

А. В. Сударев – Научный центр «Керамические двигатели» им. А.М. Бойко
В. Б. Сударев – НПП «Теплопроект»
А. А. Халатов – Институт технической теплофизики НАН Украины
М. В. Ковалев – ОАО «Гипрорыбфлот»

Интенсификация теплообмена в газовом тракте котлов-утилизаторов (КУ) с помощью проволочных спиральных вставок не только улучшает массогабаритные показатели котлов, но и обеспечивает унификацию модулей КУ для двигателей широкого диапазона мощностей. Кроме того, заметно снижается уровень шума двигателей энергетической установки при теплофикационном режиме ее эксплуатации.

Интенсификация теплообмена в газовом тракте котла-утилизатора

IN BRIEF

Heat exchange intensification in the RB gas path.

Power generation plant (PP) efficiency increase is achieved through use of the «waste» heat of exhaust gases in the recovery boilers (RB) and the «hot» water or water vapor supply to consumers. It is demonstrated that the heat exchange intensification in the RB gas path using wire helical insertions (WHI) could not only improve mass-size parameters of RB but, also, ensure: a standardization of RB modules for wide power spectrum engines; a substantial lowering in the PP engine noise level at its power-and-heat generation condition running.

Совместное производство тепловой и электрической энергии обеспечивает как экономии топлива, так и снижение токсичных выбросов (особенно парниковых газов); надежность энергоснабжения.

Несмотря на очевидное преимущество когенерации на малых ТЭЦ, производство тепловой и электрической энергии в России осуществляется в основном раздельно, что почти в полтора раза увеличивает потребность в топливе.

С применением когенерации резко повышается эффективность использования топлива газопоршневыми установками (с 38-40 % до 80-85 %) и сокращаются выбросы тепла в атмосферу, что особенно актуально для районов плотной городской застройки [1]. Энергосбережению способствует утилизация теплоты выпускных газов действующих ГПА магистральных компрессорных станций, приводов электростанций. «Бросовая» теплота используется для отопления и горячего водоснабжения производственных зданий, ближайших жилых поселков, тепличных хозяйств.

На основе многолетнего опыта эксплуатации утилизационных теплообменников – водогрейных КУ в условиях компрессорных станций сформулированы предъявляемые к ним требования: малое аэродинамическое сопротивление; широкий диапазон регулирования; низкая металлоемкость; компактность и надежность; модульное исполнение; невысокая стоимость. Кроме того, необходимо, чтобы при эксплуатации энергоустановки в теплофикационном режиме КУ обеспечивал снижение уровня шума двигателя, а также не требовал частых чисток даже при содержании в выхлопных

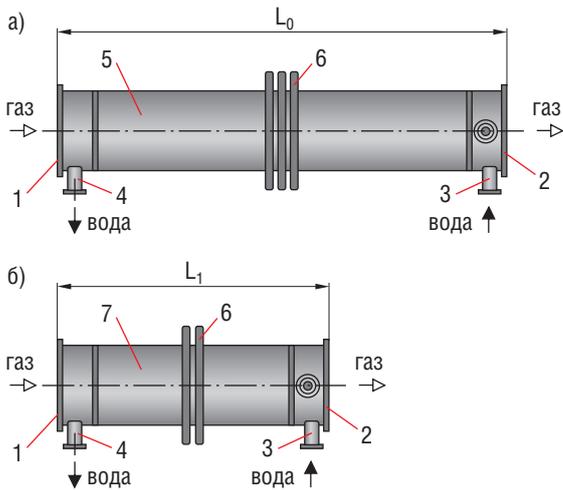
газах двигателя липких частиц сажи и/или несгоревшего масла.

Предъявляемые к КУ требования можно выполнить, в частности, за счет внедрения технологий, основанных на использовании уникальных свойств вихревого и закрученного потоков газа [2]. Создание подобных течений теплоносителей в тонком пристенном слое способствует интенсификации теплообмена при умеренном росте затрат энергии на продвижение рабочей среды по трубам котла. При этом увеличивается плотность передаваемого теплового потока, что при неизменной тепловой мощности теплообменного аппарата позволяет улучшить его массогабаритные показатели.

