

DOI 10.15589/jnn20160409
УДК 629.12.03
P93

PRECIPITATION OF AEROSOLS IN THE BOUNDARY LAYERS OF FLAT SURFACES OF POWER PLANTS

ОСАЖДЕНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Sergiy S. Ryzhkov
sergiy.ryzhkov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2201-6172

С. С. РЫЖКОВ,
канд. техн. наук, доц.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. Fractional efficiency of aerosol collection in the boundary layers at different initial speeds of disperse multiphase flow along a flat surface with the jet stream is determined.

Keywords: aerosol; surface; gradient; pressure; temperature; concentration; efficiency.

Аннотация. Определены фракционные эффективности улавливания аэрозолей в пограничных слоях при различных начальных скоростях дисперсного многофазного потока вдоль плоской поверхности при струйном течении.

Ключевые слова: аэрозоль; поверхность; градиент; давление; температура; концентрация; эффективность.

Анотація. Визначено фракційні ефективності уловлювання аерозолів в прикордонних шарах при різних початкових швидкостях дисперсного багатофазного потоку вздовж плоскої поверхні при струминній течії.

Ключові слова: аерозоль; поверхня; градієнт; тиск; температура; концентрація; ефективність.

REFERENCES

- [1] Basok B. I., Ryzhkov S. S., Ryzhkov R. S., Bortsov O. S. *Intensyfikatsiia osadzhennia ridkoi fazy u separatorakh bahatofaznykh sumishei palyv pidvyshchenoho tysku* [Intensification of liquid phase deposition in multiphase mixtures separators of fuel of high pressure] *Promyshlennaya teplotekhnika — Industrial Heat Engineering*, 2014, no. 2, pp. 22–28.
- [2] Basok B. I., Ryzhkov S. S. *Termoforeticheskaya ochistka vozdukh v energeticheskom oborudovanii* [Thermophoretic air cleaning in the energy equipment] *Promyshlennaya teplotekhnika — Industrial Heat Engineering*, 2003, no. 5, pp. 45–50.
- [3] Ryzhkov S. S. *Issledovaniya gazodinamiki i teploperenosa turbulentnykh gazovykh sred s pomoshchyu golograficheskoy interferometrii* [Research of gas dynamics and heat transfer of turbulent gas media using holographic interferometry] *Visnyk NUK — Bulletin of NUS*, 2010, no. 4.
- [4] Ryzhkov S. S. *Problemy intensyfikatsii ochystky v bahatofaznykh dyspersnykh seredovyshchakh enerhetychnykh ustanovok i sposoby yikh vyrishennia (chastyna 1)* [Problems of intensification of treatment in multiphase dispersed media power systems and solutions (part 1)] *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2014, no. 5, pp. 51–58.
- [5] Ryzhkov S. S. *Problemy intensyfikatsii ochystky v bahatofaznykh dyspersnykh seredovyshchakh enerhetychnykh ustanovok i sposoby yikh vyrishennia (chastyna 2)* [Problems of intensification of treatment in multiphase dispersed media power systems and solutions (part 2)] *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2014, no. 6, pp. 51–57.
- [6] Ryzhkov S. S. *Uzahalnena matematychna model vyznachennia intensyvnosti protsesu ochystky dyspersnykh bahatofaznykh potokivu systemakh enerhetychnykh ustanovok* [A generalized mathematical model for determining the intensity of the treatment of disperse multiphase systems potokivu power plants] *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2014, no. 3, pp. 69–76.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Высокоэффективное очистное оборудование энергетических установок использует интенсивные технологии разделения, улавливания, очищения в дисперсных многофазовых потоках. Совокупность гидродинамических, тепловых и массообменных процессов являются предметом исследования для данных технологий. Неоднородность физических полей и потенциальные возможности их градиентных показателей дают возможность совершенствовать процессы очистки многофазных потоков в энергетических установках и повышать их технико-экономические показатели.

Научной проблемой применения градиентных технологий очистки является отсутствие достоверных закономерностей локального и совокупного влияния гидродинамических, тепловых и массообменных процессов на движение частиц многофазовых потоков в пограничных слоях многофункциональных поверхностей энергетических установок.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Современное исследование осаждения мелкодисперсной фазы базируется на анализе движения частиц диаметром от 1 до 100 мкм при различных температурных условиях на основании математического и физического моделирования. Процессы термофоретического эффекта с градиентами температур можно использовать для достижения потребной траектории движения частиц и тем самым способствовать процессу осаждения в исследуемой зоне [2, 3].

