

УДК 621.438.056

О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, д-р техн. наук, проф.; проф. НТУУ «КПИ», Киев;
Л. С. БУТОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц.; доц. НТУУ «КПИ», Киев;
Е. А. ГРАНОВСКАЯ, ст. преподаватель НТУУ «КПИ», Киев;
Д. А. ГОРЯЧ, аспирант НТУУ «КПИ», Киев;
О. С. МОРОЗ, студент НТУУ «КПИ», Киев

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР В СТАБИЛИЗАТОРНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ ПРИ МИКРОДИФфуЗИОННОМ СЖИГАНИИ ГАЗА

Представлены результаты экспериментальных исследований формирования профиля температуры продуктов сгорания за стабилизаторами при микрофакельном сжигании газа со струйной подачей топлива в зону рециркуляции. Рассмотрены факторы, определяющие распределение температуры вдоль стабилизатора, а также длину камеры, необходимую для выравнивания температуры по сечению камеры сгорания.

Ключевые слова: камера сгорания, стабилизатор, микродиффузионное горение, поле температур, продукты сгорания.

Ведение

Одной из особенностей теплоэнергетической отрасли Украины является значительная зависимость от импорта топливно-энергетических ресурсов, в частности, газообразного топлива – природного газа. Значительная часть этого топлива идёт на производство чугуна, стали, цемента, минеральных удобрений и т.д. Существенный потенциал топливоиспользующей техники составляют котельные установки промышленной и коммунальной энергетики типа НИИСТУ-5, КВГМ, ПТВМ и др. различной мощности, парк которых – более 1000 штук отработавших свой ресурс, а также плавильные и нагревательные печи, воздушные подогреватели различного назначения, сушила и др. [1–3]. Наиболее реальным путём повышения эффективности этих установок, при минимальных затратах, является их модернизация. Опыт показывает, что в тепловом балансе теплоэнергетических установок расход тепла на переменных режимах, например на разогрев обмуровки топки, составляет (25–45) % от общей затраты тепла (Ахмедов Р. Б.) [4]. В связи с этим существует задача обеспечения режима работы, при котором определённым условиям эксплуатации соответствует наиболее эффективная схема организации топочного процесса – регулируемый оптимум.

В последнее время в мировой все большее внимание уделяется использованию высокотемпературных газотурбинных (ГТУ) и парогазовых (ПГУ) установок для производства электроэнергии, целей теплофикации и в комплексе с паросиловой установкой, что приводит к повышению термодинамической эффективности цикла. При этом возникает проблема сжигания газа в камере вторичного подогрева при недостатке кислорода в окислителе [5–7].

Одним из основных элементов, который в значительной степени определяет эффективность топливоиспользующего объекта, является горелочное устройство. От характеристик работы, надёжности и долговечности горелки в значительной степени зависят показатели работы агрегата в целом. Анализ горелочных устройств показывает, что значительная часть из них имеют недостаточно высокие, с точки зрения современных требований, технико-экономические характеристики, что обусловлено

© О.Ю. Черноусенко, Л.С. Бутовский, Е.А. Грановская, Д.А. Горяч, О.С. Мороз, 2015

устаревшими методами организации их рабочего процесса. Такие горелки характеризуются, в частности, узким диапазоном устойчивой работы при изменении скорости воздушного потока и коэффициента избытка воздуха, значительными выбросами оксидов азота и углерода и др., неэффективной работой на частичных нагрузках, что приводит к перерасходу топлива.

Таким образом, актуальность предлагаемой работы определяется необходимостью экономии дефицитного газообразного топлива и законодательными требованиями охраны окружающей среды от загрязнения токсичными продуктами сгорания путём внедрения в энергетическое, промышленное и коммунальное хозяйство Украины высокоэффективных технологий сжигания топлива и соответствующих горелочных устройств.

Перспективным направлением в решении указанной проблемы является использование горелочных устройств с микрофакельным (микродиффузионным) сжиганием газа в системе стабилизаторов, которые обтекаются воздушным потоком.

