

# ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПЕРЕНОСА ТУРБУЛЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕД С ПОМОЩЬЮ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

С. С. Рыжков, доцент, канд. техн. наук

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Исследованы газодинамика и теплоперенос турбулентных газовых сред с помощью голографической интерферометрии. Используются современные теоретические (с помощью программы Ansys) и экспериментальные (на специально разработанной установке, с применением визуализации потока) направления исследований характеристик потока в элементах газоочистных устройств. Комплексное использование перечисленных методов дает возможность получить качественную и количественную информацию о гидродинамических характеристиках потока и совершенствовать газоочистные устройства.

**Ключевые слова:** газодинамика, голография, турбулентная среда, теплоперенос.

**Анотація.** Досліджені газодинаміка і теплоперенос турбулентних газових середовищ за допомогою голографічної інтерферометрії. Використані сучасні теоретичні (за допомогою програми Ansys) та експериментальні (на спеціально розробленій установці, з використанням візуалізації потоку) напрямки досліджень характеристик потоку в елементах газоочисних пристроїв. Комплексне використання перерахованих методів дає можливість одержати якісну та кількісну інформацію про гідродинамічні характеристики потоку і вдосконалити газоочисні пристрої.

**Ключові слова:** газодинаміка, голографія, турбулентне середовище, теплоперенос.

**Abstract.** The research of gas dynamics and heat transfer of turbulent gas environment by means of holographic interferometry is performed. The modern theoretical and experimental research concepts of the flow characteristics in gas-cleaning system elements are used. For the experimental research the flow visualization is used on the basis of holographic interferometry by means of specially designed unit, and the Ansys program is used for the theoretical research. The multiple use of the methods mentioned gives an opportunity to get the qualitative and quantitative information on hydrodynamic flow characteristics and develop the gas-cleaning units.

**Keywords:** gas dynamics, holography, turbulent environment, heat transfer.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В последнее время вопросы очистки газовых выбросов приобретают особую актуальность. Источниками загрязнения атмосферы — генерации технологических аэрозолей — в большинстве случаев являются энергетические установки стационарных и транспортных средств, металлургические и химические предприятия.

Поступление аэрозольных сред после энергетического оборудования в окружающую среду вызывает загрязнение атмосферы и потерю дорогостоящих материалов, поэтому их улавливание и возвращение в технологический процесс позволяет решать как экологические, так и ресурсосберегающие проблемы. Для этих целей необходимо создавать высокоэффективное газоочистное

оборудование, использующее различные механизмы очистки. Разработка моделей и методов исследований, позволяющих производить расчеты гидродинамической обстановки и визуализацию потока в элементах газоочистных устройств, создает основу для повышения их эффективности. К таким элементам следует отнести системы струй, обтекающих неизотермические каналы, что широко используется в маслоотделителях систем суфлирования ГТД и очистителях сжатого воздуха [4, 5].

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Движение потоков в реальных струйных элементах газоочистителей, где имеют место значительные градиенты скоростей и концентраций в продольном и поперечном направлениях, описывается эллиптическими дифференциальными уравнениями, которые решаются конечно-разностными методами. Для практических приложений наиболее эффективными считают методы, основанные на усреднении системы уравнений в частных производных, описывающих универсальные законы сохранения массы, энергии, импульса в турбулентной системе [4, 5]. Эта система должна быть дополнена уравнениями состояния и связи параметров, а также начальными и граничными условиями. Наибольший прорыв в этом направлении произошел в связи с разработкой современных пакетов прикладных программ типа Ansys, которые позволили численным методом решать сложные практические задачи газодинамики аэрозольных сред.

Для визуализации гидродинамической и тепловой обстановки в элементах газоочистных устройств следует считать перспективным метод голографической интерферометрии [4]. Попытки визуализации потока без сравнения с теоретическими расчетами сделаны в работах [1–3, 6, 7]. Для верификации полученных данных представляет интерес комплексный подход — одновременное выполнение теоретических расчетов и их подтверждение высококачественным экспериментом.

### ЦЕЛЬ НАСТОЯЩЕЙ РАБОТЫ

Цель статьи — подтверждение эффективности комплексного исследования характеристик газового потока в элементах газоочистных устройств современными расчетными пакетами прикладных программ и методом голографической интерферометрии.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования осуществлялись с помощью разработанной экспериментальной голографической установки и на основе адаптированной математической модели процесса при помощи пакета Ansys. Схема струйного элемента газоочистного устройства и 3D модель рабочего канала показаны на рис. 1.

### Экспериментальные исследования

Исследование гидродинамических и теплофизических процессов методом голографической интерферометрии.

