

А.Ф. Рыжков, Л. Жаргалхуу, Надир Саман М., А.Д. Махаев

Уральский государственный технический университет (политехнический институт), Екатеринбург, Россия

ОЦЕНКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАВИХРИТЕЛЕЙ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

АННОТАЦИЯ

Проведено обобщение опытных данных для оценки теплогидравлической эффективности различных типов завихрителей конвективного теплообмена в трубах. Обобщение позволило установить оптимальную область чисел Рейнольдса и оптимальные геометрические размеры.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные энергетические программы предусматривают проведение активной энергосберегающей политики во всех отраслях путем исследования, совершенствования и внедрения энергосберегающего оборудования, повышения эффективности и надежности его работы.

Разработка любого теплообменного агрегата ТОА предполагает определенную энергонапряженность протекающих в нем процессов при соблюдении технологических, экологических и прочих норм и требований и сводится, в конечном итоге, к поиску своего для данной эпохи и отрасли компромисса между капитальными и эксплуатационным затратами. Так для установок транспортной энергетики оправданно применение разного уровня форсированных режимов при слабом развитии когенерации. В стационарной энергетике предпочтение чаще отдают нефорсированным когенерационным режимам.

Известно, что относительно низкая термодинамическая эффективность работы энергооборудования связана с достигнутым уровнем предельных температур в цикле, что во многом зависит от теплообмена с элементами ограждающих конструкций и вынуждает разрабатывать способы его интенсификации. В одних случаях это производится с целью повышения коэффициента использования топлива в действующем оборудовании (организация глубокого охлаждения дымовых газов, утилизация тепловых выбросов за тепловыми двигателями, повышение эффективности работы теплообменного оборудования в нерасчетных режимах). В других – планируется снижение материалоемкости и капиталоемкости изделий (разработка нового теплообменного и котельного оборудования). В третьих – позволяет вывести процесс получения электрической энергии на качественно новый уровень (создание принципиально новых систем

охлаждения лопаток газовых турбин, ТВЭЛ ядерных реакторов, газозоудного нагревателя для твердотопливной ПГУ с разомкнутым циклом, решение проблемы теплообмена в матрице высокотемпературного топливного элемента). Объединяющим здесь является широкое использование новых для современной энергетики теплогидродинамических режимов, характеризуемых пониженными числами Рейнольдса ($Re < 10^4$), неразвитой турбулентностью и ламинарного режимов и низкими коэффициентами теплообмена.

Особое значение эти положения имеют при проектировании и реконструкции ТЭС, объектов промышленной энергетики, систем теплоснабжения в новых условиях, в связи с повсеместным изменением режимов работы энергетической отрасли (переход на маневренные и недогруженные режимы) и ее реструктуризацией (с созданием распределенных систем, бурным развитием сектора малой энергетики, переходом энергоустановок малой энергетики на когенерационные режимы).

Для действующего оборудования это означает переход на нерасчетные режимы работы, пережог поверхностей теплообмена, снижение тепловой эффективности (КПД) ТОА. При модернизации оборудования, либо при создании новых агрегатов необходима разработка способов интенсификации процессов теплопереноса в ненапряженных (в целом) теплогидродинамических режимах.

На теплоснабжающих предприятиях с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии для покрытия сезонных и технологических колебаний тепловой нагрузки требуется поддержание высокой эффективности работы оборудования во всех режимах эксплуатации. На стационарных установках малой энергетики (новый, в мировой практике, динамично развивающийся вид промышленных коммунально-бытовых энергогенерирующих объектов системы распределенной энергетики) при параллельной работе с сетью предпочтение отдается оптимальным нефорсированным базовым режимам с предельно-развитой когенерацией и максимально-возможным коэффициентом использования установленной мощности. Для объектов базовой энергетики характерно стремление к достижению предельной эффективности выработки электрической энергии путем повышения термодинамической эффективности цикла (применение

комбинированных и гибридных циклов, суперсверхвысоких параметров).

Выбранный для исследования объект – газодляной теплообменник с короткими широкими гладкими трубами является типичным представителем ТООА, нуждающихся в интенсификации теплообмена и оптимизации конструкции при сохранении низконапорного режима работы. Область прямого применения – теплообменное оборудование малой энергетики, газодляные теплогенераторы, котлы-утилизаторы энергоустановок газопоршневых, дизель-электростанций, микро-ГТУ, водогрейные котлы малой и средней мощности на местном топливе.

