УДК 536.24

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА И АЭРОДИНАМИКИ ГАЗОТУРБИННЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ «КОТЕЛЬНОЙ» СХЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ ГТУ МОЩНОСТЬЮ 16 МВТ)

Сударев А.В.[1], Сударев Б.В.[1], Молчанов А.С.[1], Цуриков Н.А.[2]

[1]ООО «Научный Центр «Керамические Двигатели» им. А.М.Бойко», Санкт-Петербург, Россия
[2]ООО «Группа компаний Экономико-финансовая-энергетическо-строительная корпорация», Сочи, Россия

АННОТАЦИЯ

Модернизация газотранспортной системы Украины требует замены действующих газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на более экономичные. Высокую экономичность ГПА нового поколения обеспечивает входящий в состав его газотурбинного привода (ГТП) рекуперативный трубчатый воздухоподогреватель (ВП) со степенью регенерации Е=85% и суммарными относительными потерями давления в его трактах Δp_{Σ}=4,0%. Реализация этих параметров ВП во многом определяется его конструктивным исполнением. Стремление обеспечить высокую компактность ВП за счет искусственного уплотнения его трубной матрицы может привести к росту массогабаритных показателей теплообменника и снижению КПД ГПА из-за негативного воздействия на теплоперенос и аэродинамическое сопротивление ВП принятой в проекте «котельной» схемы компоновки его матрицы.

ВВЕДЕНИЕ

Экономика Украины отличается высокой энергоемкостью внутреннего валового продукта (ВВП), которая в 2,5 раза превышает средний уровень энергоемкости ВВП наиболее развитых стран мира [1]. Во многом это связано с использованием в энергетике морально устаревших и физически изношенных газотурбинных двигателей (ГТД) с низким коэффициентом полезного действия (КПД), составляющим η_e=18..27%. Газотурбинный привод превалирует на большинстве газопроводов мира. Его доля на Украине составляет 82% общей мощности ГПА газотранспортной системы (ГТС). Дальнейшая эксплуатация устаревших ГТП на компрессорных станциях (КС) ГТС может привести к «обвальной» деградации, неспособности обеспечивать надежный транзит газа в Европу и удовлетворение внутренних потребностей страны. С целью повышения экономической эффективности ГТС разработана Концепция [1] ее модернизации, которая предполагает:

- применение регенеративного цикла ГТП нового поколения;
- оснащение ГТП трубчатыми рекуперативными воздухоподогревателями (ВП), имеющими:
- тепловую эффективность в диапазоне Е=82-88%;
- суммарные относительные потери давления не более Δp=4-4,2%;
- ресурс 60000-120000 часов;
- число циклов пуск/останов – не менее 2000-5000;
- наработку на отказ не менее 10000 час;
- утечки сжатого воздуха не более 0,2%;
- удельную стоимость не более $(40-100) за кВт тепловой мощности (ТМ);
- удельную массу не более 3-4 кг/кВт ТМ;
- сравнительно малую площадь для их раз-

мещения на КС; возможность доставки к месту эксплуатации автомобильным и железнодорожным транспортом, а монтажа - техникой КС ограниченной грузоподъемности; оснащение для ликвидации возможного загрязнения поверхности теплообмена; условия для эволюционного конструктивного совершенствования в процессе серийного производства, в частности, путем использования технологичных и многократно проверенных при эксплуатации способов интенсификации теплообмена.

Высокая экономичность ГТП ГПА нового поколения (КПД η_e>40%) обеспечивается за счет повышения начальной температуры их термодинамического цикла (T_3=980ºС) и применения эффективной регенерации теплоты (Е=0,82-0,88).

Авторы Концепции [1] отмечают, что «регенераторы, находящиеся сегодня в эксплуатации, имеют низкую тепловую эффективность, подвергаются разгерметизации и разрушению вследствие тепловых напряжений, ухудшению характеристик из-за загрязнений поверхности, большими размерами по сравнению с ГТД, высокой стоимостью, низкой эксплуатационной надежностью и ресурсом». Поэтому актуальна «Разработка опытного образца унифицированного модуля теплообменного регенератора ГТД мощностью 10-16 МВт для модернизации действующих и создания новых ГПА». То есть Концепция предполагает выполнение ВП из унифицированных трубчатых модулей, применимых для ВП разной тепловой мощности.

