, А.П. Нищик, А.В. Баранюк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. - №1/9 (47). – С. 51-55.
12. Патент на корисну модель №54180 Україна, МПК G01P5/00. Спосіб візуалізації течії газового потоку [Текст] / Є.М. Письменний, О.І Руденко, О.П. Ніщик, О.М. Терех, О.В. Семеняко; заявник та володар патенту на корисну модель НТУУ "КПІ" – u201006121; заявл. 20.05.2010; опубл. 25.10.2010. Бюл. №20.
13. Дыбан, Е.П. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизированных потоков [Текст] / Е.П. Дыбан, Э.Я. Эпик – Киев: Наукова думка, 1985. – 296 с.

Abstract

The article is dedicated to the aerodynamic drag and flow visualization on the little-studied complex profiled drop-shaped surfaces. The experiments were held in a wind tunnel of open type of rectangular cross section over the range of Reynolds numbers 9,000 to 45,000. The flow visualization on the surface of the samples studied was carried out by means of injection of black-kerosene suspension in the flow. The findings showed that drop-shaped tubes have significantly lower aerodynamic drag compared to the pipes of circular cross-section. In their turn, the "direct" drop aerodynamic drag at $D < 38$ mm is always lower than the "inverse" drops. The results of the research can serve as a basis for further studies related to the optimization of the geometric dimensions of tube profiles for various heat exchangers of highly heat aerodynamic efficiency.

Keywords: tube, drop-shaped, circular, aerodynamics, drag, flow, visualization