

Термопескоструйные аппараты на основе углеводородно-воздушных газогенераторов

© В.А. Чернов¹, А.В. Сухов¹, К.В. Федотова^{1,2}

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование эффективности термопескоструйных аппаратов эжекторного и напорного типов посредством измерения уноса материала с поверхности исследуемых образцов для различных видов абразива. Описаны методика исследования и элементы экспериментального оборудования. Предложена математическая модель для расчета характеристик термопескоструйных аппаратов при ряде допущений. По уносу массы образца оценены энергия частиц абразива и эффективность термопескоструйного аппарата в целом. Анализ полученных результатов подтверждает сравнительно высокую производительность и перспективность термопескоструйных аппаратов напорного типа.

Ключевые слова: термопескоструйный аппарат эжекторного типа, термопескоструйный аппарат напорного типа, абразив, газогенератор, унос массы, эффективность термопескоструйного аппарата.

Очистка поверхностей различных систем и агрегатов с помощью пескоструйных аппаратов (ПСА) находит все большее применение как более эффективная по сравнению с ручной очисткой. В настоящее время существует множество схемных и конструктивных решений песко- и дробеструйных аппаратов.

Все ПСА по принципу подачи абразива в разгонный участок делятся на два типа: аппараты, где используется эффект эжекции высокоскоростного потока воздуха (ПСЭ), и аппараты, в которых абразив подается в высокоскоростной газовой поток под напором из бака, находящегося под давлением (ПСН).

В свою очередь, каждый из этих типов ПСА можно подразделить на «холодные» и «горячие». В ПСА первого типа рабочий газ подается в разгонный участок непосредственно от компрессора, в ПСА второго типа — от газогенератора, работающего на углеводородном горючем. Такая схема с предварительным разогревом рабочего газа до высоких температур (термоПСА, или ТПСА) значительно повышает КПД аппарата. По предварительным оценкам, при той же производительности расход абразива у ТПСА ниже в 5–10 раз, чем у конструкций без предварительного разогрева. Это обусловлено более высокой кинетической энергией частиц абразива на выходе из разгонного

участка вследствие значительного прироста скорости газового потока, а также «размягчением» очищаемой поверхности под воздействием высокотемпературного потока (300...500 °С) на выходе из ТПСА. Этот эффект особенно ощутим при очистке поверхностей от лакокрасочных покрытий, антикоррозийных мастик, гудронов и покрытий газопроводов.

В настоящее время промышленность и торговые организации предлагают пескоструйные пневмораспылители эжекторного типа или абразивоструйные установки эжекторного типа только для мелкомасштабных работ. Технические характеристики этих установок таковы: расход воздуха $(3,3...18,3) \cdot 10^{-3}$ м³/мин, давление 0,2...0,6 МПа, объем бака абразива около 0,05 м³. Такие установки обеспечивают производительность очистки металлических поверхностей от окалины, коррозии, лакокрасочных покрытий до 3 м²/ч.

Для более масштабных работ обычно предлагаются аппараты напорного типа, в которых абразив находится в баке под давлением 0,5...0,7 МПа и подается из бака с помощью воздуха. При расходе воздуха $(33...83,3) \cdot 10^{-3}$ м³/мин эти аппараты показывают производительность очистки до 30 м²/ч при расходе абразива 35...40 кг на 1 м² очищаемой поверхности [1]. Такие аппараты производят фирмы Clemco, Schlik (Германия), некоторые российские фирмы (в частности, АСО, DSG) [2] и др.

В статье, опубликованной в Интернете, проводится сравнение эффективности «холодных» ПСЭ и ПСН и приводятся данные о существенно большей (в 2,0–2,5 раза) эффективности систем с напорной подачей [3], однако вопрос о преимуществах и недостатках ТПСА эжекторного и напорного типов остается открытым.

В настоящей работе приведены некоторые результаты экспериментальных исследований и дано сравнение эффективности ТПСА эжекторного (ТПСЭ, рис. 1) и напорного (ТПСН, рис. 2) типов на основе измерения уноса массы материала с поверхности исследуемых образцов, установленных за выходным сечением разгонного участка. По уносу массы образца оцениваются энергия частиц абразива и эффективность ТПСА в целом.

