

УДК 621.438

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА ПОДАЧИ
ТОПЛИВА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ЗА ТУРБИННЫМИ ПРОФИЛЯМИ****Катранова Г.С.***Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, e-mail: gaziza.katranova@gmail.com*

В данной статье приведены результаты экспериментального исследования влияния угла φ подачи топлива на профиль лопатки с углом накладки β равным 45° . В рамках данного эксперимента анализировалось, как изменение угла φ подачи топлива воздействует на длину факела, температуры на выходе из камеры сгорания и образование оксидов азота. Рассматривалось три варианта подачи топлива: в первом варианте топливо подавалось под углом $\varphi = 0^\circ$, второй вариант подачи топлива подразумевал изменение угла φ до 15° , в третьем – угол φ подачи топлива на профиль был равным 30° . В результате экспериментов было выявлено, что увеличение угла φ подачи топлива на профиль лопатки приводит к повышению температуры на выходе из камеры сгорания, увеличению длины факела пламени и повышению концентрации оксидов азота. Полученные результаты позволяют подтвердить перспективность применения удобообтекаемых турбинных профилей для создания новых фронтальных устройств, положительное влияние регулируемых накладок на повышение эффективности процесса горения и пределы устойчивости горения, а также влияние изменения угла φ подачи топлива на турбинный профиль на качество перемешивания топлива с воздухом.

Ключевые слова: турбинные профили, оксиды азота, температура, горение**EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE FUEL SUPPLY ANGLE
ON THE COMBUSTION PROCESSES FOR TURBINE PROFILES****Katranova G.S.***Almaty University of Energy and Communications, Almaty, e-mail: gaziza.katranova@gmail.com*

This article presents the results of an experimental study of the influence of the fuel supply angle φ on the blade profile with a lining angle β equal to 45° . In the framework of this experiment, it was analyzed how a change in the fuel supply angle φ affects the length of the flame, the temperature at the outlet of the combustion chamber, and the formation of nitrogen oxides. Three fuel delivery options were considered: in the first embodiment, fuel was supplied at an angle of $\varphi = 0^\circ$, the second variant of fuel supply implied a change in the angle φ to 15° , and in the third, the angle φ of fuel supply to the profile was 30° . As a result of the experiments, it was found that an increase in the angle φ of fuel supply to the blade profile leads to an increase in temperature at the outlet of the combustion chamber, an increase in the length of the flame and an increase in the concentration of nitrogen oxides. The results obtained confirm the promising use of streamlined turbine profiles for the creation of new front-end devices, the positive effect of adjustable plates on increasing the efficiency of the combustion process and the limits of combustion stability, as well as the effect of changing the angle φ of the fuel supply on the turbine profile on the quality of mixing the fuel with air.

Keywords: turbine profiles, nitrogen oxides, temperature, burning

Население нашей планеты, по оценке ООН, в 2019 г. достигло показателя в 7,7 млрд чел. и будет только расти [1]. Такой рост численности человечества не может не влиять на рост производства и масштабов потребления, что оказывает значительное влияние на окружающую среду.

Перед промышленностью остро встает вопрос обеспечения населения необходимым количеством тепловой и электрической энергии, при этом не менее важны вопросы снижения нагрузки на экологию планеты. Поэтому исследования технологий сжигания газообразного топлива в газотурбинных установках изучаются мировым научным сообществом на протяжении многих лет [2, 3] и в современных реалиях не теряют своей актуальности [4–6].

Известно, что процессы подачи и подготовки топлива имеют первостепенное значение для горения и являются важной частью организации рабочего процесса в камерах сгорания. Безусловно, угол пода-

чи топлива также влияет на эффективность горения за профилями, и его выбор важен при разработке новых конструкции микрофакельных устройств.

Ранее автором, совместно с исследовательской группой, было проанализировано влияние угла β между турбинным профилем и накладкой на процессы горения в камере сгорания ГТУ [6]. На основании полученных экспериментальных данных и проведенного анализа было сделано заключение, что с точки зрения оптимизации процесса горения в камере сгорания ГТУ наиболее рационально применять турбинные профили с углом β между профилем и накладкой равным 45° .

Цель исследования: изучение влияния угла φ подачи топлива на турбинный профиль с накладкой в 45° на концентрацию оксидов азота, длину факела, стабилизацию пламени и температуры на выходе из камеры сгорания ГТУ. На рис. 2 представлен общий вид профиля.