В России в течение последних 30-ти лет проводится масштабная замена низко ресурсных пластинчатых ВП регенеративных ГТП мощностью 6-16 МВт; накоплен значительный опыт в разработке, испытаниях и эксплуатации трубчатых регенераторов, в том числе модульного типа [2]. Наиболее широкое распространение на КС России получила технологичная при сборке, транспортировке и монтаже модульная конструкция трубчатого ВП, выполненная из унифицированных панелей V - образных [2] или W-образных [3] труб. Их изготовление и монтаж освоен рядом предприятий России и Казахстана. Эти модульные регенераторы предназначены для использования в северных и труднодоступных районах России, где существуют ограничения по доставке грузов, грузоподъемной технике и монтажу. Замена пластинчатых регенераторов на трубчатые с высокой степенью регенерации Е≥0,8 ограничивается недостаточной несущей способностью фундамента под существующими секциями пластинчатых регенераторов. Это неизбежно снижает тепловую эффективность ВП до Е=0,7-0,72.

Столь низкая степень регенерации Е не позволит обеспечить требуемую Концепцией [1] экономическую эффективность ГТП нового поколения (КПД≥40%). Степень регенерации, равная Е≈70%, отчасти обусловлена тем, что для теплообменной поверхности ВП используются трубы сравнительно большого диаметра (d_2=20-25 мм), в то время как еще в первой половине прошлого века, например, для регенераторов корабельной ГТУ типа RM-60 мощностью 4,0MW фирмой Роллс-Ройс применялись тонкостенные (δ=0,1 мм) трубы d_2=1/4 дюйма (6,35 мм). Применение труб малого диаметра позволяет существенно увеличить компактность теплообменника высокой тепловой эффективности. [4]. Используя трубы диаметром d_2<20 мм, на ограниченной площади при усилении фундамента можно разместить ВП с большей поверхностью теплообмена, с большей тепловой мощностью, с большей степенью регенерации (Е=0,85), что необходимо для обеспечения требуемого КПД ГТУ в целом. Выполненный термодинамический анализ ряда регенеративных реализованных ведущими мировыми фирмами ГТУ показал, что при принятых начальных параметрах цикла и ВП, конструкция которого удовлетворяет техническим требованиям [1], а степень регенерации составляет Е=0,85, эффективный КПД проектируемой ГТЭ-16Р может быть близок к ηе≈40% [5].

ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЬ «КОТЕЛЬНОЙ» СХЕМЫ

Применительно к регенеративной ГТУ нового поколения на Украине разработана конструкция трубчатого двухсекционного ВП, поверхность теплообмена матрицы которого набрана из панелей (262 шт), каждая из которых состоит из 12-ти плоских 6-ти ходовых параллельных змеевиков, размещенных в прямоугольном коробе газохода. Змеевики выполнены из гладких труб d_2/d_1=22/20 мм, при сборке формируют плотный пучок труб шахматного строения с относительными шагами

$(S_1/d_2)/(S_2/d_2)$=1,36/1,0 [6]. Диагональный относительный шаг труб в таком тесном пучке равен S'_2/d_2=1,21, что меньше того значения, при котором для тепло-гидравлического расчета можно использовать рекомендации Норм ЦКТИ-ВТИ [7;8].

Раздаточный и сборный воздушные коллекторы выполнены из двух полуцилиндров разной толщины, длиной ~8,3 м, соединенных друг с другом с помощью продольных фланцев. Дистанционирование змеевиков осуществлено с помощью поперечных перегородок, приваренных к силовым балкам корпуса ВП. Присоединение змеевиков к воздушным коллекторам реализовано при помощи гнутых отводов с радиальным вводом в коллектор и вдвое увеличенными продольными шагами между отверстиями в трубных досках коллекторов. Такое техническое решение ВП, свойственное поверхностям нагрева мощных котельных агрегатов («котельная» конструктивная схема), не в полной мере удовлетворяет Концепции [1], т.к. не использует модульности узлов ВП, предполагает доставку деталей ВП на КС «россыпью» и сборку матрицы непосредственно в условиях станции. «Котельная» конструкция ВП подвержена разгеметизации и появлению транзитных газовых потоков при эксплуатации в условиях высокой температуры продуктов сгорания. Все это неизбежно приводит к заметному снижению степени регенерации и КПД ГТУ в целом. Кроме того, достоверный тепло-гидравлический расчет подобной конструкции затруднен из-за невозможности использования многократно проверенных и подтвержденных многолетней практикой рекомендаций Норм ЦКТИ-ВТИ [7;8].