В процессе эксперимента в качестве исследуемых образцов применялись стальные диски (Ст20) диаметром 50 и 80 мм, толщиной 10 и 6 мм соответственно. Образцы устанавливались на расстоянии 180 и 100 мм от выходного сечения разгонного участка под углом 45° к направлению двухфазного потока рабочего тела.

В экспериментальных исследованиях использовалось пять видов абразива одинаковой массы (1 кг):

1) кварцевый песок карьера Раменского горно-обогатительного комбината (РГОК), ГОСТ 22551–77;

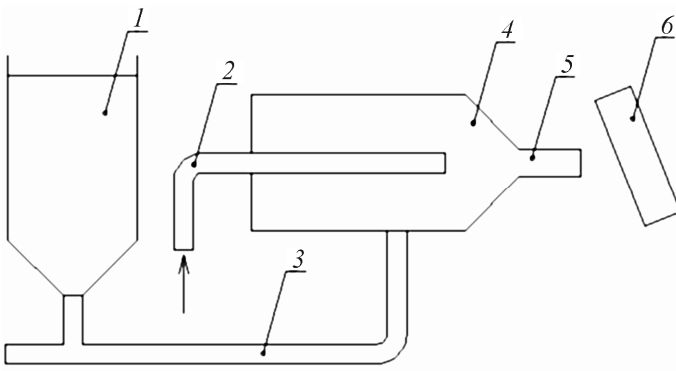


Рис. 1. Схема ТПСЭ:

1 — бак с абразивом; 2 — магистраль подачи воздуха; 3 — магистраль подачи абразива; 4 — камера сгорания; 5 — разгонный участок абразива; 6 — исследуемый образец

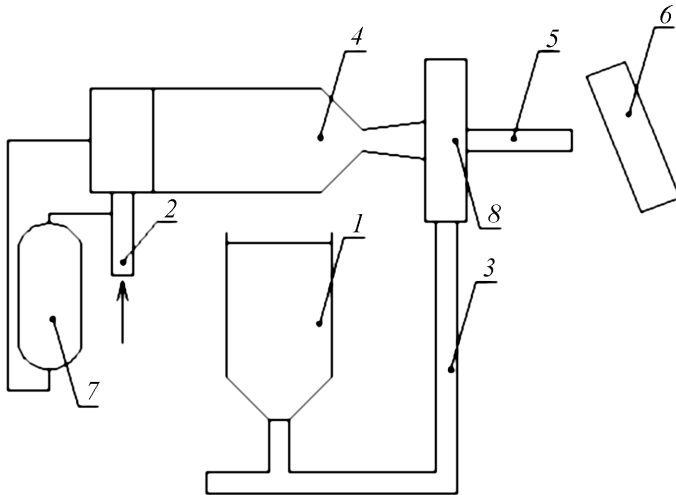


Рис. 2. Схема ТПСН:

1 — бак с абразивом; 2 — магистраль подачи воздуха; 3 — магистраль подачи абразива; 4 — камера сгорания; 5 — разгонный участок абразива; 6 — исследуемый образец; 7 — бак горючего; 8 — камера сгорания

- 2) молотый полевой шпат (обогащенный пегматит);
- 3) речной песок с частицами размером 1...2 мм;
- 4) речной песок, просеянный через сито 2×2 мм²;
- 5) речной песок, просеянный через сито 0,4×0,4 мм² и 0,16×0,16 мм² (размер частиц 0,4...0,16 мм).

Исследования под микроскопом показали, что размер исходных частиц обогащенного пегматита несколько выше (около 0,4 мм), чем частиц РГОК (около 0,3 мм). Плотность материала всех видов абра-

зива составляет примерно 2670 кг/м^3 , насыпная плотность находится в пределах 1270 кг/м^3 (обогащенный пегматит) и 1600 кг/м^3 (остальные абразивы).

