

УДК 621.438

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ГОРЕНИЯ ЗА ТУРБИНЫМИ ПРОФИЛЯМИ

<sup>1</sup>Достияров А.М., <sup>2</sup>Умышев Д.Р., <sup>3</sup>Кибарин А.А., <sup>3</sup>Катранова Г.С.

<sup>1</sup>Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Астана, e-mail: dost51@mail.ru;

<sup>2</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева,  
Алматы, e-mail: umishev\_d@mail.ru;

<sup>3</sup>Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, e-mail: kib\_61@rambler.ru, lsister@mail.ru

В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния угла  $\beta$  между профилем лопатки и накладкой на процессы образования оксидов азота, температуры на выходе из камеры сгорания, длину факела и стабилизацию пламени. В статье представлен общий анализ по использованию различных устройств при стабилизации пламени. В результате экспериментов было выявлено, что увеличение угла  $\beta$  приводит к повышению температуры на выходе из камеры сгорания, повышению концентрации оксидов азота и стабилизации пламени. Снижение угла  $\beta$  приводит к снижению концентрации оксидов азота, при  $\beta = 45^\circ$ , до 16 ppm. Снижение до  $\beta = 30^\circ$  снижает концентрацию оксидов азота до 7 ppm. Данные подтверждают экспоненциальную зависимость концентрации оксидов азота от температуры. При росте температуры на 8%, повышает концентрацию оксидов азота на 128%. При увеличении  $\beta$  до  $60^\circ$  коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  имеет значение 9,5, при  $\beta = 45^\circ$ ,  $\alpha = 9$ . Причем значительный рост стабилизации замечен при изменении угла с  $30^\circ$  до  $45^\circ$ . Оптимальным углом  $\beta$  является  $45^\circ$  ввиду хорошей стабилизации пламени и сравнительно низких концентраций оксидов азота.

**Ключевые слова:** коэффициент избытка воздуха, температура, оксиды азота, турбинные профили

## EXPERIMENTAL STUDY OF COMBUSTION PROCESS FOR TURBINE PROFILES

<sup>1</sup>Dostiyarov A.M., <sup>2</sup>Umyshev D.R., <sup>3</sup>Kibarin A.A., <sup>3</sup>Katranova G.S.

<sup>1</sup>S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Astana, e-mail: dost51@mail.ru;

<sup>2</sup>Kazakh National Research Technical University after K.I. Satpaev, Almaty, e-mail: umishev\_d@mail.ru;

<sup>3</sup>Almaty University of Power Engineering and Communications, Almaty,  
e-mail: kib\_61@rambler.ru, lsister@mail.ru

The article presents the results of an experimental study of the effect of the angle  $\beta$  between the profile of the blade and the overlay on the formation of nitrogen oxides, the temperature at the exit from the combustion chamber, the length of the torch and flame stabilization. The article presents a general analysis of the use of various devices in the stabilization of the flame. As a result of the experiments, it was found that an increase in the  $\beta$  angle leads to an increase in the temperature at the exit from the combustion chamber, an increase in the concentration of nitrogen oxides, and stabilization of the flame. Reducing the angle  $\beta$  leads to a decrease in the concentration of nitrogen oxides, at  $\beta = 45^\circ$ , to 16 ppm. Reduction to  $\beta = 30^\circ$ , reduces the concentration of nitrogen oxides to 7 ppm. The data confirm the exponential dependence of the concentration of nitrogen oxides on temperature. With an increase in temperature by 8%, it increases the concentration of nitrogen oxides by 128%. When  $\beta$  is increased to  $60^\circ$ , the excess air coefficient  $\alpha$  has a value of 9.5, with  $\beta = 45^\circ$ ,  $\alpha = 9$ . Moreover, a significant increase in stabilization is noticeable when the angle changes from  $30^\circ$  to  $45^\circ$ . The optimal angle  $\beta$  is  $45^\circ$  in view of good flame stabilization and relatively low concentrations of nitrogen oxides.

