

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТРАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЭРОДЕНТА ПРИ НОРМАЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ СТРУЕЙ ГАЗО- АБРАЗИВНОГО ПОТОКА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ

Д. т. н., проф. Селезнев Л. И.¹,
с. н. с., к. т. н. Медников А. Ф.¹,
м. н. с., к. т. н. Тхабисимов А. Б.¹
(ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

АННОТАЦИЯ. Проведен анализ поведения отраженных твердых частиц эродента по высоте специальной «ловушки» после взаимодействия частиц с поверхностью мишени. Выполнена оценка полученных значений математического ожидания M , среднеквадратического отклонения σ , коэффициента асимметрии Sk и эксцесса Ex . В результате взаимодействия газоабразивного потока с поверхностью мишени изменяется фракционный состав частиц эродента, а также происходит изменение полидисперсности и полискоростности эродента. Это обстоятельство может оказывать влияние на абразивный износ элементов конструкций турбомашин, расположенных далее по направлению движения основного парового потока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: абразивный износ, твердые частицы эродента, статистические оценки, фракционный состав, нормальное обтекание, плоская поверхность.

ABSTRACT. The paper analyzes the behavior of height distribution of erodent reflected hard particles on special «trap» after particles interaction with the target surface. The paper analyzes received values of mathematical expectation M , standard deviation σ , coefficient of asymmetry Sk and kurtosis Ex . As a result of the gas-abrasive flow interaction to the target surface changes the fractional composition of the erodent particles, as well as changes «poly-dispersity» and «poly-speed» of erodent particles. This may influence on the turbomachinery structural elements solid particle erosion located further along the direction of the main steam flow movement.

KEYWORDS: solid particle erosion, hard erodent particles, statistical ratings, fractional composition, normal wrapping, flat surface.

Процесс абразивного износа, которому подвержены многие элементы энергетического оборудования, является глубоко статистическим. Твердые абразивные частицы движутся в проточных частях паротурбинных установок по случайным траекториям и взаимодействуют с поверхностями лопаток и других элементов конструкций первых ступеней цилиндров высокого и среднего давлений с различными скоростями и под разными углами, вызывая их травмирование и износ.

При соударениях с поверхностями обтекаемых тел твердые частицы эродента могут либо дробиться с определенной вероятностью, либо отражаться в случайных направлениях и со случайными скоростями, поскольку их взаимодействие может быть как упругим, так и упругопластическим в зависимости от условий соударения.

Следует подчеркнуть, что частицы реального абразива имеют неправильную и грубую случайную форму, и не могут быть охарактеризованы лишь одним или тремя параметрами, как в случаях сферической или эллипсоидной формы соответственно. Кроме того, размеры таких частиц случайны, как случайны и их скорости в

потоке несущей среды, т. е. траектории движения таких частиц также являются случайными.

В таком случае, принимая во внимание вышесказанное, после соударения с поверхностью плоской мишени твердые частицы эродента отражаются в случайных направлениях и в первом приближении распределение по углам их отражения можно считать равномерным в пределах $0 \div 180^\circ$.

Вместе с тем, струйное обтекание поверхности, будучи ограниченным по нормали к поверхности, характеризуется наличием свободной поверхности тока, на которой давление постоянно. В случае газоабразивного потока некоторые отраженные частицы эродента могут пересекать свободную поверхность струи, не испытывая основного влияния несущей среды, покидать ее и двигаться дальше, подчиняясь сопротивлению среды вне основного потока и внешним массовым силам, например, силам тяготения.

Целью настоящего исследования было вычисление и проведение анализа статистических характеристик твердых частиц эродента при нормальном обтекании струей газоабразивного потока плоской поверхности металлической мишени.

