

УДК 629.12.03

Рыжков С. С.

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАТИВНЫХ СХЕМ ИНЕРЦИОННЫХ СОПЕЛ ДЛЯ СЕПАРАЦИОННЫХ ГРАДИЕНТНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Рижков С. С.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАТИВНИХ СХЕМ ІНЕРЦІЙНИХ СОПЕЛ ДЛЯ СЕПАРАЦІЙНИХ ГРАДІЄНТНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Serhiy S. Ryzhkov

**THE RESEARCH OF VARIATIVE SCHEMES OF INERTIAL NOZZLES FOR SEPARATION GRADIENT AEROSOL TECHNOLOGIES**

*Рассмотрены различные варианты схем инерционных сопел и выполнены их теоретические расчеты для сепарационных градиентных аэрозольных технологий. Созданы трёхмерные модели для численного эксперимента вариативных схем инерционных сопел для сепараторов широкого применения с скоростями в сопле от 10...30 м/с. На основе расчетов разработаны рекомендации по конструкции инерционных ступеней очистки сепараторов аэрозолей. Определен коэффициент суммарной эффективности очистки в системе сопел.*

*Ключевые слова: вариативные схемы, инерционные сопла, аэрозольные технологии, сепарация, расчетная сетка, поверхность, скорость струи, концентрация, эффективность.*

*Розглянуто різні варіанти схем інерційних сопел і виконані їхні теоретичні розрахунки для сепараційних градієнтних аерозольних технологій. Створено тривимірні моделі для чисельного експерименту варіативних схем інерційних сопел для сепараторів широкого застосування зі швидкостями в соплі від 10 ... 30 м / с. На основі розрахунків розроблені рекомендації щодо конструкції інерційних ступенів очистки сепараторів аерозолів. Визначено коефіцієнт сумарної ефективності очистки в системі сопел.*

*Ключові слова: варіативні схеми, інерційні сопла, аерозольні технології, сепарація, розрахункова сітка, поверхня, швидкість струменя, концентрація, ефективність.*

## **1. Введение**

Создание высокоэффективных и экономичных тепло- и массообменных аппаратов, сепарирующих устройств является значительным резервом повышения коэффициентов полезного действия энергетических установок, улучшения использования топливоэнергетических ресурсов. Эффективная очистка промышленных выбросов от вредных жидких примесей относится к важной народнохозяйственной проблеме борьбы с загрязненностью окружающей среды.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

В последние годы достигнуты определенные успехи в исследовании двухфазных сред, главным образом, их газодинамики, переноса тепла и массы. В этой области широко известны работы Института технической теплофизики НАНУ, Института тепломассообмена АН Беларуси, Национального технического университета «Киевский политехнический институт», Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова (г. Николаев), [1, 5, 8, 10, 12], а также зарубежных исследователей в этих направлениях. Во многих работах отмечается эффективность использования воды как нейтрализатора с подачей ее в зоны горения в составе топливноводяной эмульсии, в виде пара. Такая технология реализована в газопаротурбинной установки типа «Водолей» [5]. Одновременно делаются попытки очистки выпускных газов от окислов азота с помощью селективных каталитических фильтров с предварительной обработкой газов аммиаком. При достаточно высокой степени очистки такие фильтры дороги, имеют значительные массогабаритные показатели, сложны и опасны в эксплуатации использования аммиака. В работах [4, 6, 7] подтверждена эффективность интенсификации очистки высокодисперсных частиц за счет сепарационных градиентных аэрозольных технологии.

## **3. Цели и задачи исследования**

Целью данной работы является выполнение теоретических исследований вариативных схем инерционных сопел для сепарационных градиентных аэрозольных технологий и создание на их основе усовершенствованных ступеней очистки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать схему струйного осаждения на прямой, вогнутой и криволинейной поверхности;
- разработать математическую модель градиентных сепарационных технологий, трехмерную модель каналов осаждения;
- выполнить расчеты гидродинамической обстановки в канале и траектории частиц в проточной части системы входных и выходных инерционных сопел.

#### 4. Математическая модель процесса

Используемая теплофизическая модель процессов переноса частиц в канале основана на транспортном уравнении напряжений Рейнольдса с вычислением индивидуальных напряжений ( $\overline{u'_i u'_j}$ ) и имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho u_k u'_i u'_j}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_T} \overline{\frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_k}} \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu_L \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left[ \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] - 2\mu_L \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}. \quad (1)$$

По аналогии с транспортным уравнением напряжений Рейнольдса для учета неизотермических параметров процесса выполнен расчет конвективного теплопереноса с помощью уравнения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( k + \frac{C_p \mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right], \quad (2)$$

где  $\tau$  рассчитывался как:

$$\tau = \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}, \quad (3)$$

$$\text{где } \mu_{eff} = \mu_T + \mu_L. \quad (4)$$

Для моделирования траекторий дисперсных частиц двухфазной среды решалось уравнение движения [1], которое учитывало силу инерции частицы и другие основные силы, действующие на нее. В

декартовых координатах это уравнение записывалось следующим образом:

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i, \quad (5)$$

где  $F_D$  – сила сопротивления для единицы массы частицы:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D}{24} \text{Re}, \quad (6)$$

$$\text{Re} = \rho d_p \frac{|u_p - u|}{\mu}, \quad (7)$$

где  $F_i$  – дополнительные силы, воздействующие на частицу.