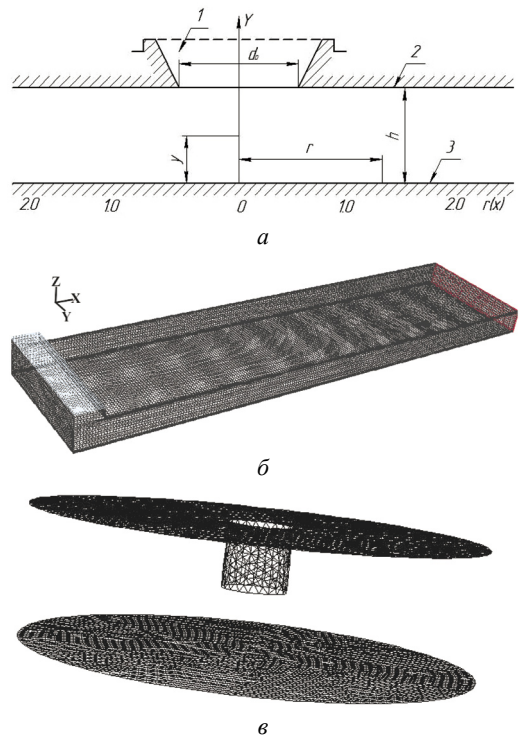


Рис. 1. Струйный элемент газоочистного устройства:

*a* — схема канала; *б* — 3D плоский канал; *в* — 3D цилиндрический канал;  
1 — входное сопло; 2, 3 — верхняя и нижняя стенки

графической интерферометрии основано на фиксации на кинограммах изменения распределения плотности газа  $\rho$ , т. е. массы единицы объема газа. Плотность  $\rho$  связана с показателем преломления газа соотношением Гладстона–Дейла

$$n - 1 = K\rho, \tag{1}$$

где  $K$  — постоянная Гладстона–Дейла, зависящая от свойств газа,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

В большинстве случаев плотность газа можно вычислить с помощью уравнения идеального газа

$$\rho = \frac{Mp}{RT}, \tag{2}$$

где  $T$  — абсолютная температура, К;  $p$  — давление, Па;  $M$  и  $R$  — молекулярная масса газа,  $\text{кг}/\text{кмоль}$ , и универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ .

Подставляя значения для плотности из (1) в (2), получим связь, которая определяет показатель преломления света  $n$  и связана с плотностью:

$$n - 1 = \frac{KMp}{RT}.$$

Таким образом, наклон кривой, представляющей зависимость показателя преломления от температуры, будет

$$\frac{\partial n}{\partial T} = \frac{-KMp}{RT^2}. \tag{3}$$

В газовых потоках при числах Прандтля, близких к единице, наблюдается аналогия

между гидродинамическими и тепловыми процессами. В этом случае по характеристикам теплового пограничного слоя можно судить о гидродинамическом пограничном слое. Температурное поле в слое при  $p = \text{const}$  однозначно определяет как распределение плотности газа в нем, так и изменение показателя преломления. Поэтому уравнение (3) можно использовать для изучения тепловых и гидродинамических слоев на неизотермической поверхности методом голографической интерферометрии.

Голографическая установка (рис. 2) работала следующим образом. Луч, генерируемый оптическим квантовым генератором 1 (гелий-неоновый лазер ЛГ-38), при помощи зеркал 14 и 5 направлялся на светоделительную пластинку 4 с коэффициентом отражения 0,5. Проходящий через пластинку луч отражался от зеркала 3 и через короткофокусную линзу 2 формировал опорный пучок. Отраженный от пластинки луч при помощи зеркала 6 и системы линз 7 и 8 создавал предметный пучок, который проходил через исследуемую область 9.

В этой области устанавливался аэродинамический рабочий участок с системой «сопло – пластина (коагулятор)». Предметный пучок пересекался с опорным в плоскости фотослоя 10. Результирующее изображение при помощи восстанавливающей линзы 11 проектировалось на экран 12. Для

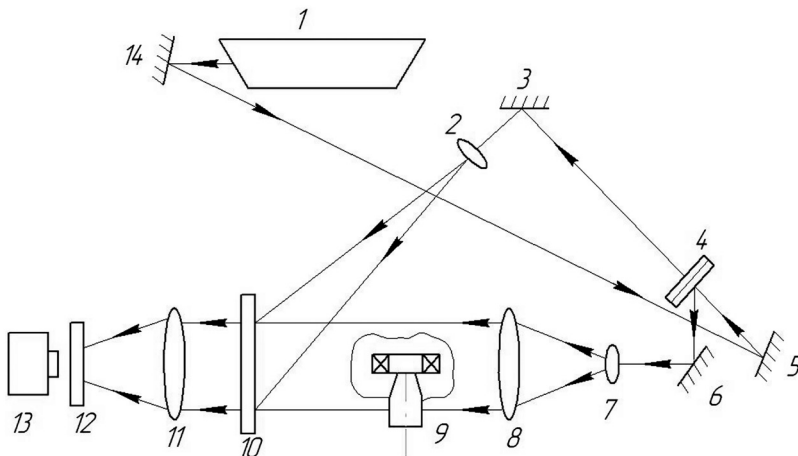


Рис. 2. Схема установки для изучения неизотермических течений газов методом голографической интерферометрии

регистрации изображения использовалась скоростная кинокамера 13 марки СКС-1 при убранном экране или фотоаппарат марки «Canon» и др.