В то же время сведения о тепловой эффективности примененных в проекте ВП тесных пучков труб много поточной компоновки [9] достаточно противоречивы. Аэродинамические и тепловые исследования ВТИ не подтвердили их эффективности, а в работе А.А. Жукаускаса и др. [10], где подробно исследованы ряд «сжатых» пучков: пять коридорных ($(S_1/d_2)=(S_2/d_2)$=1,008; 1,013; 1,02; 1,026; 1,053) и один шахматный ((S_1/d_2)=1,026;(S_2/d_2)=0,89) отмечается, что «…теплоотдача в пучке с самым узким проходным сечением ниже, чем в других пучках. По-видимому, при очень узком зазоре завихрения в межтрубном пространстве ослабевают». Визуализация картин течения в пучках труб показывает, что плотные пучки «вырождаются» в систему параллельных щелевых каналов с прерывистыми волнистыми стенками. При коридорном строении эти каналы - прямые, а при шахматном – извилистые. То есть внешняя задача поперечного омывания теплоносителем труб в тесном шахматном пучке может рассматриваться как внутренняя – движение теплоносителя по узким извилистым щелям, стенками которых служат участки труб и «замороженных» зон [11], которые «отключают» часть поверхности труб от активного теплообмена.

Как показано в работе [12], несмотря на высокие скорости течения теплоносителя коэффициенты теплоотдачи в межтрубном пространстве «вырожденных» пучков труб близки или даже ниже, чем при ламинарном течении жидкости с макровихрями в щелевых каналах [13]. Этот результат подтверждает предположение [10] о затухании турбулентности при движении теплоносителя в узких щелях. Использование тесных шахматных пучков труб из-за ламинаризации потока в их межтрубном пространстве может привести к снижению эффективности ВП и, как следствие, падению КПД регенеративной ГТУ. Как правило, коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве регенератора ГТУ меньше, чем внутри труб, поэтому ламинаризация внешнего потока заметно скажется на падении коэффициента теплопередачи, на необходимость компенсировать это падение увеличением поверхности теплообмена, габаритов и металлоемкости теплообменника. Компоновка ГТЭ-16Р совместно с ВП, имеющим матрицу с «тесным» трубным пучком и выполненным по «котельной» схеме, показана в работе Спицына В.Е. и др. [6].

ТЕПЛООТДАЧА И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Опытное исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления в плотных пучках гладких труб выполнено в работах [10,12,14,16-21]. Опыты проведены при различных: геометрических размерах труб и трубных пучков, рабочих сред и режимных параметрах, обтекающей пучок рабочей среды (Таблица 1). Результаты опытов в нетрадиционной обработке [12] представлены на рис.1.

Как видно из рис.1, в отличие от традиционной обработки опытных данных [18], где их разброс составляет более 30%, использование в качестве характерного размера – $d_г$ позволяет обобщить данные, полученные в эксперимен-

Таблица 1. Геометрические и режимные параметры рабочих участков экспериментальных установок