Коэффициент сопротивления  $C_D$  рассчитывался следующим образом:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \left( 1 + b_1 \text{Re}^{b_2} \right) + \frac{b_3 \text{Re}}{b_4 + \text{Re}}, \quad (8)$$

где  $b_i$  – полиномиально задаваемые коэффициенты.

Уравнение учитывает дополнительные силы  $F_i$ , которые воздействуют на частицу. Для учета осаждения частиц под действием силы инерции необходимо принимать во внимание ускорение потока, обтекающего частицу. Сила инерции находится следующим образом:

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_k} \frac{\partial}{\partial t} (u - u_k). \quad (9)$$

Поперечное смещение частиц может быть вызвано не только градиентом осредненной скорости газа, но и неоднородностью поля его пульсационных скоростей. Неравномерность профиля скорости приводит к направленному смещению частицы в сторону уменьшения интенсивности пульсаций. Этот эффект, обычно именуемый турбулентной миграцией или турбофорезом, рассчитывается по формуле:

$$F_2 = -0,5m_k \frac{\partial \overline{u_k'^2}}{\partial y}. \quad (10)$$

Дополнительная сила переноса частиц появляется в случае возникновения перепада давления и называется

диффузиофоретической силой, которую можно вычислить по формуле:

$$F_3 = \left( \frac{P}{P_w} \right) u_k \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (11)$$

### 5. Расчетный эксперимент исследования газодинамики и траектории движения частиц в канале

На основе разработанной математической модели выполнено исследование газодинамики в проточной части и траектории движения частиц.

В процессе расчета задавались следующие параметры:

- трехмерная геометрия построена в реальном масштабе;
- расчетная сетка построена треугольными сегментами с площадью  $S=30 \times 10^{-8} \text{ м}^2$ ;
- параметры среды – нормальные условия;
- плотность газа  $\rho_r=1,225 \text{ кг/м}^3$ ;
- вязкость  $\mu_r=1,79 \times 10^{-5} \text{ кг/(м}\times\text{с)}$ ;
- материал стенки канала – алюминий с шероховатость 0,1 мм и плотностью  $\rho_{ал} = 2690 \text{ кг/м}^3$ ;
- минимальный диаметр частиц – 3 мкм;
- средний диаметр частиц – 10 мкм;
- максимальный диаметр частиц – 15 мкм;
- концентрация жидкой фазы  $C_{жл}=100 \text{ г/м}^3$ ;
- диапазон скоростей в канале – 10...30 м/с.

### 6. Результаты исследований

На основе поведенного широкого комплекса исследований струйного обтекания поверхностей, выполненного с помощью численного моделирования, и применения метода голографической интерферометрии в реальном времени были выбраны следующие перспективные вариативные схемы инерционных сопел:

- 1) нормальное обтекание плоской струей и осесимметричной струей плоской поверхности (рис. 1);
- 2) обтекание плоской струей и осесимметричной струей поверхности под разными углами (рис. 2);
- 3) обтекание плоской и осесимметричной струями вогнутой и выпуклой поверхностей под разными углами (рис. 3).

Результаты расчета гидродинамической обстановки для вариативных схем на основе приведенной математической модели также

представлены на рис.1–3.