Исследование гидродинамических процессов с турбулизацией многофазового потока [1, 4, 5, 6] обосновали эффективность использовать пульсационных составляющих давления на процессы осаждения частиц в исследуемой зоне.

Однако закономерности влияния формы и расположения многофункциональных поверхностей на фракционную эффективность осаждения аэрозолей в пограничных слоях очистного оборудования энергетических установок в этих исследованиях отсутствует.

Определение неисследованной ранее части проблемы. Влияние формы многофункциональных поверхностей на процессы осаждения определяется распределением скорости потока в пограничных областях, а так же температуры и концентрации. Совместное воздействие градиентов давления, температуры и концентрации определяют размеры осаждаемых частиц и их расположение относительно участка поверхности где они осаждаются. Таким образом один и тот же участок поверхности характеризуется фракционной эффективностью осаждения для соответствующих распределений скоростей и температур и концентраций частиц. Определение фракционной

эффективности осаждения для отдельных участков многофункциональных поверхностей и отыскание закономерностей их изменения вдоль этих поверхностей является неисследованной ранее частью проблемы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — определить фракционные эффективности улавливания аэрозолей в пограничных слоях при различных начальных скоростях дисперсного многофазного потока вдоль плоской поверхности при струйном течении.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- экспериментального исследования методом голографической интерферометрии в пограничных слоях при различных начальных скоростях дисперсного многофазного потока вдоль плоской поверхности при струйном течении;

- численного эксперимента на математической модели аэрозольных градиентных технологий очистки частиц многофазовых потоков в пограничных слоях вдоль плоской поверхности при струйном течении;

- верификации и обобщения результатов экспериментальных и расчетных данных.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Физическое моделирование процесса. Струйное движение многофазного газового потока с температурой около 100 °С осуществлялось из сопла диаметром 20 мм с начальной скоростью от 5 м/с до 10 м/с в аэродинамическом рабочем участке, приведенном на рис. 1 [3].

При взаимодействии струи и платины, температура которой 20 °С, осуществлялось осаждение мелкодисперсной фазы при повороте потока и его завихрении. Температура стенок поддерживалась постоянной. Исследование проводилось с регистрацией интерферограмм в реальном времени. Для регистрации изображения при убранном экране использовалась цифровая камера.

Программный комплекс обработки интерферограмм решал задачу определения количества полос, прошедших через каждый пиксель изображения интерферограммы на кинограмме. Внешний вид интерфейса программы обработки показан на рис. 2. [5].

На основании интерферограммы определялись значения толщины, температур и температурных градиентов, характеризующих двумерный температурный пограничный слой, аналогично как в работе [5]. На основании показателей температурного пограничного слоя моделировались показатели двумерного гидродинамического пограничного слоя: толщина, распределение скоростей, давлений и их градиентов на основании уравнений теплового потока для пограничного слоя плоских поверхностей, Гладстона-Дейла и Менделеева-Клапейрона.