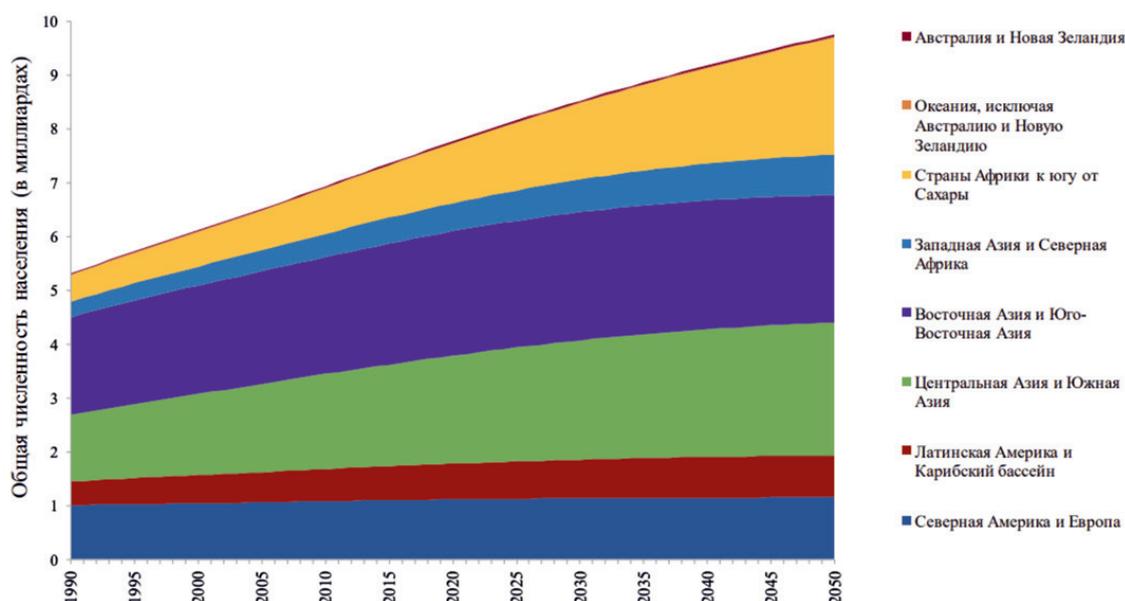


Рис. 1. Население мира по регионам, 1990–2050 гг. [1]

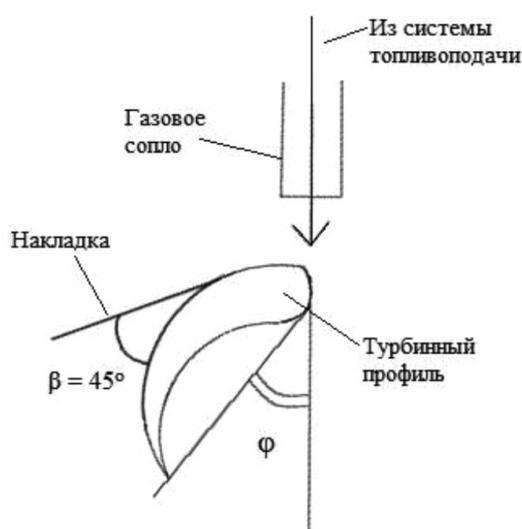


Рис. 2. Общий вид профиля

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования была использована экспериментальная установка. Ее принципиальная схема представлена на рис. 3.

Пропан находится в баллонах. Регулировка давления и расхода топлива осуществлялась клапаном, манометром и клапаном для снижения давления. Электрический расходомер использовался для контроля

расхода топлива, с точностью 1% по всему диапазону измерений.

В связи с тем, что при проведении эксперимента изучалось неперемешанное (диффузионное) горение, процесс перемешивания топлива с воздухом происходил непосредственно в зоне горения. За профилями установлено зажигание искрового типа, которое использовалось для поджога топлива. Замер температур осуществлялся посредством термопар (хромель-алюмель) диаметрами 0,5 мм, расположенных радиально на выходе из камеры сгорания. Для замеров параметров уходящих газов был использован стационарный газоанализатор с погрешностью 5%. Снимки производились цифровой фотокамерой с высоким разрешением.

В рамках данного исследования изучалось влияние угла φ подачи топлива на турбинный профиль с накладкой в 45° на процессы стабилизации, образования токсичных веществ. Пламя загоралось при отсутствии подачи воздуха, при минимальном расходе топлива, равном 0,0025 кг/с. Следующим этапом постепенно включался вентилятор, в котором с шагом в 1 м/с увеличивалась скорость подачи воздуха. При достижении нужной скорости от 2 до 12 м/с выставлялся максимальный расход топлива, равный 0,0075 кг/с. После этого расход топлива снижался с шагом в 0,0005 кг/с, для определения бедного срыва.