№ Ист.	Рабочая среда, $t_{ср.}$,°С	Геометрические характеристики пучка								Re_d*10^{-3}
		$d_2/L_{тр}$, мм	S_1/d_2	S_2/d_2	S'_2/d_2	$d_г$, мм	$D_и/d_г$	$L_к/d_г$	φ	
10	Вода,36-78	73/200	1,026	0,89	1,027	2,54	29,1	30,5	0,95	112-2350
16	Вода,22-63	22/200	1,13	1,13	1,25	5,64	4,4	4,1	0,5	4,6-96
17	Возд,	56,5 54,3	1,05 1,094	0,91 0,95	1,05 1,16	3,74 6,61	15,6 8,7	16,4 9,2	1,0 1,0	20-54 14-36
18	Возд	57 57 38	1,16 1,05 1,05	0,93 0,89 0,91	1,096 1,033 1,05	9,22 2,95 2,49	6,7 19,8 15,8	7,5 21,3 16,6	1,67 1,54 0,99	20-85 31,5-16 7,4-16,5
19	Возд	57	1,16	1,0	1,156	11,7	5,36	5,7	1,03	18-76
20	Возд	64,4 64,4	1,027 1,05	0,89 0,91	1,027 1,05	2,29 4,3	28,7 15,3	30 16,3	0,98 1,0	20-100 10-85

Примечание. $L_к$-длина канала; характерным размером в числе Рейнольдса служит наружный диаметр трубы, «φ»-геометрический параметр, равный $(S_1/d_2-1)/(S'_2/d_2-1)$.

тах на воздухе и воде, с отклонением от обобщающей зависимости в пределах ±15%. Этот результат еще раз подтверждает, что «тесный пучок «вырождается» в систему узких шелевых каналов, т.е. в данном случае внешнюю задачу обтекания пучка труб следует рассматривать как внутреннюю - движение теплоносителя в узких волнообразных щелях [13], Ламинаризация и «отключение» части поверхности от активного теплообмена [11] снижают эффективный коэффициент теплоотдачи в трубном пакете с газовой стороны и негативно сказываются на степени регенерации, компактности и металлоемкости ВП.

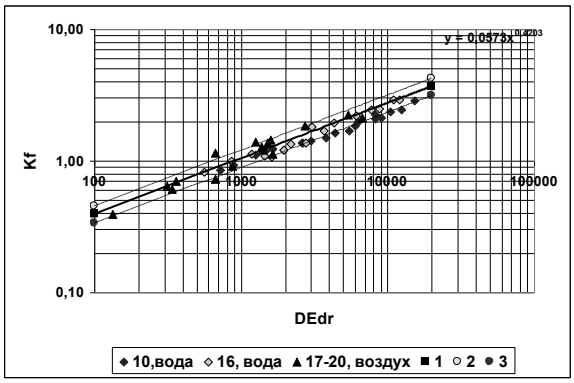

Рис.1 Теплоотдача в «вырожденных» пучках гладких труб шахматного строения.
10; 16-20 - источник; 1- обобщающая формула $Kf=0,0573(Dedr)^{0,42}$; 2;3 - линии, соответствующие отклонению от «1» - ±15%.

Если за счет этих факторов реальная степень регенерации уменьшится на 1,0%, то поверхность теплообмена необходимо будет увеличить на 8%, металлоемкость - на 10-12%, а КПД установки упадет на 0,5%.

Кроме того, необходимо отметить, что искусственное «стеснение» пучка уменьшает «мостик» между трубами в пакете, поэтому технологические отклонения диаметра труб (в пределах допусков на поставку трубного проката) оказывают заметное влияние на потери давления в газовом тракте ВП, снижая его энергоэффективность. Коэффициент увеличения сопротивления зависит от относительного диагонального шага S'_2/d_2 труб в пучке [7] и значительно увеличивается при уменьшении последнего (рис.2) [14].

Т.е. принятое конструктивное техническое решение («котельная» схема ВП) создает условия, способствующие снижению реальной степени регенерации и росту потерь давления в трактах ВП, а значит снижению КПД ГТУ. Если аэродинамическое сопротивление газового тракта трубного пакета увеличится на 10%, то затраты мощности на проталкивание газа по тракту ВП также возрастут на 10%, что приведет к снижению полезной мощности и КПД примерно на 0,25%.

Таким образом, КПД установки (без учета других потерь, связанных с возникновением транзитных потоков, загрязнением поверхности теплообмена, неравномерностью раздачи рабочих сред и т.п.) составит не более 39,5%, что заметно ближе к реализованным результатам аналогичных ГТУ той же мощности [5].