На кафедре ТЭУ Т и АЭС НТУУ «КПИ» выполняются, начаты В. А. Христинем и Г. Н. Любчиком, научные исследования по разработке горелочных устройств стабилизаторного типа с различными схемами организации смесеобразования и горения топлива и воздуха [8]. Организация процесса сжигания топлива в системе микрообъёмов, и связанное с этим увеличение поверхности воспламенения и горения, позволяет повысить интенсивность горения и тепловое напряжение топочного объёма и сократить длину факела (Франк-Каменецкий Д. А. [9] и др.). Использование соответствующих схем смесеобразования газа и воздуха позволяет достичь оптимального соотношения компонентов горения в зависимости от требований, предъявляемых к горелочному устройству.

Микрофакельные горелочные устройства стабилизаторного типа показали высокую эффективность работы при изменении режимных параметров и сниженный уровень выбросов токсичных оксидов азота (Сигал И. Я. [1], Тумановский А. Г. [10] и др.). При микрофакельном сжигании топлива в системе стабилизаторов обеспечивается возможность разработки горелочных устройств различной мощности за счёт изменения количества отдельных модульных элементов. Благодаря принципу прямоточности горелочные устройства имеют пониженное аэродинамическое сопротивление.

По результатам испытаний на различных объектах установлено, что применение горелочных устройств стабилизаторного типа при модернизации котлов малой и средней мощности (3–20 МВт) позволило на (15–20) % уменьшить эмиссию оксидов азота, за счёт прямоточности уменьшить сопротивление горелочных устройств и снизить расход электроэнергии на привод вентилятора до 15 %, повысить надёжность оборудования.

Характеристики цикла любой теплосиловой установки, кроме различных режимных и конструктивных факторов, в значительной степени зависят от характера формирования температурного поля в топочном пространстве. Потери в цикле в результате отклонения поля температур от проектного профиля приводят к ограничению средней температуры газов и уменьшают КПД цикла энергоустановки. Этот вывод особенно справедлив для высокотемпературных огнетехнических устройств, где используемые материалы работают на пределе термической прочности.

В свою очередь, снижение неравномерности поля температур позволяет повысить эффективность цикла энергоустановки и уменьшить, таким образом, удельный и абсолютный расход топлива.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния различных режимных и конструктивных факторов на формирование поля температур в огневом пространстве при микрофакельном сжигании газа за стабилизаторами и струйной подаче топлива в зону рециркуляции.

Результаты экспериментальных исследований.

При изготовлении горелочного устройства в виде системы плоских стабилизаторов (рис. 1) различают поле температур в поперечном и продольном направлении (вдоль стабилизатора). При кольцевом исполнении горелочного устройства различают, соответственно, окружное и радиальное поле температур.

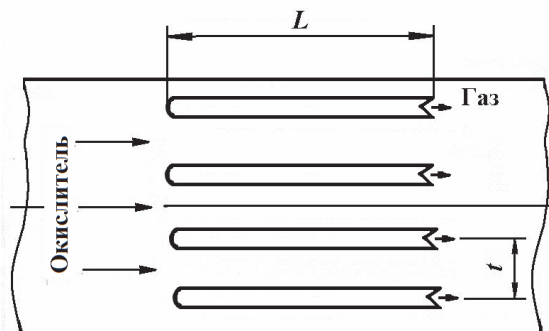


Рис. 1 – Микродиффузионное горелочное устройство стабилизаторного типа с подачей топлива в зону рециркуляции за плоским стабилизатором

В идеальном варианте поле температур в поперечном и окружном направлении должно быть абсолютно ровным. Окружная или поперечная неравномерность температуры газа на выходе из горелочного устройства кроме влияния на коэффициент полезного действия теплосилового установке при работе, например, в составе ГТУ влияет на скорость окисления материала сопловых лопаток турбины, на продолжительность их работы без прогара, и, следовательно, на их ресурс. Чем выше окружная

неравномерность, тем соответственно больше необходимо затрачивать воздуха на охлаждение сопловых лопаток с целью обеспечения их работоспособности.

Считается, что на неравномерность температурных полей влияют такие факторы:

- принципиальная схема горелочного устройства, в частности, для ГТУ – камеры сгорания (трубчатая, трубчато-кольцевая, кольцевая);
- поле скоростей воздуха на входе в горелочное устройство;
- форма диффузора и степень его раскрытия;
- конструкция горелочного устройства (размер и количество модулей);
- длина огневого пространства;
- точность изготовления и сборки деталей горелочного устройства;
- принятый уровень гидравлических потерь в горелке.

