

Член-корреспондент АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ИСКУССТВЕННОЙ ТУРБУЛИЗАЦИЕЙ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Как мы установили ранее (1), теплообмен в условиях так называемой „внешней задачи“ по существу своему более эффективен, чем теплообмен в условиях „внутренней задачи“ — канала. Общий принцип интенсификации конвективного переноса тепла и вещества, развитый в наших работах, требует для рациональной интенсификации этих гетерогенных процессов искусственной турбулизации режима течения в пограничном слое. При этом чем раньше, т. е. чем при меньших значениях Re достигается устойчивый режим, тем эффективнее теплообмен и тем больше возможности его практической интенсификации. Поскольку величина $Te_{кр}$, должна быть неизменна, очевидно, что снижение $Re_{кр}$, т. е. значения Re , при котором наступает устойчивый турбулентный режим, возможно за счет изменения безразмерного комплекса $w_1 \delta_n / \nu_n^*$.

Прежде всего, конечно, важно установить, возможно ли вообще практически изменить это число, равное в обычных условиях ~ 110 .

$$K = \frac{w_1 \delta_n}{\nu_n} = (10,45)^2 \cong 110. \quad (1)$$

Вопрос, в конечном счете, сводится к тому, возможно ли искусственно добиться устойчивой турбулизации пограничного слоя. Не будет ли всякое искусственное возмущение „случайным“, не приводящим к уравнению $\zeta_t^* = a Te^{-1/4}$, начиная с значений, при которых произведено возмущение.

Для разрешения поставленного вопроса обратимся непосредственно к опыту. Наибольший экспериментальный материал по теплообмену при „внешней задаче“ относится к теплообмену газа с поперечно обтекаемым цилиндром.

Теоретическое уравнение теплообмена для этого случая (1) имеет при нормальных условиях следующий вид для $Re > 10\,000$:

$$Nu \cong 0,36 Re^{0,5} + 0,007 Re^{0,82}. \quad (2)$$

* $Te = \frac{\bar{w} (a - \delta_n)}{\nu} : \frac{w_1 \delta_n}{\nu_n}$; \bar{w} — средняя скорость; a — характеристический размер; δ_n — толщина псевдоламинарного слоя; ν и ν_n — соответственно, кинематическая вязкость в ядре потока и в псевдоламинарном пограничном слое; w_1 — скорость газа на границе псевдоламинарного пограничного слоя; $K = w_1 \delta_n / \nu_n$; ζ^* — местное значение коэффициента сопротивления; $Nu = ad/\lambda$; a — коэффициент теплообмена; d — диаметр канала или эквивалентный диаметр; $Re = \bar{w}d/\nu$; a_0, a_T, a_d — коэффициенты.

Первый член правой части уравнения (2) характеризует теплообмен в лобовой части цилиндра, а второй член — теплообмен в корме цилиндра. Для значений $Re < 5000$ правый член (для теплообмена в корме) имеет степень при Re 0,5, так как режим в корме при этом, так же как и в лобовой части, — ламинарный. В этом случае

$$Nu \cong 0,36 Re^{0,5} + 0,14 Re^{0,5} = 0,5 Re^{0,5}. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) следует, что в этих условиях устойчивая турбулентность режима в кормовой части цилиндра наступает при $Re \cong 10\,000$. Повышение турбулентности набегающего потока для режима вплоть до $Re \cong 100\,000$ совершенно не влияет на пограничный слой в лобовой части цилиндра, однако изменяет условия теплообмена в корме, так как взаимодействие набегающего потока с вихревой областью в корме цилиндра весьма значительное. Опыт показывает, что теплообмен газа с цилиндром интенсифицируется при повышении турбулентности набегающего потока.

При влиянии турбулентности набегающего потока на образование турбулентного пограничного слоя в корме цилиндра уравнение теплообмена будет иметь следующий вид:

$$Nu = 0,36 Re^{0,5} + a_T Re^{0,82}. \quad (4)$$

При повышении степени турбулентности набегающего потока, если она уменьшает величину K в уравнении (1), коэффициент a_T в уравнении (4) будет расти, коэффициент же при члене с $Re^{0,5}$ будет оставаться неизменным.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные (2), полученные при теплообмене газа с цилиндром при различной интенсивности турбулентности набегающего потока. Как видно из рис. 1, экспериментальные данные хорошо описываются кривыми, построенными по уравнению (4). При этом образование устойчивого турбулентного режима в пограничном слое в корме смещается при сильной турбулентности набегающего потока до $Re \cong 70 - 100$ вместо 10 000 при нормальной турбулентности набегающего потока.