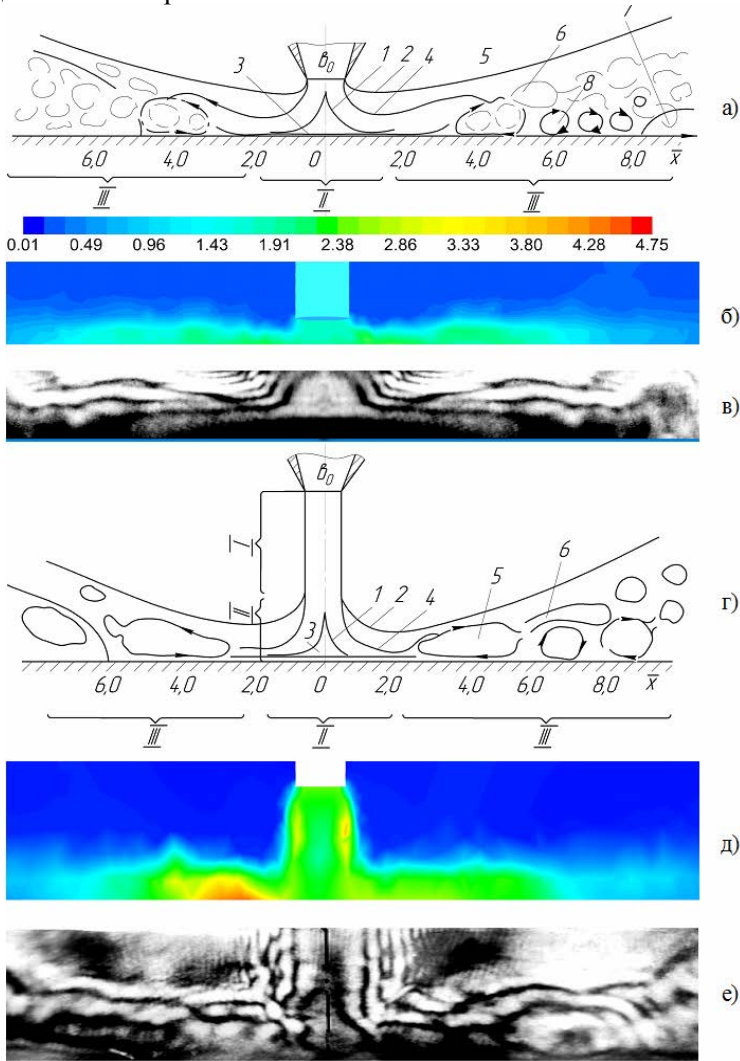


Рис. 1. Вариативные схемы инерционных сопел: нормальное обтекание плоской струей и осесимметричной струей плоской поверхности; схема распределения области течения струи: а) – схема плоской струи; б) – расчет кинетической энергии турбулентности в плоской струе (а) при скорости 30 м/с; в) – визуализация методом голографической интерферометрии в плоской струе (а) при скорости 30 м/с; г) – схема цилиндрической струи; д) – расчет кинетической энергии турбулентности в

цилиндрической струе ( $\Gamma$ ) при скорости 30 м/с; е) – визуализация методом голографической интерферометрии в цилиндрической струе ( $\Gamma$ ) при скорости 30 м/с; Зоны струи: / – свободной; // – градиентного течения в зоне удара и разворота; /// – пристенного; 1 – центр течения в зоне разворота; 2 – внешний; 3 – зона разворота; 4 – зона вихреобразования; 5 – отрывной «пузырь»; 6 – выбросы газа; 7 – повторный отрывной «пузырь»; 8 – выбросы газа.

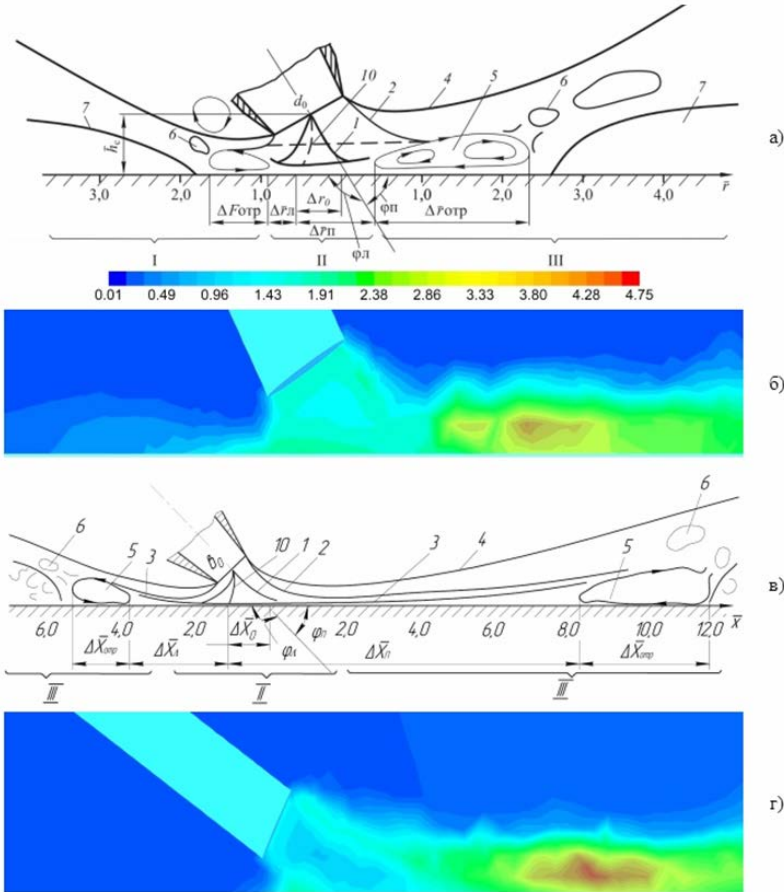


Рис. 2. Вариативные схемы инерционных сопел: обтекание плоской струей и осесимметричной струей плоской поверхности под углом; схема распределения области течения струи: а) – схема цилиндрической струи под углом к поверхности осаждения; б) – расчет кинетической энергии турбулентности в цилиндрической струе (а) при скорости 30 м/с; в) – схема плоской струи под углом к поверхности осаждения; г) – расчет

кинетической энергии турбулентности в цилиндрической струе (в) при скорости 30 м/с; 1 – центр течения в зоне разворота; 2 - внешний; 3 – зона разворота; 4 – зона вихреобразования; 5 – отрывной «пузырь»; 6 – выбросы газа; 7 – повторный отрывной «пузырь»; 8 – выбросы газа; 9 – повторный отрывной «пузырь»; 10 – зона осаждения.