Результирующая интерферограмма в реальном времени получалась в два этапа. Сначала снималась опорная голограмма без рабочего участка. Фотопластинка обрабатывалась «на месте», а затем отбеливалась. Использовались фотопластинки марки ВРЛ-10, реактивы изготавливались по рецептам фирмы «Кодак». На втором этапе в исследуемую область вводился рабочий участок и голографическое изображение проектировалось на экран.

Рабочий аэродинамический участок (рис. 3) состоит из охлаждаемого сопла 1 и пластины 2. Крепление позволяло устанавливать различные сопла (круглые, плоские, систему сопел и др.). Сопла снабжались охлаждаемой рубашкой 11, в случае наличия экрана — охлаждаемым экраном. Между пластиной и экраном устанавливался сеточный коагулятор. Диск 2 охлаждался при помощи трубчатой спирали 3. Рабочий участок имел

электронагреватель воздуха 8 и нагнетатель 7. Пластина 2 выполнялась различной формы и могла располагаться по отношению к соплу 1 под различными углами — от 0 до 90°, причем во всех случаях она находилась в горизонтальной плоскости над соплом. Это исключало вертикальные конвективные потоки воздуха, которые могли оказать влияние на результирующее изображение на экране. Сопло 1 и нагреватель 8 устанавливались на координатнике 10 и соединялись гибким шлангом с вентилятором (нагнетателем) 7. Мощность нагревателя и производительность нагнетателя регулировались автотрансформаторами 9 и 5. Расход воздуха определялся по перепаду давлений на входном коллекторе 6 с помощью микроманометра 4 типа МКВ-250. Охлаждающая вода (15...20 °С) поступала в трубчатую спираль 3 и рубашку 11; это обеспечивало поддержание практически постоянной температуры стенок сопла и поверхности пластины. Температура поверхности измерялась хромель-копелевыми термопарами. Температура окружающего воздуха при помощи конди-

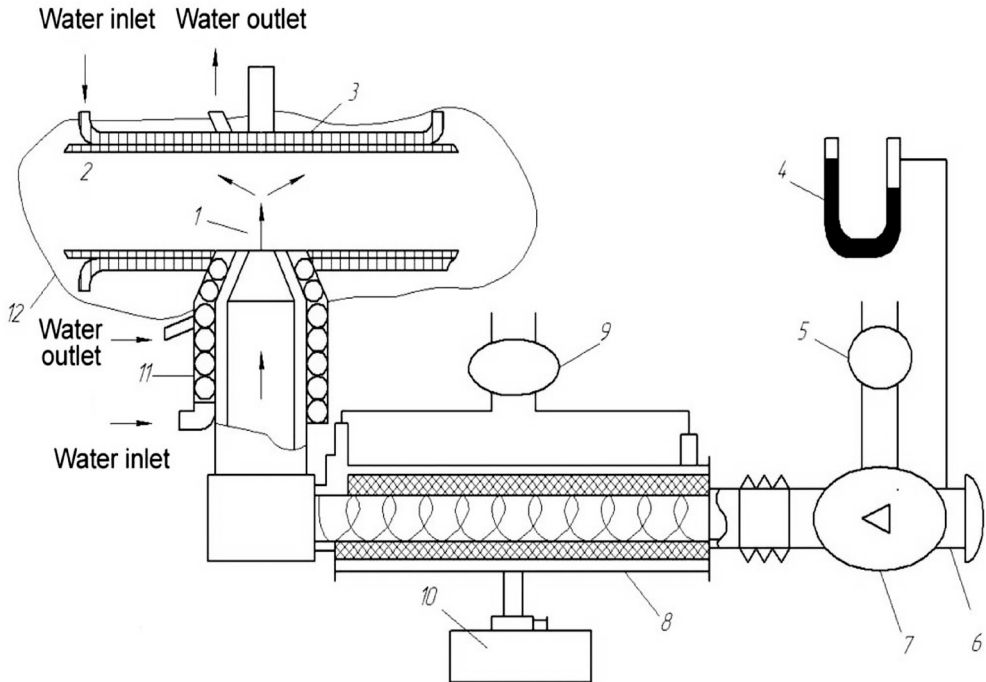


Рис. 3. Аэродинамический рабочий участок:

1 — сопло; 2 — пластина; 3, 11 — охладители; 4 — манометр; 5, 9 — автотрансформаторы; 6 — коллектор; 7 — нагнетатель; 8 — электронагреватель; 10 — координатник; 12 — рабочий объем

онера поддерживалась в интервале 15...20 °С. Пластина 2 обтекалась струей горячего воздуха с температурой 90...150 °С, поступающая из сопла 1. На поверхности пластины образовывался тепловой пограничный слой, воздух в нем имел различную плотность, которая изменялась в соответствии с температурой или вследствие повышения давления. Система «сопло – пластина» создавала рабочий объем участка 12. Все элементы оптической схемы закреплялись в держателях, которые позволяли поворачивать их в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Элементы устанавливались на виброзащищенной плите совместно с системой «сопло – пластина». Скоростная кинокамера позволяла документировать развитие основных процессов во времени при различных скоростях истечения и расстояниях от сопла до пластины. Ди-

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu_L \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left[ \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] - 2\mu_L \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k},$$

где  $u$  — скорость потока;  $u'$  — пульсационная составляющая скорости;  $\mu_T$  — коэффициент турбулентной вязкости;  $\mu_L$  — коэффициент ламинарной вязкости;  $\sigma_T = 0,82$  — аналог числа Прандтля;  $x$  — координата;  $t$  — время;  $\rho$  — плотность;  $i, j, k$  — индексы координаты и векторных величин (соответственно 1, 2, 3).