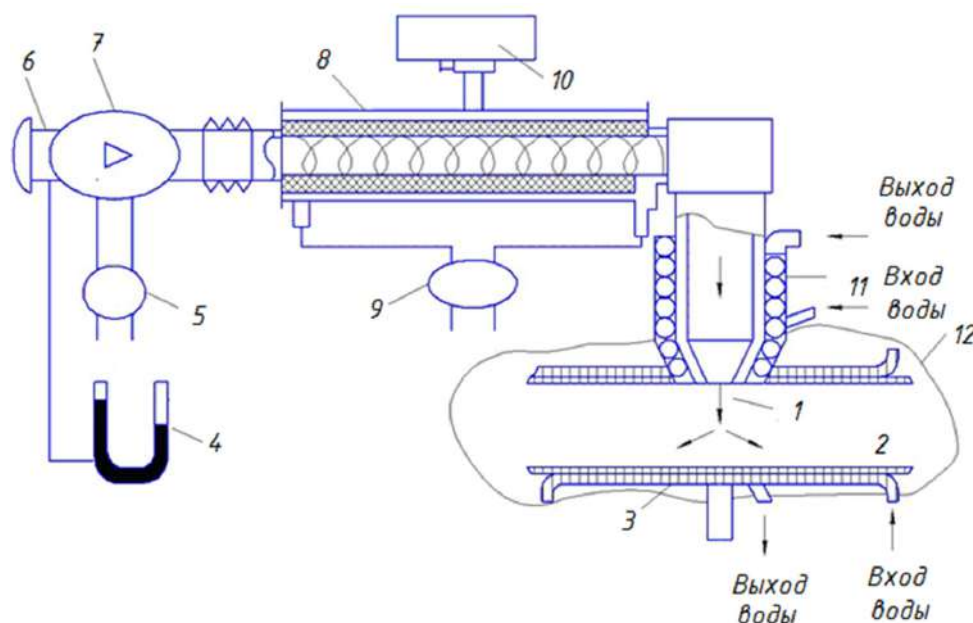
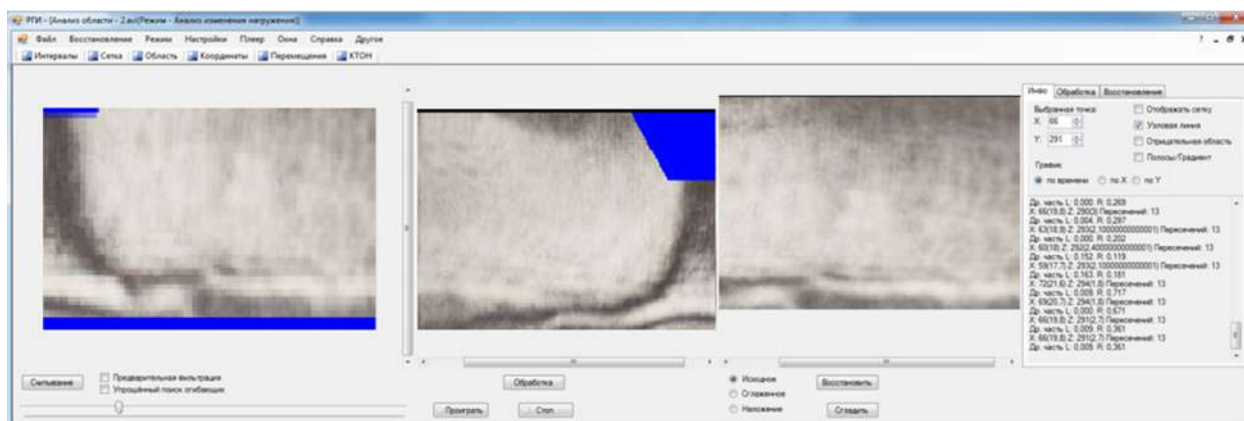


Рис. 1. Аэродинамический рабочий участок:

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



Безразмерная координата пограничного слоя	0	0,094	0,138	0,181	0,231	0,275	0,312	0,375
Температура, К	293	296,0	313,0	318,4	324,6	329,8	333,8	340,3
Скорость, м/с	0	0,638	0,795					
Давление, 10^{-5} Па								
Градиент температуры, К/м	31,9	159,0	125,6	124,0	118,2	108,1	93,2	80,0
Градиент давления, 10^{-5} Па/м								
Безразмерная координата пограничного слоя	0,419	0,499	0,575	0,706	0,812	0,950	1	
Температура, К	344,4	350,8	355,2	360,2	366,9	372,6	373	
Скорость, м/с								
Давление, 10^{-5} Па								
Градиент температуры, К/м	57,9	38,2	63,2	41,3	8,0	3,6	0	
Градиент давления, 10^{-5} Па/м								

Рис. 2. Результаты обработки интерферограммы с определением количества интерференционных полос на изображении

Математическое моделирование процесса.

Адекватность математической модели при исследовании с учетом принятых допущений реальным процессам осаждения аэрозолей на поверхностях обосновывается применением системы уравнений, описывающих законы сохранения массы, энергии и импульса при турбулентных течениях [6]. Эта система дополняется уравнениями состояния и условиями однозначности. При моделировании траекторий движения аэрозольных частиц применялось уравнение динамики, которое учитывало основные и дополнительные силы. Дополнительные силы учитывали влияние градиентов давления, температуры и диффузии. Эти дополнительные силы влияют на движение частиц имеющих объемную форму. На частицы, имеющие плоские формы с кривизной дополнительно действует подъемная сила Жуковского, но у аэрозольных частиц такие формы встречаются редко, и поэтому в расчетах эта сила не учитывалась.