Вместе с тем технический уровень ГТУ оказывает существенное влияние на надежность и эффективность ГТС, так как стоимость КС составляет 25% стоимости ГТС, а расход газа на работу ГТУ равен 9,0% от расхода транспортируемого газа [15].

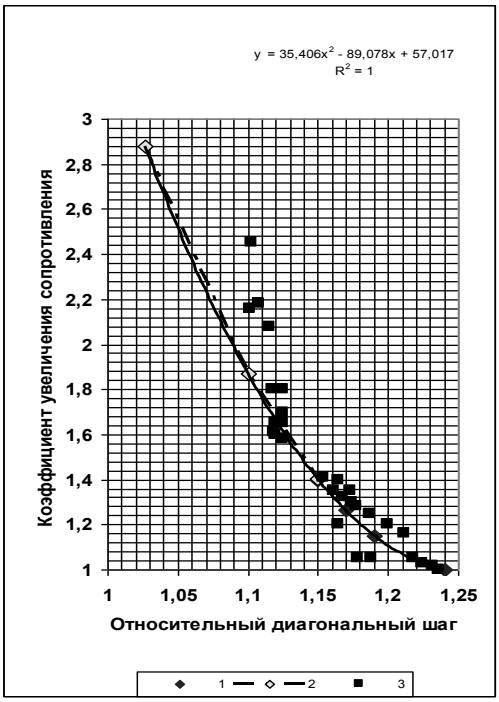

Рис.2 Коэффициент увеличения сопротивления по сравнению с расчетом [7]. 1-опытные данные [10]; 2- аппроксимационная зависимость $Kp=35,406(S'_2/d_2)^2-89,078(S'_2/d_2)+57,017$; 3 - опытные данные Лафа Ю.И. [14]; сплошная линия-экстраполяция кривой Норм аэродинамического расчета ЦКТИ-ВТИ [7].

Для повышения надежности парка ГПА необходимо реконструировать цехи КС.

Известно, что парк устаревших ГТУ невозможно обновить за короткий срок, поэтому необходима модернизация ГТУ в условиях КС.

Модернизация, как правило, сопровождается заменой пластинчатых регенераторов трубчатыми с более высокой степенью регенерации Е. Подобная замена уже в течение 30 лет проводится на КС ГТС России; причем широко используются модульные конструкции ВП [3], [23] с пучками гладких труб диаметром d_2/d_1=25/23 мм.

В 2003 году для опытного стенда Невского завода был изготовлен модульный ВП, конструктивно аналогичный приведенному в [2], с применением тонкостенных труб наружным диаметром d_2=16 мм, что позволило при опытном значении $E_{оп}$=0,85 улучшить его массогабаритные показатели.

Без внедрения инновационной для стационарного энергомашиностроения технологии изготовления, сборки и монтажа трубчатых ВП промышленных регенеративных ГТУ задача снижения их металлоемкости и повышения компактности представляется трудновыполнимой.

Попытка обеспечить высокую компактность ВП за счет искусственного «сжатия» трубного шахматного пакета была реализована при создании в г. Вельске в 2002-2003 годах регенеративной ГТУ-ТЭЦ типа ГТ-009, где вместо проектной степени регенерации ВП, равной Е=0,8, опытное значение, полученное при проведении приемочных испытаний, оказалось равным $E_{оп}$=0,65-0,70, что отразилось на эффективном КПД ГТУ, которое составило лишь η_e=30-31%, вместо (35-36)% по проекту.

ВЫВОДЫ

- Высокая экономичность ГТУ нового поколения во многом достигается за счет наличия в ее составе рекуперативного трубчатого ВП высокой тепловой и энергетической эффективности.
- Последние два определяющих фактора во многом зависят от конструктивной реализации ВП.
- Применение в конструкции ВП матрицы с «котельной» компоновкой трубных панелей и с искусственно «сжатым» трубным пучком шахматного строения может привести к негативным последствиям: росту массогабаритных показателей ВП, снижению КПД ГТУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Халатов А.А., Костенко Д.А., Парафейник В.П., Боцула А.Л., Билека Б.Д., Письменный А.С. Компрессорные станции ГТС Украины: Концепция модернизации ГТП ГПА. - Киев.- Изд. ИТТФ НАН Украины.-2009.-52 с.
2. Бродов Ю. М. и др. Теплообменники энергетических установок. - Екатеринбург: Сократ.-2003.-968 с.
3. Белоусов В.Д., Даниленко В.Г., Мишустин Н.И., Рыбаков В.П. Трубчатые регенераторы ОАО «ЗиО–Подольск». //