¹ 111250, Москва ул. Красноказарменная, 14

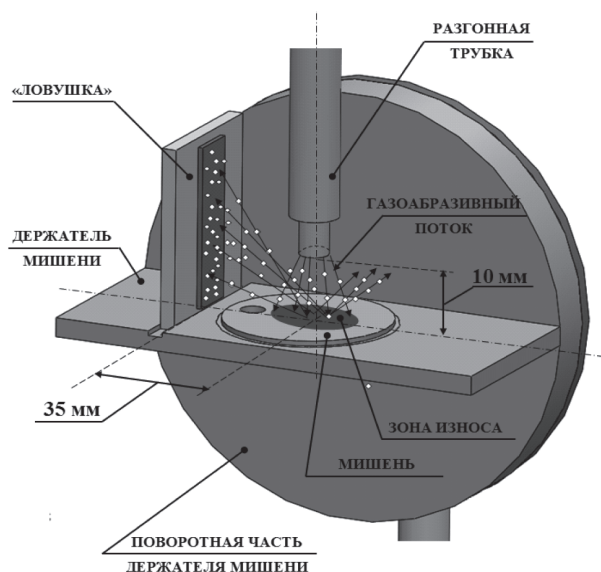


Рис. 1. Схема проведения эксперимента по исследованию статистических характеристик отраженных частиц эродента.

Для проведения испытаний был использован экспериментальный стенд [1], позволяющий проводить исследования процессов абразивного износа материалов, защитных покрытий и различных способов упрочнений при варьируемых параметрах эксперимента (скоростях и углах атаки газоабразивного потока, температурах экспериментальных образцов-мишеней). В качестве твердых частиц эродента использовался электрокорунд Al_2O_3 [2].

Отраженные твердые частицы эродента после взаимодействия с поверхностью мишени собирались с помощью специальной «ловушки» [2], которая была расположена перпендикулярно плоскости держателя мишени на расстоянии 35 мм от центра соударения струи с мишенью (рис. 1).

Массовый расход несущей среды (воздуха) составлял $37,3 \cdot 10^{-5}$ кг/с; расход твердых частиц эродента: $8,3 \cdot 10^{-5}$ кг/с. Таким образом, расходная массовая концентрация $x_{э}^*$ твердых частиц эродента была равна 0,182. В качестве мишени использовались образцы из стали 20Х13, которая применяется для изготовления лопаток первых ступеней цилиндров высокого и среднего давлений паровых турбин.

После испытаний «ловушка» помещалась в растровый электронный микроскоп *TESCAN MIRA 3 LMU*, с помощью которого была получена так называемая «панорамная» фотография всей области ловушки. В работе

[2] было показано, что количество уловленных отраженных частиц составляет несколько сотен, а также велика плотность их осаждения на небольшой площади по сравнению со всей «ловушкой». Поэтому, для более подробного анализа, полученная «панорамная» фотография была разбита на 7 секторов, начиная с края «ловушки». На рис. 2 последовательно представлены примеры фотографий некоторых секторов, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, а именно, первая, вторая и шестая фотографии секторов, которые демонстрируют изменения количества уловленных отраженных частиц эродента по высоте «ловушки» h после одной минуты испытаний в течение последующей одной минуты. Плотность осаждения частиц в области, близкой к плоскости мишени, крайне высока, поэтому высота сектора №7 меньше остальных.

Были проанализированы поведения статистических характеристик отраженных твердых частиц эродента как в пределах газоабразивного потока, обтекающего поверхность, так и вне его.

Достаточно отчетливо прослеживается уменьшение количества уловленных частиц при удалении от уровня плоскости мишени. На рис. 3 представлено удельное количество частиц N ($1/мм^2$) по высоте.

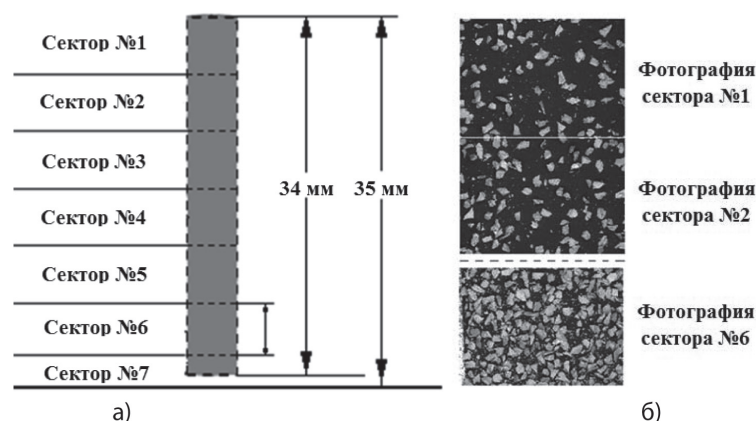


Рис. 2. Схема разбивки «панорамной» фотографии по секторам (а) и фотографии некоторых секторов (б).