Результаты исследования. Согласование результатов расчетов при обработке интерферограмм и при численном моделировании представлены ниже. Гистограммы фракционной эффективности осаждения частиц определялись для сухих так и покрытых пленкой жидкости поверхностей пластины (рис. 3). Влияние слоя жидкости на эффективность осаждения частиц учитывалось величиной коэффициента захвата

величина которого зависит от направления скорости движения частицы по отношению плоскости поверхности и действия поверхностных сил.

Аналогичные результаты для скорости потока $U_0 = 10 \text{ м/с}$; $d_0 = 10 \text{ мм}$; $h = 100 \text{ мм}$; $y = 60 \text{ мм}$ приведены на рис. 4.

Гистограммы фракционной эффективности осаждения в зависимости от размера частиц и их расположения от оси сопла при соответствии расчетного распределения температур и скоростей данным физического и математического моделирования процессов обтекания струей плоской поверхности на рис. 3. приведены на рис. 5.

Влияние расположения частиц относительно оси сопла на эффективность их улавливания приведено на рис. 5, а. По оси абсцисс указано расстояние от оси, на которую удаляется линия тока при различных начальных положениях частицы. По оси ординат указано интегральное значение эффективности осаждения для различных расстояний от оси сопла.

Чем больше начальное расположение частицы от оси сопла тем меньше эффективность его осаждения, а при расположении частиц более $0,25 d_0$ эффективность осаждения равна нулю.

Влияние начального размера частиц и их расположения от оси сопла на эффективность осаждения приведено на рис. 5, б. Согласно приведенным

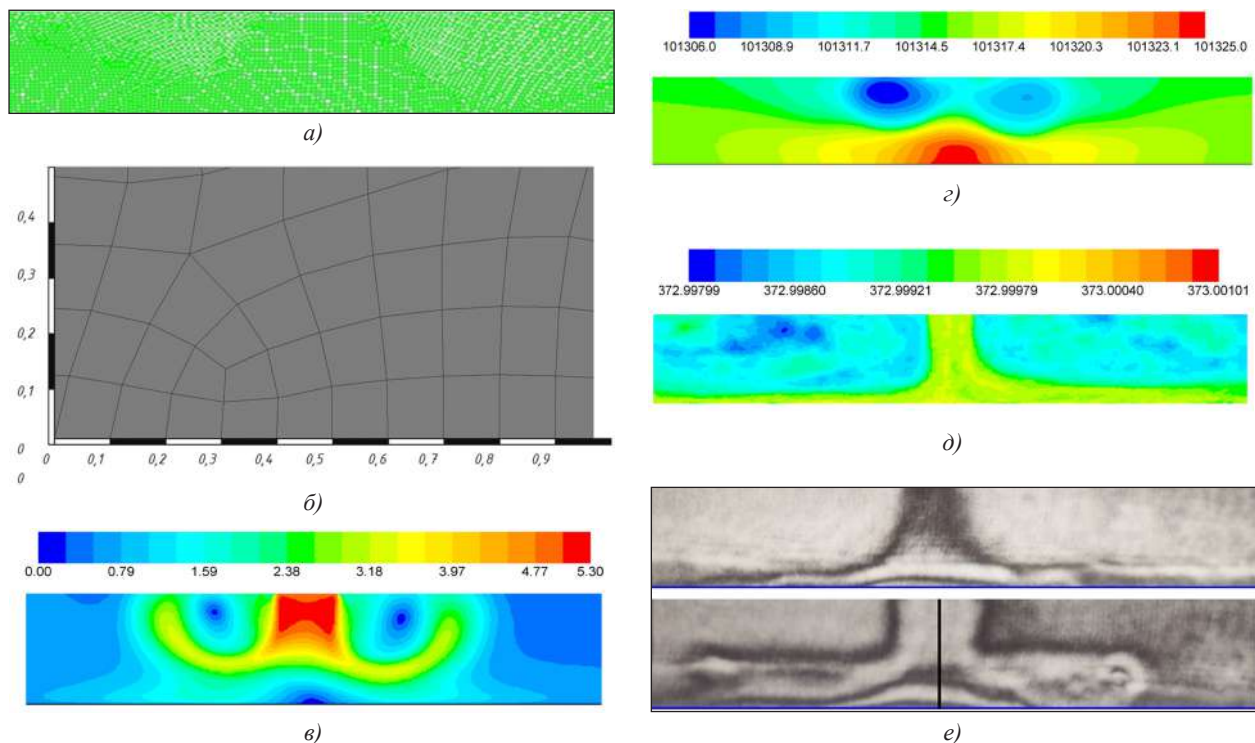
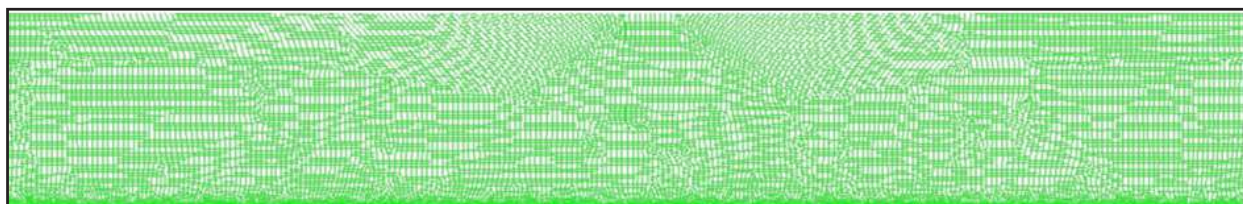