Один из наиболее технологичных методов интенсификации теплообмена в трубах газового тракта КУ основан на применении проволочных спиральных вставок (ПСВ) для турбулизации и закрутки газового потока. Он прошел экспериментальные исследования и внедрен в практику создания котлов-утилизаторов и воздухоподогревателей мощных котлоагрегатов. При использовании ПСВ в котле-утилизаторе теплосъем, по сравнению с гладкой трубой, повышается на 40 % при равных гидравлических потерях [3], а в воздухоподогревателе рост теплосъема составляет 20-30 % [4].

Для системы утилизации теплоты газопоршневого двигателя 4012 TESI LC фирмы Perkins использование ПСВ внутри труб газового тракта КУ мощностью 330 кВт позволяет существенно сократить длину его теплообменной матрицы (ТМ).

На рис. 1 представлены два конструктивных варианта ТМ кожухотрубного котла-утилиза-



1; 2 – трубные доски; 3; 4 – патрубки подвода/отвода воды; 5; 7 – корпус; 6 – линзовый компенсатор

тора. Матрица обоих теплообменников выполнена из 649 труб внутренним диаметром 17 мм, которые закреплены в двух трубных досках, и размещена в цилиндрическом корпусе диаметром 600 мм, оснащённом линзовым компенсатором. В межтрубном пространстве установлены поперечные сегментные перегородки, обеспечивающие продольно-поперечное течение нагреваемой воды навстречу горячему газу, движущемуся внутри труб.

Теплогидравлические расчеты, выполненные с использованием рекомендаций [5], [6], показали (рис. 2), что при размещении ПСВ по всей длине трубы ($L_{\text{ПСВ}}=L_{\text{ТР}}$) теплоотдача возрастает в 1,8 раза, сопровождаясь увеличением сопротивления почти вдвое. По мере сокращения длины участка, занятого ПСВ ($L_{\text{ПСВ}}<L_{\text{ТР}}$), интенсивность теплообмена и темп роста аэродинамического сопротивления падают вследствие затухания крутки на свободном участке.

Рост теплоотдачи позволил значительно уменьшить длину труб (рис. 3). При относительной длине вставок $L_{\text{ПСВ}}/L_{\text{ТР}}=1$ длина труб матрицы сокращается почти вдвое – также вдвое снижается и масса трубного проката. Применение ПСВ разной относительной длины позволяет разработать конструкцию матрицы КУ, тепловая мощность каждого модуля которой может изменяться в широком диапазоне: минимальная – при «пустых» трубах модуля; максимальная – при наличии ПСВ длиной,

Рис. 2. Интенсификация теплообмена (1) и повышение аэродинамического сопротивления (2) при движении газа в гладкой трубе с ПСВ разной относительной длины ($L_{\text{ПСВ}}/L_{\text{ТР}}$)

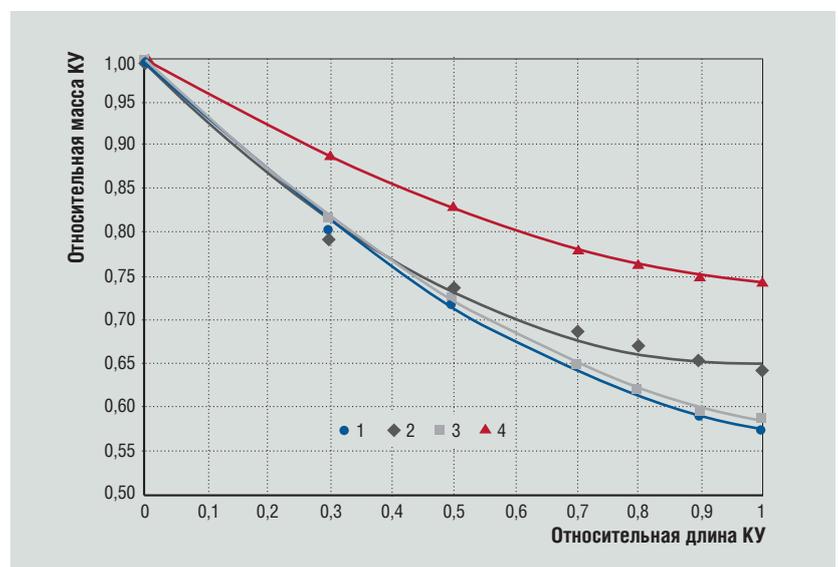
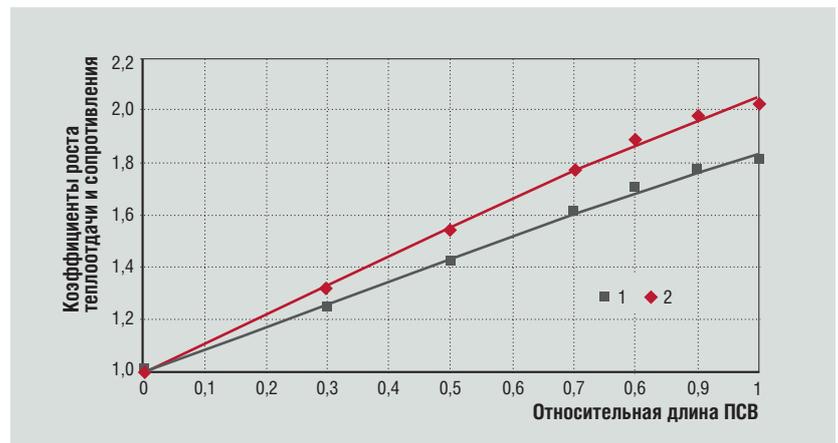
Рис. 3. Массогабаритные показатели КУ: 1; 2 – масса труб и КУ в целом для одномодульного теплообменника; 3; 4 – для двухмодульного

