

Виконано оцінку теплогідравлічної ефективності деяких способів інтенсифікації теплообміну при поперечному обтіканні циліндрів. Розглянуто кругові циліндри зі стрибкоподібними змінами радіуса, виступами, асиметричними лунками, еліптичний циліндр, а також круговий циліндр зі спіральним оребрением. Показано переваги формування поверхні циліндрів асиметричними лунками

Ключові слова: теплообмін, гідравлічний опір, інтенсифікація теплообміну, циліндричні поверхні, теплогідравлічна ефективність

Проведена оценка теплогидравлической эффективности некоторых способов интенсификации теплообмена при поперечном обтекании цилиндров. Рассмотрены круговые цилиндры со скачкообразным изменением радиуса, выступами, асимметричными лунками, эллиптический цилиндр, а также круговой цилиндр со спиральным оребрением. Показано преимущество формирования поверхности цилиндров асимметричными лунками

Ключевые слова: теплообмен, гидравлическое сопротивление, интенсификация теплообмена, цилиндрические поверхности, теплогидравлическая эффективность

УДК 536.24:541.11

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Г. В. Коваленко

Старший научный сотрудник*
e-mail: kovalenko@vortex.org.ua

А. Ж. Мейрис

Инженер второй категории*
e-mail: ameyris@gmail.com*Институт технической теплофизики
НАН Украины

ул. Желябова, 2а, г. Киев, Украина, 03057

1. Введение

Исследования, затрагиваемые в статье, относятся к области теплотехники, в частности, к интенсификации теплообмена.

Энергоемкость продукции украинской промышленности значительно превышает соответствующие показатели европейских производителей, что ставит под вопрос ее конкурентоспособность [1]. Одним из путей уменьшения энергопотребления является утилизация теплоты, неразрывно связанная с созданием эффективных теплообменников.

Результаты длительной эксплуатации теплообменного оборудования, в частности, в газотурбинных установках показывают, что пластинчатые теплообменники оказались менее надежными и менее ремонтопригодными, чем трубчатые [2]. Проектирование эффективного трубчатого теплообменника представляет собой многофакторную инженерную задачу. Несмотря на значительную базу уже опубликованных данных, закон роста от времени количества одних только патентов в указанной области близок к степенной зависимости.

2. Постановка проблемы

Поперечно обтекаемые цилиндры, как и сферы, относятся к семейству «плохообтекаемых» тел, на поверхности которых образуются зоны отрыва потока. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление их связаны с состоянием пограничного слоя. Известны опыты Визельсберга по турбулизации пограничного слоя на поверхности сферы с помощью проволоочного

кольца, при которой сопротивление потоку значительно уменьшалось [3].

Формирование поверхности цилиндров выступами или неглубокими впадинами интенсифицирует теплообмен и приводит к ряду интересных особенностей обтекания [4], [5], [6].

Известно, что в зависимости от числа Рейнольдса имеется несколько режимов обтекания гладкого цилиндра [4]. Теплогидравлическая эффективность круговых цилиндров, зависящая от числа Рейнольдса, характеризуется местными максимумами в областях наступления критического обтекания, зависящих от относительных высот выступов и глубин лунок [7].

Нетривиальной является проблема компоновки труб теплообменника в пучок. Стремление улучшить массогабаритные показатели теплообменника за счет уменьшения зазоров между трубами в пучке может привести не только к ламинаризации потока газа, но и к «выключению» части поверхности труб из процесса теплообмена [8]. В так называемых «суперплотных» пучках (относительный диагональный шаг меньше 1,15) теплоотдача на 15% ниже, чем по расчету [9]. В связи с указанным выше возникает вопрос о том, на какое увеличение гидравлического сопротивления можно пойти для достижения желаемого роста теплообмена.

3. Результаты исследования и их анализ

В [10] предложен способ оценки теплогидравлических характеристиках интенсификаторов теплообмена, использующий представление опытных данных в системе координат $[Nu/Nu_0] / [f/f_0] - f/f_0$, где Nu и f

– это число Нуссельта и коэффициент сопротивления для случая с интенсификаторами, а те же параметры с индексом «0» относятся к варианту похожей поверхности теплообмена без интенсификаторов.