Газодинамическая асимметрия может быть следствием воздействия таких факторов как, например, нарушение подвода воздуха к горелочному устройству в результате отклонений в конструкции подводящего трубопровода, поворот воздушного потока или местного стеснения стойками, рёбрами, технологические отклонения при изготовлении деталей, например, отклонение формы и размера деталей и газодинамическая асимметрия конструкции. Так, если при подаче газообразного топлива отверстия выполняются с отклонениями в диаметре $2^{\pm 0,1}$ мм, то неравномерность расхода топлива может составлять около 20 %.

В связи со сложностью, а иногда невозможностью получения идеально ровного поля температур на ограниченной располагаемой длине камеры сгорания на практике допускается некоторая неравномерность, которую можно представить в виде [11]

$$\delta_t = \frac{T_{\max} - T_{\text{cp}}}{T_{\text{cp}} - T_{\text{в}}}, \quad (1)$$

где T_{\max} , $T_{\text{ср}}$, $T_{\text{в}}$ – соответственно максимальная и средняя температуры газов в данном сечении камеры сгорания и температура воздуха на входе.

Как показано в работе [12], уменьшение величины δ_t от 0,14 до 0,04 приводит к уменьшению энергетических потерь из-за неравномерности температурного поля в 3–4 раза. Считается, например, что в камерах сгорания величина δ_t не должна превышать 12 % для выносных типов и 25 % – для встроенных.

В современных ГТУ характер радиальной или продольной эпюры температур на выходе из камеры выбирается из условия обеспечения ресурса рабочих лопаток турбины, который, в свою очередь, определяется сечениями лопатки, имеющими минимальный запас прочности. Обычно эти сечения располагаются вблизи корня лопатки, где действующие напряжения близки к максимальным. На рис. 2а [13] показано распределение действующих напряжений в рабочей лопатке турбины при типичных законах изменения площади поперечного сечения по её высоте. Допустимые напряжения существенно зависят от температуры металла лопатки, потому в зоне действия максимальных напряжений необходимо иметь пониженную температуру лопатки и, следовательно, набегающих продуктов сгорания.

Температура металла на периферии лопатки, несмотря на низкий уровень действующих напряжений, также должна быть снижена с точки зрения жаропрочности материала и сохранения постоянной геометрии статорных деталей. В итоге по мере повышения температуры газов требования обеспечения равномерного поля температур перед турбиной заменяются требованиями создания оптимального профиля температур по высоте лопатки. Типичной является радиальная эпюра температур с максимальным её значением на высоте примерно 0,6–0,75 от высоты выходного канала камеры. Отношение пиковой температуры к среднемассовой в выходном сечении изменяется в диапазоне $T_{\max}/T_{\text{ср}} = 1,04\text{--}1,08$ [13].

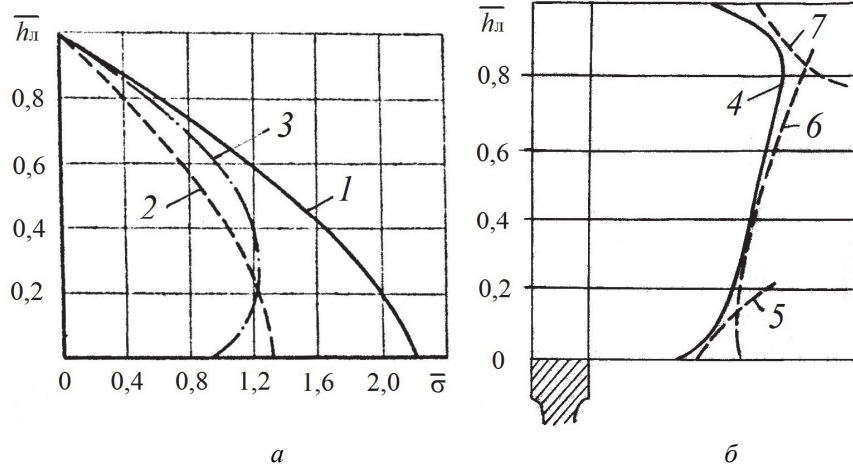


Рис. 2 – Напряжения в рабочей лопатке газовой турбины: а – изменение безразмерной величины действующих напряжений по высоте лопатки; б – влияние распределения напряжений на расчётный предельный профиль температуры на выходе из камеры сгорания;
 1–3 – влияние закона изменения площади поперечного сечения лопатки по высоте: 1 – $F = \text{const}$; 2 – линейный; 3 – квадратичный; 4 – предельный профиль температуры газов; 5 – граница усталости металла; б – граница ползучести; 7 – возникновение напряжения в лопатках статора

Также на рис. 2б приведены кривые оптимального распределения температур, где показана линия 4, которая огибает несколько кривых для предельно допустимых напряжений: 5 – граница усталости металла; б – граница ползучести; 7 – возникновение напряжения в лопатках статора [14].