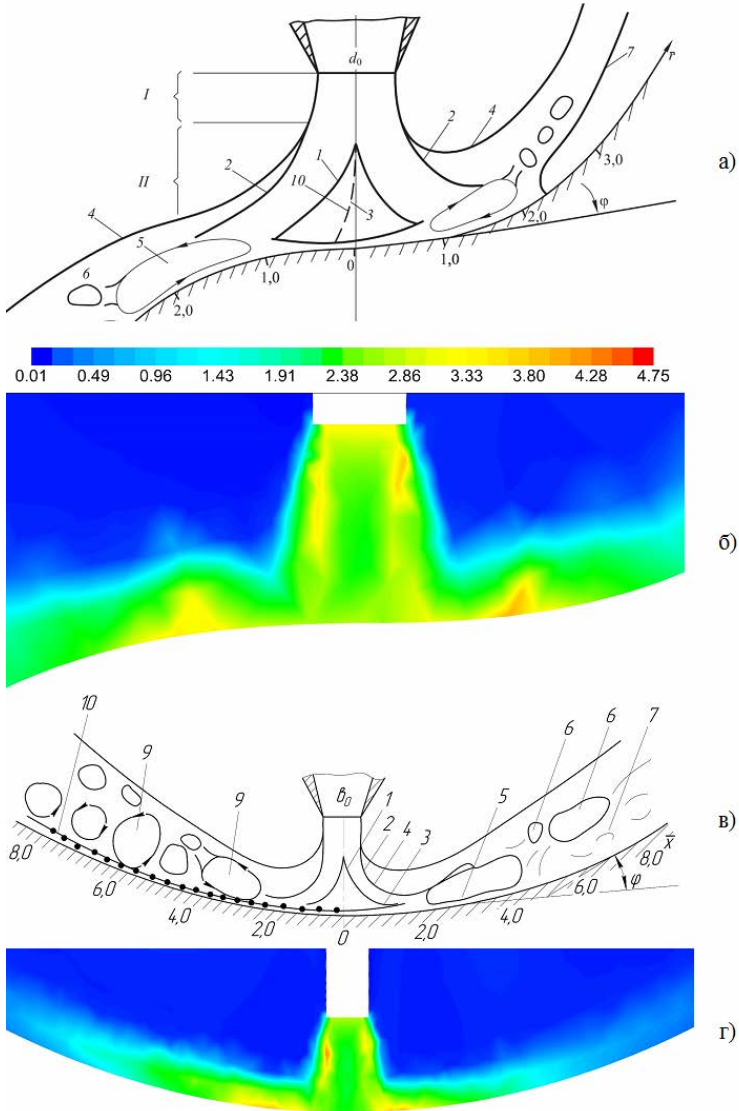


Рис. 3. Вариативные схемы инерционных сопел: обтекание плоской струей и осесимметричной струей вогнутой и выпуклой поверхности; схема



распределения области течения струи: а) – схема плоской струи в вогнуто-выпуклом канале; б) – расчет кинетической энергии турбулентности в плоской струе (а) при скорости 30 м/с; в) – схема плоской струи в вогнутом канале; г) – расчет кинетической энергии турбулентности в цилиндрической струе (в) при скорости 30 м/с; 1 – центр течения в зоне разворота; 2 – внешний; 3 – зона разворота; 4 – зона вихреобразования; 5 – отрывной «пузырь»; 6 – выбросы газа; 7 – повторный отрывной «пузырь»; 8 – выбросы газа; 9 – повторный отрывной «пузырь»; 10 – зона осаждения.

На рис. 1 представлены результаты расчета распределения газовых потоков в канале с цилиндрическим и плоским соплом с направленной струей под углом  $90^\circ$  к плоскому каналу осаждения и их сравнение с полученными ранее интерферограммами течения, что подтверждает достоверность расчетов. На рис. 2 изображена схема распределения газовых потоков в канале с цилиндрическим соплом с направленной струей под углами  $30^\circ$ ;  $60^\circ$  к цилиндрическому и плоскому каналу осаждения. На рис. 3 показана схема распределения газовых потоков в канале с плоским соплом с направленной струей под углом  $90^\circ$  к вогнутой и вогнуто-выпуклой поверхности каналов осаждения. Данные решения возможно использовать в системах инерционных сопел для сепараторов широкого применения.

На рис. 4 отображены расчеты трехмерной геометрии для плоского канала осаждения. На рис. 5 представлены расчет трехмерной геометрии для вогнутого канала осаждения, а на рис. 6 – расчет трехмерной геометрии для выпукло-вогнутого канала осаждения. Выполненный расчет в каналах с различным углом атаки струи –  $30^\circ$ ;  $60^\circ$ ;  $90^\circ$  показал, что отрывные зоны сохраняются, однако при малых углах атаки эффективность осаждения частиц за счет сил инерции будет падать из-за возможного их захвата потоком по линиям тока газа. Проведены расчеты распределения скорости в канале и кинетической энергии турбулентности при начальной скорости струи 30 м/с для случаев расположения сопла  $d_{\text{сопло}} = 1$  на расстоянии от стенки –  $1,0 \cdot d$ ;  $1,5 \cdot d$ ;  $2,0 \cdot d$ . Таким образом, при расстоянии от стенки к соплу до –  $2,0 \cdot d$  наблюдаются повышенные значения кинетической энергии турбулентности, в которых формируются поля осаждения и укрупнения частиц жидкой фазы.

На рис. 7 представлена исходная геометрия рабочей области для заданных значений расстояния от сопла к стенке – 2 мм; 4 мм; 7,5

мм; 12 мм; 15 мм; 22,5 мм. Определены скорость и статическое давление в расчётной области при  $v = 30$  м/с.

На основе расчетов трехмерной геометрии для плоского, вогнутого, вогнуто-выгнутого каналов осаждения в каналах с различным углом атаки струи –  $30^\circ$ ;  $60^\circ$ ;  $90^\circ$  предложена расчетная геометрия с учетом габаритов сепарационного оборудования (рис. 8).