Газогенератор может работать на любом жидком углеводородном горючем (бензин, керосин, дизельное топливо, их смеси в любой пропорции) и сжатом воздухе (давление на входе в установку $p_{\text{вх}} = 0,6 \text{ МПа}$) при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 2,85$ и расчетной температуре продуктов сгорания примерно 1200 К , определяемой жаростойкостью конструкционных материалов, выполненных из коррозионно-стойкой стали X18H10T. Расход воздуха составляет около $0,08 \text{ кг/с}$, горючего около $0,002 \text{ кг/с}$.

ТермоПСА электронного типа (ТПСЭ) (см. рис. 1) имеет сопло диаметром $d_{\text{кр}} = 14 \text{ мм}$ и работает при давлении в камере $p_{\text{к}} = 0,45 \text{ МПа}$, ТПСН (см. рис. 2) имеет сопло диаметром $d_{\text{кр}} = 12,5 \text{ мм}$ и работает при давлении в камере $p_{\text{к}} = 0,5 \text{ МПа}$, диаметр трубы на срезе разгонного участка $d_{\text{ср}} = 24 \text{ мм}$.

Температуру потока на выходе из разгонного участка измеряли с помощью термопары хромель — алюмель с открытым спаем для оценки соответствия ее значения расчетному.

Абразив в разгонный участок ТПСЭ (см. рис. 1) подается из открытой емкости, а в ТПСН (см. рис. 2) — из бака, находящегося под давлением $0,6 \text{ МПа}$, по трубопроводу, расположенному внутри камеры сгорания перед входом в сопло (расстояние от выходного сечения абразивной трубки до входа в сопло составляет примерно 20 мм). Входная часть сопла газогенератора ТПСН выполнена с углом раскрытия 60° , а закритическая часть — с углом раскрытия 4° (длина 157 мм). Кроме того, для ТПСН использовались цилиндрические насадки длиной 100 мм . Расстояние от среза разгонного участка до исследуемого образца составляло 180 либо 100 мм .

Образцы до и после каждого эксперимента взвешивали на лабораторных весах с точностью до $0,01 \text{ г}$. Результаты экспериментов для определенного времени эксперимента или начальной массы абразива (1 кг) представлены на рис. 3. Видно, что для всех видов абразива эта зависимость имеет экстремальные значения в области $l \approx 450 \text{ мм}$.

Кроме того, установлено, что максимальный унос массы получен при использовании кварцевого песка РГОК, а наименьший — при использовании речного песка, просеянного через сито $2 \times 2 \text{ мм}^2$.

Различие величин уноса массы для разных абразивов обусловлено физическими свойствами и степенью прогрева материала образца, фракционным составом абразива, скоростью потока.