На рис. 1 на фоне предложенных в [10] предельных кривых (1 и 2) представлены результаты сравнения нескольких вариантов цилиндрических теплообменных поверхностей с их гладкотрубными аналогами. Вместо коэффициента сопротивления f используется число Эйлера ($Eu = \Delta p / (\rho \times w^2)$). Группы точек, соответствующие экспериментам, проведенным в достаточно широком диапазоне режимных параметров, демонстрируют зависимость теплогидравлической эффективности от числа Рейнольдса. Точки, соответствующие большим скоростям обтекания, располагаются над меньшими значениями отношения Eu/Eu_0 . Это объясняется тем, что при увеличении скорости потока коэффициент сопротивления цилиндра после длительного участка слабого уменьшения вдруг резко снижается (наступление режима критического обтекания), в то время, как коэффициент теплоотдачи монотонно растет [3]. Подобные явления характерны не только для цилиндров с различной степенью шероховатости (3 – $k/D=0.005$, 4 – $k/D=0.02$), но и для цилиндров с лунками (5 – $k/D=-0.024$ [5]), которые по гидравлическим характеристикам напоминают цилиндры с выступами только в узком диапазоне относительных высот [3]. (Асимметричные лунки диаметром $d=2.2$ мм наносились на цилиндры диаметром $D=25$ мм [5]) Расстояние групп экспериментальных точек объясняется тем, что интенсификаторы большего размера турбулизируют пограничный слой при меньших скоростях. Эффективность применения пучков труб со ступенчатым изменением диаметра сравнима с эффективностью труб с мелкой шероховатостью, хотя природа интенсификации, по-видимому, состоит в удачном использовании трехмерности образующихся за цилиндром вихрей. (Исследовались поперечно обтекаемые пучки, состоящие из труб с поверхностью в виде чередующихся вдоль оси цилиндрических участков длиной $l=15$ мм с наружными диаметрами $D_1=27$ мм и $D_2=19.6$ мм [11])

Как и следовало ожидать, малым относительным сопротивлением обладают эллиптические цилиндры с обтеканием в направлении большой оси сечения ($D_1=58.3$ мм и $D_2=30.3$ мм, позиция 9 на рис. 1 [4]). Однако, вытянутая вдоль потока форма в какой-то степени гасит вихри, возникающие поочередно с разных сторон цилиндра, чем уменьшает теплоотдачу.

Наибольшим относительным гидравлическим сопротивлением из рассмотренных вариантов теплообменных поверхностей обладают пучки труб со спиральным оребрением 10 из [12]. Поперечный относительный шаг такого пучка – $S_1/D=3$, а продольный – $S_2/D=1.2$, диаметр трубы $D=23$ мм, шаг и высота ребра $t=5$ мм, $h_p=10$ мм.

Энергетическая эффективность различных вариантов теплообменных поверхностей оценивается целым рядом комплексных характеристик, тепловых массовых, объемных, в частности, количеством теплоты, приходящимся на единицу мощности, затрачиваемой на прокачивание теплоносителя при единичном температурном напоре. Само изобилие встречающихся критериев говорит о многофакторности процесса выбора предпочтительного теплообменника. Так, при

проектировании регенератора ГТУ термодинамически целесообразно ставить более жесткие требования к минимизации перепада давления по газовой стороне. На рис. 1 линии 6 и 7 соответствуют числам Рейнольдса $Re=1000$ и $Re=6000$ в гладкотрубном пучке, которые традиционно используются. В этом узком диапазоне преимущества цилиндров с асимметричными лунками над гладкими круговыми цилиндрами составляют всего 17%.

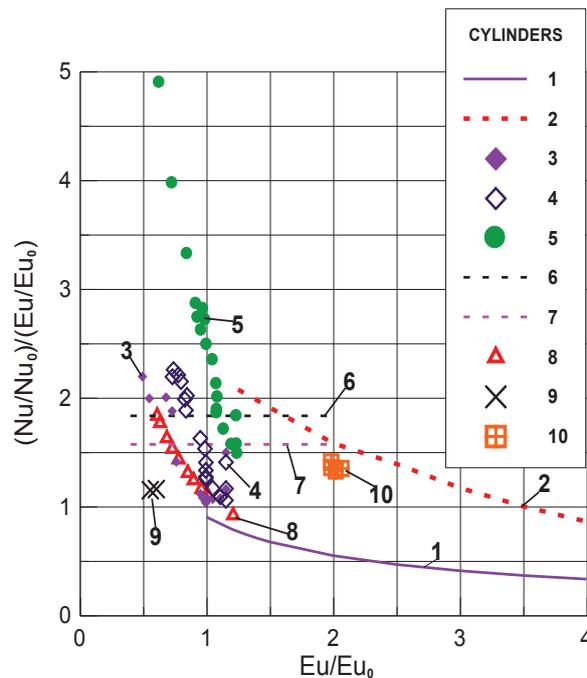


Рис. 1. Теплогидравлическая эффективность интенсификаторов на цилиндрических теплообменных поверхностях: 1 – плоская оребренная поверхность при больших числах Рейнольдса [10]; 2 – плоская поверхность с углублениями в виде сферических сегментов при малых числах Рейнольдса [10]; 3 – цилиндр с относительной шероховатостью поверхности $k/D=0.005$ [3]; 4 – цилиндр с относительной шероховатостью поверхности $k/D=0.02$ [3]; 5 – цилиндр с асимметричными лунками с относительной глубиной $k/D=-0.024$ [5]; 6 – цилиндры с лунками при $Re=6000$ [5]; 7 – цилиндры с лунками при $Re=1000$ [5]; 8 – пучок труб с чередующимися по длине одинаковыми цилиндрическими участками с различными диаметрами [11]; 9 – эллиптический цилиндр [4]; 10 – пучок труб со спиральными ребрами [12]

4. Выводы

Применение различных интенсификаторов теплообмена на цилиндрических поверхностях приводит к относительному изменению гидравлического сопротивления в диапазоне от 0.5 до 2. При этом прогнозируется изменение теплогидравлической эффективности в пределах от 1 до 5. Среди рассмотренных трубчатых теплообменных поверхностей наилучшими теплогидравлическими характеристиками обладают цилиндры, формированные асимметричными лунками.