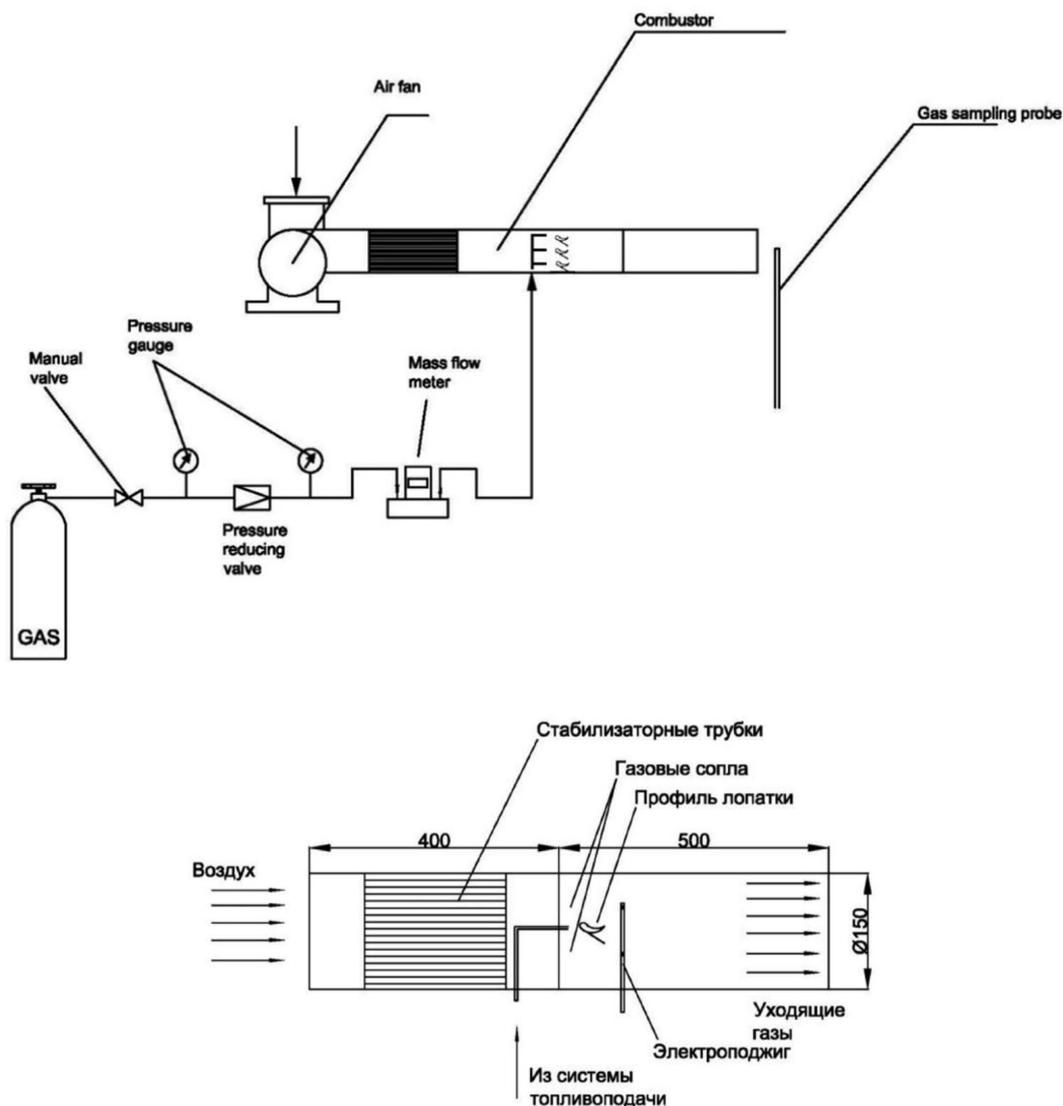


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки

Результаты исследования и их обсуждение

Рис. 4 иллюстрирует зависимость температур на выходе из камер сгорания от скорости подачи воздуха и угла φ подачи топлива на турбинный профиль.

Из графиков видно, что наибольшие показатели температуры на выходе из камеры сгорания мы получаем при скорости потока воздуха 4 м/с, при этом при угле φ подачи топлива на турбинный профиль равном 30° мы наблюдаем максимальное значение этого параметра.

Зависимость длины факела от угла φ подачи топлива и скорости подачи воздуха представлена на рис. 5.

Графики показывают, что чем развитее зоны обратных токов (рециркуляции), тем короче факел: большая часть топлива сжигается в рециркуляционной зоне благодаря большому втягиванию в нее топливно-воздушной смеси.

