

УДК 621.165

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ТВЕРДЫХ
ВКЛЮЧЕНИЙ В МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ СИСТЕМАХ
ПЫЛЕЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ**

Лагерева Э.А.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

Представлена методика расчета коэффициента сепарации твердых включений из газоздушных потоков для многоступенчатых систем пылезолоулавливания, состоящих из ряда последовательно установленных сепарационных устройств различного конструктивного исполнения и принципа действия. Она основана на раздельном последовательном анализе процессов улавливания и прохождения отдельных фракций твердых частиц полидисперсной структуры. Методика дает информацию об изменении дисперсного состава твердых включений при прохождении газоздушного потока по системе очистки и позволяет целенаправленно подбирать эффективное сочетание различных типов сепараторов.

Ключевые слова: газоздушный поток, сепарация, многоступенчатая система пылезолоулавливания, твердые включения, дисперсный состав, фракция

При построении современных методик расчетной оценки эффективности работы различных сепарационных устройств систем очистки газоздушных потоков от частиц твердых включений (зола, пыли, окалины и др.) характерен эмпирический подход [1]. Как правило, он основан на обобщении результатов экспериментальных исследований натуральных или модельных сепараторов сходного конструктивного исполнения - на выявлении определяющих процесс параметров конструкции, газоздушного потока, твердых включений и построении с помощью статистических методов теории обработки данных эксперимента аппроксимационных регрессионных соотношений типа

$$\eta = \eta(f_1, f_2, \dots, f_n, \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_m),$$

где η - коэффициент сепарации; f_i - значимые параметры конструкции сепаратора, потока рабочего тела и твердых включений; $\Pi_j = \Pi_j(f_1, f_2, \dots, f_n)$ - числа подобия или вспомогательные параметры, являющиеся регрессионными функциями от значимых параметров f_i .

Однако наряду с эмпирическим также известны методики расчетной оценки эффективности работы сепараторов, основанные на теоретическом подходе [2, 3]. Он включает расчет траекторий движения твердых частиц в зависимости от условий входа их в сепарационное устройство и фракционного размера. При этом движение газовой фазы (газоздушного потока) рассматривается совершенно обособленно от движения твердой фазы (частиц включений), т.е. траектория движения частиц накладывается на поле скоростей потока и основной компонентой в уравнении движения сферической частицы является сила аэродинамического сопротивления, величина которой пропорциональна разности искомой скорости частицы и известной скорости потока в расчетной точке пространства [4]. При таком подходе поле скоростей газоздушного потока в сепарационном устройстве, имеющее выраженный пространственный характер, задается либо на основании экспериментальных данных, либо с помощью приближенных соотношений, в основе которых также лежат обобщенные экспериментальные данные [5-8].

Несомненными достоинствами теоретического подхода является то, что основанные на его применении методики расчета эффективности сепарационных устройств:

- дают возможность проведения детального анализа протекания процесса осаждения твердых включений на поверхностях проточной части сепаратора и удаления их за пределы устройства;

- обеспечивают на этапе проектирования сравнительно мало затратную процедуру конструктивной отработки сепаратора с целью достижения максимально возможного коэффициента сепарации η по данным машинного, а не более трудоемкого натурального или модельного эксперимента;

- получить исчерпывающую информацию о фракционном составе как уловленных, так и прошедших через сепаратор твердых частиц.

Общими принципиальными трудностями, сдерживающими разработку методик расчетной оценки эффективности сепараторов на базе теоретического подхода, являются:

- трехмерный характер поля скоростей газовой фазы в проточной части сепарационных устройств и необходимость использования трудоемких и ориентированных на применение компьютеризированных численных методов интегрирования систем уравнений Навье-Стокса внутри областей сложной конфигурации [9-11];

- недостаточная изученность влияния на кинематику твердых частиц процессов их взаимодействия как между собой, так и с поверхностями проточной части сепарационных устройств (процессов дробления, конгломерирования, рикошетирования и др. [12].

