



УДК 53.083.8

Е.М. Михалева, А.С. Михалев, И.А. Бамбуркина

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: omfi@tpri.ac.ru*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ХАРАКТЕРНЫХ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Разработана экспериментальная установка для исследования процессов, характерных в энергетических установках, на основе типичной установки теневого фонового метода (ТФМ). С этой целью установка ТФМ была оптимизирована, были подобраны параметры установки, позволяющие получать высокую точность, а также были разработаны инструкции по подбору параметров установки для конкретных исследуемых объектов.

ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД, КОНЦЕНТРАЦИЯ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более актуальным становится использование в промышленности бесконтактных мобильных и в то же время дешевых приборов для исследования различных промышленных процессов. Множество из этих процессов относится к процессам горения и сопровождается выделением различных газообразных веществ, концентрацию которых необходимо исследовать. Для исследования этих процессов подходят оптические методы, которые на данный момент не находят широкого применения в промышленности из-за дороговизны и сложности юстировки. Теневой фоновый метод является оптическим методом, но в то же время лишен этих недостатков, так как для него не требуется дорогостоящая аппаратура, а простота настройки экспериментальной установки позволяет легко использовать его в полевых условиях. Целью данной работы было создать экспериментальную установку, позволяющую исследовать модели истечения газового топлива из сопла, а также процессы горения газообразного топлива.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ИЗ СОПЛА

Экспериментальная установка

Исследование модели истечения газового топлива из сопла проводилось на экспериментальной установке, представленной на рис. 1, которая состояла из источника света (2), фонового экрана (1), датчиков концентрации газа (4), газоанализатора (5), исследуемого объекта (3), объектива (7), цифровой видеокамеры (8) и компьютера (6).

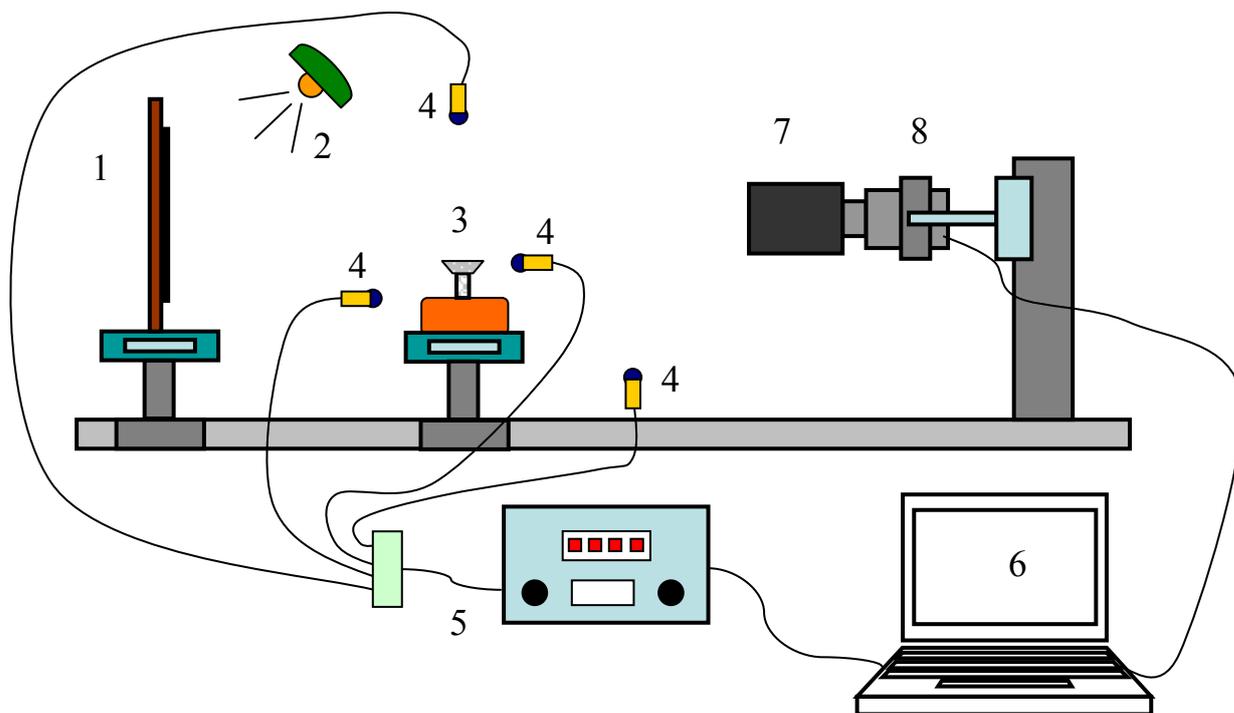


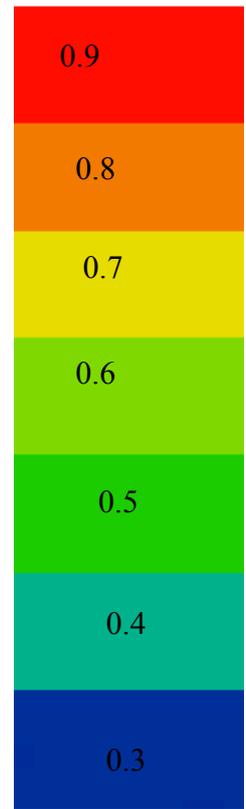
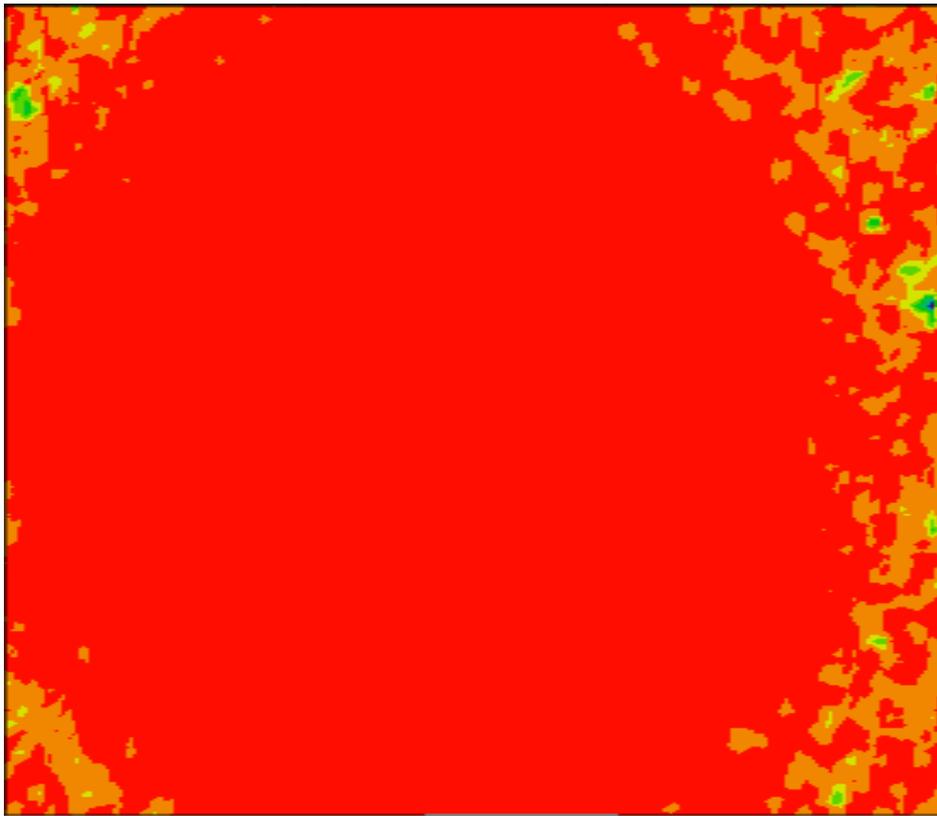
Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – фоновый экран, 2 - источник света, 3 – исследуемый объект, 4 - датчики концентрации газа, 5 - газоанализатор, 6 – компьютер, 7 - объектив, 8 - цифровая видеокамера