Считается, что с уменьшением масштаба элементов горелочного устройства облегчаются возможности формирования требуемого поля температур [13]. С этой точки зрения при рассматриваемом в данной работе методе сжигания топлива за системой сравнительно небольших стабилизаторов формирование требуемого профиля температур газов соответствует такому подходу.

При анализе формирования поля температур в микрофакельных горелочных устройствах стабилизаторного типа следует учитывать, что на этот процесс существенное влияние оказывает интенсивность массообменных процессов за фронтным устройством и в объёме камеры. Как видно из рис. 3, где приведены данные по интенсивности турбулентности в следе за стабилизаторами, максимальное её значение наблюдается в поперечном сечении стабилизатора (ϵ_y), что связано с большим градиентом скоростей в этом направлении [14]. По высоте стабилизатора (ϵ_z) и по оси следа (ϵ_x) интенсивность массообмена примерно в 3 раза меньше.

Как уже указывалось, в продольном направлении (вдоль стабилизатора) поле температур должно иметь определённый профиль, связанный с допустимым уровнем напряжений, возникающих в рабочих лопатках турбины (рис. 2б).

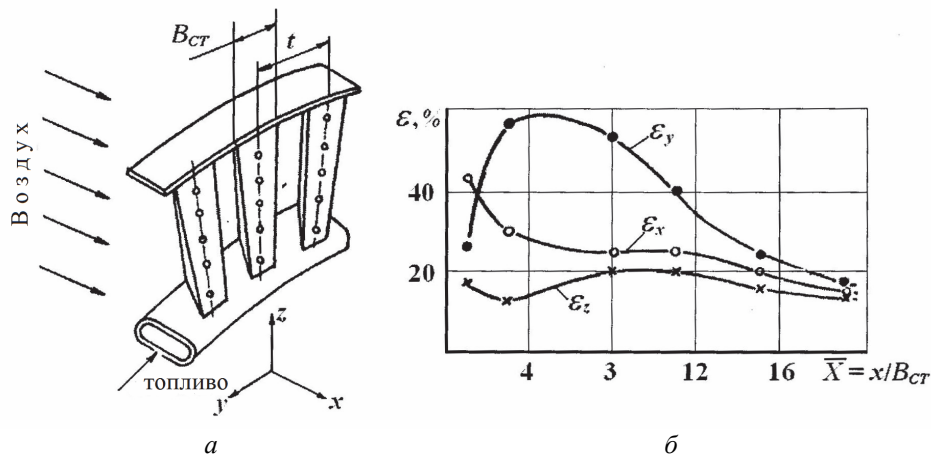


Рис. 3 – Схема стабилизаторной решетки (а) и изменение интенсивности турбулентности в следе за стабилизатором (б): ϵ_x – по оси следа за стабилизатором; ϵ_y – в поперечном направлении; ϵ_z – по высоте вдоль стабилизатора

На рис. 4 приведены данные по относительному расходу топлива (газа) вдоль стабилизатора G_i и полю температур газа при подаче с обеих сторон коллектора (рис. 4а) и с одной стороны (рис. 4б). При двухсторонней подаче газа с относительной площадью газоподающих отверстий $f_r = 0,31$ неравномерность расхода газа равна $\epsilon = 0,04$, а при односторонней подаче с $f_r = 0,625$ значение $\epsilon = 0,10$.

Как видно из рисунка, поле температур вдоль стабилизатора примерно соответствует характеру распределения топлива вдоль стабилизатора. Таким образом, использованный метод сжигания топлива за стабилизаторами с распределённой по длине подачей топлива позволяет изменяя схему газораздачи между отдельными стабилизаторами и вдоль стабилизатора (диаметр и шаг отверстий, профиль коллектора и др.) регулировать эпюру поля температур в камере сгорания.