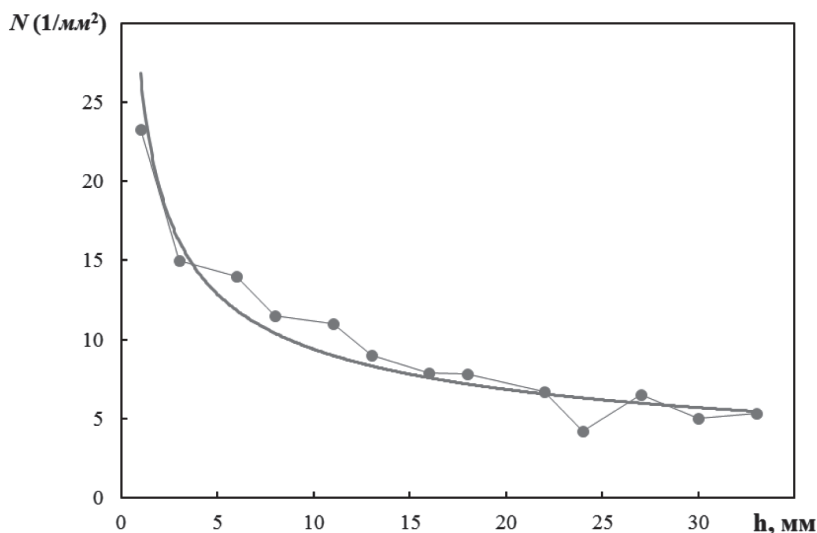


Рис. 3. Поведение удельного количества частиц N ($1/мм^2$) по высоте «ловушки» h .

Интенсивный спад количества отраженных частиц эродента до высоты «ловушки» $h \approx 12$ мм при дальнейшем существенно замедляется. Более отчетливо картина распределения удельного количества частиц N по высоте «ловушки» представляется в зависимости от угла α , начало которого расположено в центре соударения исходящего из сопла газообразивного потока с поверхностью мишени (рис. 4).

Здесь отчетливо усматривается два диапазона:

— параболический: $N = 25 - 1,592 \cdot \alpha + 0,042 \cdot \alpha^2$ для $\alpha < 22^\circ$;

— почти строго линейный: $N = 13,13 - 0,197 \cdot \alpha$ для $\alpha < 22^\circ$ ($h \approx 12$ мм).

Такое существенное отличие в распределении отраженных частиц эродента может быть объяснено изменением условий воздействия окружающей среды на совокупность частиц: до $h \approx 12$ мм имеет место движение частиц эродента в пределах потока несущей среды

в окрестности поверхности мишени; выше $h \approx 12$ мм частицы движутся вне зоны этого потока. Кроме того, распределение скоростей несущей среды в пределах потока имеет отрицательную осевую составляющую (на поверхности мишени осевая составляющая равна нулю). Это, возможно, частично выражается в параболическом характере распределения частиц эродента в пределах потока несущей среды при струйном обтекании плоской поверхности мишени.

Основной проблемой является установление свободной поверхности воздушной струи с твердыми частицами эродента, обтекающей плоскую поверхность мишени. В случаях потоков двухфазных дисперсных сред с учетом взаимного влияния движущихся с различными скоростями фаз и в условиях неправильной, случайной и грубой формы частиц дискретной фазы, т. е. в условиях случайных траекторий частиц, теоретическое решение, пусть даже численное, представляется весьма затруднительным. В этих случаях приходится прибегать к анализу экспериментальных данных.