При использовании указанной методики исходная информация должна включать:

- данные о конструкции, основных конструктивных размерах и технических характеристиках сепараторов, входящих в системы очистки;

- данные о параметрах газовоздушного потока на входе в систему очистки: его химическом составе, объемном V_2 или массовом G_2 расходе, рабочей температуре T_2 , плотности ρ_2 , динамической вязкости μ_2 ;

- данные о параметрах частиц твердых включений: количественных показателях дисперсного состава (например, медианном диаметре d_m и стандартном отклонении σ_q или $\lg \sigma_q$), вида закона распределения массы частиц по размерам (функции распределения $F(d_q)$ или плотности вероятности $p(d_q)$), плотности ρ_q , массовой концентрации в газоздушном потоке C_q .

Полидисперсную структуру твердой фазы представим совокупностью m фракций, каждая из которых характеризуется среднефракционным диаметром частиц d_{qi} ($i = 1, 2, \dots, m$). Это достигается разделением всего интервала возможных диаметров частиц включений в газоздушном потоке $d_{\min} \dots d_{\max}$ на m подынтервалов постоянной ширины Δd . При логнормальном законе распределения массы частиц по размерам на m подынтервалов целесообразно разбивать интервал $\lg d_{\min} \dots \lg d_{\max}$. Тогда произвольную i -ю фракцию будут образовывать частицы, диаметр которых удовлетворяет условию

$$d_q \in [d_{i\min}; d_{i\max}).$$

Граничные значения диаметров частиц фракций определяются соотношениями:

- нижние

$$d_{i\min} = d_{\min} + (i-1)\Delta d \quad \text{или} \quad \lg d_{i\min} = \lg d_{\min} + (i-1)\Delta d;$$

- верхние

$$d_{i\max} = d_{\min} + i\Delta d \quad \text{или} \quad \lg d_{i\max} = \lg d_{\min} + i\Delta d.$$

Среднефракционный диаметр частиц i -й фракции составляет

$$d_{qi} = d_{\min} + (i-0,5)\Delta d \quad \text{или} \quad \lg d_{qi} = \lg d_{\min} + (i-0,5)\Delta d.$$

При отсутствии данных о величинах минимально и максимально возможных частиц включений в газоздушном потоке эти параметры ориентировочно определяются соотношениями:

$$d_{\min} = d_m - (3...4)\sigma_q \quad \text{или} \quad \lg d_{\min} = \lg d_m - (3...4)\lg \sigma_q;$$

$$d_{\max} = d_m + (3...4)\sigma_q \quad \text{или} \quad \lg d_{\max} = \lg d_m + (3...4)\lg \sigma_q.$$

Таким образом, реальный непрерывный спектр размеров частиц $d_q \in [d_{\min}, d_{\max}]$ представляется конечным набором из m групп капель дискретного ряда диаметров d_{qi} . Поведение частиц произвольной i -й фракции $d_q \in [d_{\min}, d_{\max}]$ в сепарационном устройстве определяется поведением частицы диаметра d_{qi} .

Это позволяет для каждой фракции ввести в рассмотрение индивидуальный фракционный коэффициент сепарации η_i . Его расчет выполняется с помощью известных методик оценки эффективности работы сепараторов различных типов [1] при условии монодисперсности структуры удаляемых частиц включений (отсутствии разброса размеров частиц: $\sigma_u = 0$ или $\lg \sigma_u = 0$). Как пример, для циклонов конструкции НИИОГАЗ типа ЦН и СК-ЦН фракционные коэффициенты сепарации определяются зависимостью, преобразованной из известного соотношения [1]:

$$\eta_i = 0,5[1 + \Phi(x_i)],$$

где $\Phi(x_i)$ - значение стандартизованной функции нормального распределения [13] аргумента x_i ; $x_i = \lg(d_{ui} / d_{50}) / \lg \sigma_\eta$ - вспомогательный коэффициент; d_{50} - диаметр частиц твердых включений, удаляемых данным циклоном с коэффициентом сепарации $\eta = 50\%$; $\lg \sigma_\eta$ - техническая характеристика циклона [1].