Одним из важнейших показателей современных газотурбинных установок является их экологичность. Наиболее интересными для нас являются выбросы таких токсичных веществ, как оксид азота и монооксид углерода. Однако последний мы не рассматриваем в рамках данного исследования в связи с тем, что он в основном образуется за счет большого недожога топлива.

На рис. 6 представлены графики зависимости концентрации NO_x от угла φ подачи топлива и скорости подачи воздуха.

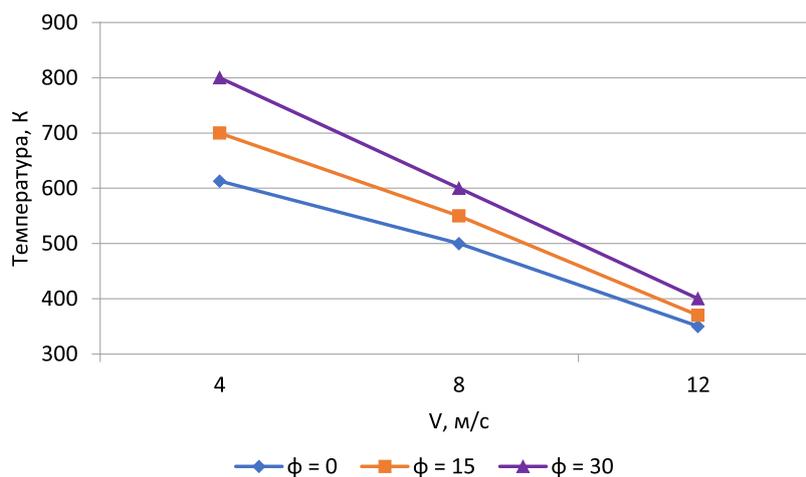


Рис. 4. Зависимость температуры на выходе из камеры сгорания от угла ϕ подачи топлива и скорости подачи воздуха

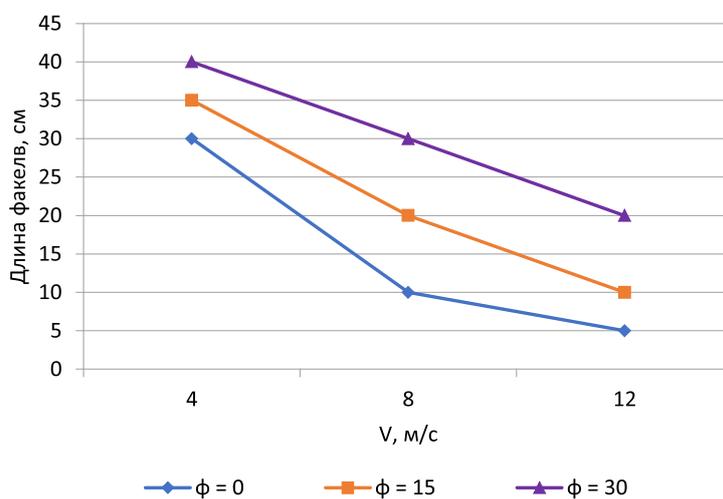


Рис. 5. Зависимость длины факела от угла ϕ подачи топлива и скорости подачи воздуха

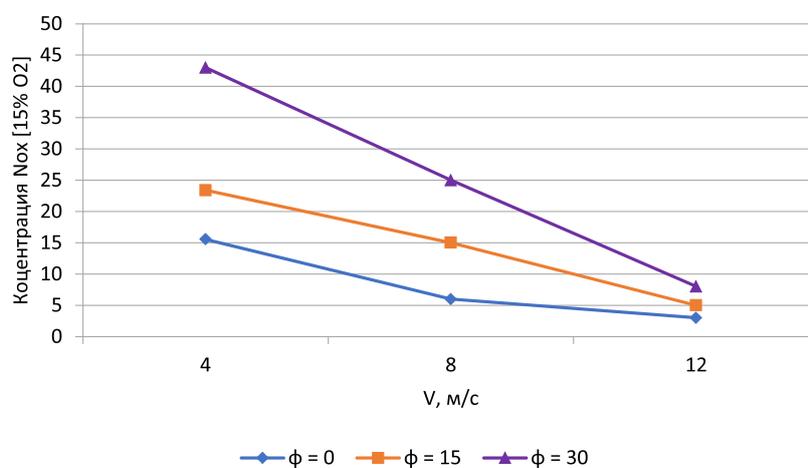


Рис. 6. Зависимость концентрации NOx от угла ϕ подачи топлива и скорости подачи воздуха