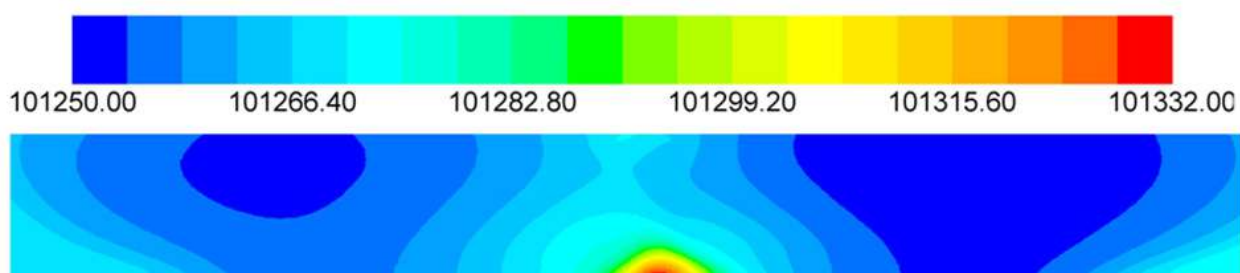
Рис. 3. $U_0 = 5 \text{ м/с}$; $d_0 = 20 \text{ мм}$; $h = 100 \text{ мм}$; $y = 60 \text{ мм}$:

а, б) расчетная сетка и особенности построения сетки возле поверхности, результаты расчета:

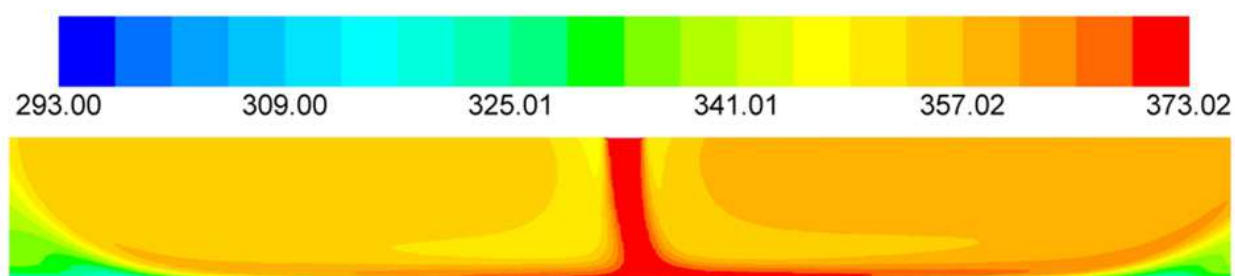
в) поле скоростей, г) поле давлений, д) поле температур, е) — кинограммы интерферограмм (термо-гидрограмм) обтекания пластины плоской неизотермической струей с частотой — 2000 кадров в секунду