Характер формирования температуры продуктов сгорания в поперечном сечении за системой уголковых стабилизаторов с подачей топлива распределено по длине стабилизатора показан на рис. 5 [15, 16].

Проводились испытания горелочных устройств с такими параметрами – $B_{ст} = 30$ мм и 45 мм, коэффициент загромождения $K_f = 0,60; 0,692; 0,81$, где $K_f = B_{ст}/t_{ст}$;

$B_{ст}$ – ширина стабилизатора; $t_{ст}$ – шаг стабилизаторов. Изменение общего коэффициента избытка воздуха α приведено на рис. 5, 6.

На рис. 5 для одного из вариантов ($B_{ст} = 30$ мм; $K_f = 0,60$) для двух значений коэффициента избытка воздуха $\alpha_0 = 15,6$ и $4,3$ показано изменение температуры газов по оси следа за стабилизатором и оси щели между стабилизаторами.

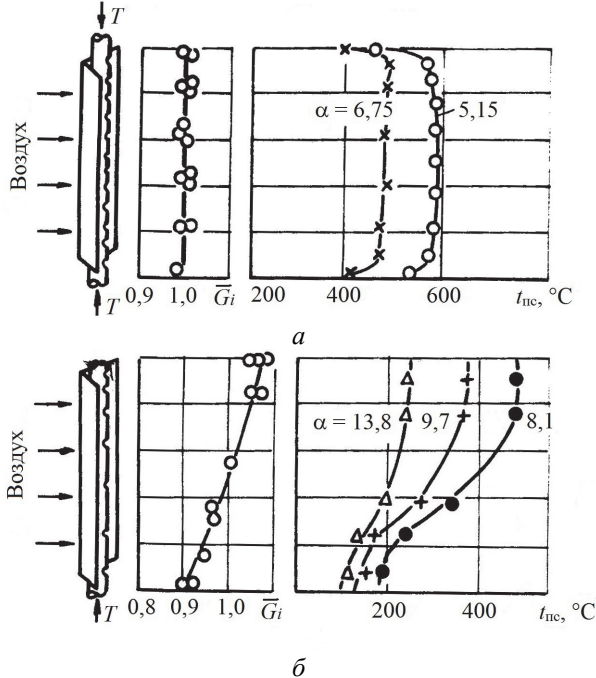


Рис. 4 – Формирование поля температур по высоте стабилизатора при подаче газа: *a* – с двух сторон коллектора; *б* – с одной стороны коллектора

Как видно из рис. 5, в связи с высокой интенсивностью турбулентности в поперечном направлении ϵ_y процесс перемешивания продуктов сгорания в следе за стабилизаторами и воздуха между ними происходит с высокой интенсивностью. Полученные данные показывают, что длина камеры, на которой происходит выравнивание температуры в этом направлении зависит от коэффициента избытка воздуха α_0 . Из рисунка видно, что с уменьшением α_0 длина камеры, требуемая для выравнивания температур, увеличивается. Это связано с уменьшением интенсивности выгорания топлива, увеличением длины факела и замедлением роста температуры по длине факела.

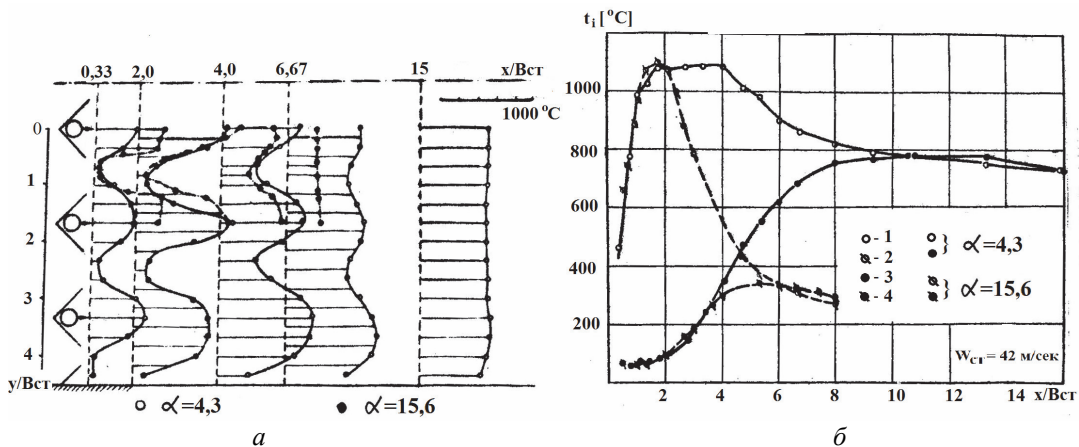


Рис. 5 – Формирование поля температур газов за стабилизаторами при $K_f = 0,60$ и разных коэффициентах избытка воздуха: *a* – в поперечном сечении стабилизаторов; *б* – по длине камеры сгорания; 1, 2 – по оси следа за стабилизатором; 3, 4 – по оси щели