Газотурбинные технологии. - Сентябрь. - 2004.-С.44-45.
4. Дрейцер Г.А. Современные проблемы анализа эффективности, проектирования, производства и эксплуатации компактных трубчатых теплообменных аппаратов // Сб. «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». Т.2. - Сек. 8. «Интенсификация процессов тепло- и массообмена» .- М.: МЭИ.-2001.-С.299-306.
5. Сударев А.В., Халатов А.А., Сударев Б.В. Оценка и анализ технических требований к газотурбинным приводам ГПА газотранспортной системы Украины. // Газовая промышленность.-№6.-2010.- С.42-47.
6. Спицын В.Е., Боцула А.Л., Мовчан С.Н., Чобенко В.Н., Соломонюк Д.Н. Регенеративная газотурбинная установка для ГПА мощностью 16 MW // Турбины и дизели.-сентябрь-октябрь.-2010- С.28-31.
7. Мочан С.И. Аэродинамический расчет котельных установок. (Нормативный метод). Л.: Энергия.-1977.- Изд. 3-е.-256 с.
8. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд.3-е. НПО ЦКТИ, СПб.-1998.-257 с.
9. Липец А.У., Андреева А.Я. Теплообменники из суперплотных шахматных пучков труб // Теплоэнергетика. -№10.-2000.-С.49-50.
10. Жукаускас А.А. и др. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости. Вильнюс. - Минтис.-1968.- 192 с.
11. Мигай В.К., Фирсова Э.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление пучков труб. Л.: ЛО.-Наука.-1986.-195 с.
12. Кондратьев В.В., Орберг А.Н., Сударев Б.В. Теплоотдача в «суперплотных» шахматных пучках гладких труб // Турбины и компрессоры.-2004.-№3;4.-с.33-36.
13. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. - М.: Машиностроение.-1970.-330 с.
14. Лафа Ю.И. Аэродинамические характеристики компактных шахматных пучков труб в поперечном потоке и влияние на них технологии изготовления // Теплоэнергетика.-1976.-№8.-с.49-52.
15. Шайхутдинов А.З. Разработка и модернизация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Казань. -ООО «Слово».-2007.-339 с.
16. Боришанский В.М., Жинкина В.Б., Фирсова Э.В. Теплоотдача плотных пучков труб в поперечном потоке натрия и воды // Тр.ЦКТИ.-1968.-вып.86. - С.58-64.
17. Беленький М.Я. и др. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик поперечно обтекаемых «суперплотных» шахматных пучков труб // Теплоэнергетика. -№10.-2000.-С.44-48.
18. Бурков В.К., Константинов В.Ф. Исследование теплоаэродинамических характеристик поперечно обмываемых суперплотных шахматных пучков труб // Теплоэнергетика. -№5.-2003.- С.53-56
19. Бурков В.К., Говоров А.С. Исследование теплоаэродинамических характеристик тесного шахматного пучка труб // Теплоэнергетика.- №10.-2000.- С.51-52.
20. Величко В.И., Лавров Д.А. Оптимальная компактность гладкотрубных шахматных пучков.-Теплоэнергетика.-№10.-2000.-.53-54.
21. Липец А.У. и др. Аэродинамическое сопротивление компактных шахматных пучков труб // Теплоэнергетика.-№6.-1965.- С.32-34.
22. Маслов Л.А. Судовые газотурбинные установки. Л.:Судостроение.-1973.-409 с.
23. Виноградов В.В., Орберг А.Н., Сударев В.Б. Опыт внедрения трубчатых регенераторов на компрессорных станциях // Газовая промышленность.-2002.-№11.-С.68-71.