**Keywords:** excess air ratio, temperature, nitrogen oxides, turbine profiles

Обеспечение стабильного горения при различных избытках воздуха является одной из важных проблем камер сгорания газотурбинных установок. Стабилизация пламени обеспечивается различными способами, к ним относятся закрутка топлива в горелочном устройстве, создание рециркуляционной зоны за плохообтекаемыми телами, комбинация двух способов. Особый интерес для авторов представляет изучение стабилизации при микрофакельном горении топлива. На рис. 1 представлены направления разработок микрофакельного горения.

Принцип работы микрофакельных устройств заключается в распределении факелов по площади на более мелкие. Такой принцип обеспечивает высокую степень

сжигания топлива, хорошую стабилизацию при тех же средних температурах в зоне горения жаровой трубы. Устройства на базе плохообтекаемых тел имеют высокий потенциал ввиду малых гидравлических сопротивлений.

Наибольшую популярность получили плохообтекаемые тела в виде уголкового стабилизаторов, ввиду того, что они являются хорошими стабилизаторами, с одной стороны, и обеспечивают относительно небольшие потери давления, с другой стороны. Изучению плохообтекаемых тел посвятили свои работы многие авторы [1]. Эксперименты показали, что уголкового стабилизаторы имеют ряд преимуществ:

– простота изготовления;



Рис. 1. Основные направления разработки микрофакельных устройств

– горение по показателям близким к кинетическому;

– высокие стабилизационные характеристики при достаточно высоких показателях горения.

Одним из принципов микрофакельного сжигания считается использование горелок без разделения воздуха на первичный и вторичный. В таких случаях удается снизить размеры камер сгорания, снизить концентрации оксидов азота и обеспечить высокую полноту сгорания. Камеры сгорания с уголковыми стабилизаторами относятся к таким способам.

Изучению процессов горения за плохообтекаемыми телами посвящено достаточно много работ [2]. В работе [3] приведены результаты влияния угла раскрытия уголков и числа Маха на процессы стабилизации пламени. Было показано, что увеличением угла до 90 градусов при относительно малых числах Маха достигается минимальные значения срыва. Снижение скорости подачи топлива, соответственно снижение интенсивности турбулентности, увеличение размеров стабилизатора приводят к улучшению стабилизационных характеристик пламени.

Айву Фан и др. [3, 4] провели глубокое изучение процессов горения, стабилизации, теплообмена за плохообтекаемыми телами. Влияние различных типов стабилизаторов, а также различные варианты ввода топлива, расположения уголков, установки пламенных перемычек [5] показали, что уголковые стабилизаторы имеют широкий диапазон. Экспериментальные работы показали, что с увеличением концентрации топлива предел срыва увеличивается. А температура газов сначала увеличивается, а затем снижается.

Эксперименты по изучению влияния вихрей [6] на процесс стабилизации показали, что увеличение закрутки увеличивает теплообмен в застabilизаторной зоне. Изучение процессов срыва [7] показало, что при бедном срыве, свежая смесь реагирующих веществ входит в рециркуляционную зону, при этом само пламя сильно расчленяется (фрагментируется) и часть пламени находится на краю плохообтекаемого тела. Похожие результаты были получены при исследовании срыва за стабилизатором предварительно перемешанного топлива [8, 9]. При приближении к границам срыва форма пламени изменялась, а также изменялась форма концевой участка пламени.

Цель исследования: влияние угла  $\beta$  между профилем и накладкой на процессы стабилизации пламени, концентрации оксидов азота, длину факела и температуры на выходе из камеры сгорания. На рис. 2 представлен общий вид профиля.

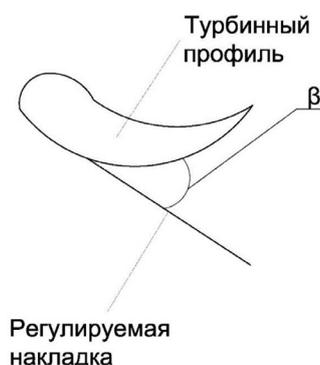


Рис. 2. Общий вид профиля

### Материалы и методы исследования

Методом исследования являются эксперименты на камере сгорания. Схема камеры сгорания представлена на рис. 3. Общая длина камеры сгорания 900 мм. Длина камеры сгорания 150 мм. Общий вид профилей представлен на рис. 3. Профили установлены симметрично относительно оси камеры сгорания и расстояние между соплом и профилем равно 30 мм. Часть между вентилятором и зоной горения сделана из цельного металла, в котором расположены трубки диаметром 16 мм, для обеспечения равномерного потока воздуха. Зона горения сделана из кварцевой трубы, которая выдерживает высокие температуры.