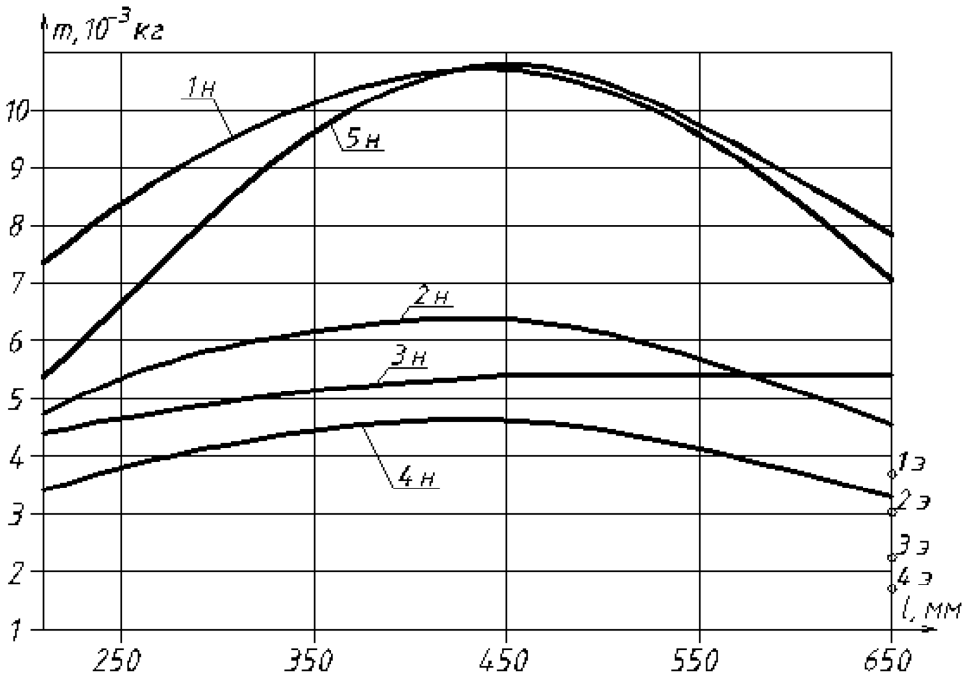


Рис. 3. Зависимости уноса массы образца от длины разгонного участка (1–5 — пять видов абразива; индексы «н» и «э» соответствуют ТПСН и ТПСЭ)

Как видно, при использовании ТПСН унос массы в 2–3 раза выше, чем при использовании ТПСЭ, что обусловлено различием скоростей истечения и соответственно кинетической энергии частиц абразива. Кроме того, установлено, что максимальный унос массы материала получен для частиц абразива размером около 0,3 мм. Уменьшение расстояния от выходного сечения разгонного участка до образца от 180 до 100 мм приводит к увеличению уноса массы образца в 1,5–2,0 раза для ТПСН и в 3 раза для ТПСЭ при использовании любого абразива.

Приведенные выше экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с результатами расчета. Расчет проведен для сопла длиной 240 мм с углом раскрытия 3° и частиц размером от 0,3 мм (эквивалент — кварцевый песок РГОК) до 2 мм (эквивалент — речной песок).

Математическая модель:

$$\frac{dw_k(x)}{dx} = 0,75C_x \frac{\rho_r}{\rho_k} \frac{w_{отн}^2(x)}{w_k(x) \cdot d}; \quad (1)$$

$$\frac{dw_r(x)}{dx} + \frac{g_k}{g_r} \frac{dw_k(x)}{dx} + \frac{R}{w_r(x) \cdot \rho_r} \left(\rho_r \frac{dT_r(x)}{dx} + T_r(x) \frac{d\rho_r}{dx} \right) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{w_{\Gamma}^2(x) - w_{\Gamma 0}^2}{2} + \frac{g_{\kappa}}{g_{\Gamma}} \frac{w_{\kappa}^2(x) - w_{\kappa 0}^2}{2} = c_{p\Gamma} (T_{\Gamma 0} + T_{\Gamma}(x)) + \frac{g_{\kappa}}{g_{\Gamma}} c_{p\kappa} (T_{\kappa 0} + T_{\kappa}(x)); \quad (3)$$

$$\frac{dT_{\kappa}(x)}{dx} = \frac{6\alpha}{c_{p\kappa}\rho_{\kappa}d} \frac{T_{\Gamma}(x) - T_{\kappa}(x)}{w_{\kappa}(x)}; \quad (4)$$

$$F(x)\rho_{\Gamma}w_{\Gamma}(x) = G_{\Gamma}, \quad (5)$$

где (1) — уравнение движения частиц; (2) — уравнение движения газа; (3) — уравнение энергии; (4) — уравнение теплообмена между частицами и газом; (5) — уравнение расхода.

В уравнениях (1)–(5)

$$C_x = f(\text{Re}_{\text{отн}}); \quad \alpha = \frac{\lambda_{\Gamma}}{d} \text{Nu}(\text{Re}_{\text{отн}}); \quad \text{Re}_{\text{отн}} = \frac{w_{\text{отн}}\rho_{\Gamma}d}{\mu_{\Gamma}};$$