равной длине трубы. Типовые модули отделены друг от друга газовой «пазухой», которая служит камерой расширения газа при его перемещении по трубному тракту матрицы КУ.

При длине ($L_{\text{ПСВ}}/L$) $>0,4$ масса КУ снижается менее резко, что обусловлено влиянием массы элементов корпуса, на которых не отражается интенсификация теплообмена. Еще более пологим является график для массы матрицы двухсекционного КУ, что связано с необходимостью использования дополнительных трубных досок.

Наличие ПСВ в газовых трубах влияет на увеличение газового сопротивления трубной матрицы КУ (рис. 4). Видно, что по сравнению с «пустыми» трубами потери давления возрастают более чем вдвое. Однако с учетом других местных сопротивлений газового тракта рост его полного сопротивления составляет лишь 35 % для одномодульного варианта КУ и 50 % – для двухмодульного. При установке ПСВ на половине длины трубы потери давления в газовом тракте КУ (по сравнению с «пустой» матрицей этого теплообменника) возрастают примерно на 20 % – в то же время теплосъем

Рис. 1. Сопоставление длины матрицы котлов-утилизаторов типа УТГ-330 без интенсификаторов (а) и с интенсификаторами теплообмена (б) в газовых трубах в виде ПСВ



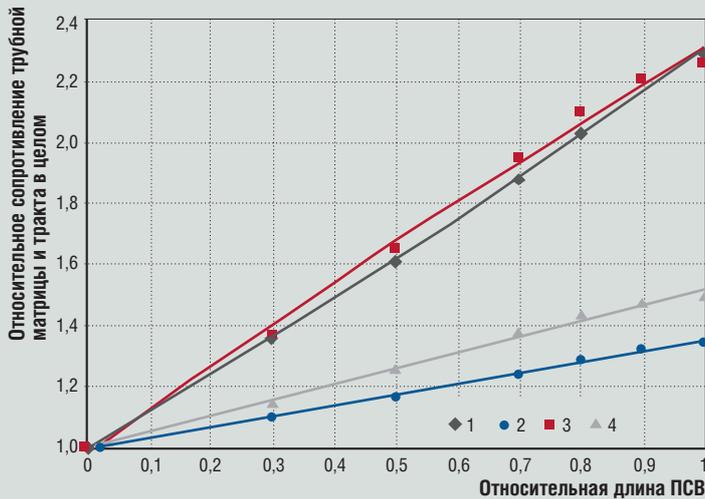


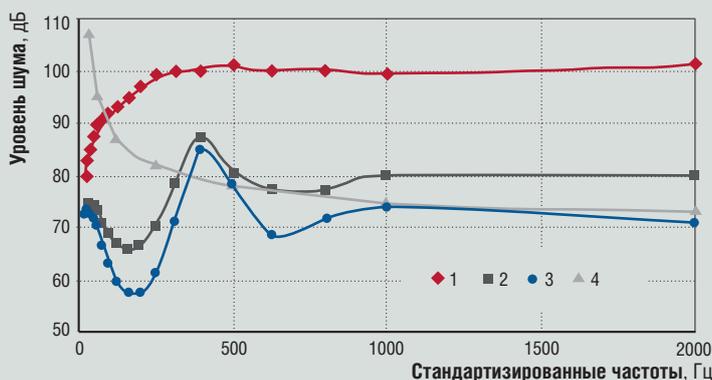
Рис. 4.
Аэродинамическое сопротивление газового тракта матрицы (1; 3) и КУ в целом (2; 4).
1; 2 – одномодульный котел-утилизатор;
3; 4 – двухмодульный

увеличивается на 55 %. Таким образом, применение ПСВ является эффективным, позволяя уменьшить габариты и металлоемкость КУ.

Кроме того, размещение в трубах матрицы ПСВ будет способствовать самоочистке внутренней поверхности труб, снятию возможных загрязнений. Самоочистка связана с перемещением витков ПСВ вдоль стенки трубки вследствие их термического расширения. Продольное перемещение витков приводит к механическому разрушению пристенного слоя газа, удалению возможных отложений на поверхности труб – все это дополнительно повышает эффективный коэффициент теплоотдачи с газовой стороны. Вставки, расположенные внутри газовых труб матрицы КУ, не усложняют его обслуживание. Для проведения периодической чистки труб достаточно извлечь и вновь установить ПСВ в каждой трубке матрицы.

Кожухотрубный КУ не только эффективно использует теплоту выпускных газов, снабжая потребителей горячей водой, но и заметно снижает уровень шума двигателя (рис. 5) [5]. Применение КУ из двух типовых модулей, разделенных «пазухой», обеспечивает в широком диапазоне частот уровень шума ниже допустимого (линия 3, 4). Наличие «пазухи» несколько увеличивает длину теплообменника (сокращает