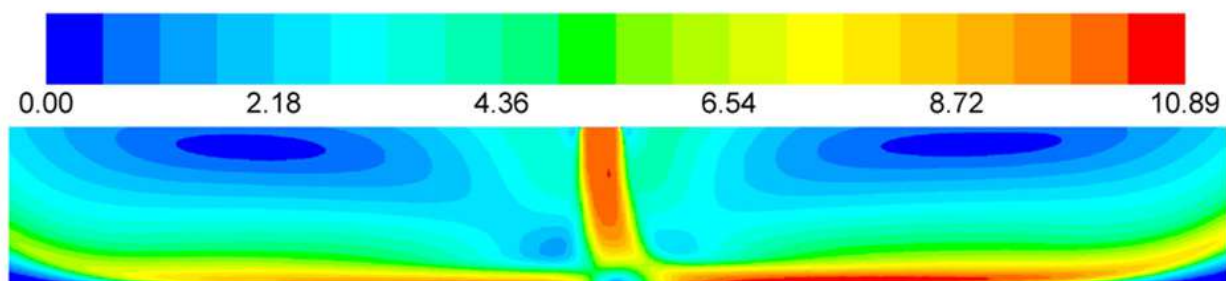
а)



б)



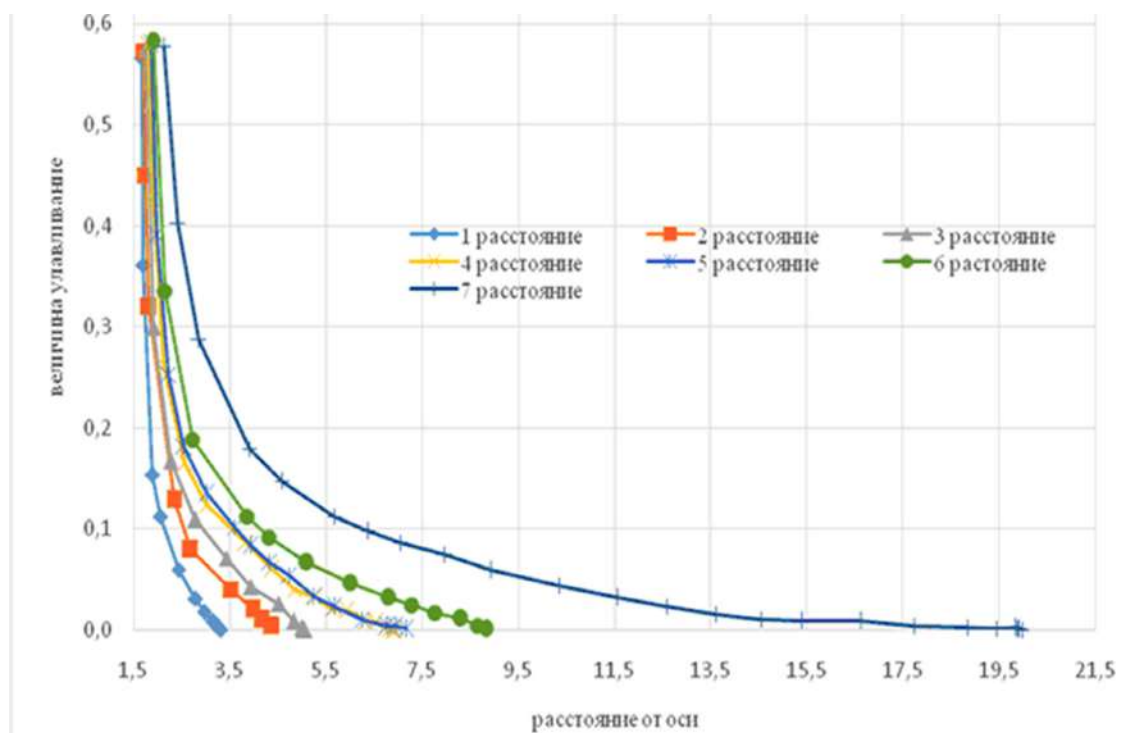
в)