Для учета неізотермических параметров выполнен расчет конвективного теплопереноса — по аналогии с транспортным уравнением напряжения Рейнольдса с помощью уравнения энергии

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \alpha + \frac{C_p \mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right],$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплопроводности;  $E$  — полная энергия потока;  $T$  — температура;  $Pr$  — число Прандтля;  $C_p$  — теплоемкость;  $\tau$  — тензор напряжений.

Для решения систем уравнений выбирался современный универсальный программный продукт Ansys.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате исследований были получены кинограммы термогидрограмм (интерферограмм), которые отражали иско-

мую динамику процесса изучалась при просмотре киноплёнки на кинопроекторе, а также по кинограммам интерферограмм.

## Теоретические исследования

Для теоретических расчетов адаптирована теплофизическая модель, которая представляет собой транспортное уравнение напряжений Рейнольдса и выражения для конвективного теплопереноса на основании уравнения энергии. Расчет динамики вязкого газа осуществляется с помощью основного уравнения Навье–Стокса и уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_n} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_n} + \frac{\partial u_i u_k}{\partial x_k}; \quad \frac{\partial u_n}{\partial x_k} = 0.$$

Общий вид транспортного уравнения для напряжений Рейнольдса:

тепловую и гидродинамическую обстановку потока в канале. Кинограммы термогидрограмм для случая цилиндрического канала высотой 10 мм и скорости истечения 10 м/с приведены на рис. 4. Границы потока видны в виде темных и светлых полос, которые соответствовали изотермам. Из-за трехмерности потока границы изучаемой области размыты, что затрудняет количественные расчеты полей температур. Полученные термогидрограммы позволяют осуществить высокоточную визуализацию неізотермического высокотурбулентного потока.

На рис. 4–11 приведены результаты расчетов гидродинамических и тепловых полей для тех же случаев протекания потока в канале газоочистного устройства. Так, на них видно зарождение процесса отрыва пристенного слоя и границы течения — кривые  $A$  и  $B$ , а также выбросы газа — объемы  $C$  и  $D$ . Зарождение выбросов происходит через каждые 25 мкс.

Просмотр динамики процесса на кинопроекторе подтвердил характер массообмена: исследуемая зона пульсирует, выбрасывая крупные объемы газа, заполняющие почти все сечение канала.

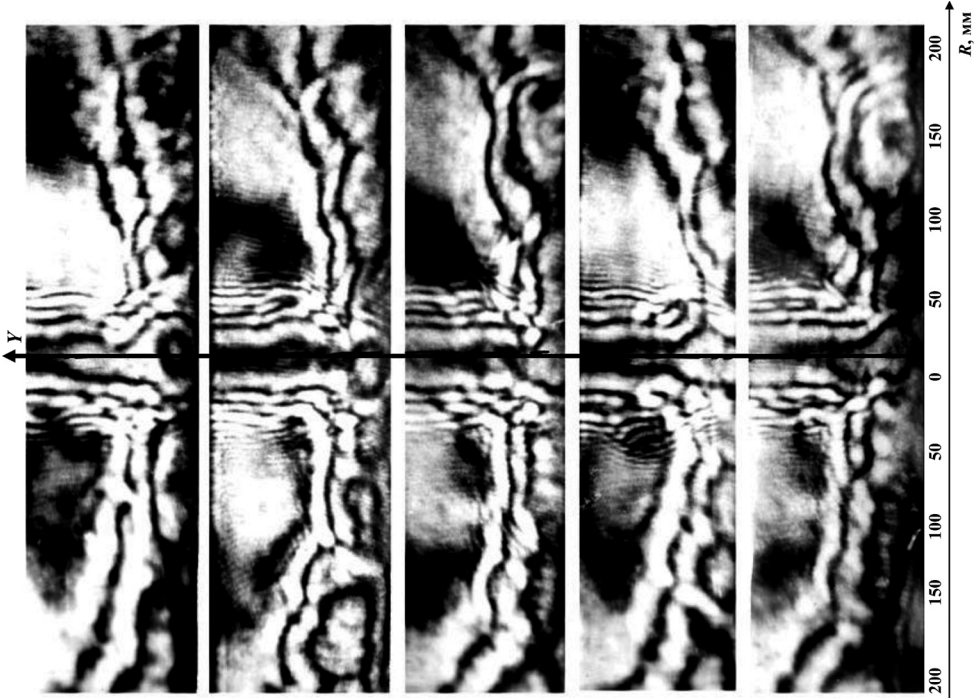


Рис. 5. Кинограммы интерферогамм (термогидрограмм) обтекания пластины плоской неизотермической турбулентной струей. Частота — 5000 кадров в секунду, интервал между кадрами 2 мкс