На рис. 6 для трёх горелочных устройств с различным загромождением и при различных α_0 представлены данные по изменению относительной температуры газов по оси следа за стабилизатором и оси щели по длине камеры. Из рисунка видно, что при используемых на практике коэффициентах загромождения $K_f \geq 0,5$ в диапазоне исследованных режимов по коэффициенту избытка воздуха поле температур в

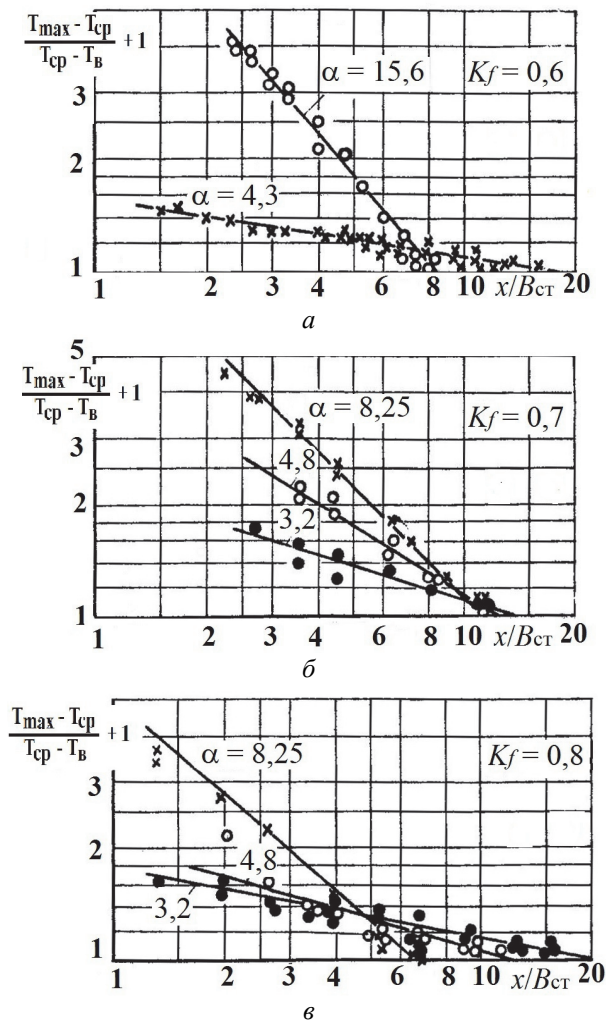


Рис. 6 – Закономерности изменения относительной разницы температуры в поперечном сечении камеры по оси следа за стабилизатором и оси щели между стабилизаторами

стабилизаторе, профиль коллектора, диаметр и шаг топливных отверстий можно регулировать эпоху поля температур в топочном пространстве вдоль стабилизатора.

2) Длина камеры, на которой происходит выравнивание температуры в поперечном сечении стабилизаторов зависит от коэффициента загромождения горелочного устройства и коэффициента избытка воздуха.

Список литературы: 1. Сигал, И. Я. Защита воздушного бассейна от выбросов электростанций и котельных [Текст] / И. Я. Сигал // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – № 10. – С. 60–66. 2. Хзмаян, Д. М. Теория горения и топочные устройства [Текст] / Д. М. Хзмаян, Я. А. Каган. – Москва : Энергия, 1976. – 488 с. 3. Спейшер, В. А. Сжигания газа на электростанциях и в промышленности [Текст] / В. А. Спейшер. – Москва : Энергия, 1967. – 251 с. 4. Ахмедов, Р. Б. Основы регулирования топочных процессов [Текст] / Р. Б. Ахмедов. – М. : Энергия, 1977. – 280 с. 5. Халатов, А. А. Парогазовые установки в электроэнергетике: современное состояние и перспективы развития в Украине [Текст] / А. А. Халатов // Тепловая энергетика – новые вызовы времени. – Львов : НВФ «Українські технології», 2010. – С. 238–247. – ISSN 6. Патон, Б. С. Промислові газотурбінні двигуни для газотранспортної системи України: сучасний стан і проблеми розвитку [Текст] / Б. С. Патон, А. А. Халатов, Д. А. Костенко та ін. // Енергетика та Електрифікація. – 2008. – № 7. – С. 87–294. 7. Халатов, А. А. Які газотурбінні двигуни необхідні газотурбінній системі України [Текст] // Газотурбінні технології. – 2008. – № 7(68). – С. 22–24.