В единицу времени на вход системы очистки поступает число частиц каждой фракции, в общем случае определяемое зависимостью:

$$n_i^{(o)} = \frac{6C_u V_z}{\pi \rho_u d_{ui}^3} [F(d_{i \max}) - F(d_{i \min})].$$

Для случая нормального распределения массы твердых включений в газовоздушном потоке по размерам она преобразуется к виду

$$n_i^{(o)} = \frac{6C_u V_z}{\pi \rho_u d_{ui}^3} \left\{ \Phi \left[\frac{d_{i \max} - d_m}{\sigma_u} \right] - \Phi \left[\frac{d_{i \min} - d_m}{\sigma_u} \right] \right\},$$

Для случая логнормального распределения – к виду

$$n_i^{(o)} = \frac{6C_u V_z}{\pi \rho_u d_{ui}^3} \left\{ \Phi \left[\frac{\lg d_{i \max} - \lg d_m}{\lg \sigma_u} \right] - \Phi \left[\frac{\lg d_{i \min} - \lg d_m}{\lg \sigma_u} \right] \right\}.$$

После прохождения первой ступени очистки число частиц i -й фракции, задержанное сепараторами, составляет:

$$k_i^{(1)} = \eta_i^{(1)} n_i^{(o)},$$

а число частиц, прошедших через сепараторы:

$$l_i^{(1)} = (1 - \eta_i^{(1)}) n_i^{(o)}.$$

В общей сложности в первой ступени очистки в единицу времени задерживается $k^{(1)}$ частиц всех фракций

$$k^{(1)} = \sum_{i=1}^{i=m} \eta_i^{(1)} n_i^{(o)}$$

суммарным массовым расходом

$$G_u^{(1)} = \frac{\pi}{6} \rho_u \sum_{i=1}^{i=m} \eta_i^{(1)} d_{ui}^3 n_i^{(o)}.$$

Коэффициент сепарации первой ступени определяется зависимостью

$$\eta^{(1)} = \frac{G_u^{(1)}}{C_u V_z}.$$

Аналогичные зависимости справедливы для второй и последующих ступеней системы очистки. В единицу времени на вход произвольной j -й ступени поступает число частиц i -й фракции n_i^j , равное числу частиц, прошедших через предыдущую, $(j - 1)$ -ю ступень:

$$n_i^j = l_i^{j-1} = (1 - \eta_i^{(j-1)})n_i^{(j-2)} = \dots = n_i^{(o)} \prod_{v=1}^{v=j-1} (1 - \eta_i^{(v)}).$$

В j -й степени очистки в единицу времени задерживается $k^{(j)}$ частиц всех фракций

$$k^{(j)} = \sum_{i=1}^{i=m} \left[\eta_i^{(j)} n_i^{(o)} \prod_{v=1}^{v=j-1} (1 - \eta_i^{(v)}) \right]$$

Суммарным массовым расходом

$$G_q^{(j)} = \frac{\pi}{6} \rho_q \sum_{i=1}^{i=m} \left[\eta_i^{(j)} d_{qi}^3 n_i^{(o)} \prod_{v=1}^{v=j-1} (1 - \eta_i^{(v)}) \right].$$

Коэффициент сепарации j -й степени выражается соотношением вида

$$\eta^{(j)} = \frac{G_q^{(j)}}{C_q^{(j)} V_2} = \frac{G_q^{(j)}}{V_2 C_q \prod_{v=1}^{v=j-1} (1 - \eta_i^{(v)})},$$

где $C_q^{(j)}$ - массовая концентрация твердых включений в газоздушном потоке на входе в j -ю степень очистки.