Экспериментальная установка представлена на рис. 3. Пропан находится в баллонах. Давление и расход регулируется клапаном, манометром и клапаном для снижения давления. Расход топлива контролировался электрическим расходомером, с точностью 1% по всему диапазону измерений.

Так как в эксперименте изучалось неперемешанное (диффузионное горение), перемешивание топлива с воздухом осуществлялось непосредственно в зоне горения. Для поджога топлива использовалось искровое зажигание, установленное непосредственно за профилями. На выходе из камеры сгорания были установлены радиально термомпары с диаметрами 0,5 мм (хромель-алюмель) для проведения замеров температуры. Параметры уходящих газов замерялись стационарным газоанализатором с погрешностью 5% по всему диапазону измерений. Для снимков использовалась цифровая фотокамера с высоким разрешением.

При эксперименте исследовалось влияние угла между профилем и накладкой на процессы стабилизации, образования токсичных веществ. Пламя зажигалось при отсутствии подачи воздуха, при минимальном расходе топлива, равном 0,0025 кг/с, затем постепенно включался вентилятор, в котором увеличивалась скорость с шагом в 1 м/с. По достижении необходимой скорости от 2 до 10 м/с выставлялся максимальный расход топлива, равном 0,0075 кг/с. После этого расход топлива снижался с шагом в 0,0005 кг/с, для определения бедного срыва.

При замерах оксидов азота, в начале выставлялось расстояние между уголками, как показано на рис. 3.

Пламя зажигалось при отсутствии подачи воздуха, при минимальном расходе топлива, равном 0,0025 кг/с, затем постепенно включался вентилятор, в котором увеличивалась скорость с шагом в 1 м/с. По достижении необходимой скорости от 2 до 10 м/с выставлялся максимальный расход топлива, равный 0,0075 кг/с.

Коэффициент избытка воздуха рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{L_{\phi}}{L_0}, \quad (*)$$

где  $L_{\phi}$  – фактическое количество воздуха, подаваемого в камеру сгорания,  $L_0$  – теоретическое необходимое количество воздуха для полного сжигания пропана.

### Результаты исследования и их обсуждение

В данной главе представлены результаты экспериментального исследования. Температура уходящих газов. На рис. 4 представлены зависимости температур на выходе из камеры сгорания в зависимости от угла между накладкой и спинкой турбинного профиля. Как видно из рисунка, максимальная температура на выходе из камеры сгорания достигается при  $\beta = 60^\circ$ , ввиду того, что поперечная площадь профиля создает более развитую зону рециркуляции, в которую засасывается большое количество воздуха с топливом. Более эффективное смешение топлива с воздухом обеспечивает его выгорание и высокую температуру.

На рис. 5 представлены аналогичная зависимость температуры от угла, но в области за рециркуляционной зоной. Данные температуры подтверждают анализ, приведенный по рис. 4. Более развитая рециркуляционная зона обеспечивает «концентрацию» высокой температуры в ней и обеспечивает эффективное сжигание топлива. При углах 45 и 30 пламя за профилем имеет более низкие температуры.