На рис. 5 представлено поведение средних значений длин L частиц эродента по высоте «ловушки» h , где отчетливо усматривается максимум по размерам отраженных частиц эродента на высоте ловушки $h \approx 10$ мм.

Поведение других численных характеристик, таких, как среднеквадратическое отклонение (σ), коэффициент асимметрии (Sk) и эксцесс (Ex), представлены на рис. 6.

Среднеквадратическое отклонение (σ) в среднем монотонно возрастает с высотой «ловушки» h при значительных колебаниях около кривой, описывающей среднее поведение данной величины. При этом осредненная кривая имеет стремление к выполаживанию при $h > 12$ мм.

Значения коэффициента асимметрии (Sk) в целом снижаются, оставаясь положительными и выполаживаются в среднем при значении $h > 12$ мм, что свидетельствует о смещении распределения по размерам в сторону больших значений. Это смещение находит объяснение в том, что легкие частицы эродента более подвержены влиянию несущей среды, поле скоростей которой имеет отрицательную осевую составляющую.

Значения эксцесса (Ex) монотонно уменьшаются, проходя через нулевое значение также при $h \approx 12$ мм, отвечающее нормальному распределению, с тенденцией к более равномерному распределению в дальнейшем.

Таким образом, эти результаты в

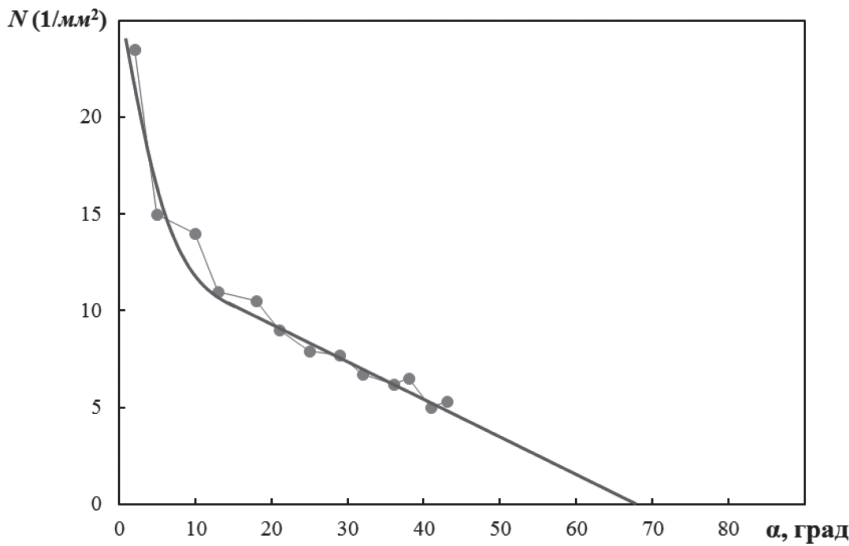


Рис. 4. Распределения удельного количества частиц N по высоте «ловушки» h в зависимости от угла α .

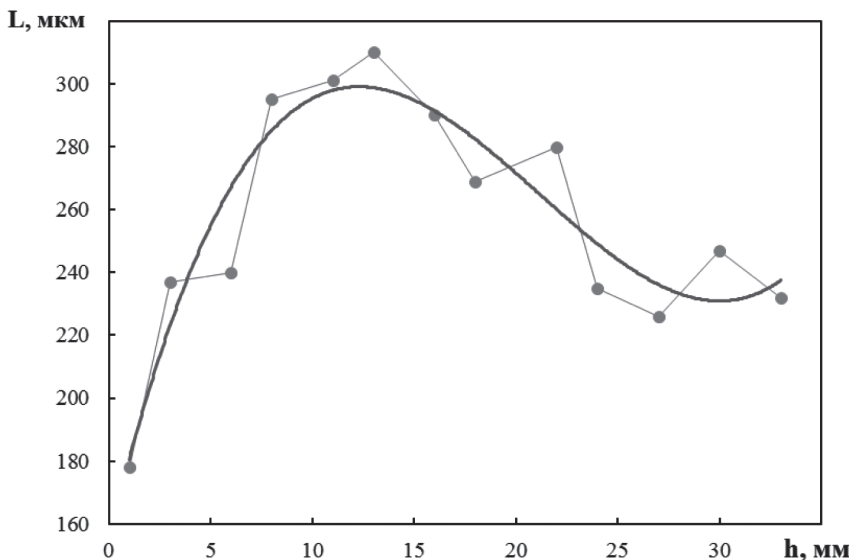


Рис. 5. Поведение средних значений длин отраженных частиц эродента L по высоте «ловушки» h .