Экспериментальные исследования влияния параметров экспериментальной установки на погрешности

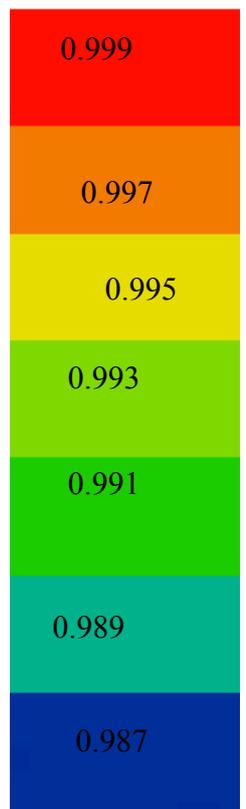
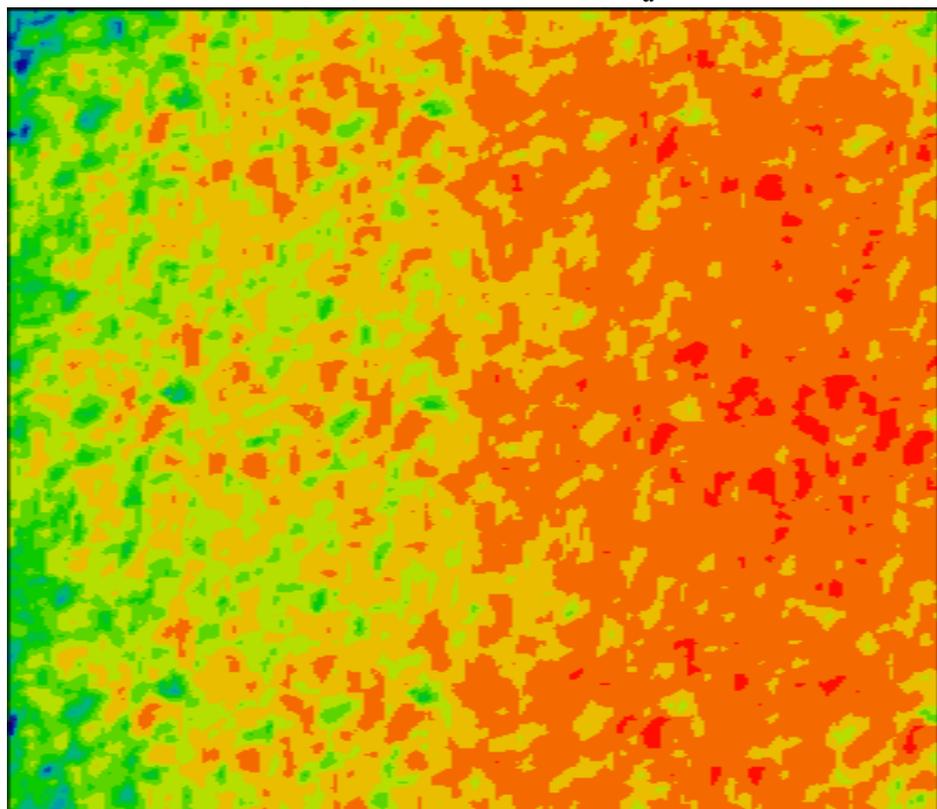
Было проведено несколько экспериментов с различными параметрами экспериментальной установки (числами диафрагмы и освещенностью), которые показали, что, так как исследуемые градиенты концентрации, а, соответственно, и смещения деталей фонового экрана малы, то при недостаточной освещенности и большом числе диафрагмы (например, 8) погрешности, возникающие из-за аберраций, примерно равны по величине исследуемому эффекту.

Для исследования возникающих аберраций при разных параметрах экспериментальной установки была произведена регистрация нескольких серий из 100 изображений, во время каждой из которых исследуемый объект отсутствовал, а условия регистрации не изменялись, что означало, что после кросскорреляционной обработки любых двух изображений из одной серии поле коэффициентов корреляции должно было получиться однотонным (красного цвета), что соответствовало бы коэффициенту корреляции равному 1. Однако, при разной освещенности и числе диафрагмы поле коэффициентов корреляции получалось различным (рис. 2), но **не** в одном случае полностью не совпадало с предсказанным результатом.

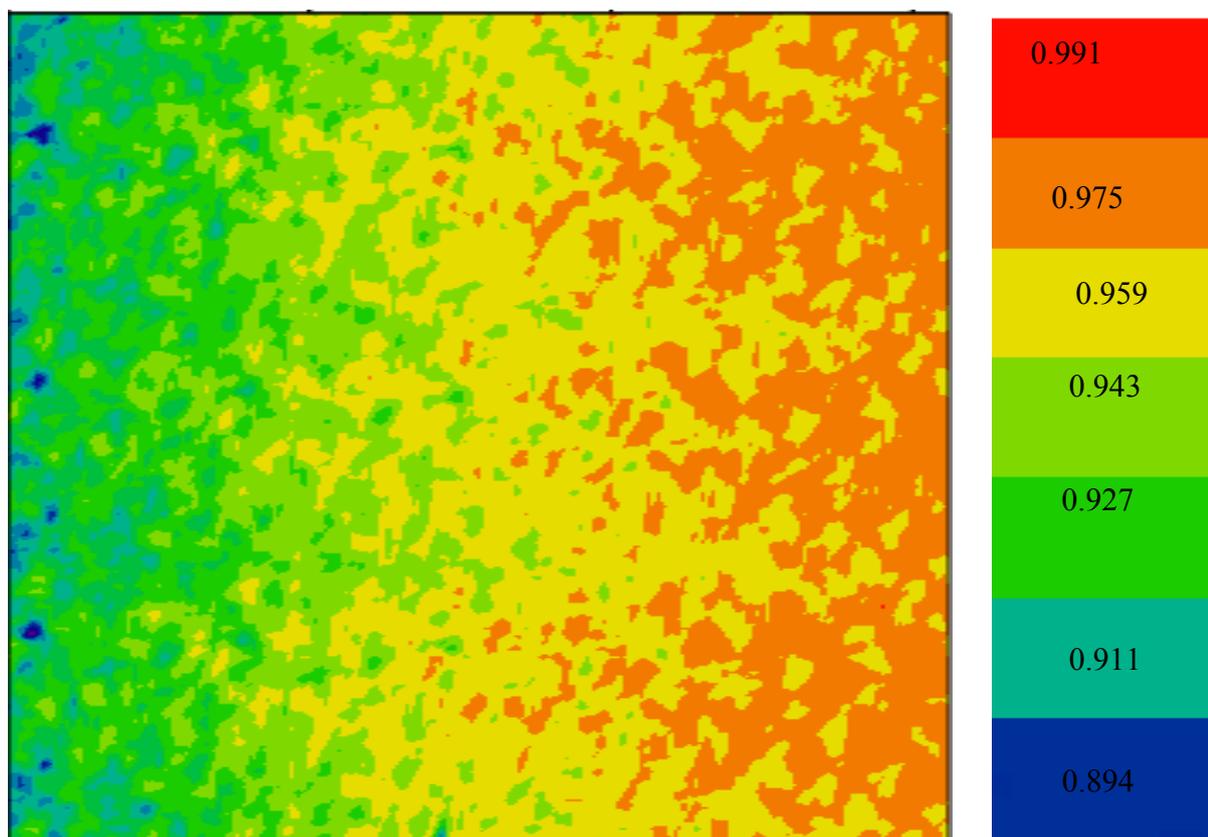
Из результатов абберационных исследований следует, что наименьшее число погрешностей из-за аббераций возникает при хорошей освещенности и полностью открытой диафрагме, но в то же время при полностью открытой диафрагме уменьшается глубина резкости, что также негативно отражается на результатах эксперимента, поэтому для дальнейших экспериментальных исследований модели истечения газообразного топлива из сопла была выбрана конфигурация экспериментальной установки с хорошей освещенностью и числом диафрагмы 8. Так как источник света находился сбоку от исследуемой области, то на всех последующих изображениях погрешность с одного бока картины слегка превышает погрешность с другого бока.