Таким образом, опыт полностью подтверждает возможность получения искусственным путем устойчивого турбулентного пограничного слоя при $Re < Re_{кр}$ в нормальных условиях. Величина K при этом должна сильно уменьшаться.

Другой способ искусственной турбуликации пограничного слоя уже в лобовой части обтекаемого тела был в свое время отмечен Прандтлем при обтекании шара — это так называемое кольцо Прандтля.

Для цилиндра аналогичный прием был применен А. А. Гухманом (3). Турбулизация достигалась здесь постановкой на лобовой части цилиндра планок, за которыми пограничный слой турбулизировался вследствие отрыва течения за планкой.

В этом случае уравнение (2) должно иметь следующий вид:

$$Nu \cong a_n Re^{0,5} + b Re^{0,82}. \quad (5)$$

Величина a_n в уравнении (5) имеет совершенно определенную величину, определяемую углом постановки планок.

На рис. 1 приведена кривая, построенная по уравнению (5) для опытов А. А. Гухмана с углом постановки планок $\sim 35^\circ$. Кривая (4) удовлетворительно описывает опытный материал. Эти опытные данные вполне однозначно подтверждают возможность уменьшения величины K и тем самым возможность резкого сдвига начала устойчивого турбулентного режима в область более низких значений Re и для лобовой части обтекаемого тела.

Второй, менее изученной „внешней задачей“ теплообмена является теплообмен газа с шаром. Турбулизация набегающего потока, как и следовало ожидать, в меньшей степени интенсифицирует теплообмен газа с шаром, так как роль теплообмена кормы шара невелика и, кроме того, даже в нормальных условиях, турбулизация пограничного слоя в корме шара наступает при сравнительно небольших значениях $Re \approx 1000$.

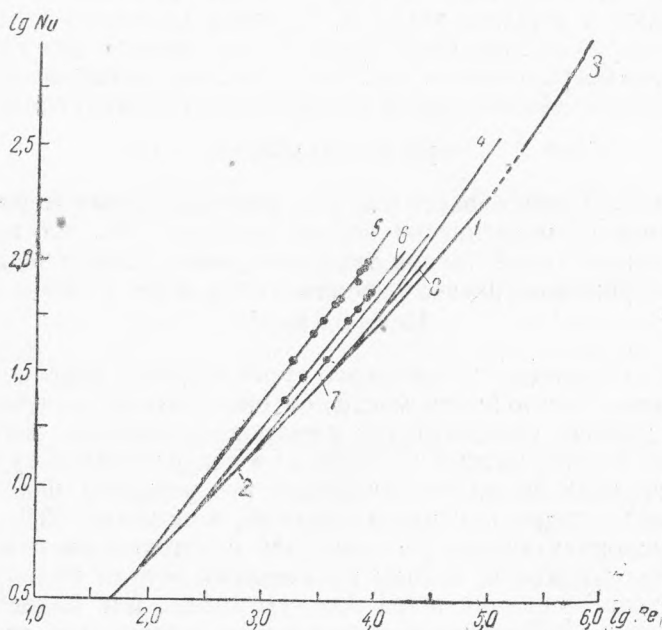


Рис. 1. Теплообмен поперечно обтекаемого цилиндра с газовым потоком при изменении турбулентности набегающего потока и при применении искусственной турбулизации пограничного слоя постановкой специальных планок

№ кривых	Автор опытов	Набегающий поток	Уравнение
1	Гильперт, Эйгенсон ⁽²⁾	Нормальн. турбулентный набегающий поток	$Nu = 0,36 Re^{0,5} + 0,007 Re^{0,82}$
2	Гильперт	То же	$Nu = 0,50 Re^{0,5}$
3	Гильперт	То же	$Nu = 0,015 Re^{0,82}$
4	Гухман ⁽³⁾	То же (опыты с планками)	$Nu = 0,15 Re^{0,5} + 0,022 Re^{0,82}$
5	Эйгенсон ⁽²⁾	Сильно турбулизов. поток	$Nu = 0,36 Re^{0,5} + 0,039 Re^{0,82}$
6	Эйгенсон ⁽²⁾	Турбулизов. поток	$Nu = 0,36 Re^{0,5} + 0,023 Re^{0,82}$
7	Рейер	» »	$Nu = 0,36 Re^{0,5} + 0,016 Re^{0,82}$
8	Hughes	Слабо турбулизов. поток	$Nu = 0,36 Re^{0,5} + 0,01 Re^{0,82}$