2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

Работа ТООА в области перехода от ламинарного режима движения к турбулентному и неразвитой турбулентности означает, что процессы теплообмена в них формально не подчиняются теплогидравлической аналогии Рейнольдса, используемой обычно при расчете теплообменных аппаратов [1]. Напомним, что, будучи некоей идеализацией, аналогия Рейнольдса, построенная на подобии скоростных и температурных полей, в ее простейшем виде реализуется безградиентных течений $Pr=1$ и в отсутствии внутренних источников теплоты. В трубах и каналах ТООА, где течение всегда практически напорное, подобие скоростей и температур может быть только приближенным, да еще при выполнении ряда ограничений.

В реальности же существуют механизмы, приводящие к нарушению этих условий и требующие отдельного рассмотрения в каждом частном случае. К наиболее известным случаям отклонения от требований аналогии относятся [1]: отличие числа Прандтля от единицы; переменность теплофизических свойств; зависимость теплообмена от вида теплоносителя; вдув и отсос вещества на поверхности; наличие объемных источников и стоков вещества и энергии в потоке (вследствие сжатия, трения, протекания химических реакций); неизотермичность граничных условий; появление отрывных течений и закрученных потоков; ламинарные и переходные режимы.

Успешному решению большинства этих проблем посвящены многочисленные исследования по конвективному теплообмену, в которых теоретические построения аппроксимируют, как правило, критериальными зависимостями в форме (модифицированной) аналогии Рейнольдса. Такой же подход используется при выявлении эффективности мероприятий по интенсификации процессов теплообмена в ТООА.

Разработано много методов оценки эффективности ТООА. Из них наиболее обоснованным, лаконичным и признанным в новейшей литературе является метод

энергетических коэффициентов академика М.В. Кирпичева с относительным универсальным критерием эффективности [2]:

$$\bar{E}' = E' / E'_{2l}. \quad (1)$$

Используя критериальные уравнения подобия, выражение (1) переписывают в «рабочем» виде, удобном для сопоставления эмпирического материала:

$$\bar{E}' = \frac{Nu / Nu_{2l}}{\xi / \xi_{2l}}. \quad (2)$$

Выявление возможностей конкретного интенсификатора предлагается [2] проводить путем нахождения максимального значения \bar{E}'_{max} при каждом конкретном числе Re . Например, для поперечных выступов при фиксированном числе Re и ряде постоянных высот (h/D) диафрагм при всех возможных размерах шагов (s/h) находят массив коэффициентов \bar{E}' . Из этого множества выбирается коэффициент $\bar{E}'_{max}(Re)$ с параметрами выступов ($h/D, t/h$), оптимальными для заданного числа Re . Построение кривой для всех чисел Рейнольдса $\bar{E}'_{max}(Re)$, дает представление о предельной эффективности интенсификатора. Сравнение предельных режимных характеристик для разных типов интенсификаторов позволяет выполнить обоснованный выбор конструкции в заданном диапазоне чисел Рейнольдса.

На основании такой методики авторы [2] провели большую работу по выявлению предельных гидродинамических режимов для разных типов интенсификаторов и подвели своего рода промежуточный итог по проблеме создания эффективных интенсификаторов теплообмена в каналах энергоустановок, отмечая, в частности, недостаточность информации в области ламинарно-турбулентного перехода в интенсифицированных каналах и указывая на актуальность изучения процессов в этой области.

Результаты расчетов в близком к авторскому [2] представлении с нашими дополнениями, приведены на рисунке. Обращают на себя внимание квазирезонансный характер полей всех трех параметров с максимумом в области перехода, наличие двух качественно различных по эффективности режимов ($\bar{E}' > 1$ и $\bar{E}' < 1$) и плотное заполнение нашими данными относительно свободного промежутка в области $Re=(2-6) \cdot 10^3$.

Возвращаясь к анализу эффективности теплогидравлических режимов каналов с интенсификаторами теплообмена, отметим, что по величине \bar{E}' можно судить об эффективности режима.

2.1. Первая группа – условно малоэффективные режимы ($\bar{E}' < 1$)

Наиболее распространенная и до середины XX века единственно известная. Обладая часто высокой тепловой эффективностью ($Nu / Nu_{2l} > 1$),