a



b



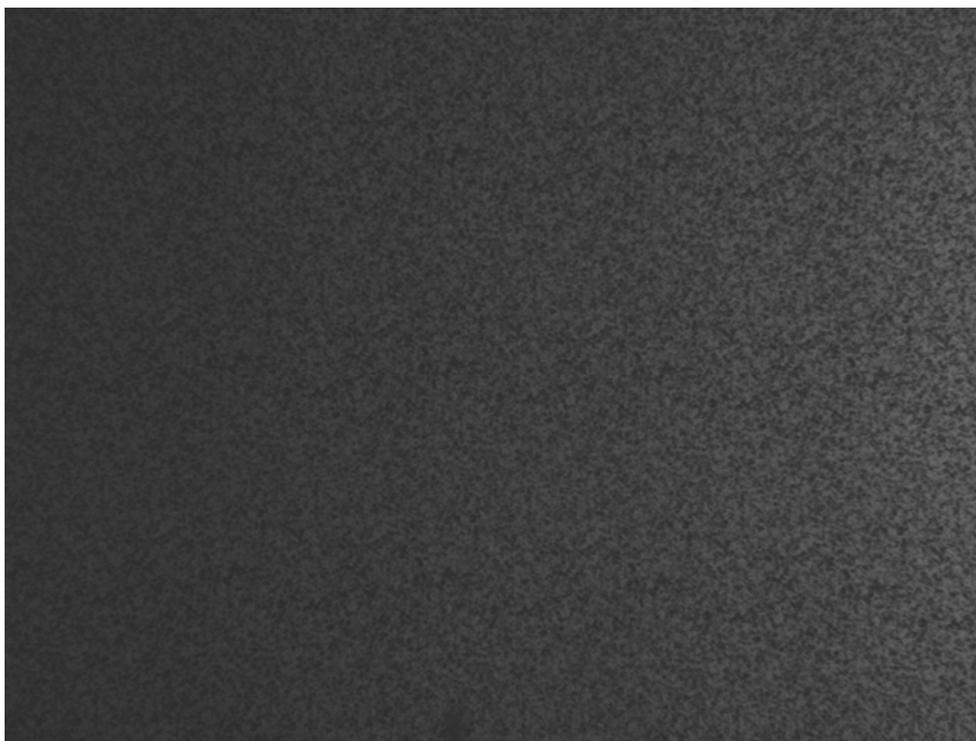
в

Рис. 2. Поверхности коэффициентов корреляции, иллюстрирующие погрешности определения коэффициентов корреляции, возникающие при различных конфигурациях экспериментальной установки: а – недостаточная освещенность и число диафрагмы 8, б – хорошая освещенность и открытая диафрагма, в – хорошая освещенность и число диафрагмы 8

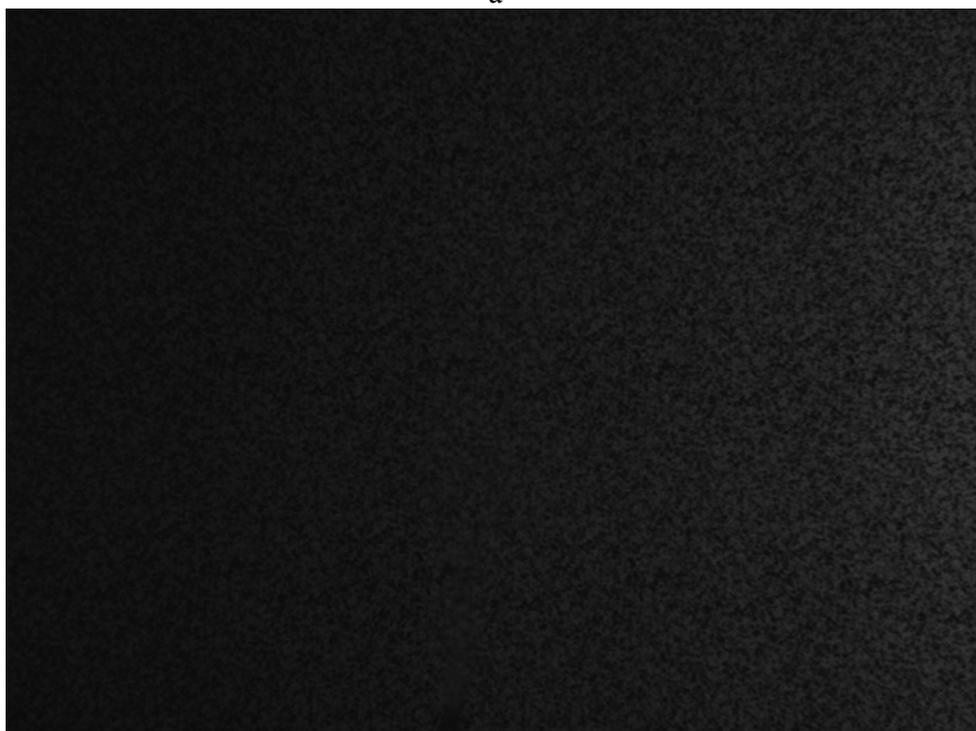
Экспериментальные исследования модели истечения газового топлива из сопла

В качестве модели истечения газового топлива из сопла были использованы несколько видов газовых баллонов с разными видами сопел (рассекателей).

В первом эксперименте в качестве объекта исследования был использован баллон с газом для заправки зажигалок с конусообразным наконечником, направленным вертикально вверх. На цифровую видеокамеру проводилась регистрация серии из 100 изображений со скоростью 26 кадров в секунду, в начале которой газ из баллона не истекал, а во время которой производилось нажатие на наконечник баллона, что приводило к возникновению вертикальной струи газа. В то же время регистрировались показания датчиков концентрации газа, которые находились снизу и сверху области опроса. Для последующей обработки в качестве опорного изображения использовалось изображение предшествующее нажатию на наконечник баллона и возникновению струи (рис. 3а), а в качестве исследуемых изображений – серия из двух изображений сразу после нажатия на наконечник баллона и возникновения струи. Одно из изображений сразу после нажатия на наконечник баллона и возникновения струи представлено на рис. 3 б. На изображении при наличии струи область наибольших градиентов концентрации можно видеть как небольшое размытие деталей изображения фонового экрана.