Искусственная турбулизация пограничного слоя в лобовой части шара может быть осуществлена „кольцом Праудтля“, но, к сожалению, исследования по теплообмену шара с турбулизирующим кольцом нам неизвестны. Уравнение теплообмена для шара, как мы показали, аналогично уравнению для цилиндра, поэтому структура уравнения и для случая с искусственной турбулизацией части поверхностного слоя шара будет аналогична уравнению (5).

Несомненно, весьма благоприятные условия для искусственной турбулизации пограничного слоя при обтекании шара образуются при

сближении нескольких шаров и создании из них слоя, в котором отдельные шары соприкасаются между собой, а газовый поток пронизывает слой. Совершенно очевидно, что в слое мы имеем дело с достаточно характерной „внешней задачей“, так как при обтекании шаров в слое образуется пограничный слой, не совпадающий по размерам с расстоянием между шарами. В силу наличия резких сужений и поворотов потока в слое, а также в силу наличия точек касания между шарами и отрывов течения, условия движения газа и жидкости в слое шаров весьма благоприятны для раннего (по Re) развития турбулентного пограничного слоя. Эмпирическое уравнение теплообмена для слоя шаров, по данным наших исследований⁽⁴⁾, имеет следующий вид:

$$Nu \cong 0,24 Re^{0,83} \quad (6)$$

Уравнение (6) показывает, что для данного случая первый правый член уравнения (5) практически весьма невелик, т. е., что практически весь пограничный слой шаров турбулизирован. Если учесть, что для ламинарного режима уравнение теплообмена шара с газом имеет вид:

$$Nu \cong 0,6 Re^{0,5}, \quad (7)$$

то ясно, что появление устойчивого турбулентного пограничного слоя в этом случае должно иметь место при очень малых значениях Re , что достаточно хорошо соответствует и гидродинамическим наблюдениям.

Не менее благоприятные условия для искусственной турбулизации пограничного слоя должны создаваться и в условиях падения „трехмерного тела“ — шара или частиц другой, неправильной*, формы.

В этих условиях задача не совпадает с обтеканием неподвижного шара потоком жидкости, в силу практически всегда имеющего место одновременного вращения шара при его полете или падении. Вращение шара должно создавать благоприятные условия для весьма быстрой (по Re) турбулизации пограничного слоя.

Таким образом, мы на нескольких примерах показали, что разработанный нами общий принцип интенсификации гетерогенных процессов типа теплообмена практически осуществим различными методами. Следует, конечно, указать, что методы искусственной турбулизации пограничного слоя для создания высокоинтенсивных и эффективных теплообменников могут быть весьма разнообразны, как то: вибрация, звуковые и другие колебания, гидродинамический режим, форма поверхности нагрева и т. д. Естественно, конечно, что эффективность теплообмена будет тем больше, чем меньше будут потери напора газового потока на посторонние, не связанные с турбулизацией пограничного слоя явления и процессы. Сам процесс турбулизации связан с незначительной диссипацией энергии и поэтому, при удачном решении задачи, теплообмен в теплообменнике с искусственно турбулизированным пограничным слоем, или, как мы его условно называем, „высокоскоростной теплообмен“**, может быть исключительно эффективен.

Поступило
27 IV 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ З. Ф. Чуханов, ДАН, 43, № 7 (1944); 48, № 2 (1945); 52, № 8 (1946); 53, № 3 (1946); 53, № 9 (1946); 55, № 6 (1947); 56, № 3 (1947). ² Л. С. Эйгенсон, Материалы к совещанию по моделированию тепловых устройств, Изд. АН СССР, 1938. ³ А. А. Гухман, Физические основы теплопередачи, 1934. ⁴ З. Ф. Чуханов, Е. А. Шапатина, Изв. АН СССР, ОТН, № 7, 8 (1945); там же, № 4 (1946).

* В условиях, когда падение или полет твердых частиц сопровождается их вращением вокруг оси, не совпадающей с направлением потока.

** Теплообмен, при котором увеличение скорости газового потока дает максимальный эффект повышения интенсивности теплообмена.