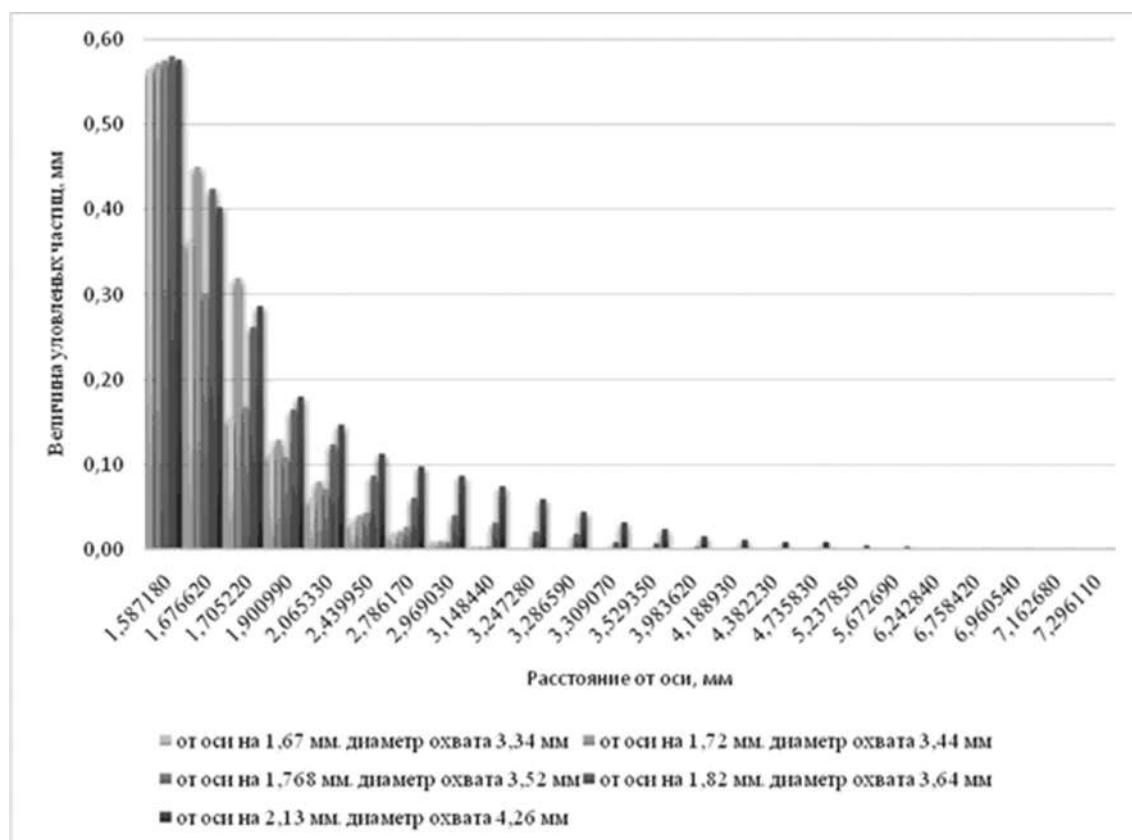
г)

Рис. 4. Расчетная сетка — а) и результаты расчета:

б) поля давлений, в) поля температур, г) поля температур при $U_0 = 5 \text{ м/с}$; $d_0 = 20 \text{ мм}$; $h = 100 \text{ мм}$; $y = 60 \text{ мм}$



а)



б)

Рис. 5. Гистограммы фракционной эффективности осаждения в зависимости от размера частиц и их расположения от оси сопла