В целом, в системе очистки, состоящей из t ступеней с сепараторами различного типа или типоразмера, в единицу времени будет задерживаться число частиц i -й фракции, определяемое зависимостью:

$$k_{i,t} = n_i^{(o)} \sum_{\varphi=1}^{\varphi=t} \left[\eta_i^{(\varphi)} \prod_{v=1}^{v=\varphi-1} (1 - \eta_i^{(v)}) \right].$$

Фракционный коэффициент сепарации системы очистки составит

$$\eta_{i,t} = \frac{k_{i,t}}{n_i^{(o)}}.$$

Массовый расход задержанных частиц будет выражаться зависимостью

$$G_{q,t} = \frac{\pi}{6} \rho_q \sum_{i=1}^{i=m} k_{i,t} d_{qi}^3,$$

а общий коэффициент сепарации – зависимостью

$$\eta_t = \frac{G_{q,t}}{C_q V_2}.$$

Через систему очистки проходит число частиц i -й фракции $l_{i,t}$, определяемое зависимостью:

$$l_{i,t} = n_i^{(o)} - k_{i,t}.$$

Набор значений $l_{i,t}$ для всех $i \in [1; m]$ определяет гистограмму распределения по размерам числа частиц, прошедших через систему очистки. Аналогично, набор значений

$$m_{i,t} = \frac{\pi}{6} \rho_q d_{qi}^3 l_{i,t}$$

Определяет гистограмму распределения по размерам массы прошедших частиц. Их анализ методами теории математической статистики [13] позволяет установить тип и количественные характеристики законов распределения по размерам числа или массы прошедших частиц. Медианный диаметр составляет

$$d_{m,t} = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} m_{i,t} d_{qi}}{(C_q V_2 - G_{q,t})},$$

а стандартное отклонение –

$$\sigma_{q,t} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=m} m_{i,t} (d_{qi} - d_{m,t})^2}{(m-1)(C_q V_2 - G_{q,t})}}.$$

Последней зависимостью следует пользоваться, если число фракций твердых частиц $m > 7$ [14].

Приведенные выше зависимости составляют основу предложенной методики расчета эффективности работы систем пылезолоулавливания, образованных рядом последовательно установленных сепарационных устройств.

В качестве примера, иллюстрирующего особенности ее применения при расчете конкретных систем пылезолоулавливания, была рассмотрена двухступенчатая система очистки воздушного потока от твердых включений на основе циклонов конструкции НИИОГАЗ типа ЦН-24 (1 ступень) и ЦН-11 (2 ступень). Исходные данные:

- объемный расход воздуха $V_2 = 2 \text{ м}^3/\text{с}$;
- плотность воздушного потока $\rho_2 = 0,785 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- динамическая вязкость воздушного потока $\mu_2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- плотность твердых частиц $\rho_q = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- медианный диаметр твердых частиц $d_m = 17 \text{ мкм}$;
- логарифм стандартного отклонения диаметров твердых частиц $\lg \sigma_q = 0,301 \text{ (мкм)}$;
- закон распределения массы твердых частиц по диаметрам: логнормальный с плотностью вероятности вида

$$p(d_q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_q} \exp \left[-\frac{(\lg d_q - \lg d_m)^2}{2(\lg \sigma_q)^2} \right].$$

Минимальный и максимальный диаметры частиц в потоке определялись как

$$d_{\min} = \exp(\lg d_m - 3 \lg \sigma_q) = 2,1 \text{ мкм};$$

$$d_{\max} = \exp(\lg d_m + 3 \lg \sigma_q) = 136 \text{ мкм}.$$

При расчете учитывалось $m = 8$ фракций твердых частиц.

Результаты расчета (гистограммы распределения по размерам массы твердых частиц в характерных точках системы очистки) приведены на рис. 1. Расчетный коэффициент сепарации 1 ступени составил $\eta^{(1)} = 0,855$; коэффициент сепарации всей двухступенчатой системы очистки - $\eta = \eta^{(2)} = 0,987$.