окружном направлении становится равномерным в пределах 10–15 калибров стабилизатора.

Анализ результатов испытаний стабилизаторных горелочных устройств показал, что расчёты длины камеры сгорания, необходимой для выравнивания поля температур в поперечном сечении камеры сгорания при заданном коэффициенте неравномерности температурного поля δ_t и запаса длины камеры в виде коэффициента K_1 , который учитывает возможные технологические отклонения при изготовлении и сборке камеры сгорания, можно производить по формуле:

$$\frac{X}{B_{ст}} = K_1 \left(\frac{e^{1,3(1+\alpha_{рец})} - 2,73}{\delta_t} \right)^{\frac{1}{\alpha_{рец}^{0,8}}}, \quad (2)$$

где $\alpha_{рец}$ – расчётный коэффициент избытка воздуха в зоне рециркуляции, который определяется как

$$\alpha_{рец} = K_w C_x \alpha_0 K_f (1 + K_f), \quad (3)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления стабилизатора; K_w – опытный коэффициент, равный $K_w = 0,042$ в изотермических условиях и $K_w = 0,0315$ – при горении.

Выводы

1) Изменяя схему газороздачи в

8. Христич, В. А. Горелочные устройства для сжигания газа при высоких и переменных избытках воздуха [Текст] / В. А. Христич, Г. Н. Любчик // Использование газа в народном хозяйстве. – Москва : ВНИИГазпром, 1978. – Вып. 10. – 60 с. 9. Франк-Каменецкий, Д. А. Микродиффузионное турбулентное горение [Текст] / Д. А. Франк-Каменецкий, Е. М. Минский // Докл. АН СССР. – 1950. – Т. 50. – С. 353–354. 10. Тумановский, А. Г. Сжигание жидкого топлива во встречно-закрученных струях кольцевой камеры сгорания [Текст] / А. Г. Тумановский, А. В. Сударев, А. В. Маев // Теплоэнергетика. – 1986. – № 3. – С. 37–42. 11. Пчелкин, Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей [Текст] / Ю. М. Пчелкин. – Москва : Машиностроение, 1973. – 392 с. 12. Любчик, Г. Н. Система показателей эффективности камер сгорания ГТУ [Текст] / Г. Н. Любчик // Теплоэнергетика. – 1975. – № 12. – С. 47–52. 13. Резник, В. Е. Инженерные основы проектирования камер сгорания авиационных ГТД / В. Е. Резник, В. П. Данильченко, Н. Б. Болотин. – Куйбышев : КуАИ, 1981. – 80 с. 14. Хауторн, У. Р. Основы проектирования и характеристики газотурбинных двигателей [Текст] / У. Р. Хауторн, У. Т. Олсон. – Москва : Машиностроение, 1964. – 648 с. 15. Христич, В. А. Рабочий процесс и охлаждение высокотемпературных камер сгорания диффузионно-стабилизаторного типа [Текст] / В. А. Христич, Л. С. Бутовский, Е. А. Грановская [и др.] // Промышленная теплотехника. – 1980. – Т. 2, № 6. – С. 78–83. 16. Бутовский, Л. С. Влияние режимных и конструктивных факторов на диффузионное сжигание газа за стабилизаторами [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 23.12.83 / Л. С. Бутовский ; НТУУ «КПИ». – Киев : 1983. – 259 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sigal, I. Ja. "Zashhita vozdushnogo bassejna ot vybrosov jelektrostantsij i kotel'nyh [The protection of the air area from steam power plants and boiler unit ejections]." *Jekotehnologii i resursoberezenie*. No 10. 2000. 60–66. Print. 2. Hzmajlan, D. M., and Ja. A. Kagan. *Teorija gorenija i topochnye ustrojstva [The theory of burning and fire devices]*. Moscow : Jenergija, 1976. Print. 3. Spejsher, V. A. *Szhiganiya gaza na jelektrostantsijah i v promyshlenosti [The gas burning on the steam power plants and in the industry]*. Moscow : Jenergija, 1967. Print. 