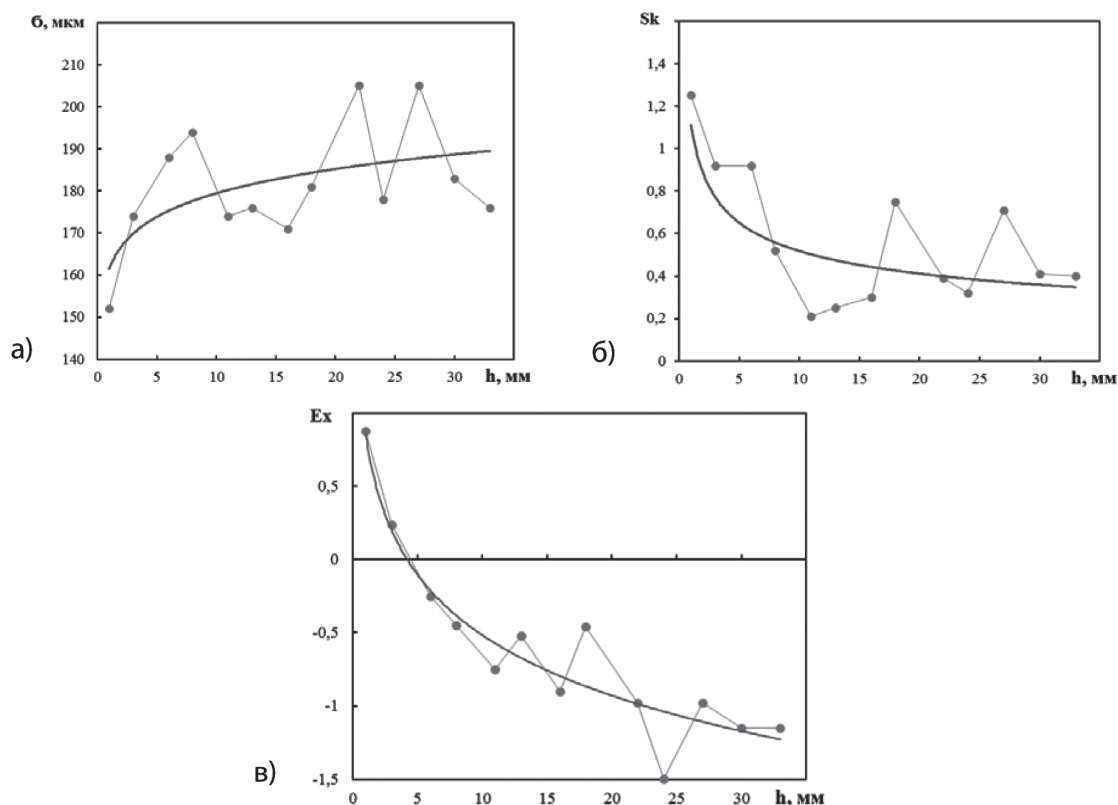


Рис. 6. Поведение среднеквадратического отклонения σ (а), коэффициента асимметрии Sk (б) и эксцесса Ex (в) по высоте «ловушки» h .