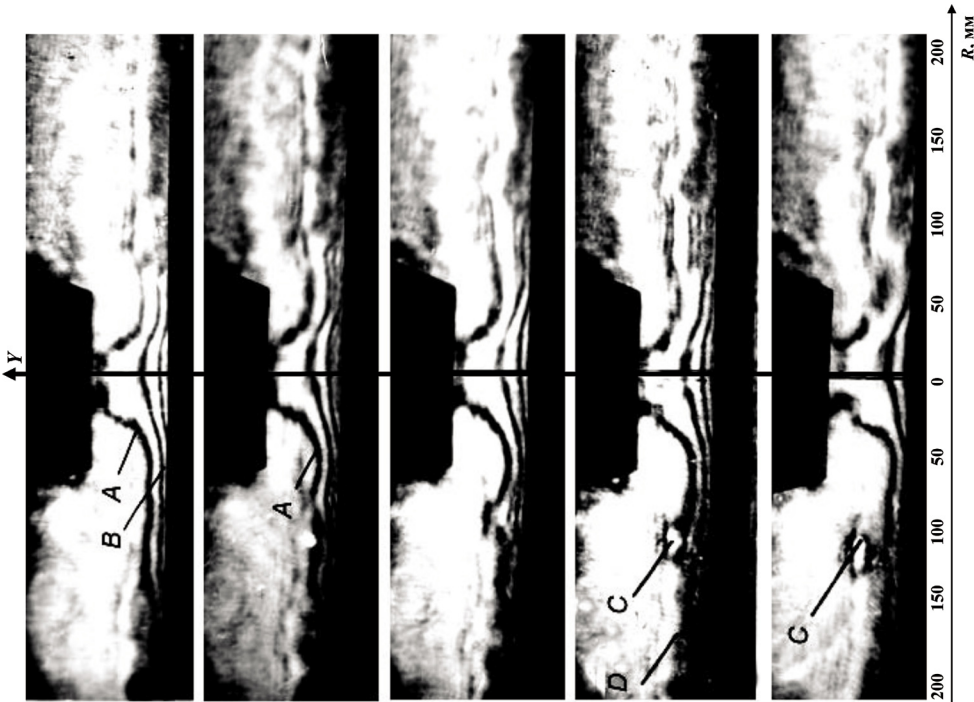
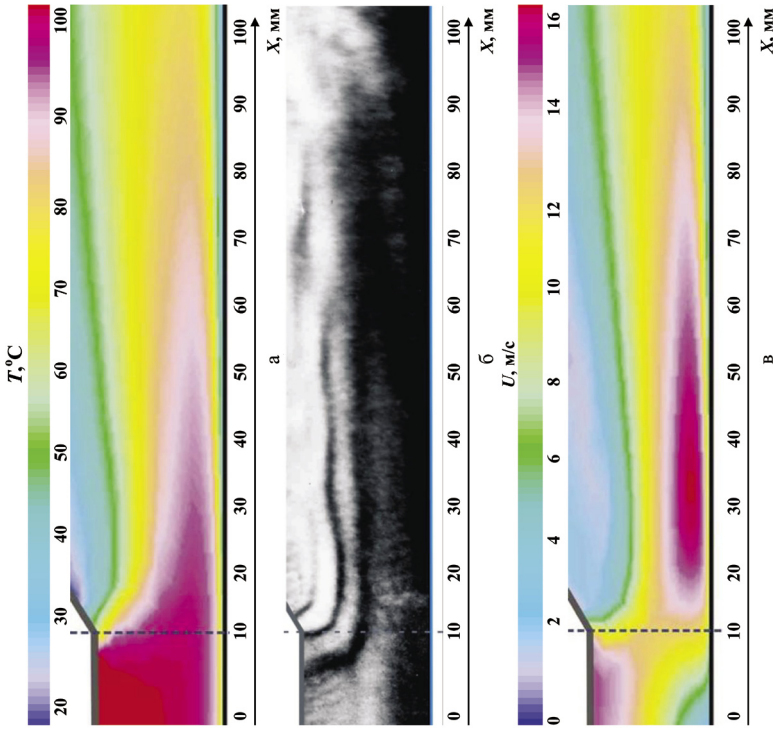
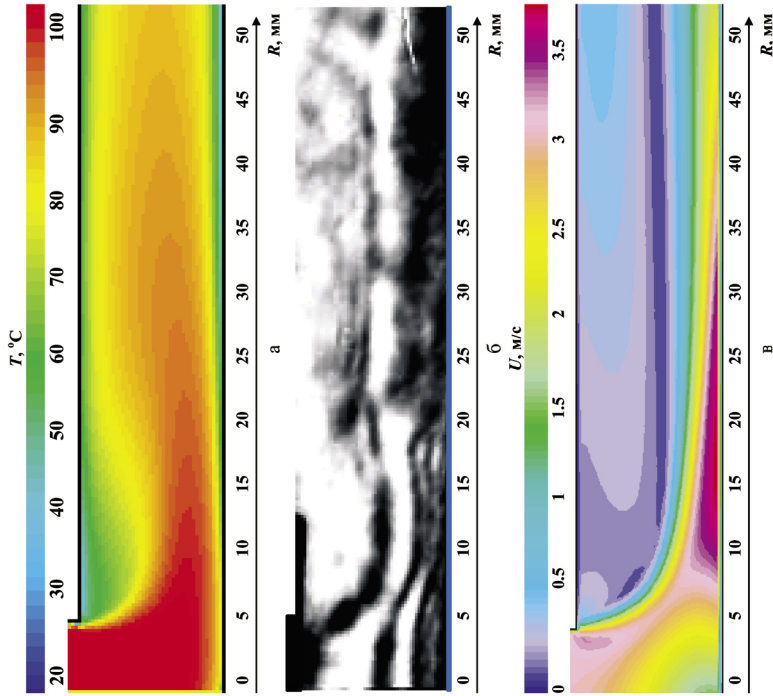