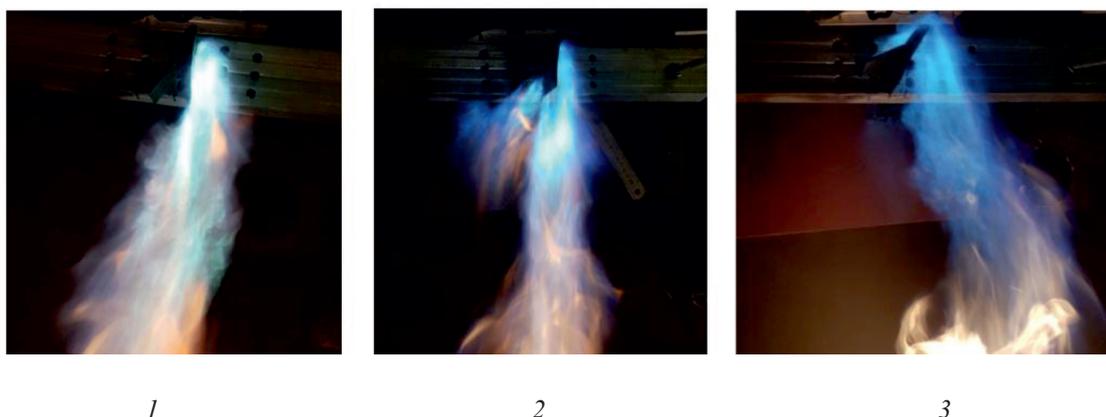


Рис. 7. Фотоснимки факелов за профилями лопаток.
Скорость потока $v = 4$ м/с; 1 – $\varphi = 0^\circ$; 2 – $\varphi = 15^\circ$; 3 – $\varphi = 30^\circ$

Полученные в ходе проведения эксперимента данные демонстрируют нам, что при росте температуры в зоне горения, развитой зоны рециркуляции и увеличения времени нахождения газов в зоне горения растет концентрация оксидов азота.

На рис. 7 представлены фотоснимки факелов за профилями лопаток.

Данные снимки позволяют нам увидеть, что увеличение угла φ подачи топлива на турбинный профиль приводит к уменьшению светимости факела. С точки зрения оптимизации процесса горения, учитывая температуры, концентрации оксидов азота, наиболее оптимальной является подача топлива на профиль с углом $\beta = 45^\circ$ под углом $\varphi = 15^\circ$.

Заключение

Эксперименты позволяют сделать вывод, что применение удобообтекаемых турбинных профилей является перспективным направлением для создания новых фронтных устройств. Регулируемые накладки в целом приводят к повышению эффективности процесса горения и влияют на пределы устойчивости горения, а изменение угла φ подачи топлива на турбинный профиль также влияют на качество перемешивания топлива с воздухом. Показано, что увеличение угла φ приводит к значительному повышению температуры в зоне горения, что

сказывается на росте образования токсичных веществ (оксида азота). Наиболее рациональной с точки зрения оптимизации выглядит подача топлива на профиль с углом $\beta = 45^\circ$ под углом $\varphi = 15^\circ$.

Список литературы

1. Антониу Гутерреш. Обзор и оценка Программы действий Международной конференции по народонаселению и развитию и ее вклада в осуществление последующей деятельности в связи с Повесткой дня в области устойчивого развития на период до 2030 года и проведение обзора хода ее реализации. E/CN.9/2019/2* [Электронный ресурс] URL: <https://undocs.org/pdf?symbol=ru/E/CN.9/2019/2> (дата обращения: 29.08.2019).
2. Lefebre A. Gas turbine combustion. М.: Mir, 1986. P. 566 (in Russian).
3. Khristich V.A., Lyubchik G.N. The influence of gas fuel type of combustion process of jet-stabilizer burners, in: Theory and practice of gas burning. Leningrad. 1972. P. 12–132 (in Russian).
4. Cheon Hyeon Cho, Gwang Min Baek, Chae Hoon Sohn, Ju Hyeong Cho. A numerical approach to reduction of NOx emission from swirl premix burner in a gas turbine combustor. Applied Thermal Engineering. 2013. vol. 59. P. 454–463.
5. Dias R. Umyshev, et al., Experimental investigation of v-gutter flameholders. Thermal Science. 2017. vol. 21 (2). P. 1011–1019.
6. Jianlong Wan, et.al., 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.
7. Достяров А.М., Умышев Д.Р., Кибарин А.А., Катранова Г.С. Экспериментальное изучение горения за турбинными профилями // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 5. С. 115–121.