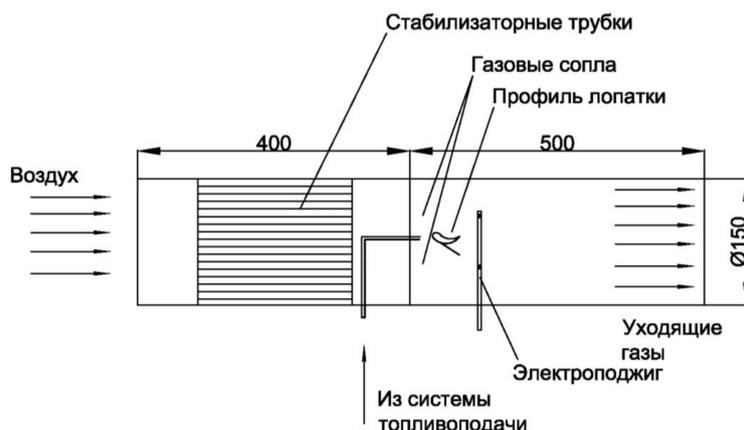


Рис. 3. Схема камеры сгорания и точек замеров

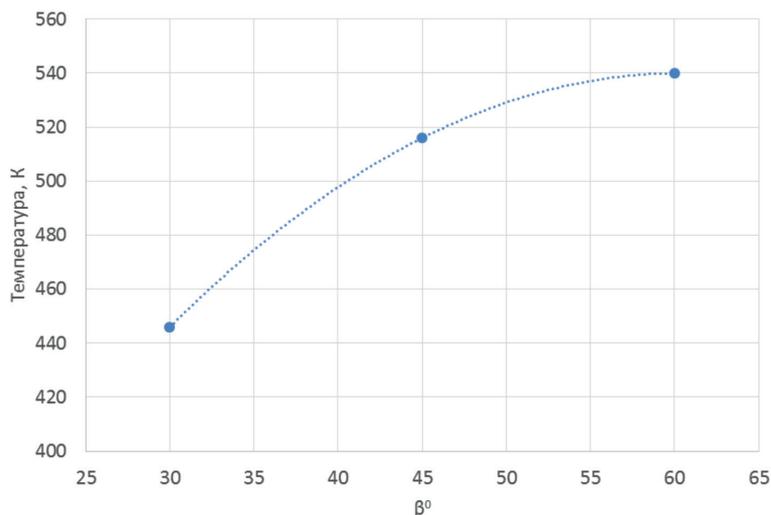


Рис. 4. Зависимость температуры на выходе из камеры сгорания от угла  $\beta^0$

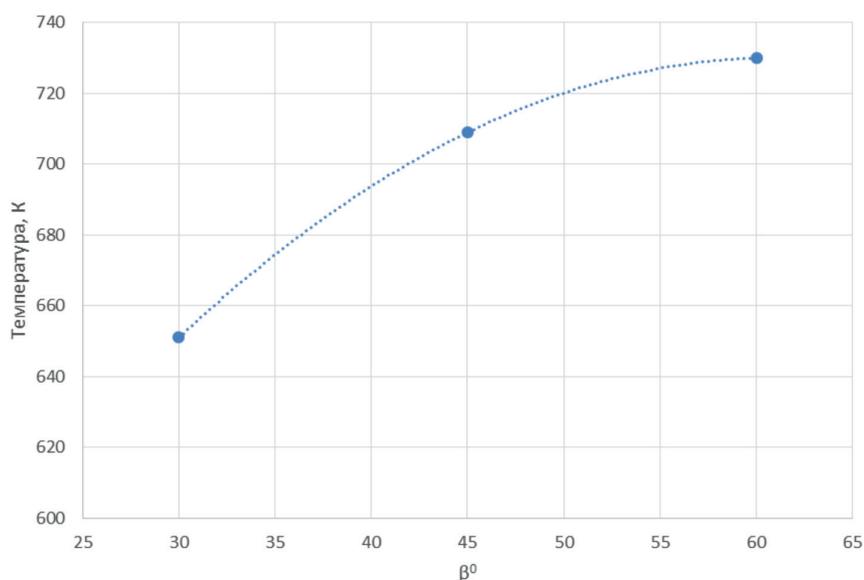


Рис. 5. Зависимость температуры у профиля от угла  $\beta^0$

На рис. 6 представлена зависимость длины факела от угла  $\beta^0$ . Данные показывают, что чем развитее зоны обратных токов (рециркуляции) тем, короче факел. Это происходит из-за более сильного втягивания топливно-воздушной смеси в рециркуляционную зону, обеспечивая тем самым сжигание большей части топлива в ней. Часть недогоревшего топлива сжигается в «хвосте» факела. Создание более сильного сопротивления снижает концентрацию топлива за профилем лопатки, тем самым снижая видимую длину факела. Данное заключение

подтверждается фотоснимком факелов, представленных на рисунке

На рис. 7 – зависимость коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  при «бедном» срыве от угла  $\beta^0$ . Как известно важным параметром всех горелочных устройств и камер сгорания является надежность работы при различных нагрузках. Определяющим фактором является стабилизация пламени при различных значениях избытка воздуха  $\alpha$ . В эксперименте изучались лишь «бедные» концентрации ( $\alpha > 1$ ), при которых топлива меньше, чем воздуха, необходимого для го-

рения. Коэффициент избытка воздуха рассчитывался по формуле (\*).