Применено трехмерное моделирование сепарационных градиентных аэрозольных технологий. Создана трёхмерная модель для численного эксперимента входных и выходных систем инерционных сопел для сепараторов широкого применения с скоростями в сопле от 10...30 м/с. В процессе построения учитывалась симметричность исходной геометрии сепарационного элемента относительно двух взаимно перпендикулярных плоскостей.

Расчетная геометрия изучалась в стационарных условиях с постоянной осредненной скоростью истечения газовой струи из входного сопла –  $U_0=10...30$  м/с и в нестационарных условиях осаждение и укрупнение диаметров частиц в канале при минимальном диаметре частиц – 3 мкм, среднем диаметре частиц – 10 мкм и максимальном диаметре частиц – 15 мкм для концентрации жидкой фазы  $C_{жл} = 100$  г/м<sup>3</sup>. В результате исследований получено распределение векторов скорости в 3D элементе сепарационного оборудования при  $U_0=10$  м/с. Визуализация газодинамической обстановки позволяет определить эффективность конструкции и возможность дальнейшей адаптации, модифицирования и повышения коэффициентов улавливания газоочистителей. Как видно из расчетов, происходит неравномерное распределение газового потока в рабочем участке, что интенсифицирует процесс осаждения полидисперсных аэрозолей. За разворотом струи наблюдается значительное повышение скорости газового потока, в зонах повышенной турбулентности имеет место осаждение высокодисперсных частиц.

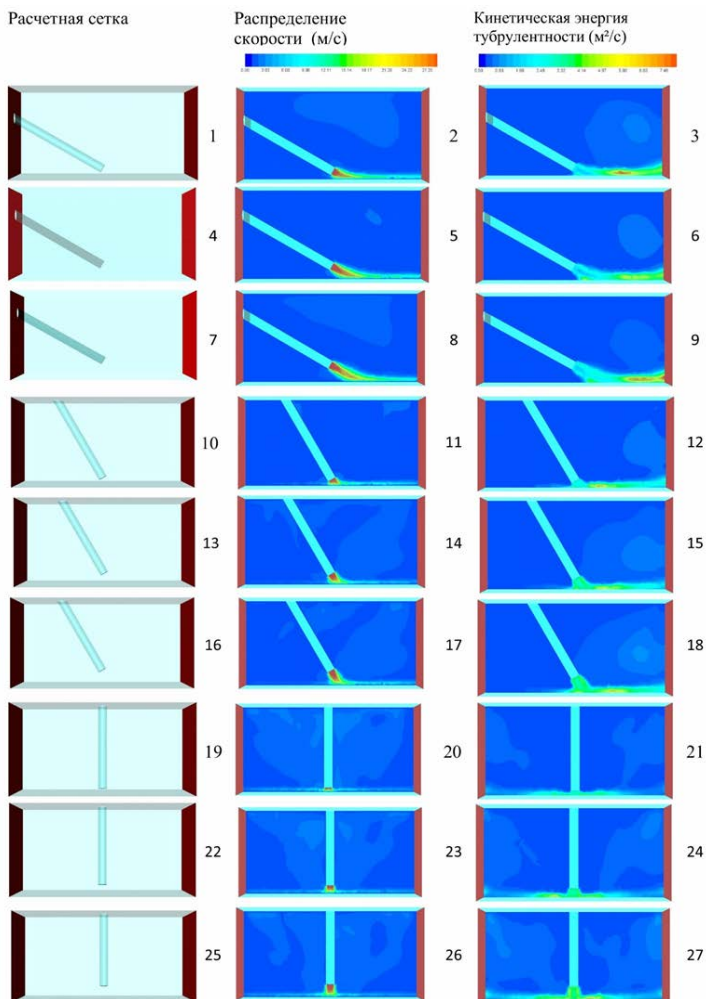


Рис. 4. Расчет распределения скорости и кинетической энергии турбулентности при начальной скорости потока в сопле 30 м/с в плоском канале: канал с различным углом атаки струи – 30°; 60°; 90° для случаев расположения сопла  $d_{\text{соплю}}=1$  на расстоянии от стенки – 1,0· $d$ ; 1,5· $d$ ; 2,0· $d$