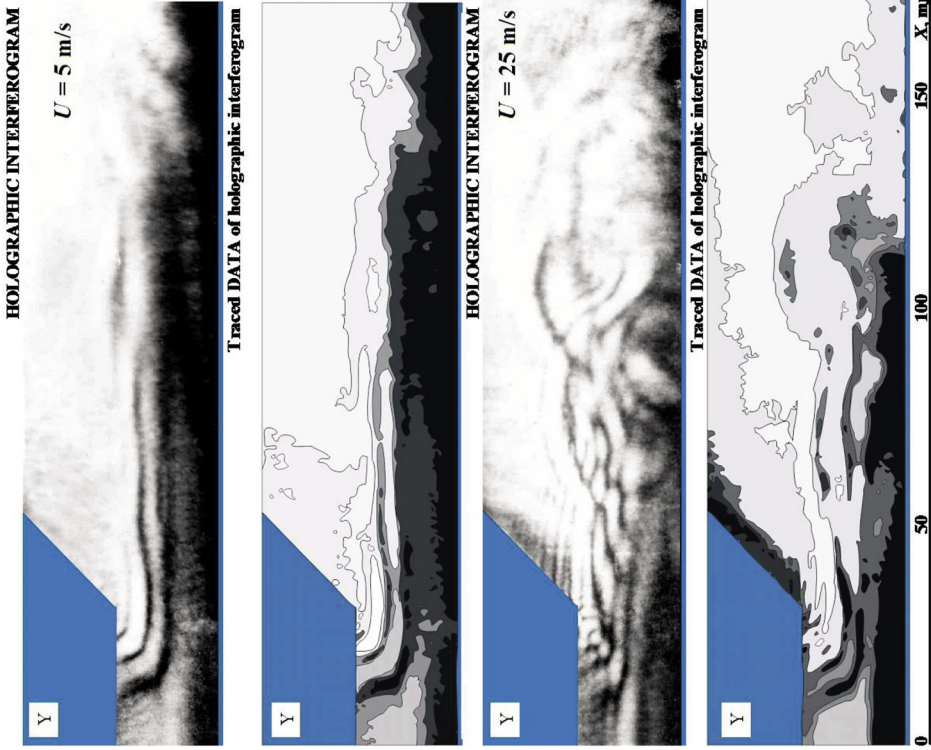
Рис. 4. Кинограммы термогидрограмм (интерферогамм) обтекания пластины круглой неизотермической турбулентной струей (цилиндрический канал). Частота — 5000 кадров в секунду, интервал между кадрами 2 мкс



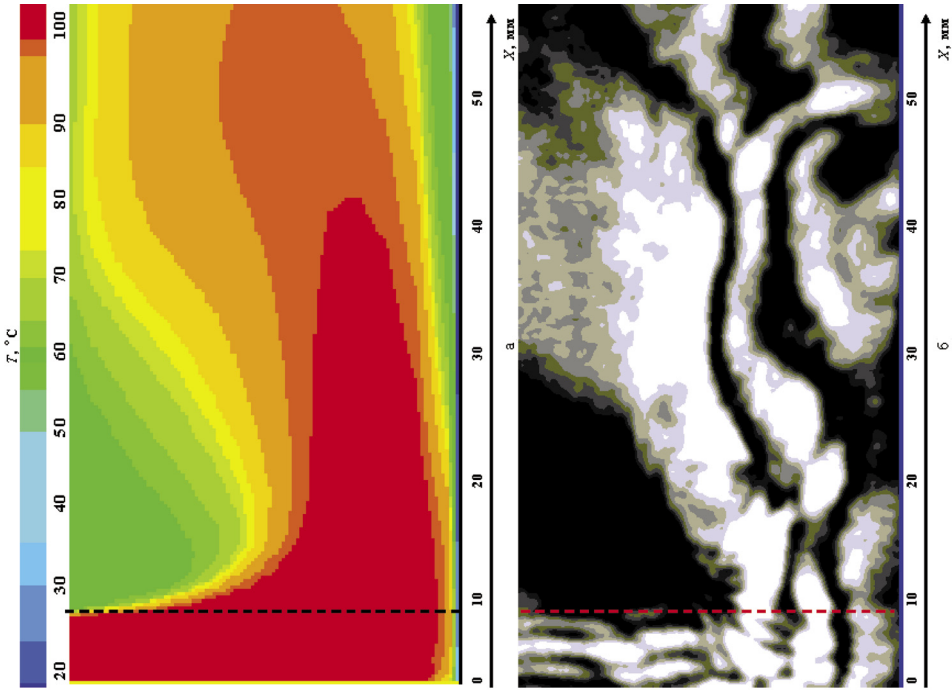
**Рис. 7.** Сравнение результатов расчета полей температур (а) и скорости (в) с интерферограммой (термогидрограммой) (б) для случая плоского канала при  $H = 10$  мм, начальной скорости потока  $U_0 = 3$  м/с