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента избытка воздуха при «бедном» срыве от угла  $\beta^0$ . Чем выше  $\alpha$ , тем лучше стабилизационные характеристики пламени. Увеличение поперечной площади занимаемой турбинным профилем за счет увеличения угла  $\beta^0$  приводит к увеличению рециркуляционной зоны. За счет повышения температуры за профи-

лем повышается эффективность поджога свежей топливно-воздушной смеси, что положительно отражается на стабилизации пламени.

При увеличении  $\beta$  до  $60^0$  коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  имеет значение 9,5, при  $\beta = 45^0$ ,  $\alpha = 9$ . Причем значительный рост стабилизации заметен при изменении угла с  $30^0$  до  $45^0$ . Многочисленные исследования уголковых стабилизаторов подтверждают результаты измерений.

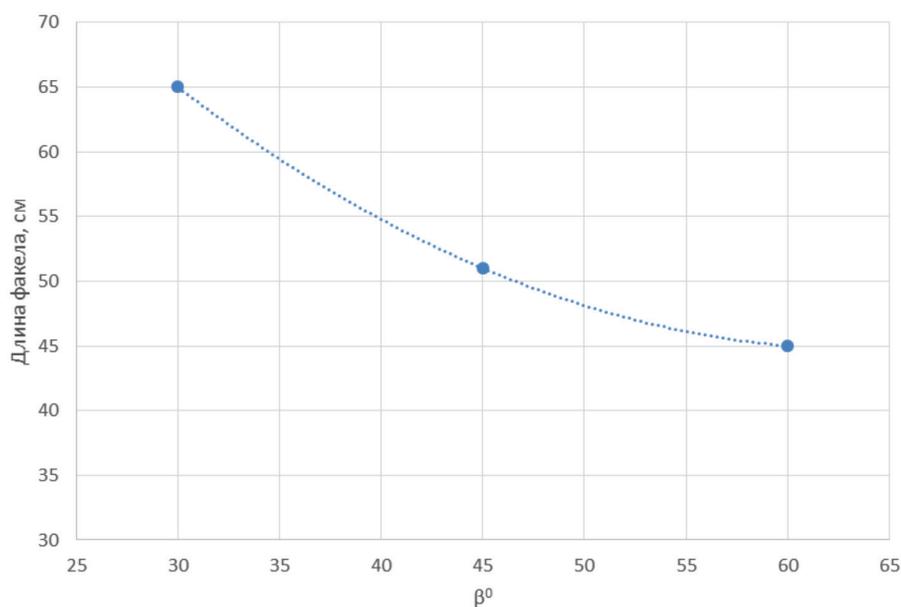


Рис. 6. Зависимость длины видимого факела от угла  $\beta^0$

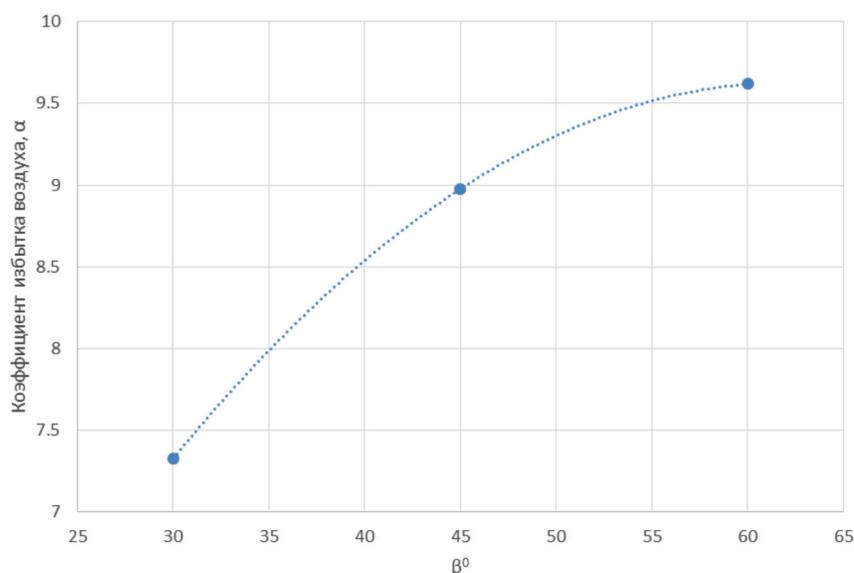


Рис. 7. Зависимость коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  при «бедном» срыве от угла  $\beta^0$