На основании проведенных расчетов можно сформулировать следующие положительные черты предложенной методики расчета эффективности работы систем пылезолоулавливания, образованных последовательно установленными сепарационными устройствами:

- позволяет в соответствии с единым алгоритмом выполнять расчет одно- и многоступенчатых систем очистки газоздушных потоков от твердых включений, а также систем, содержащих сепараторы различного принципа действия;
- дает информацию об изменении дисперсного состава твердых включений при прохождении газоздушного потока по системе очистки и, таким образом, позволяет целенаправленно подбирать эффективное сочетание различных типов сепараторов;
- легко поддается программированию и использованию в составе систем автоматизированного проектирования различного технологического оборудования.

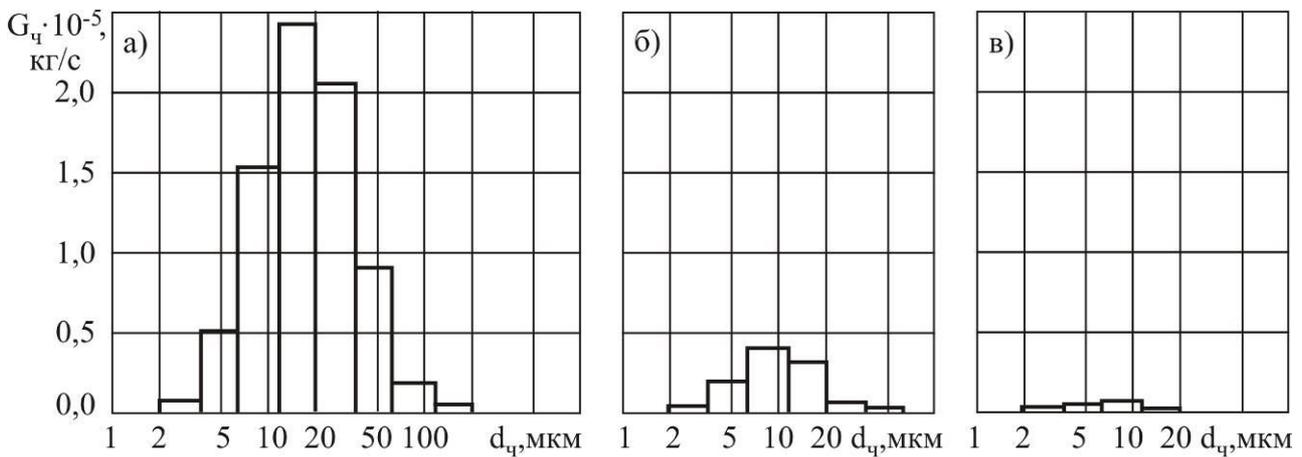


Рис. 1. Изменение дисперсного состава твердых включений в воздушном потоке в характерных точках двухступенчатой системы пылезолоулавливания:
 а – на входе в систему; б – после 1 степени очистки; в – на выходе из системы

Список литературы.

1. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
2. Степанов, Г.Ю. Инерционные воздухоочистители / Г.Ю. Степанов, И.М. Зицер. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
3. Богуславский, Е.И. Теоретическое определение основных характеристик пылезолоулавливания в циклонных аппаратах / Е.И. Богуславский // Обеспыливание воздуха: сб. науч. тр. / Ростовский инженерно-строительный институт. - Ростов-на-Дону, 1982. – С. 40-45.
4. Лагерев, А.В. Эрозия паровых турбин: вероятностный подход: в 3 т. / А.В. Лагерев. – М.: Машиностроение-1, 2006.
5. Лагерев, А.В. Моделирование процессов массопереноса влаги в вертикальных сепараторах с тангенциальным входом для АЭС / А.В. Лагерев, Э.А. Лагерева // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1997. - №3. - С.68-72.
6. Лагерев, А.В. Оптимизация влагоудаления в вертикальных сепараторах с тангенциальным входом для АЭС / А.В. Лагерев, Э.А. Лагерева // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1997. - №6. - С. 30-34.
7. Лагерев, А.В. Математическое моделирование кинематики и осаждения влаги из пространственных многофазных потоков в элементах паровых энергоустановок / А.В. Лагерев, Э.А. Лагерева // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - № 1. - С. 67-75.
8. Лагерев, А.В. Математическое моделирование кинематики и сепарации пленочной влаги в элементах парового тракта энергоустановок / А.В. Лагерев, Э.А. Лагерева // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - № 3. - С. 67-75.
9. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей / К. Флетчер. - М.: Мир, 1991. – 552 с.
10. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Т.1 / Д. Андерсон, Д. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 384 с.
11. Дорфман, Л.А. Численные методы в газодинамике турбомашин / Л.А. Дорфман. – М.: Энергия, 1974. – 271 с.
12. Эрозия / Под ред. К. Прис. – М.: Мир, 1982. – 464 с.
13. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М.Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
14. Поллард, Д. Справочник по вычислительным методам статистики / Д. Поллард. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.