**Рис. 6.** Сравнение результатов расчета полей температур (а) и скорости (в) с интерферограммой (термогидрограммой) (б) для случая цилиндрического канала при  $H = 10$  мм и начальной скорости потока  $U_0 = 10$  м/с

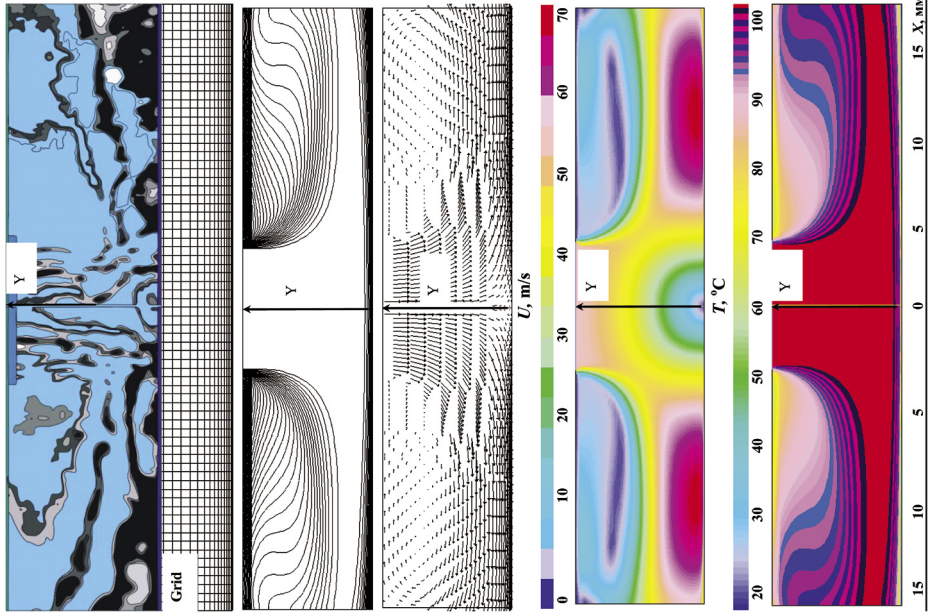


**Рис. 9.** Кинogramмы интерферогамм (термогидрограмм) обтекания пластины плоской неизотермической турбулентной струей и трассированные данные эксперимента. Частота — 2000 кадров в секунду. Входные данные:  $U_0 = 5; 25$  м/с;  $d_0 = 50$  мм;  $h = 50$  мм;  $y = 25$  мм  $T_{inlet} = 100$  °С;  $T_{wall} = 20$  °С