Другим важным показателем являются выбросы токсичных веществ. Наиболее токсичные из них – это оксиды азота и монооксид углерода. Монооксид углерода не рассматривался при исследованиях ввиду того, что они образуются в основном за счет большого недожога топлива. Предыдущие исследования показывают, что монооксид углерода при использовании плохообтекаемых тел имеет очень малые значения.

С другой стороны, образование оксидов азота имеет сложный характер, ввиду зависимости от нескольких параметров: температура в зоне горения, время нахождения газов в зоне горения и эффективность смешения топлива с воздухом.

Полученные результаты подтверждают теорию образования оксидов азота. При увеличении угла  $\beta$  до  $60^\circ$ , концентрация оксидов азота растет за счет увеличения температуры в зоне горения (рис. 4, 5) и за счет увеличения времени нахождения газов в зоне горения за счет развитой зоны рециркуляции.

Снижение же угла приводит к снижению концентрации оксидов азота, при  $\beta = 45^\circ$ , до 16 ppm. Снижение  $\beta = 30^\circ$  снижает концентрацию оксидов азота до 7 ppm. Данные подтверждают экспоненциальную зависимость концентрации оксидов азота от температуры. При росте температуры на 8% повышается концентрация оксидов азота на 128%.

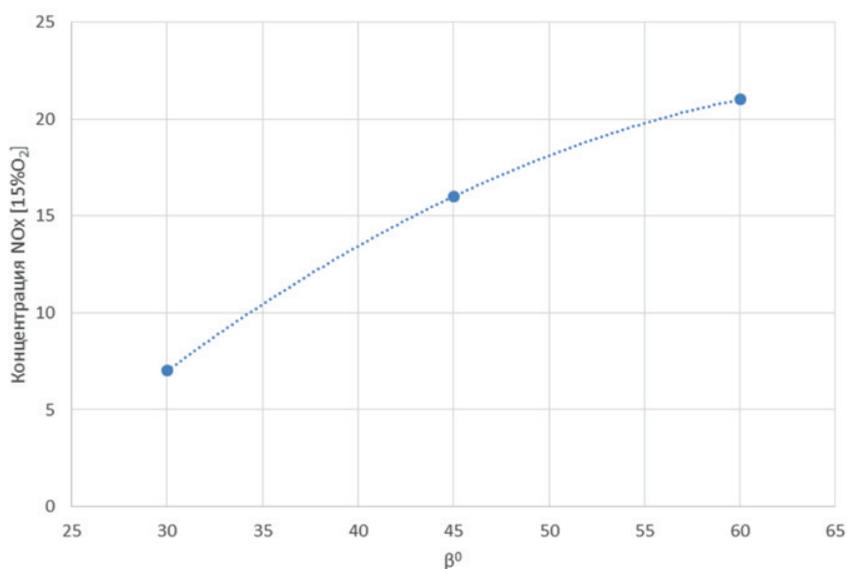
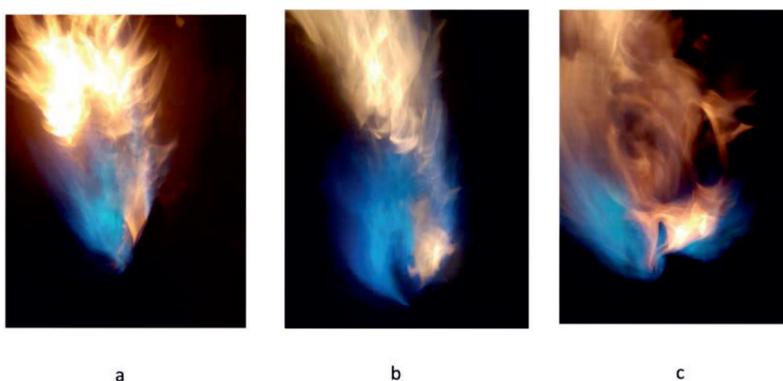