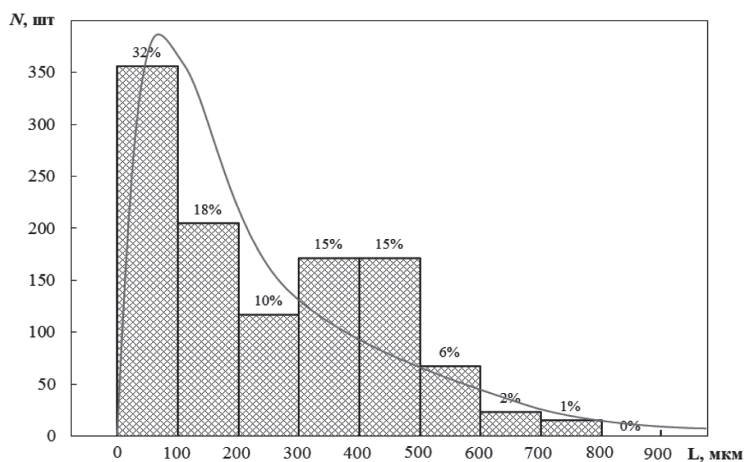


Рис. 7. Распределение размеров твердых частиц «отработавшего» эродента.

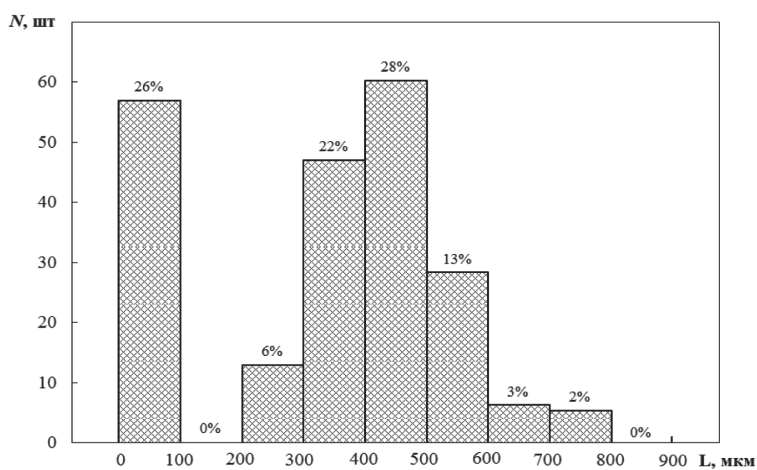


Рис. 8. Распределение размеров твердых частиц эродента в состоянии поставки.

целом свидетельствуют о том, что ширина газобразивной струи на расстоянии 35 мм от ее оси при соударении с плоскостью мишени достигает величины ≈ 10 мм. Необходимо также отметить, что 39% частиц эродента из общего числа уловленных приходится на частицы, покинувшие поток несущей среды после соударений с поверхностью мишени.

Общая гистограмма количества твердых частиц «отработавшего» эродента, представленная на рис. 7, демонстрирует монотонное (в среднем) падение. Общие численные характеристики распределения в этом случае составляли следующие значения: $M \approx 249$ мкм, $\sigma \approx 184$ мкм. Коэффициент корреляции между максимальными и минимальными длинами частиц эродента положителен и равен 0,72.

Полученные значения сопоставлены с данными по размерам частиц эродента в состоянии поставки (до введения частиц в поток несущей среды). На рис. 8 представлена общая гистограмма твердых частиц эродента в состоянии поставки. Здесь просматриваются две фракции: мелкодисперсная фракция с длинами частиц эродента в интервале от 0 мкм до 150 мкм (среднее значение