Литература

1. Шевченко, В. І. Енергетика України: який шлях обрати, щоб вижити? [Текст]/ В. І. Шевченко, Л. З. Півень// Київ.– Видавничий центр «Просвіта». - 1999. - 186 с.
2. Спицын, В. Е. Высокоэффективная газотурбинная установка для ГПА [Текст]/В. Е. Спицын, А. Л. Боцула, В. Н. Чобенко, Д. Н. Соломонок// Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ ХПИ. – 2008. - № 35, - 8-11 с.
3. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст]/ Г. Шлихтинг// Издательство «Наука». - Москва.-1969.-742 с.
4. Жукаускас, А. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости/ А. Жукаускас, И. Жюгжда//Вильнюс: «Мокслас».- 1979. – 240 с.
5. Коваленко, Г. В. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление трубчатых поверхностей с цилиндрическими лунками при поперечном обтекании в однорядных пучках [Текст]/ Г. В. Коваленко// Промышленная теплотехника – 1998. –Т. 20, №3. - С. 65-70.
6. Kovalenko, G. V.Fluid Flow and Heat Transfer Features at a Cross-Flow of Dimpled Tubes in a Confined Space [Текст]/ G. V. Kovalenko, A. A. Khalatov// GT2002-38155 Proceeding of ASME Turbo Expo 2003 June 16-19 2003, 2003, Atlanta, Georgia, USA.
7. Халатов, А. А., Коваленко Г. В. Теплогидравлическая эффективность круговых цилиндров с выступами и углублениями при поперечном обтекании [Текст] / А. А. Халатов, Г. В. Коваленко// Промышленная теплотехника. - Т. 30 . № 1. - 2008. - 10 - 15 С.
8. Fage, A. The Effects of Turbulence and Surface Roughness on the Drag of Circular Cylinders [Текст]/ A. Fage, J. H. Warsap// ARC RM1283.- 1930.– 36- 47 P.
9. Bearman, P. W. Control of Circular Cylinder Flow by the Use of Dimples [Текст]/ P. W. Bearman, J. K. Harvey//AIAA JOURNAL. - Vol. 31, No. 10. - 1993.- 1753-1756 Pp. .
10. Халатов, А.А. Аналогия переноса теплоты и количества движения в каналах с поверхностными генераторами вихрей [Текст]/ А.А. Халатов, В.Н. Онищенко, И. И. Борисов//Киев: Доклады НАН Украины. – 2007. – № 6. – С. 70 – 75.
11. Анисин, А. А. Повышение энергетической эффективности пучков гладких труб и профилированных каналов для газожидкостных теплообменных аппаратов энергетических установок. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д. т. н. Санкт-Петербург. - 2009. – 42 с.
12. Юдин, В. Ф. Теплообмен поперечно-оребранных труб [Текст]/ В. Ф. Юдин//Ленинград: «Машиностроение». – 1982.– 189 с.

Представлено конструкцію редуктора для випробувань ГТД з різними частотами обертання без зміни передаточного відношення та зі зміною частоти обертання до обертань навантажувального пристрою. Оригінальність конструкції редуктору полягає в присутності механізмів переключення, які дозволяють змінювати напрямки потоків потужності відносно від типу випробувального ГТД

Ключові слова: редуктор, зубчасті колеса, механізм переключення, торсіонні вали

Представлена конструкция редуктора для испытаний ГТД с различными частотами вращения без изменения передаточного отношения и с изменением частоты вращения до оборотов загрузочного устройства. Оригинальность конструкции редуктора состоит в наличии механизмов переключения, позволяющих изменять направления потоков мощности в зависимости от типа испытываемого ГТД

Ключевые слова: редуктор, зубчатые колеса, механизм переключения, торсионные вали

УДК 621.833

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНДОВЫЙ РЕДУКТОР ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МОЩНОСТЬЮ 16-35 МВт

А. И. Мироненко
Начальник отдела редукторов*

Е. А. Гамза
Ведущий инженер-конструктор – руководитель группы*

Д. В. Матвеевский
Ведущий инженер-конструктор – руководитель группы*

С. А. Дзятко
Ведущий инженер-конструктор – руководитель группы

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

*Государственное предприятие Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект» пр. Октябрьский, 42а, г. Николаев, Украина, 54018