Рис. 8. Концентрация NOx от угла  $\beta^\circ$



$a - \beta = 30^\circ$ ,  $b - \beta = 45^\circ$ ,  $c - \beta = 60^\circ$

Рис. 9. Фотоснимки факелов за профилями турбинных лопаток

*Фотоснимки факелов*

На рис. 9 представлены фотоснимки факелов за профилями лопаток при различных углах  $\beta$ . Как видно из рис. 9, увеличение угла  $\beta$  приводит к значительному сокращению длины факела, а также к незначительному снижению светимости. Светимость факела в значительной степени зависит от нехватки воздуха и образованию частиц сажи, горение которых сопровождается желтым цветом. Увеличение поперечной площади уголка приводит к увеличению пламени синего цвета, что говорит о горении при значениях  $\alpha$  близких или равных стехиометрии. Видно, что зона рециркуляции, образующаяся при увеличении угла  $\beta$ , увеличиваются обратные токи, за профилем лопатки, что подтверждается предыдущими рисунками (температуры, оксиды азота). С точки зрения оптимизации процесса горения, учитывая температуры, стабилизацию и концентрации оксидов азота, наиболее оптимальным являются профили с углом  $\beta = 45^\circ$ .

**Заключение**

Проведенные эксперименты показывают, что турбинные профили являются перспективными для создания камер сгорания на базе хорошообтекаемых тел. Применение регулируемых накладок будет повышать эффективность при различных режимах работы газотурбинной установки. Показано, что увеличение угла  $\beta$  приводит к значительному сокращению длины факела, а также к незначительному снижению светимости, а также повышению температуры в зоне горения и образованию токсичных веществ. С точки зрения оптими-

зации наиболее рациональным выглядит применение турбинных профилей с  $\beta = 45^\circ$ . Проведенные эксперименты показывают, что необходим компромисс между стабилизацией и оксидами азота, ввиду того, что максимальная стабилизация достигается при режимах максимальных концентраций оксидов азота.

**Список литературы**

1. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания. М.: Мир, 1986. 566 с.
2. Aiwu Fan, Jianlong Wan, Yi Liu, Boming Pi, Hong Yao, Wei Liu. Effect of bluff body shape on the blow-off limit of hydrogen/air flame in a planar micro-combustor. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 62.5. P. 13–19.
3. Jianlong Wan, Jianlong Wan, Kaoru Maruta, Hong Yao, Wei Liu. Interactions between heat transfer, flow field and flame stabilization in a micro-combustor with a bluff body. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. Vol. 66. P. 72–79.
4. Jianlong Wan, Aiwu Fan, Kaoru Maruta, Hong Yao, Wei Liu. Experimental and numerical investigation on combustion characteristics of premixed hydrogen/air flame in a micro-combustor with a bluff body. *International journal of hydrogen energy*. 2012. Vol. 37. P. 19190–19197.
5. Michaels Dan. The impact of reactants composition and temperature on the flow structure in a wake stabilized laminar lean premixed  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$  flames, mechanism and scaling. *Combustion and Flame*. 2017. Vol. 176. P. 151–161.
6. Yunfei Yan. Numerical investigation on combustion characteristics of methane/air in a micro-combustor with a regular triangular pyramid bluff body. *International journal of hydrogen energy*. 2018. Vol. 43. P. 7581–7590.
7. Yiheng Tong. Effects of the position of a bluff-body on the diffusion flames: A combined experimental and numerical study. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 131. P. 507–521.
8. Умышев Д.Р., Достияров А.М., Туманов М.Е., Тютебаева Г.М., Результаты исследования уголковых стабилизаторов для камер сгорания // *Advances in Science and Technology: Сборник материалов 8-ой международной научно – практической конференции*. М., 2017. С. 159–160.
9. Umyshev Dias, Dostiyarov Abay, Tumanov Musagul, Quiwang Wang. Experimental investigation of v-gutter flame-holders. *Thermal Science*. 2017. Vol. 21.2. P. 1011–1019.