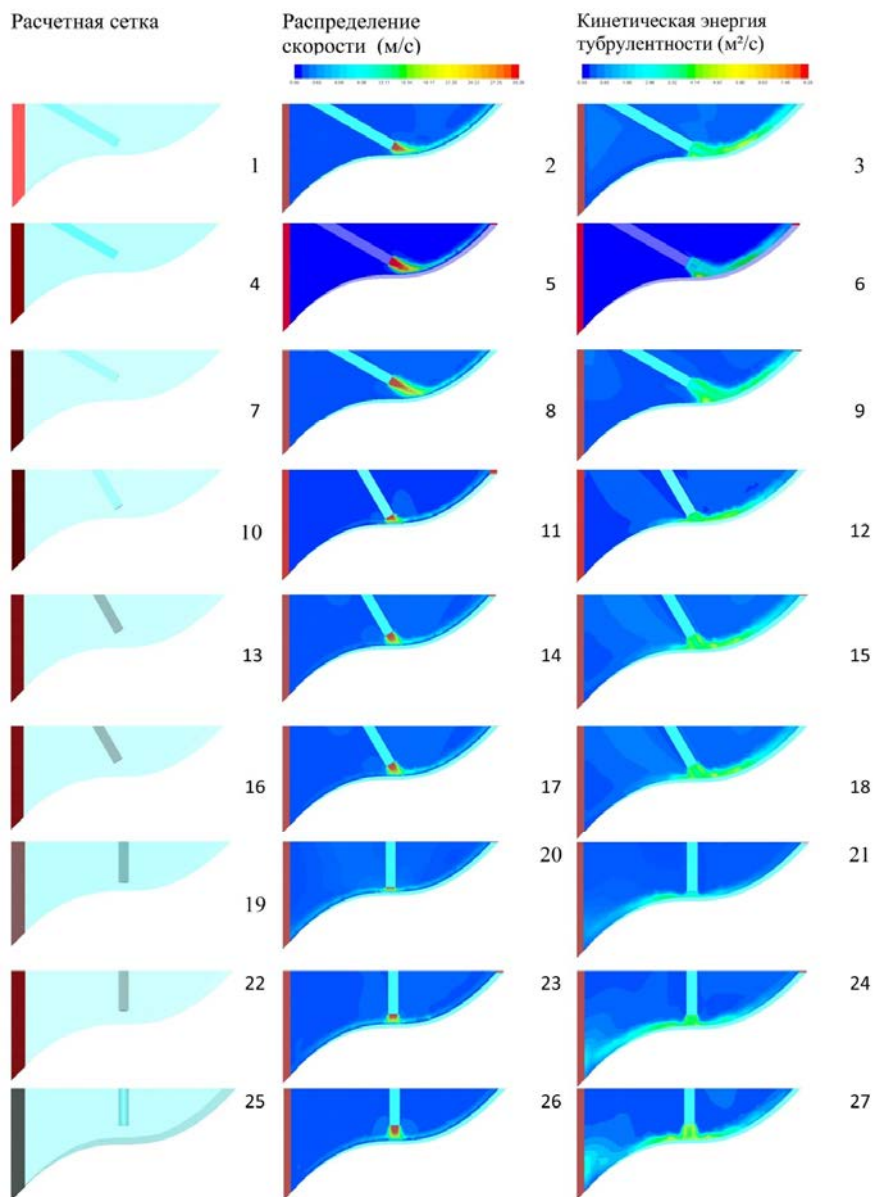


Рис. 5. Расчет распределения скорости и кинетической энергии турбулентности при начальной скорости потока в сопле 30 м/с в вогнуто-выпуклом канале: канал с различным углом атаки струи – 30°; 60°; 90° для

случаев расположения сопла  $d_{\text{сопло}}=1$  на расстоянии от стенки –  $1,0\cdot d$ ;  $1,5\cdot d$ ;  $2,0\cdot d$