а



б

Рис. 3. Экспериментальные изображения: а – в отсутствие исследуемого объекта, б – при наличии исследуемого объекта

Результаты кросскорреляционной обработки представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, экспериментальная установка на основе теневого фонового метода позволяет качественно визуализировать поле концентраций, характерное для процессов в энергетических установках.

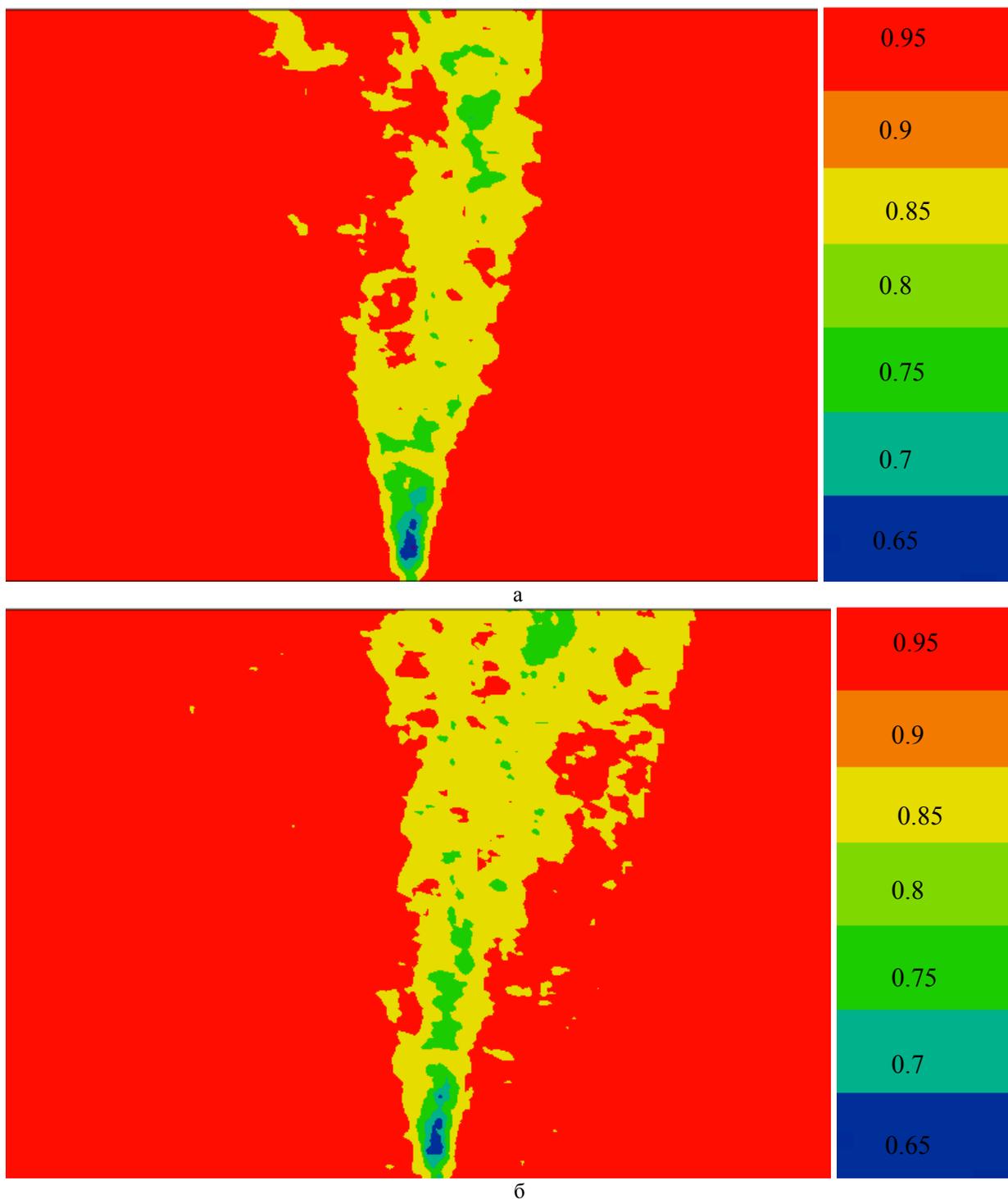


Рис. 4. Поверхности коэффициентов корреляции для разных моментов истечения газа из сопла: а – начало процесса, б – стационарное состояние газовой струи

Также с помощью программы PIVView были получены векторные поля, векторы которых пропорциональны смещению элементов фонового экрана и, соответственно, градиентам концентрации. Цвет векторов в векторном поле соответствует их размеру от 0 пикселей при синем цвете до 1 пикселя при красном.