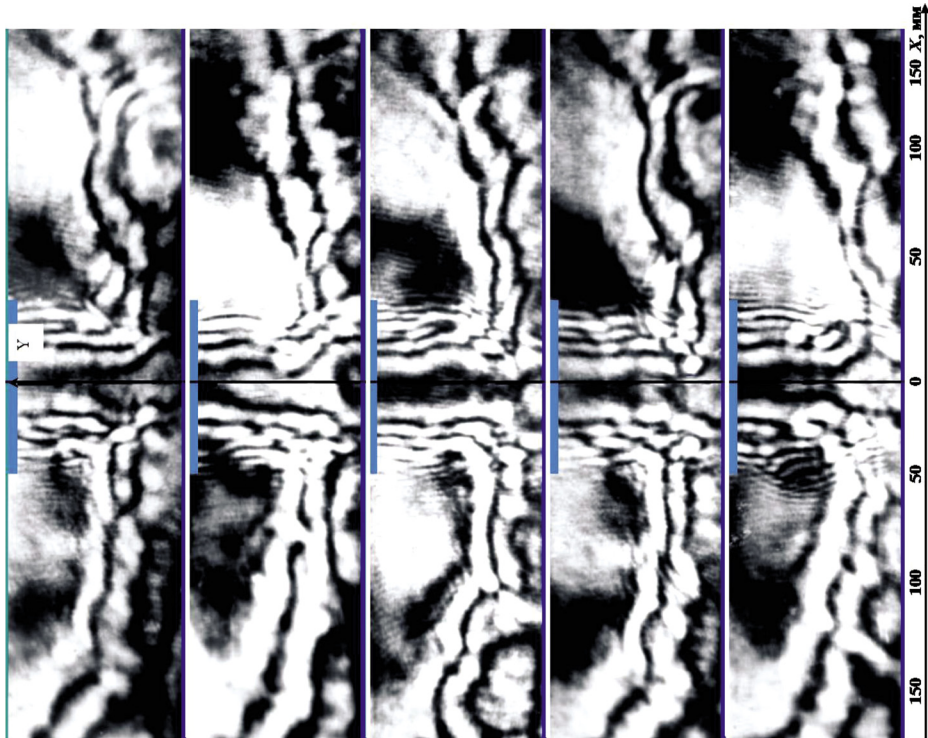


**Рис. 8.** Сравнение результатов расчета полей температур (а) с интерферогаммой (термогидрограммой) (б) для случая плоского канала при  $H = 30$  мм и начальной скорости потока  $U_0 = 20$  м/с





**Рис. 11.** Сравнение результатов расчета полей температур с интерферограммой (термогидрограммой) в процессе выхода на режим для случая плоского канала. Входные данные:  $U_0 = 45$  м/с;  $T_{inlet} = 100$  °C;  $T_{wall} = 20$  °C;  $d_0 = 50$  мм;  $h = 50$  мм;  $y = 50$  мм



**Рис. 10.** Кинограммы интерферограмм (термогидрограмм) обтекания пластины плоской изотермической турбулентной струей. Частота – 2000 кадров в секунду, интервал между кадрами 2 мкс. Входные данные:  $U_0 = 45$  м/с;  $d_0 = 50$  мм;  $h = 50$  мм;  $y = 50$  мм

Приведены термогидрограммы для случая плоского канала высотой 30 мм при скорости потока 10 м/с. Здесь уже более отчетливо видны изменение температуры в виде чередования темных и светлых полос и вихревые объемы газа, отрывные течения.

Согласно методам оптических измерений интерферограммы представляют собой изолинии разности показателей преломления лазерного луча исследуемой среды и воздуха (опорный пучок на рис. 1). Учитывая, что показатель преломления воздуха практически постоянен, линии интерферограмм можно считать соответствующими изолиниям показателя преломления лазерного пучка в исследуемом потоке. Известно, что для газов показатель преломления почти не зависит от давления (в диапазоне  $1 \dots 10 \cdot 10^5$  Па) и испытывает влияние температуры. Поэтому линии (области) интерферограмм будут соответствовать областям одинаковой температуры, т. е. изотермам среды.

Результаты экспериментальных исследований структуры потока следует сопоставлять с расчетами изотерм потока. Сравнение результатов расчета полей температур и скоростей с термогидрограммами установило, что полученные при помощи скоростной

киносъемки термогидрограммы (интерферограммы) в достаточной мере совпадают с данными расчетов — это подтверждает принятую физическую модель процесса и адекватность созданной теплофизической модели.

## ВЫВОДЫ

1. Исследования газодинамики и теплопереноса турбулентных газовых сред с помощью голографической интерферометрии выполнялись с использованием современных теоретических и экспериментальных направлений характеристик потока в элементах газоочистных устройств. 2. Изучение динамики процесса подтвердило характер массообмена: исследуемая зона пульсирует, выбрасывая крупные объемы газа, заполняющие почти все сечение канала. 3. Сравнением результатов расчета полей температур и скоростей с полученными термогидрограммами установлено, что полученные при помощи скоростной киносъемки термогидрограммы (интерферограммы) в достаточной мере совпадают с данными расчетов. Это подтверждает принятую физическую модель процесса и адекватность созданной теплофизической модели.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. с. 1783292 СССР, МКИ G 01 В 9/02. Установка для изучения гидродинамических течений методом голографической интерферометрии [Текст] / С. С. Рыжков, Г. Ф. Романовский, Ю. Г. Золотой, С. И. Липатников (СССР). — 4899861/25 ; заявл. 08.01.92; опубл. 23.12.92, Бюл. № 47. — 3 с.
- [2] Басок, Б. И. Термофоретическая очистка воздуха в энергетическом оборудовании [Текст] / Б. И. Басок, С. С. Рыжков // Промышленная теплотехника. — 2003. — № 5. — С. 45–50.
- [3] Басок, Б. И. Исследование влияния температуры на процесс улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале [Текст] / Б. И. Басок, С. С. Рыжков, А. А. Авраменко // Промышленная теплотехника : междунар. науч.-прикл. журнал. — 2006. — № 1. — С. 67–75.
- [4] Вест, Ч. Голографическая интерферометрия [Текст] / Ч. Вест. — М. : Мир, 1982. — 504 с.
- [5] Калинин, Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Яхро. — М. : Машиностроение, 1972. — 220 с.
- [6] Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей [Текст] / Е. П. Медников. — М. : Наука, 1981. — 176 с.
- [7] Письменный, Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб [Текст] / Е. Н. Письменный // Альтерпес. — К., 2004.