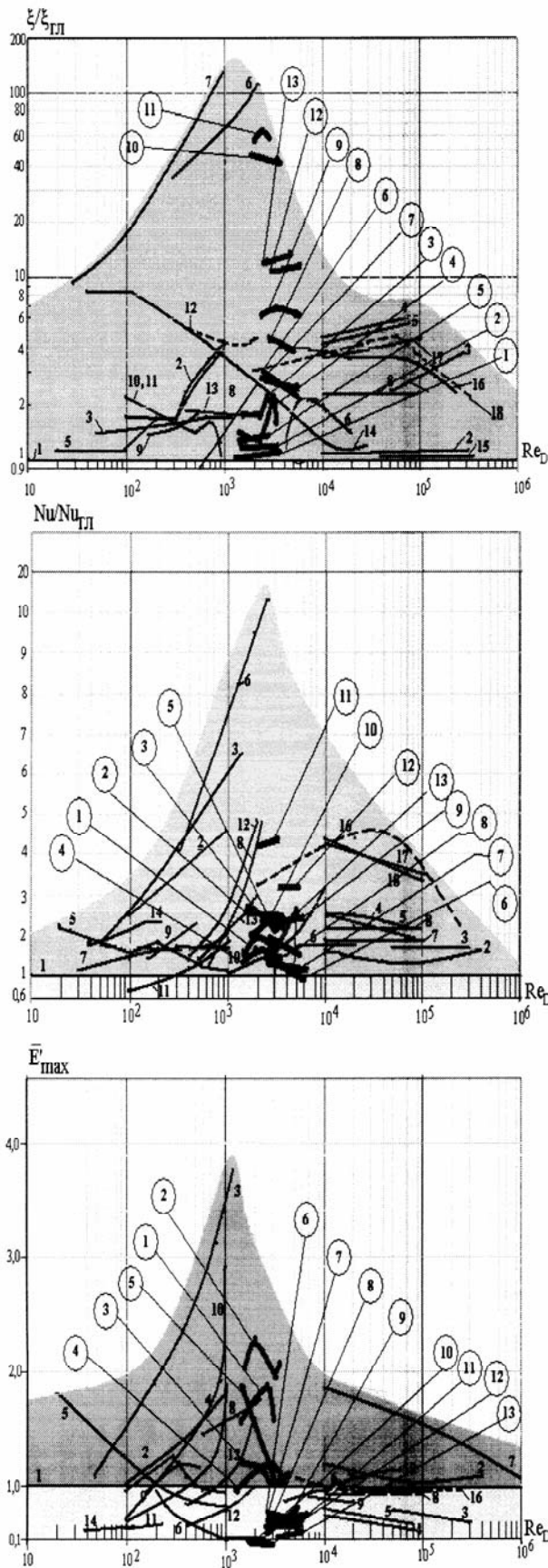


Рисунок. Эффективность действия интенсификаторов в трубах: цифры у кривых – нумерация по [2]; цифры в кружках – данные авторов в соответствии с таблицей 1; 16 – предельные расчетные данные по [4]; 17, 18 – расчетные данные по [3,4].

устройства этой группы характеризуются низкой теплогидродинамической эффективностью ($\xi/\xi_{гп} \gg 1$) и находят обычно специфическое применение там, где теплогидродинамические процессы носят подчиненный характер. Ярким примером таких специфических теплообменников являются вихревые и циклонные аппараты (предтопки), величина Nu в которых за счет закрутки увеличивается в 25-30 раз, а гидросопротивление – на 2 порядка. Существуют системы и с менее ярко выраженным преобладанием гидравлических потерь. Так при создании на внутренней поверхности трубы сплошной песочной шероховатости (опыт Никурадзе) величина \bar{E}' оказывается лишь на 15-20% меньше единицы. Как отметил Кутателадзе, нарушение подобия граничных условий в уравнениях движения и теплообмена в сторону сил трения уменьшает эффективность поверхности с песочной шероховатостью при $Re=10^4-10^5$ даже при $Pr=1$ и $gradP=0$ до $\bar{E}' \approx 0.86$ при $Nu/Nu_{гп} = 1.57$. Нарушение подобия граничных условий в рассматриваемой задаче Шлихтинг объясняет тем, что часть турбулентных касательных сил передается на стенку не через вязкий подслоя, а непосредственно через силы давления на выступы шероховатости, тогда как при теплообмене аналогичного явления происходить не может. В [4,6,10,11] можно найти многочисленные примеры и существенно меньшей теплогидравлической эффективности ($\bar{E}' \ll 1$) интенсифицированных поверхностей ($Nu/Nu_{гп} > 1$) по сравнению с гладкими поверхностями (рисунок).

2.2. Вторая группа – эффективные теплогидродинамические режимы

Режимы с опережающим ростом теплообмена по сравнению с увеличением гидравлических потерь ($\bar{E}' > 1$). В ряде случаев представляет наибольший практический интерес, позволяя провести энергоэффективную оптимизацию конструкции. Такие режимы наиболее значительно проявляются в переходной области ($\bar{E}' \approx 2.5-3$), сходя на нет ($\bar{E}' \rightarrow 1$) в области развитой турбулентности ($Re > 10^5$) либо при $Re \rightarrow 0$.