Рис. 5.
Уровень шума на расстоянии 1 м от двигателя при одномодульном (2) и двухмодульном (3) исполнении КУ.
1 – собственный шум двигателя;
4 – допустимый уровень шума [6]



ценную вследствие применения ПСВ), но в этом случае можно отказаться от штатного шумоглушителя, который устанавливается между котлом и дымовой трубой.

Кроме того, двухмодульное исполнение матрицы КУ позволяет унифицировать модули, использовать типовые узлы для создания модельного ряда разной тепловой мощности, что важно для серийного изготовления. Применение механизации и/или автоматизации при изготовлении и пооперационной диагностике модулей будет способствовать повышению их качества.

В итоге можно сделать следующие выводы:

1. Применение ПСВ в газовом тракте КУ энергетически эффективно, способствует повышению его компактности и снижению металлоемкости.

2. Наличие в трубках матрицы КУ интенсификаторов типа ПСВ обеспечивает самоочистку труб, уменьшает число необходимых чисток теплообменника при эксплуатации.

3. Изготовление КУ из последовательно соединенных по газовому тракту типовых модулей позволяет за счет установки ПСВ разной относительной длины обеспечить различную тепловую мощность как модулей, так и котлоагрегата в целом.

4. Унификация модулей позволит механизировать процесс их изготовления, обеспечить серийность, повысить качество и снизить себестоимость.

5. Наличие расширительной камеры между типовыми модулями повышает шумоподавляющую способность КУ, как глушителя шума двигателя. ■

Использованная литература

1. Дубянский А.А., Пузовик Д.Ф. Системы когенерации на базе газопоршневых установок FG Wilson // Турбины и дизели. 2007, №5.
2. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т.7. Вихревые технологии азотермодинамики в энергетическом газотурбостроении / Изд. ИТТФ НАН Украины, Киев. - 2008. - 292 с.
3. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. - Л.: Энергия, ЛО, 1980. - 140 с.
4. Пермяков Б.А., Рамадан А.Э., Аксенов А.К. Повышение эффективности воздухоподогревателей со стеклянными трубами // Промышленная энергетика. 1995, №7.
5. Хряпченков А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные котлы. Л.: Судостроение, 1988. - 296 с.
6. ГОСТ 12.1.003-83 Шум. Общие требования безопасности. Изд. Стандартов. 2002.