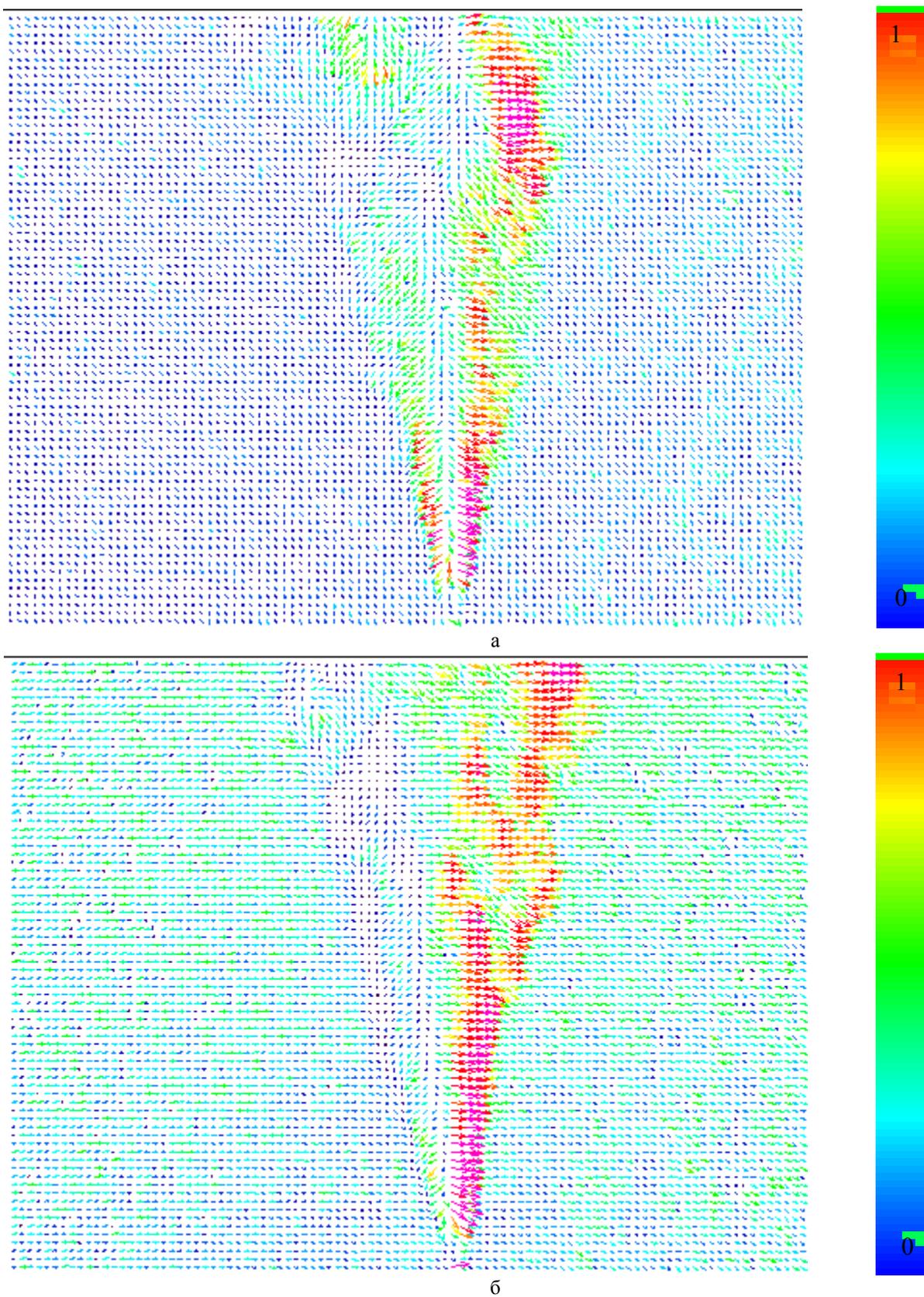


Рис. 5. Векторные поля для разных моментов истечения газа из сопла:
а – начало процесса, б – стационарное состояние газовой струи

Далее, используя полученные поля коэффициентов корреляции и данные с датчиков концентрации газа в качестве граничных значений, проводилась нормировка на концентрацию. Поля концентраций, полученные в результате нормировки, представлены на

рис. 6. Области красного цвета соответствуют 100% концентрации газа, а области синего цвета соответствуют 0% газа.

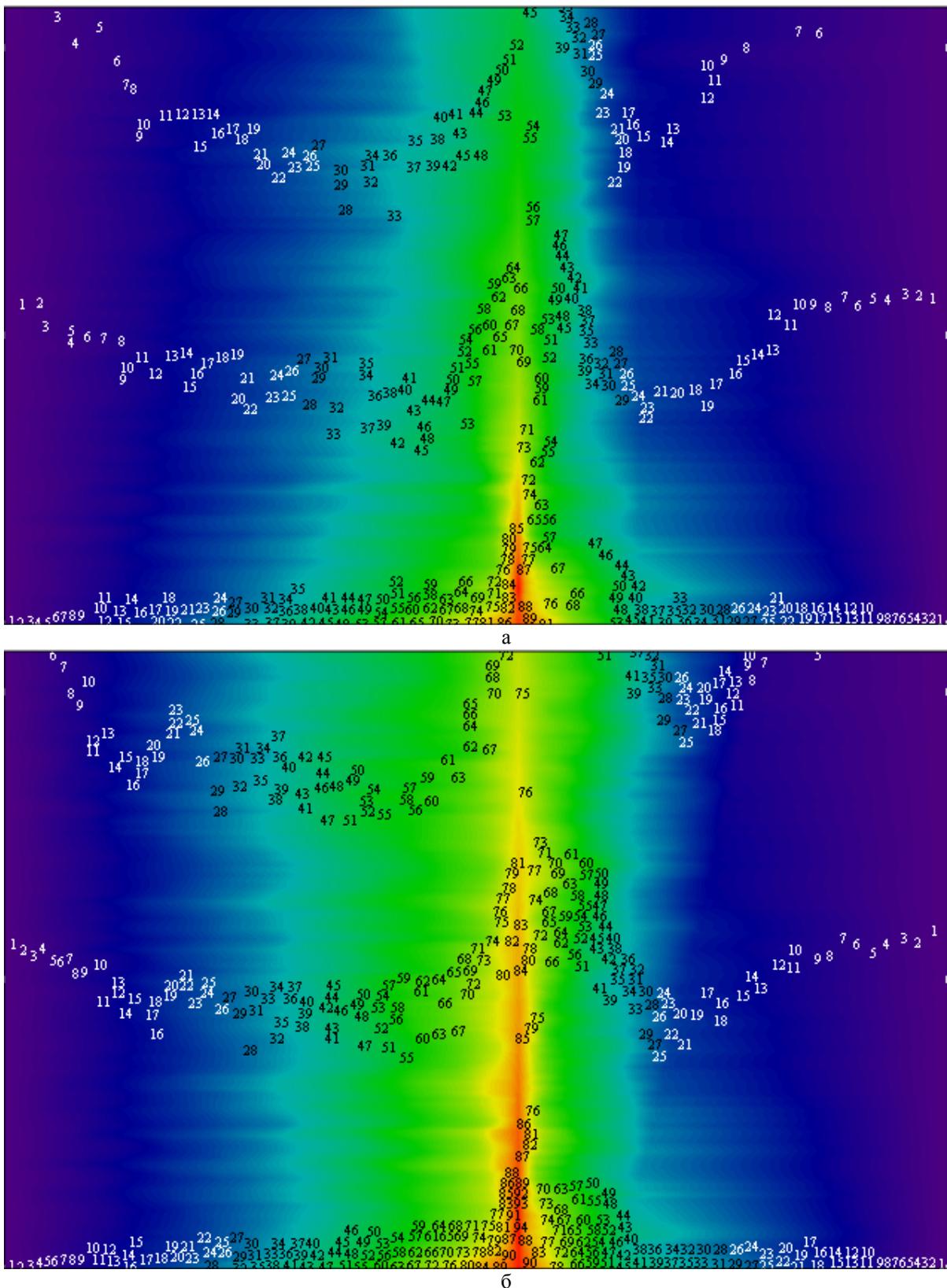


Рис. 6. Поля концентраций для разных моментов истечения газа из сопла:
а – начало процесса, б – стационарное состояние газовой струи

Таким образом, показана возможность визуализации полей концентрации, а также получения количественных концентрационных полей с помощью оптимизированной установки теневого фонового метода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

Экспериментальная установка

Исследование модели горения газового топлива проводилось на экспериментальной установке, представленной на рис. 7, которая состояла из фонового экрана (1), источника света (2), исследуемого объекта (3), объектива (4), цифровой видеокамеры (5) и компьютера (6).

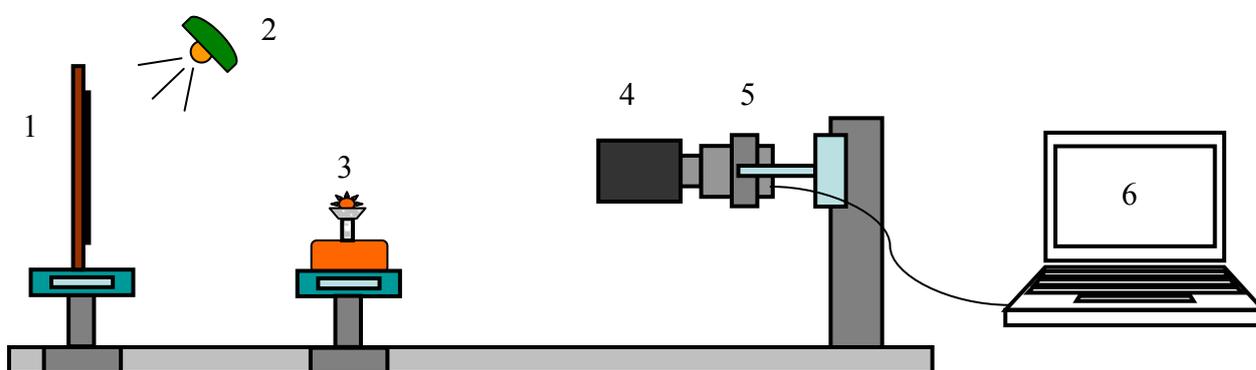


Рис. 7. Схема экспериментальной установки: 1 – фоновый экран, 2 - источник света, 3 – исследуемый объект, 4 - объектив, 5 –цифровая видеокамера, 6 – компьютер

С целью исследования модели горения газового топлива было проведено несколько серий экспериментов, в качестве объекта исследования в которых использовалась газовая горелка с различными видами рассекателей.