Сведения об авторе

Лагерева Эльвира Александровна - кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отдела ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», *elvira-l.alex@yandex.ru*.

MODELING OF CHANGES IN PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF SOLIDS IN MULTISTAGE SEPARATION SYSTEMS

Lagereva E.A.

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University

The presented method of calculation of the separation of solid particles from gas streams to multistage separation systems, consisting of a number of sequentially installed separational devices of various design and principle of operation. It is based on a separate analysis of the sequential processes of capture and transmission of individual fractions of solid particles of a polydisperse structure. The technique provides information about changes in particle size distribution of solids with the passage of the gas flow in the treatment system and allows you to specifically select the effective combination of different types of separators.

Key words: *gas flow, separation, multistage separation system, solids, disperse composition, the fraction*

References

1. Rusanov A.A. *Spravochnik po pylezoloulavlivaniyu* [Handbook on dust and ash removal]. Moscow, Energiya, 1975. 296 p.
2. Stepanov G.Yu., Zitser I.M. *Inertsionnye vozdukhochistiteli* [Inertial air cleaners]. Moscow, Mashinostroenie, 1986. 224 p.
3. Boguslavskiy E.I. Teoreticheskoe opredelenie osnovnykh kharakteristik pylezoloulavlivaniya v tsiklonnykh apparatakh [Theoretical determination of the main characteristics of dust and ash removal in cyclone devices]. *Sbornik nauchnykh trudov Rostovskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta "Obespylivanie vozdukha"*. Rostov-na-Donu, 1982, pp. 40-45.
4. Lagerev A.V. *Eroziya parovykh turbin: veroyatnostnyy podkhod* [Erosion of steam turbines: a probabilistic approach]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2006.
5. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Analysis of mass transfer at the vertical separators with tangential entrance for NPPs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 1997, No. 3, pp. 68-72.
6. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Optimization of steam-water separation at the vertical separators with tangential entrance for NPPs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 1997, No. 6, pp. 30-34.
7. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Mathematic simulation of drops kinematics and sedimentation from 3-dimensional multiphase flows in steam turbine elements. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, No. 1, pp. 67-75.
8. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Mathematic simulation of liquid film kinematics and separation in steam turbine elements. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, No. 3, pp. 67-75.
9. Fletcher C.A.J. *Computational techniques for fluid dynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.
10. Anderson D.A., Tannehill J.C., Pletcher R.H. *Computational fluid mechanics and heat transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, 1984.
11. Dorfman L.A. *Chislennyye metody v gazodinamike turbomashin* [Numerical methods in gas dynamics of Turbomachinery]. Moscow, Energiya, 1974. 271 p.

12. Treatise on materials science and technology. Volume 16. Erosion. Bell Telephone Laboratories, Inc., 1979.
13. Stepnov M.N. *Statisticheskie metody obrabotki rezultatov mekhanicheskikh ispytaniy* [Statistical methods of processing mechanical test results]. Moscow, Mashinostroenie, 1985. 232 p.
14. Pollard J.H. A handbook of numerical and statistical techniques. Cambridge University Press, 1977.

Author' information

Elvira A. Lagereva - Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Vice Head of Bureau at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, *elvira-l.alex@yandex.ru*.