3. ВЫБОР СПОСОБА ИНТЕНСИФИКАЦИИ

Среди различных методов создания эффективных теплогидродинамических режимов наиболее простым в реализации является метод закрутки потока. Повышая коэффициент теплоотдачи в 2-2.5 раза и более, он оказывает существенное влияние на протекание разных теплоэнергетических процессов, позволяя увеличить тепловые потоки, уменьшить

температурную неравномерность в конструкции, стабилизировать горение, уменьшить занос поверхностей нагрева. Непрерывающиеся более полувека интенсивные исследования в этом направлении свидетельствуют об его актуальности, востребованности и практической значимости полученных результатов. При этом, наряду с новыми способами интенсификации с $\bar{E}' > 1$ [3], обеспечиваемыми путем «встраивания» в турбулентный поток самоорганизующихся закрученных струй (т.н. смерчевые технологии), продолжают развиваться классические варианты создания вихревых структур посредством турбулизации потока на периодической поперечной шероховатости определенных (оптимальных) параметров. Возбуждая в пристенной области отрывное вихревое движение со струйными эффектами, элементы периодической шероховатости поставляют основную массу факторов отклонения в сторону увеличения теплогидродинамической эффективности $\bar{E}' > 1$, что начинает находить соответствующее расчетно-теоретическое обоснование [3,4]. Однако многовариантность системы, низкая моделируемость явлений, а также трудности диагностики мелкомасштабных явлений и фрагментарный характер проводимых исследований, при в общем-то понятных тенденциях, требуют при решении конкретных задач индивидуального подхода. Эффективность \bar{E}' такого интенсификатора зависит от шага s/D и рода жидкости. При пропуске воздуха в трубках с малыми шагами накатки ($t/h=10-15$, углы атаки $\varphi \geq 50 \div 60^\circ$) эффективность (с некоторым превышением) тяготеет к варианту поперечной шероховатости. Вытянутые спирали и водные потоки создают более выраженный закручивающий эффект и теплогидравлическая эффективность будет уменьшаться $\bar{E}' < 1$.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАВИХРИТЕЛЕЙ В ОБЛАСТИ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА

Исследование проведено с интенсификаторами четырех типов в неизотермических условиях по методике, описанной в [5]. Результаты исследований изложены в [6]. Выбор оптимальных геометрических размеров интенсификаторов производился по стандартной методике планированного эксперимента. Полученные данные хорошо вписываются в общую картину теплогидродинамической эффективности интенсификаторов, заполняя малоизученный промежуток чисел Рейнольдса $Re=2000-6000$ (см. рисунок).

Наибольшей энергетической эффективностью ($\bar{E}'_{\max}=1.94-2.10$) при умеренной тепловой ($Nu / Nu_{2л} = 2.17-2.56$) обладают тонкие скрученные

ленты при больших углах атаки $\varphi > 50^\circ$ ($\delta=0.33\text{мм}$; $S/D=3$).

Проволочные вставки оказывают во всем диапазоне диаметров прутка d_n значительное, быстро возрастающее ($\sim d_n$) гидросопротивление при близкой интенсификации теплообмена.

Пропеллерные вставки и шнеки дают наибольший прирост теплообмена ($Nu / Nu_{2л} = 3.17-4.36$) и на порядок больший прирост гидросопротивления ($\xi / \xi_{2л} = 14.88-62.11$).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные способы интенсификации теплообмена (закрутки потока) эффективны для применения в энергетических установках малой мощности как с точки зрения простоты и дешевизны, так и относительного уровня возможного улучшения технико-экономических показателей теплообменников.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$E' = Q / N\Delta t$; $E'_{2л}$ – энергетические коэффициенты интенсифицированного и гладкостенного каналов;
 Q, N – теплосъем и мощность на прокачивание теплоносителя;
 Δt – температурный напор поток-стенка;
 Nu, ξ – соответственно, число Нуссельта и коэффициент сопротивления интенсифицированной трубы (без индекса) и гладкой трубы (с индексом «гл»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах М.: Машиностроение, 1990. 208с.
2. Леонтьев А.И., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (турбулентных) потоков в каналах энергоустановок // Известия Академии наук. Энергетика, 2005. № 1. С.75-91.
3. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. 1987. С. 264.
4. Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е. Исследование предельной интенсификации теплообмена в трубах за счет искусственной турбулизации потока // Теплофизика высоких температур. Т. 40. №6. 2002. С. 958-963.
5. Жаргалхуу Л., Рыжков А.Ф. Экспериментальное исследование теплообмена в трубах переходной области // Вестник УГТУ-УПИ Теоретические и экспериментальные исследования в энерготехнологии. Межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург, 2005. № 4(56). С. 114-124.
6. Жаргалхуу Л., Рыжков А.Ф. Экспериментальное исследование аэродинамики в трубах при малых числах Рейнольдса. // Вестник УГТУ-УПИ Теоретические и экспериментальные исследования в энерготехнологии. Межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург, 2005. №4(56) С. 101-113.