В первом эксперименте исследовалось горение на примере газовой горелки без рассекателя (рис. 8).

Из рис. 8 видно, что при горении пламя локализовано между лапками горелки. Для исследования температурного поля пламени регистрировалось изображение горящей горелки на тепловизор (рис. 9).



Рис. 8. Фотография газовой горелки без рассекателя в процессе горения

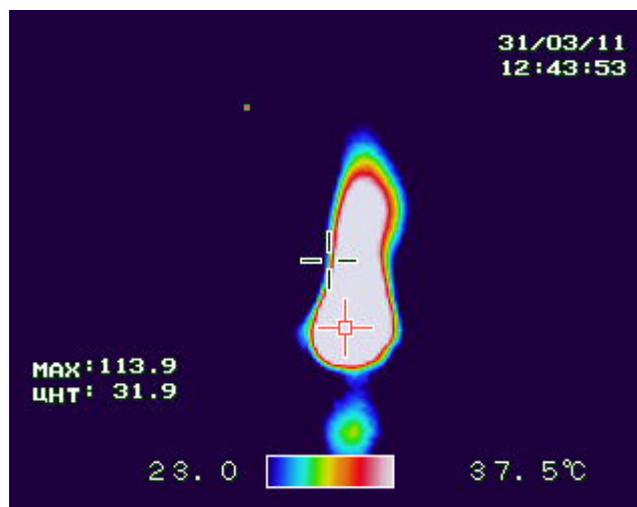


Рис. 9. Изображение с тепловизора

Как видно из рис. 9, с помощью тепловизора можно определить температуру в разных точках пламени и также видно, что пламя локализовано между лапками горелки, но маленькое разрешение не позволяет качественно визуализировать структуру пламени и потоков горячего воздуха, поднимающихся на горелкой, поэтому были проведены дополнительные исследования с помощью теневого фонового метода. Для этого регистрировались две серии изображений: первая – когда вентиль горелки был закрыт, газ из горелки не выходил, и отсутствовало горение, а вторая – когда вентиль горелки был открыт, и присутствовало горение газа, истекающего из горелки.

Далее проводилась кросскорреляционная обработка экспериментальных изображений. Результаты обработки представлены на рис. 10.

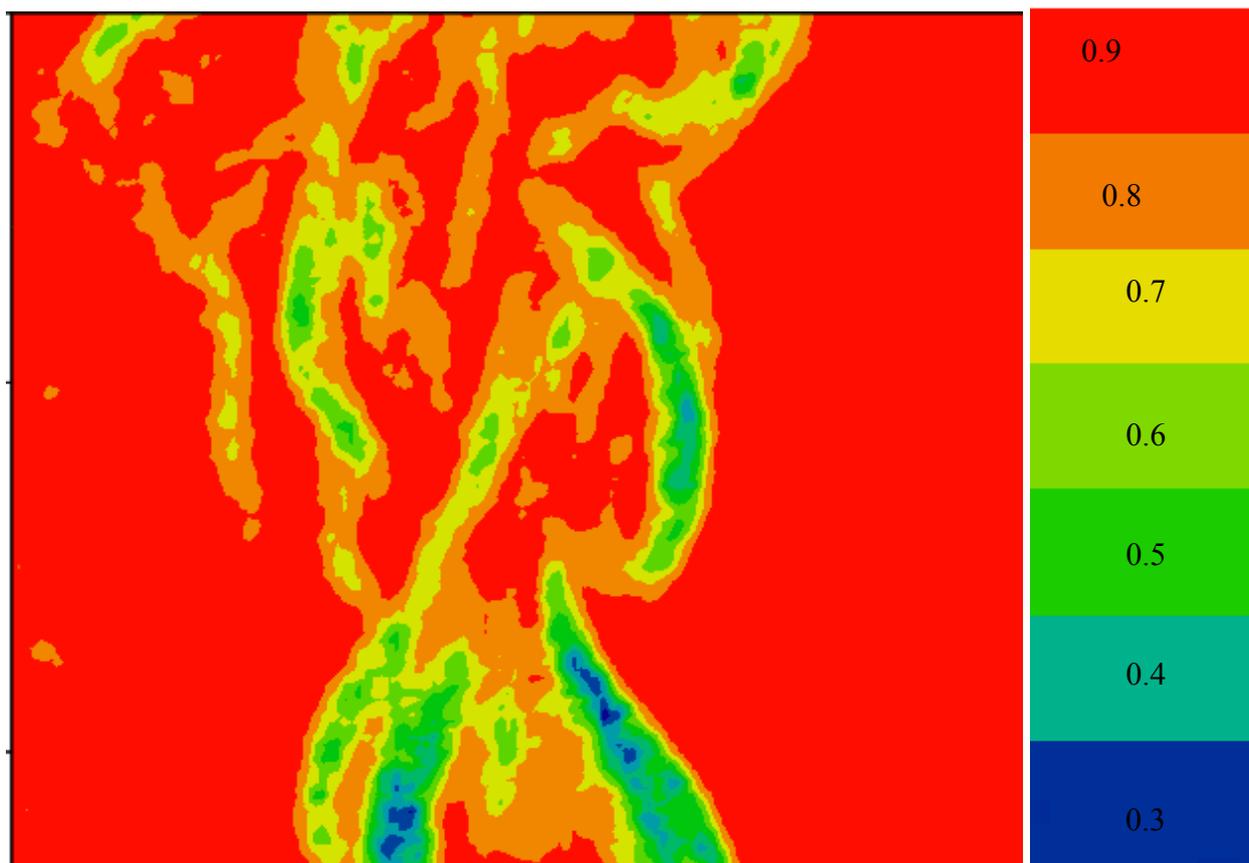


Рис. 10. Поверхность коэффициентов корреляции

Из рис. 10 видно, что с помощью ТФМ структура пламени и потоков горячего воздуха над ним четко визуализируется, то есть можно различить струи, идущие от отдельных отверстий горелки

Также была проведена обработка экспериментальных изображений с помощью программы PIVView. Результат обработки представлен на рис. 11. Цвет векторов соответствует их величине (от синего при смещении равному 0 пикселей до красного при смещении равном 1 пикселю). Векторы векторного поля пропорциональны градиентам температуры.

Во втором эксперименте на лапках горелки был зафиксирован рассекаТЕЛЬ сложной формы (рис. 12). Из рис. 12 видно, что при горении основное пламя проходит через центр рассекаТеля, образуя узкую струю в момент прохождения через рассекаТель, а затем поднимается над ним, расширяясь. Для исследования температурного поля пламени регистрировалось изображение горячей горелки с рассекаТелем сложной формы на тепловизор (рис. 13).