4. Ahmedov, R. B. *Osnovy regulirovanija topochnyh processov [The foundations of the regulating of burning processes]*. Moscow : Jenergija, 1977. Print. 5. Khalatov, A. A. "Parogazovye ustanovki v jelektrojenergetike: sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija v Ukraine [Steam-gas power plants in the electric energy: the modern state and the perspective of the development in the Ukraine]." *Teplovaja jenergetika – novye vyzovy vremeni*. – Lvov: NVF "Ukrains'ki tehnologii", 2010. 238–247. Print. ISSN. 6. Paton, B. Je., A. A. Khalatov and D. A. Kostenko, et al. "Promyslovi gazoturbinni dvyguny dlja gazotransportnoi' systemy Ukrai'ny: suchasnyj stan i problemy rozvytku [The industrial gas-turbine engings for the gas-transport system of the Ukraine: the modern state and the problems of the development]." *Energetyka ta Elektryfikacija*. No 7. 2008. 287–294. Print. 7. Khalatov, A. A. "Jaki gazoturbinni dvyguny neobhidni gazoturbinnij systemi Ukrai'ny [What gas-turbine plants are necessary to the gas-turbine system of the Ukraine]." *Gazoturbinni tehnologii'*. No 7(68). 2008. 22–24. Print. 8. Khristich, V. A., and G. N. Lyubchik. "Gorelochnye ustrojstva dlja szhiganiya gaza pri vysokih i peremennyh izbytkah vozduha [The burning devices for combustion of the gas at high and alternating excess of air]." *Ispol'zovanie gaza v narodnom hozjajstve [The using of gas in the national economy]*. No 10. Moscow : VNIIEgasprom, 1978. Print. 9. Frank-Kameneckij, D. A, and E. M. Minskij. "Mikrodiffuzionnoe turbulentnoe gorenje [Microdiffusing turbulent burning]." *Dokl. AN SSSR*. Vol. 50. 1950. 353–354. Print. 10. Tumanovskij, A. G., A. V. Sudarev and A. V. Maev. "Szhiganiye zhidkogo topliva vo vstrechno-zakruchennyh strujah kol'cevoj kamery sgoranija [Burning of the liquid fuel in cross streams of the annular combustion chamber]." *Tepljenergetika*. No 3. 1986. 37–42. Print. 11. Pchelkin, Ju. M. *Kamery sgoranija gazoturbinnih dvigatelej [Combustion chambers of gas turbine plants]*. Moscow : Mashinostroenie, 1973. Print. 12. Lyubchik, G. N. "Sistema pokazatelej jeffektivnosti kamer sgoranija GTU [The system of indices of the combustion chamber efficiency of the gas turbine installation]." *Tepljenergetika*. No 12. 1975. 47–52. Print. 13. Reznik, V. E., V. P. Danil'chenko and N. B. Bolotin. *Inzhenernye osnovy proektirovanija kamer sgoranija aviacionnyh GTD [The ingeneering basis of the desining of combustion chambers of aircraft gas turbine engines]*. Kujbushev : Kuj.A.I., 1981. Print. 14. Hawthorne, W. R., and W. T. Olson. *Osnovy proektirovanija i harakteristiki gazoturbinnih dvigatelej [Design and performans of gas turbine power plants]*. Moscow : Mashinostroenie, 1964. Print. 15. Khristich, V. A. "Rabochij process i ohlazhdenie vysokotemperaturnyh kamer sgoranija diffuzionno-stabilizatornogo tipa [The working process and cooling of the high temperature diffusion-type combustion chamber]." *Promyshlennaja teplotehnika*. Vol. 2.06 1980. 78–83. Print. 16. Butovskij, L. S. *Vlijanie rezhimnyh i konstruktivnyh faktorov na diffuzionnoe szhiganiye gaza za stabilizatorami [The influence of regime and design factors on the diffusion burning of gas behind the stabilizer]*. *Dis. ... kand. tech. nauk*. Kiev : NTUU "KPI", 1983. Print.

Поступила (received) 12.01.2015