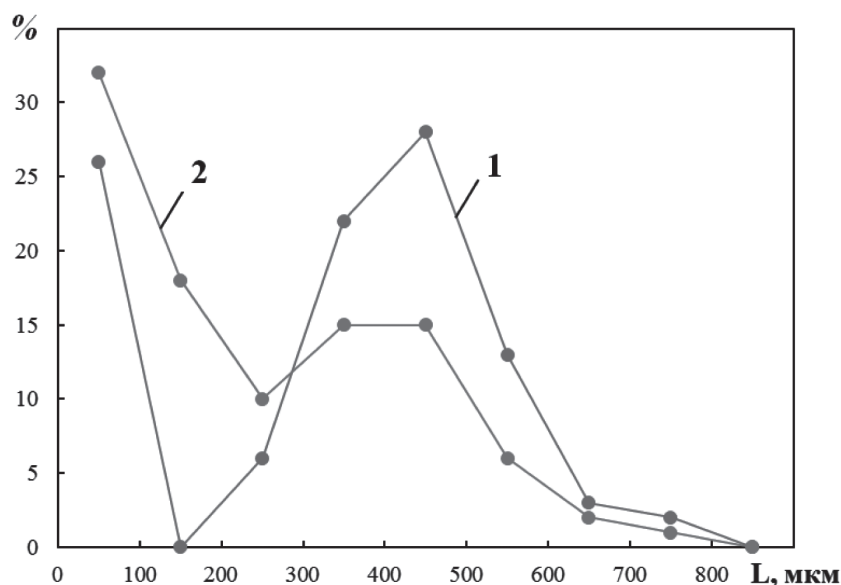


Рис. 9. Распределение средних значений размеров частиц в состоянии поставки и после 1 минуты испытаний на соответствующих интервалах: 1 — состояние поставки; 2 — после 1 минуты испытаний.

38,5 мкм) и крупнодисперсная фракция с длинами частиц в интервале 250÷800 мкм (среднее значение 437,6 мкм). В целом, численные значения статистических характеристик твердых частиц эродента в состоянии поставки соответственно равны: $M \approx 331$ мкм, $\sigma \approx 200$ мкм, $Sk = -0,47$, $Ex = -0,42$.

На рис. 9 представлено сравнение средних значений размеров частиц в состоянии поставки и после 1 минуты испытаний на соответствующих интервалах. Из него отчетливо видно увеличение мелкодисперсной фракции в результате дробления: процентный состав твердых частиц эродента размерами от 12 мкм до 300 мкм в результате дробления возрастает, в то время как от 300 мкм до 750 мкм — убывает. Особенно интенсивно это дробление наблюдается в диапазоне 300÷550 мкм, за счет которого и возрастает процентный состав мелкодисперсной фракции. Отметим также, что процентный состав твердых частиц эродента, больших 600 мкм, практически остается прежним. Последнее наблюдение, возможно, связано с тем, что крупные частицы эродента, размерами более 600 мкм, не успевают разогнаться потоком несущей среды до скоростей (кинетических энергий), достаточных для их дробления при соударении с мишенью. Об этом же свидетельствует и распределение средних значений длин частиц эроден-

та по высоте «ловушки» (рис. 5). Таким образом, основное дробление приходится на частицы, чьи размеры лежат в диапазоне 300÷550 мкм, которые, по-видимому, приобретают энергию, достаточную для дробления, от несущей среды.

Выводы

1. В результате взаимодействия газоабразивного потока с поверхностью мишени изменяется фракционный состав частиц эродента. Процентный состав мелкодисперсной части возрастает (12÷300 мкм) за счет дробления среднедисперсной части (300÷500 мкм). Крупнодисперсная часть (частицы, размерами более 600 мкм) остается практически неизменной ввиду того, что энергия потока несущей среды мала для разгона данных частиц до скоростей, достаточ-

ных для их дробления.

2. Часть отраженных частиц эродента вновь попадает в поток несущей среды, другая часть — покидает его. В обоих случаях происходит изменение характеристик эродента, а именно, полидисперсности и полискоростности. Это обстоятельство может оказывать влияние на абразивный износ как элементов конструкций турбомашин, расположенных выше основного потока (шпы бандажей, надбандажные уплотнения), так и расположенных далее по направлению движения потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Приказа №184 от 10 марта 2015 г.

Литература

1. Тхабисимов А. Б., Качалин Г. В., Медников А. Ф., Сидоров С. В. Экспериментальный стенд для изучения абразивной стойкости конструкционных материалов и защитных покрытий // Естественные и технические науки, 2013 г. — №5. — С. 234–238.
2. Л. И. Селезнев, А. Ф. Медников, А. Б. Тхабисимов Анализ поведения статистических характеристик эродента при абразивном износе конструкционных материалов. — Вестник МЭИ, №5, 2015, С. 25–29.