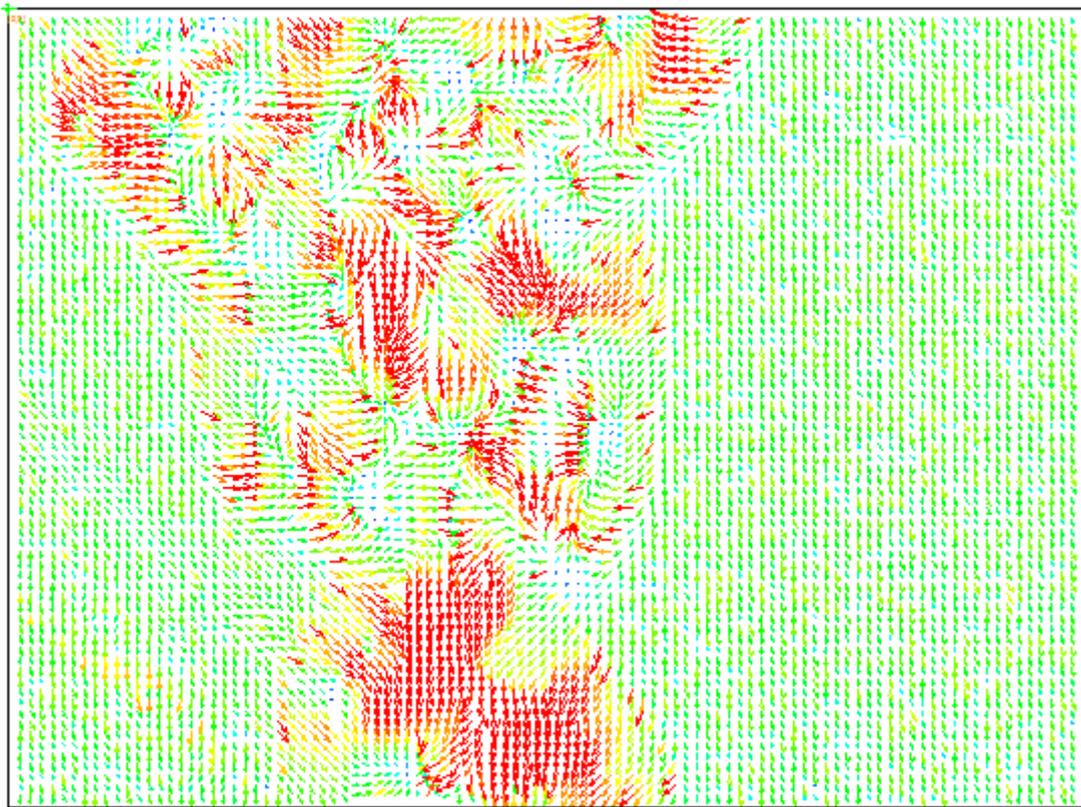


Рис. 11. Векторное поле



Рис. 12. Фотография газовой горелки с рассекателем сложной формы в процессе горения

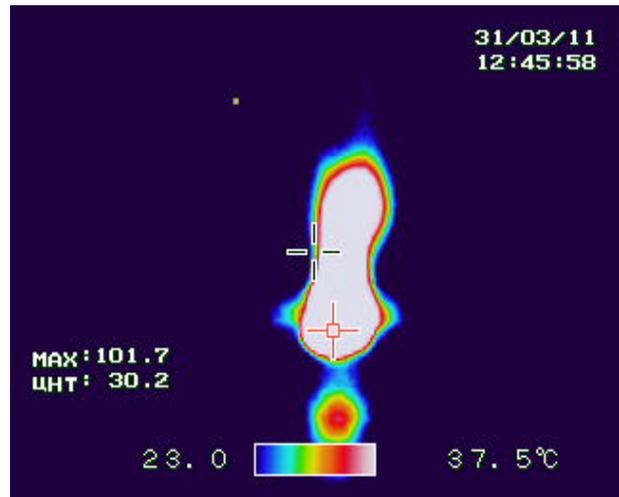


Рис. 13. Изображение с тепловизора

Как видно из рис. 13, с помощью тепловизора можно определить температуру в разных точках пламени и также видно, что пламя поднимается над горелкой сначала сужаясь (до момента прохождения через рассекатель), а потом расширяясь. В то же время тепловизор не позволяет визуализировать структуру пламени и потоков горячего воздуха, обтекающие рассекатель, поэтому были проведены дополнительные исследования с помощью теневого фонового метода. Для этого регистрировались две серии изображений: первая – когда вентиль горелки был закрыт, газ из горелки не выходил, и отсутствовало горение, а вторая – когда вентиль горелки был открыт, и присутствовало горение газа, истекающего из горелки.

Далее проводилась кросскорреляционная обработка экспериментальных изображений. Результаты обработки представлены на рис. 14.

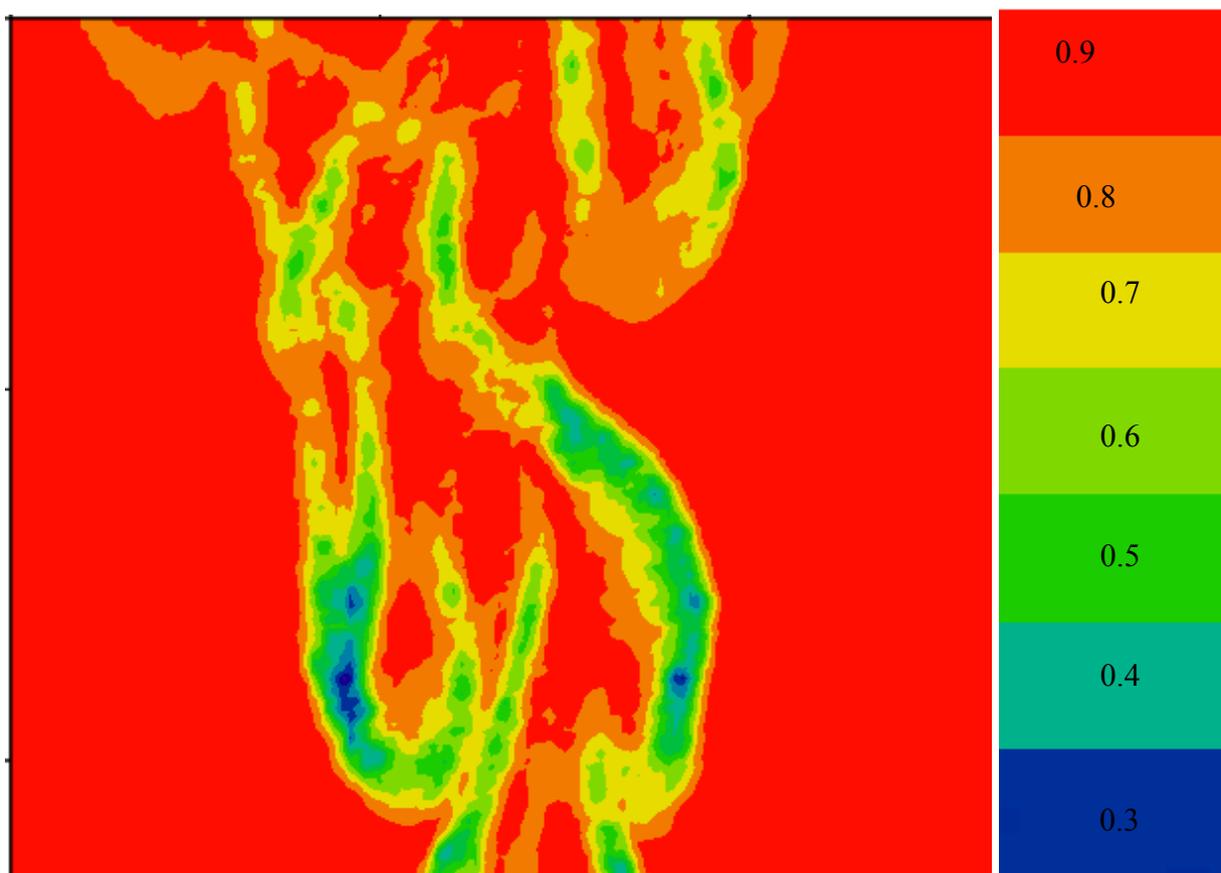


Рис. 14 – Поверхность коэффициентов корреляции

Из рис. 14 видно, что с помощью ТФМ структура пламени и потоков горячего воздуха над рассекателем четко визуализируется, то есть можно различить струи, обтекающие рассекатель.