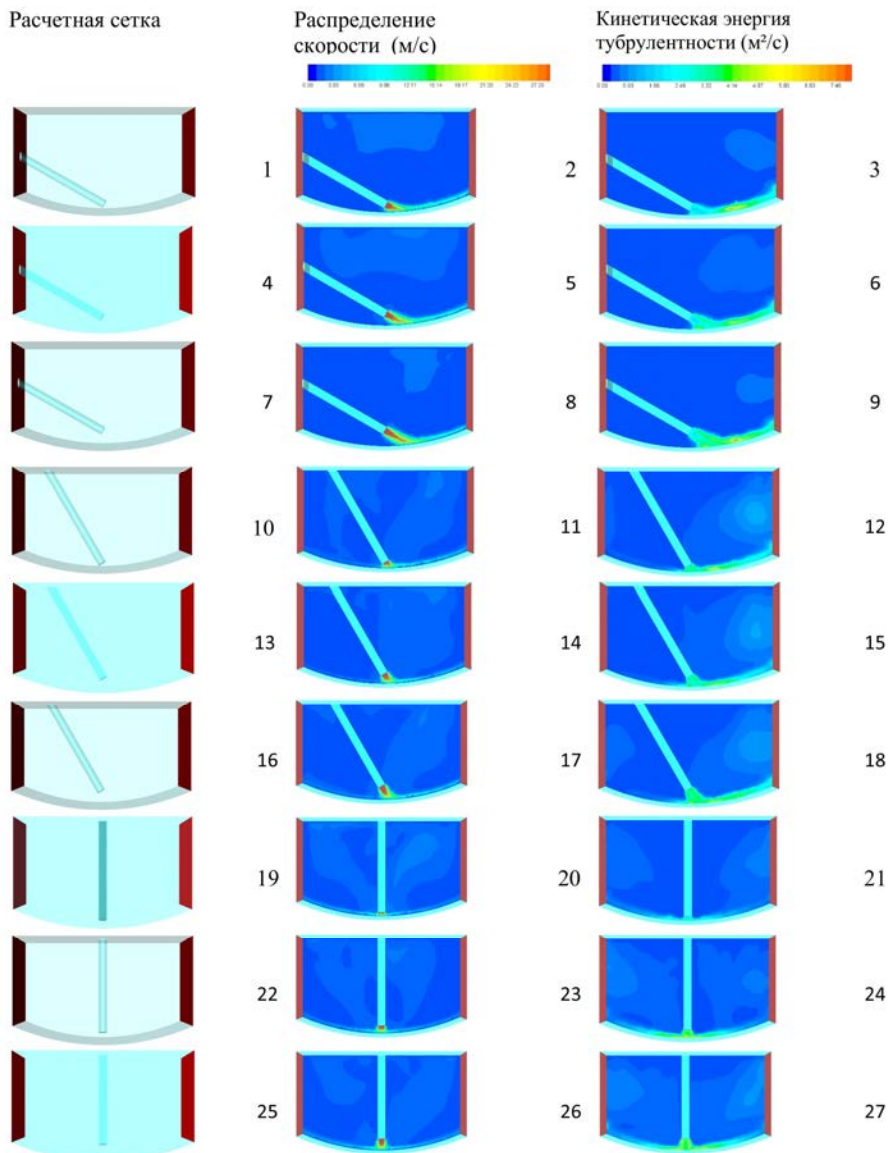


Рис. 6. Расчет распределения скорости и кинетической энергии турбулентности при начальной скорости потока в сопле 30 м/с в вогнутом

канале: канал с различным углом атаки струи – 30°; 60°; 90° для случаев расположения сопла  $d_{\text{соплю}}=1$  на расстоянии от стенки – 1,0·d; 1,5·d; 2,0·d

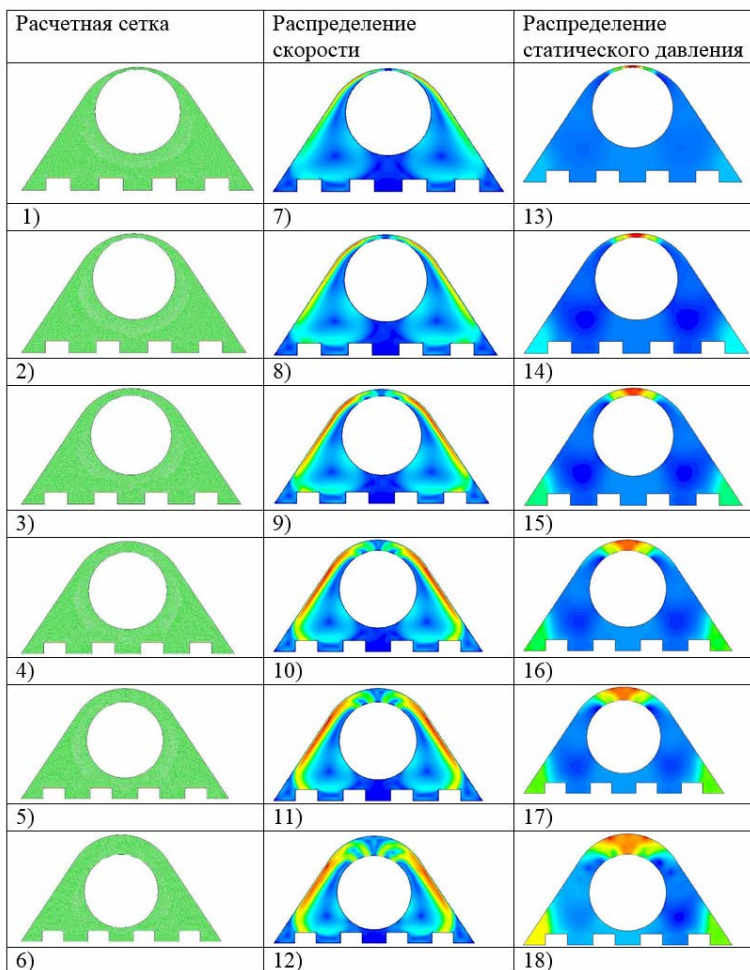


Рис. 7. Исходная геометрия рабочей области для заданных значений расстояния от сопла к стенке 1) – 2 мм; 2) – 4 мм; 3) – 7,5 мм; 4) – 12 мм; 5) – 15 мм; 6) – 22,5 мм; 7–12 – распределение скорости в расчётной области при  $v=30$  м/с расчетных сеток 1–6; 13–18) – распределение статического давления в расчетной области при  $v=30$  м/с расчетных сеток 1–6.