$w_{\Gamma 0}$ — начальная скорость газового потока; w_{Γ} — скорость газа; w_{κ} — скорость частиц абразива; $w_{\kappa 0}$ — начальная скорость частиц абразива; T_{Γ}, T_{κ} — температура газовой и твердой фаз; $T_{\Gamma 0}, T_{\kappa 0}$ — начальные температуры газовой и твердой фаз; $c_{p\Gamma}, c_{p\kappa}$ — удельная теплоемкость при постоянном давлении газовой и твердой фаз; G_{Γ} — массовый расход газовой фазы; g_{Γ} — массовая доля газовой фазы; g_{κ} — массовая доля твердой фазы; d — диаметр частицы абразива; F — площадь поперечного сечения канала; α — коэффициент теплоотдачи; $w_{\text{отн}}$ — относительная скорость фаз; C_x — коэффициент лобового сопротивления частицы; $\text{Re}_{\text{отн}}$ — число Рейнольдса для относительного движения частиц (в качестве характерного размера принят диаметр частицы); μ_{Γ} — вязкость газа; λ_{Γ} — теплопроводность газа; Nu — число Нуссельта.

При составлении расчетной системы уравнений приняты следующие допущения [4, 5].

1. Течение стационарное и одномерное.
2. Теплообмен с окружающей средой отсутствует.
3. Удельные теплоемкости фаз и коэффициент динамической вязкости не зависят от температуры.
4. Массовые расходы фаз постоянны (фазовые переходы отсутствуют, т. е. нет конденсации, горения или испарения частиц).
5. В потоке не происходит дробления или коагуляции частиц.
6. Общий объем частиц пренебрежимо мал по сравнению с объемом газовой фазы.
7. Скачки уплотнения в потоке отсутствуют, скорость частиц относительно движения газа не превышает скорости звука.
8. Все частицы имеют сферическую форму и одинаковый диаметр.

9. Механическим взаимодействием частиц можно пренебречь, что позволяет считать парциальное давление частиц равным нулю.

10. Взаимодействие потока со стенкой канала отсутствует.

11. Коэффициент сопротивления частиц постоянен. (В результате первичной оценки выяснилось, что он лежит в области автомодельности на всей длине взаимодействия с газовым потоком.)

В процессе приведения в систему уравнений подставлена функция площади и ее производной, так как контур канала заведомо известен, что позволило исключить из системы одно дифференциальное уравнение:

$$F(x) = \frac{\pi(d - 2x \operatorname{tg} \beta)^2}{4};$$

$$f(x) = -\pi(1,2 \cdot 10^{-2} - 2x \operatorname{tg} \beta) \operatorname{tg} \beta.$$

Для обеспечения сходимости решение для до- и закритической частей сопла проводилось отдельно. Результаты расчета в виде графических зависимостей представлены на рис. 4 и 5.

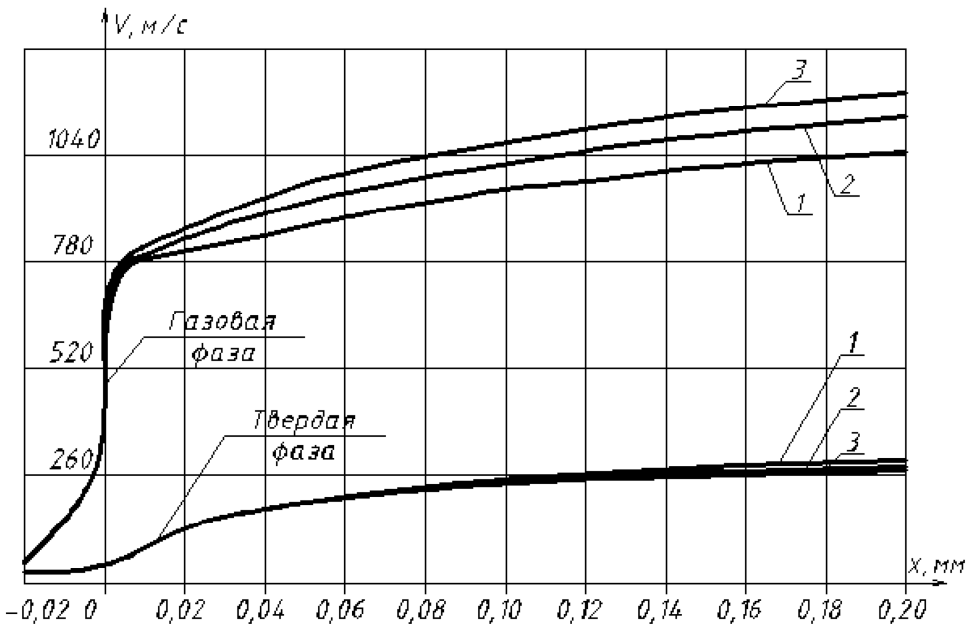


Рис. 4. Результирующие зависимости для разных углов раскрытия:

1 — угол раскрытия 2°; 2 — угол раскрытия 3°; 3 — угол раскрытия 4°

Таким образом, в результате проведенных экспериментально-теоретических исследований получены данные, характеризующие эффективность работы ТПСН и ТПСЭ. Установлено, что ТПСН обладают более высокой производительностью по сравнению с ПСА

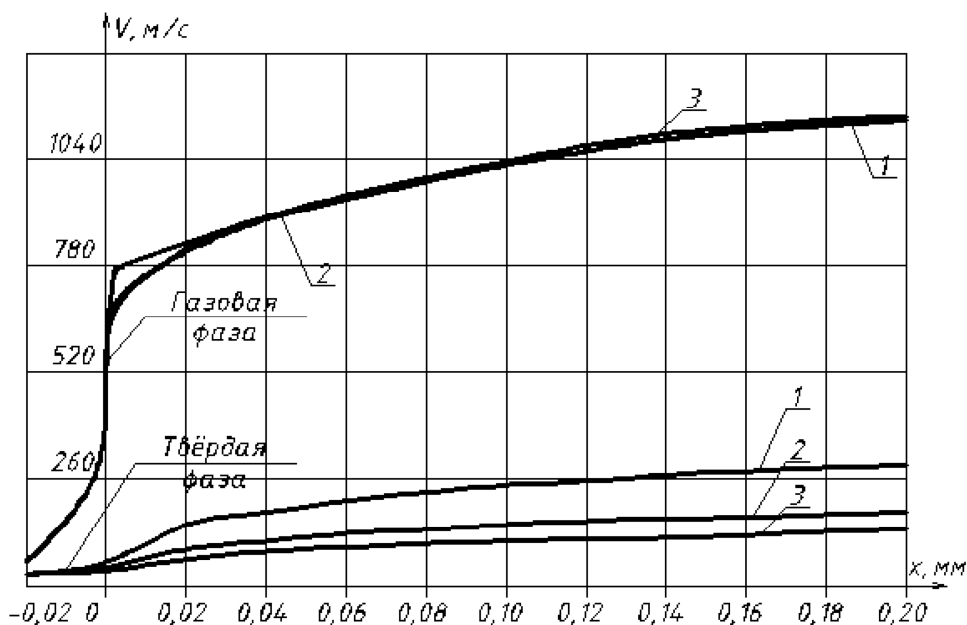


Рис. 5. Результирующие зависимости для разных диаметров частиц абразива:
1 — 0,3 мм; 2 — 1 мм; 3 — 2 мм

любых других видов, что при определенном усложнении конструкции делает их применение в промышленности перспективным и экономически оправданным.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Промышленное и строительное оборудование от ведущих отечественных и зарубежных производителей. Сборник. Корпорация «Экономика». Прайс-лист.* Москва, 2006.
- [2] *Clemco. Preisliste, October 2004.*
- [3] *Surface blasting systems. LLC.* URL: <http://www.surface-blasting.com>
- [4] Венедиктов В.Д. *Турбины и реактивные сопла на двухфазных потоках.* Москва, Машиностроение, 1969.
- [5] Стернин Л.Е. *Основы газодинамики двухфазных течений в соплах.* Москва, Машиностроение, 1974.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чернов В.А., Сухов А.В., Федотова К.В. Термопескоструйные аппараты на основе углеводородно-воздушных газогенераторов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/700.html>

Чернов Владимир Александрович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Московская область, Дмитровский район, пос. Орево, тел.: 8-496-227-81-60).

Сухов Алексей Васильевич — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, тел.: 8-915-472-84-16).

Федотова Ксения Викторовна — аспирантка кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер ЦИАМ им. П.И. Баранова. e-mail: ksu_number1@mail.ru