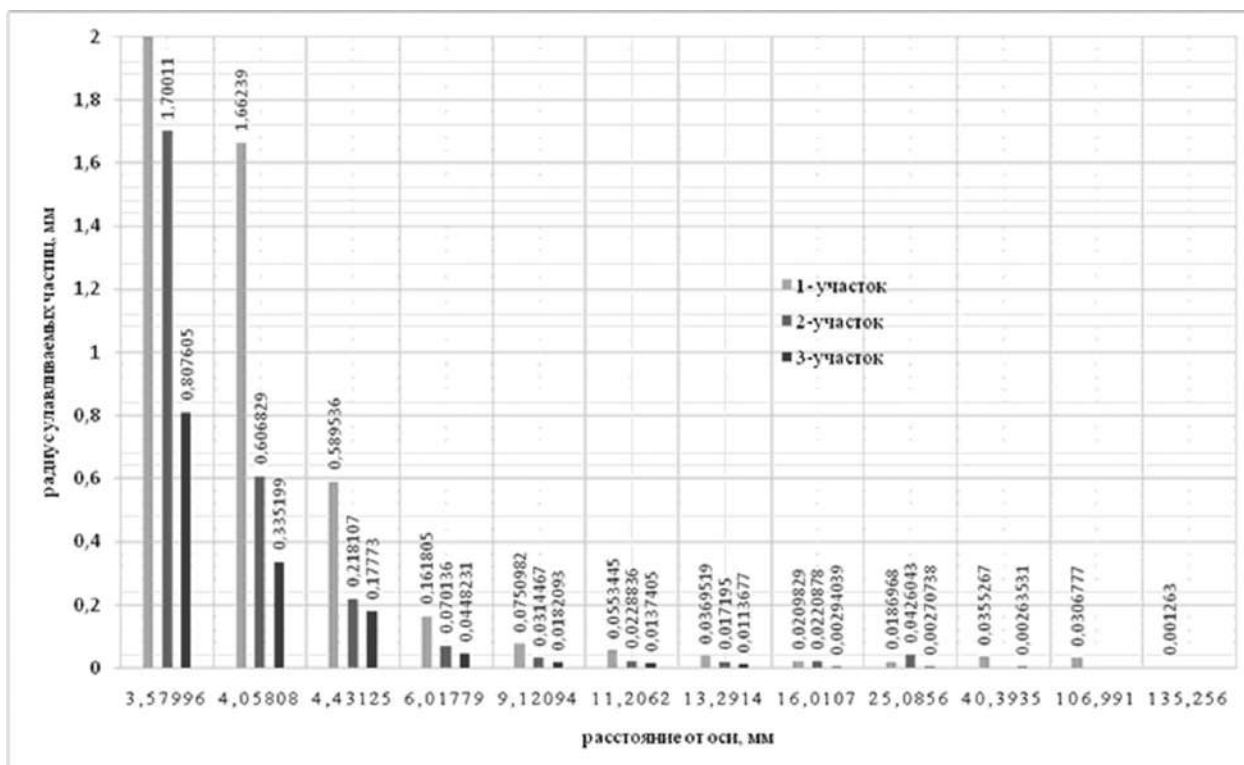


Рис. 6. Гистограмма радиус частиц, которые улавливаются от расположения частицы относительно оси сопла

данным более крупные частицы высаживаются ближе к оси сопла, а более мелкие на расстоянии соответствующему диаметру сопла.

На гистограмме рис. 6 по оси абсцисс указано расстояние от оси, на которую удаляется линия тока от начального положения. По оси ординат указан радиус частиц, которые улавливаются.

ВЫВОДЫ. 1. Экспериментальное исследование методом голографической интерферометрии в пограничных слоях при различных начальных скоростях дисперсного многофазного потока вдоль плоской поверхности при струйном течении позволило определить распределение темпе-

ратур и скоростей для верификации и обобщения результатов экспериментальных и расчетных данных.

2. На основании численного эксперимента на математической модели аэрозольных градиентных технологий очистки частиц многофазовых потоков в пограничных слоях вдоль плоской поверхности при струйном течении определены условия фракционные эффективности улавливания аэрозолей.

3. Рассчитаны значения фракционной эффективности улавливания аэрозолей в виде гистограмм радиус частиц, которые улавливаются от их расположения относительно оси сопла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Басок, Б. І. Інтенсифікація осадження рідкої фази у сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / Б. І. Басок, С. С. Рижков, Р. С. Рижков, О. С. Борцов // Пром. теплотехника. — 2014. — № 2. — С. 22–28.
- [2] Басок, Б. І. Термофоретическая очистка воздуха в энергетическом оборудовании [Текст] / Б. І. Басок, С. С. Рижков // Промышленная теплотехника. — 2003. — № 5. — С. 45–50.
- [3] Рижков, С. С. Исследования газодинамики и теплопереноса турбулентных газовых сред с помощью голографической интерферометрии [Текст] / С. С. Рижков // Електронний вісник НУК — 2010 — № 4.
- [4] Рижков, С. С. Проблеми інтенсифікації очистки в багатофазних дисперсних середовищах енергетичних установок і способи їх вирішення (частина 1) [Текст] / С. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК. — 2014. — Вип. 5. — С. 51–58.

- [5] **Рижков, С. С.** Проблеми інтенсифікації очистки в багатофазних дисперсних середовищах енергетичних установок і способи їх вирішення (частина 2) [Текст] / С. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК. — 2014. — Вип. 6. — С. 51–57.
- [6] **Рижков, С. С.** Узагальнена математична модель визначення інтенсивності процесу очистки дисперсних багатофазних потоків у системах енергетичних установок [Текст] / С. С. Рижков // Збірник наукових праць НУК. — 2014. — Вип. 3. — С. 69–76.

© С. С. Рижков

Надійшла до редколегії 08.07.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *С. І. Сербін*