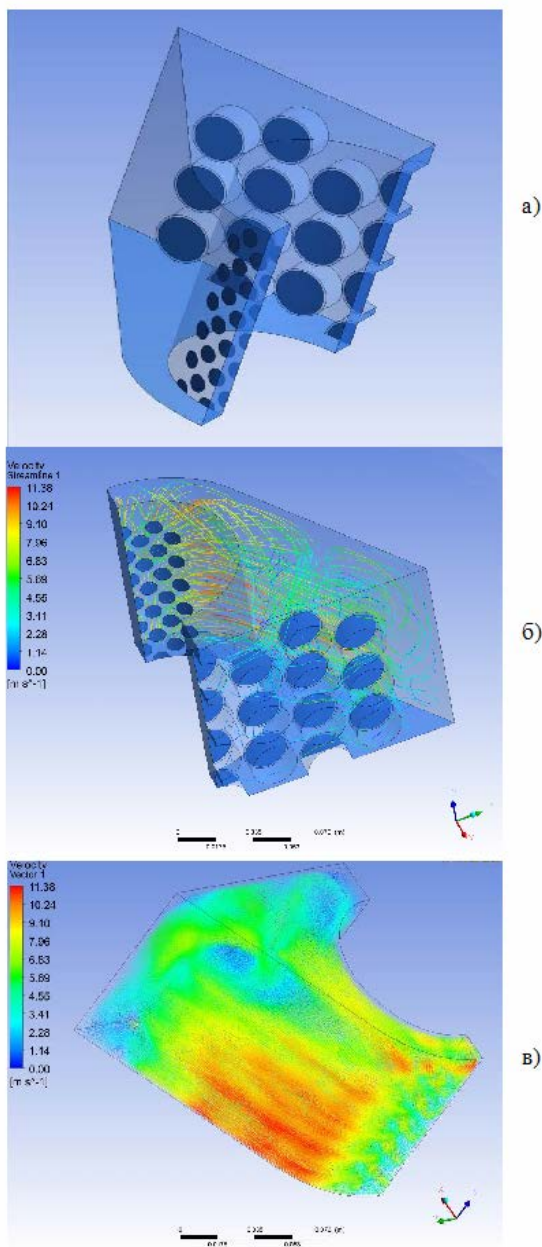


Рис. 8. Рабочая область сепарационного элемента: а) – расчетная геометрия; б) – линии тока; в) – расчет скорости

Как показывают расчёты, в газовом потоке образуются зоны интенсивного вихреобразования (средненное значение скорости газа в струйном обтирании достигает – 11.38 м/с) и наблюдаются значительные вихреобразование во всей области рабочей геометрии. По расчету линий тока можно судить о траектории движения дисперсных частиц и основных зонах осаждения.

Расчет осаждения и укрупнения частиц в нестационарных условиях при постоянной средней скоростью истечения газовой струи из входного сопла –  $U_0=10...30$  м/с представлен в таблице 1.

Таблица 1. Расчет осаждения входных и выходных систем инерционных сопел для сепараторов широкого применения со скоростями в сопле от 10...30 м/с

Начальные условия						Вынос частиц			Укрупнение		
$U$ , м/ с	$T_{вх}$ СМ, °С	$C_{вх}$ , г/м <sup>3</sup>	$d_{min}$ , МК М	$d_{mid}$ , МК М	$d_{max}$ х, МК М	$d_{min}$ <i>выно</i> с, %	$d_{mid}$ <i>выно</i> с, %	$d_{max}$ х <i>выно</i> с, %	$d_{min}$ $g_{выно}$ с, Г/ч	$d_{mid}$ $g_{выно}$ с, Г/ч	$d_{max}$ $g_{выно}$ с, Г/ч
10	80	100	3	10	15	95	84	68	5	15	21
15	80	100	3	10	15	93	79	66	6	17	25
20	80	100	3	10	15	92	74	63	8	21	28
25	80	100	3	10	15	91	71	57	9	23	31
30	80	100	3	10	15	89	67	52	11	24	35

## 7. Выводы

На основе выполненного широкого комплекса исследований были выбраны следующие перспективные вариативные схемы инерционных сопел: нормальное обтекание плоской струей и осесимметричной струей плоской поверхности; обтекание плоской струей и осесимметричной струей поверхности под разными углами; обтекание плоской и осесимметричной струями вогнутой и выпуклой поверхностей под разными углами. Их комбинирование позволяет создавать высокоэффективные инерционные ступени очистки для сепарационных градиентных аэрозольных технологий.

Подтверждена эффективность применения трехмерного моделирования для отработки вариативных схем инерционных сопел сепарационных градиентных аэрозольных технологий со скоростями в сопле от 10...30 м/с.



Установлено, что при расстоянии от стенки к соплу до  $-2,0 \cdot d$  наблюдаются повышенные значения кинетической энергии турбулентности, в которых формируются поля осаждения и укрупнения частиц жидкой фазы.

Выполнен расчет осаждения и укрупнения частиц в нестационарных условиях при постоянной осредненной скоростью истечения газовой струи из входного сопла –  $U_0=10...30$  м/с. Выявлено, что минимальный вынос частиц из входных систем инерционных сопел составляет 89% для частиц 3 мкм при скорости 3 м/с.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басок, Б. И. Исследование влияния температуры на процесс улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале [Текст] / Б. И. Басок, А. А. Авраменко, С. С. Рыжков // Промышленная теплотехника. – 2005. – № 4–5. – С. 141–145.
2. Рыжков, С. С. Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред [Текст] / С. С. Рыжков, Б. И. Басок // Промышленная теплотехника. – 2001. – № 4–5. – С. 141–145.
3. Ван-Дайка, М. Течение жидкости и газа [Текст] / М. Ван-Дайка. – М. : Мир, 1986. – 114 с.
4. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию [Текст] / П. Райст. – М. : Мир, 1987. – С. 34–40.
5. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справочник Ч. 1 [Текст] / Под ред. С. Калверта и Г.М. Инглунда. – М. : Metallurgia, 1988. – 760 с.
6. Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей [Текст] / Е. П. Медников. – М. : Наука, 1981. – 176 с.
7. Ryzhkov, S. S. Jet- contact separator of exhaust gases of ship engines [Текст] / S. S. Ryzhkov // Proceedings of the third international conference on marine industry. – Varna, Bulgaria, 2001. – Pp. 137–145.