Также была проведена обработка экспериментальных изображений с помощью программы PIVView. Результат обработки представлен на рис. 15. Цвет векторов соответствует их величине (от синего при смещении равному 0 пикселей до красного при смещении равном 1 пикселю). Векторы векторного поля пропорциональны градиентам температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была разработана экспериментальная установка для исследования процессов, характерных в энергетических установках, на основе типичной установки теневого фонового метода. С этой целью типичная установка теневого фонового метода была оптимизирована: были добавлены дополнительные элементы для измерения концентрации в нескольких точках, позволяющие задать граничные условия, были подобраны параметры, позволяющие фиксировать даже небольшие смещения элементов фонового экрана. Для проверки работоспособности разработанной экспериментальной установки были проведены исследования модели истечения газового топлива из сопла и модели горения газового топлива, которые показали, что данная установка позволяет измерять концентрацию газообразных веществ, а также визуализировать процессы горения. Были разработаны рекомендации по подбору параметров установки для конкретных объектов исследования.

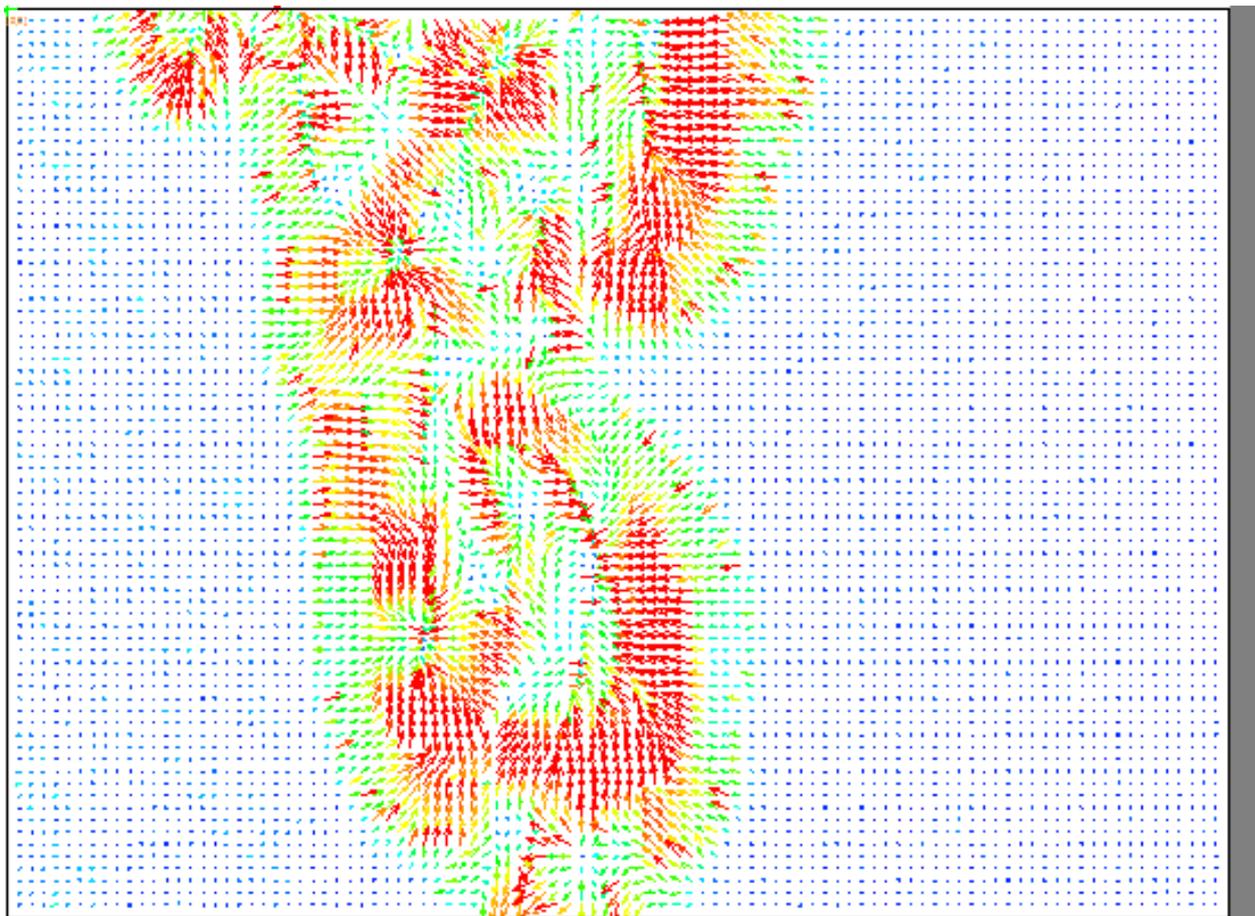


Рис. 15. Векторное поле

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Попова Е.М., Скорнякова Н.М.** Оптическая визуализация процессов тепломассообмена в жидкостях // Вестник МЭИ. – 2008, №2, издательство МЭИ. С. 104–108.
2. **Popova E.M., Rinkevichyus B.S., Skornyakova N.M., Udalov A.V.** Background oriented schlieren (BOS) method for vortex investigation during the airplane landing and around wings. Book of abstracts of Advanced In-flight Measurement Techniques Final Workshop. 2009.
3. **Мансурова Н.Г., Михалев А.С., Попова Е.М.** Исследование температурных полей теньвым фоновым методом // «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010»: Материалы 6-ой международной молодежной научно-технической конференции, 19-24 апреля 2010г. - Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010 – 519с.
4. **Popova E.M., Kompnhans J., Skornyakova N.M.** Investigation of the accuracy of the background oriented schlieren method. Proceedings of ISFV13 - 13th International Symposium on Flow Visualization, July 1-4, 2008, Nice, France, Paper 263.

E.M. Mikhaleva, A.S. Mikhalev, I.A. Bamburkina

*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

EXPERIMENTAL SETUP FOR MODELING OF PROCESSES TYPICAL FOR GENERATING UNITS

In th present work experimental setup for investigation of processes typical for generating units on the basis of a typical background oriented schlieren (BOS) method setup was developed. In order to do this the BOS method setup was optimized, setup parameters allowing to achieve high accuracy were chosen, and instructions for setup parameter selection for specific investigated objects were developed.

BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN METHOD, CONCENTRATION, VISUALIZATION