ИМИТАЦИОННАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЫХЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА

П.А. Севостьянов, Т.А. Самойлова,
В.В. Монахов, К.В. Ордов

УДК 677.022:519.8:62.50

РЕФЕРАТ

РЫХЛЕНИЕ, ОЧИСТКА, ИМИТАЦИЯ, КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ, ИМИТАЦИОННАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, КЛОЧКИ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА

На подготовительных этапах прядильного производства клочки волокнистого материала подвергаются рыхлению и очистке с целью удаления сорных примесей и непрядомых волокон. Для изучения этих процессов целесообразно использовать имитационные статистические модели.

С помощью имитационных статистических моделей можно проводить исследования по изучению влияния таких характеристик системы, как распределение параметров клочков, плотность расположения колков, интенсивность взаимодействия на степень рыхления, измельчение клочков и их очистка.

В работе изложены принципы построения такого рода моделей, приведены примеры этих моделей.

Данные, полученные в результате моделирования, соответствуют распределениям, которые наблюдаются в натурных экспериментах и предсказываются общей теорией дробления частиц.

ABSTRACT

BREAKING, CLEANING, SIMULATION, COMPUTER MODELS, SIMULATION STATISTICAL MODEL, FLOCKS OF SFIBROUS MATERIAL

In the preparatory stages of spinning flocks of fibrous material are subjected to breaking and cleaning to remove trash and short fibers. It is advisable to use a simulation statistical model to research these processes.

Simulation statistical models of breaking and cleaning process were created. With these models it is possible to investigate the influence of these characteristics of the system as flock's parameter distribution, density of pins, intensity of interaction on the efficiency of flock's breaking, cleaning.

The article describes the principles of creation of such models. There are examples of such models.

The data of the simulation corresponds to the distribution observed in natural experiments and predicted by the general theory of particle crushing.

В текстильной промышленности при подготовке хлопка к прядению волокнистые клочки, отобранные из кип, подвергаются воздействию рабочих органов разрыхлительно-очистительных машин. Целью этого воздействия является уменьшение массы клочка путем его разделения на более мелкие клочки, уменьшение объемной плотности клочков для упрощения разъединения волокон в последующих процессах, удаления сорных примесей и коротких волокон, не пригодных к прядению.

В результате одного акта взаимодействия с рабочими органами машины клочок либо разделяется на два (большее число «осколков» практически невероятно), либо не разделяется. При этом исходный клочок или два вновь образовавшихся клочка изменяют свою объемную плотность. Процессу разрыхления клочка соответствует уменьшение его плотности. При этом может выделиться часть сорных примесей и непрядомых волокон за счет ослабления связей внутри клочка, что означает очищение волокнистого материала (ВМ) клочка и некоторое (незначительное) уменьшение его массы.

Витебский государственный технологический университет

Однако возможен и обратный процесс — увеличение объемной плотности клочка вследствие его «зажгучивания». Зажгучивание клочка может быть вызвано разными причинами или комплексом причин. Это взаимодействие клочка с воздушным потоком и близко расположенными элементами конструкции машины, придающими клочку не только поступательное, но и вращательное движение. Это взаимодействие клочка с другими клочками, повышенная извитость и цепкость волокон в клочке, большие размеры клочка, не соответствующие размерам той части рабочей зоны, в которой движется клочок и в которой происходит его взаимодействие с рабочими органами машины. При зажгучивании клочка увеличивается его плотность, масса не меняется, сорные примеси и непрядомые волокна не выделяются.

Процесс рыхления и очистки на современном оборудовании выполняется для клочков волокнистого материала, находящихся в свободном состоянии. При этом в наибольшей степени проявляется хаотический, вероятностный характер самого процесса. Именно это, а также большой разброс характеристик клочков и большой диапазон вариаций приводят к тому, что экспериментальным образом получить данные о процессе достаточно сложно и трудоемко даже при наличии специальной измерительной аппаратуры. В этих условиях хорошей альтернативой для исследования разрыхлительно-очистительного процесса является метод имитационного статистического моделирования процесса [1].

При разработке модели разрыхления и очистки клочков необходимо учесть ряд факторов. Во-первых, вероятность разделения клочка на два должна оцениваться исходя из параметров конкретного рассматриваемого клочка: плотности, объема, возможно, формы и расположения относительно оси движения потока. Во-вторых, в модель должны быть включены зависимости, позволяющие отразить изменения параметров клочка после каждого взаимодействия. К настоящему времени, да и в будущем, получить такие зависимости вряд ли удастся. Причина в вероятностной природе и характере всех рассматриваемых процессов и параметров клочков.

Для преодоления возникающих трудностей, на наш взгляд, наиболее рациональным является подход, при котором искомые неизвестные зависимости заменяют максимально простыми и грубыми аппроксимациями. Эти аппроксимации необходимо подобрать так, чтобы они правильно, в общих чертах отображали физически очевидные тенденции. Кроме того, в предельных значениях они также должны приводить к очевидным значениям. Аппроксимирующие зависимости, конечно, должны удовлетворять требованиям согласования размерностей. Наконец, желательно, чтобы эти зависимости включали как можно меньше неизвестных или неопределенных параметров моделируемой системы. По сути, этот эвристический подход к построению модельных зависимостей должен позволить, по крайней мере, на качественном уровне отобразить моделируемые процессы.

Для моделирования перечисленных эффектов взаимодействия необходимо, во-первых, оценить вероятность каждого из них, во-вторых, в зависимости от эффекта иметь возможность рассчитать величину изменения соответствующей характеристики клочка.

В основе всех преобразований лежат изменения плотности клочка при разрыхлении, которые и влекут за собой остальные процессы. Наибольшее теоретически возможное значение плотности близко к плотности материала волокна rf, а наименьшая плотность, очевидно, приближается к нулю: $0 \leqslant r \leqslant rf$. Для массы m клочков тоже можно задать некоторую предельную величину $mMax$: $0 \leqslant m \leqslant mMax$.

Изменения плотности клочка зависят от интенсивности его взаимодействия с рабочими органами машины. Эта интенсивность зависит от соотношения размеров (объема) клочка $V = m/r$ и объема свободного пространства между колками и колосниками Vm, а также соотношения скоростей клочка W и рабочих органов Wm. Учитывая, что при неизменной массе клочка $dr / r = - dV / V$, эту зависимость можно отобразить следующим соотношением:

$$dr = -C_r r \frac{mMax}{r_f V_m}\left(1 - \frac{w}{w_m}\right), \quad \text{или} \quad dV = C_r V \frac{mMax}{r_f V_m}\left(1 - \frac{w}{w_m}\right), \tag{1}$$

Витебский государственный технологический университет

где ***Cr*** – безразмерный коэффициент пропорциональности.

Вероятность разрыхления P_0 клочка также зависит от соотношения размеров клочка и рабочей области и обязана находиться в пределах от 0 до 1. Можно предположить следующий вид для этой вероятности:

$$P_0 = 1 - \exp(-C_0 V / V_m), \quad (2)$$

где C_0 – коэффициент пропорциональности.

Будем считать, что количество выделяющихся сорных примесей ***dg*** тем больше, чем больше их в клочке и чем меньше его плотность. Эти очевидные зависимости можно отобразить формулой

$$\frac{dg}{g} = C_g a \sqrt{1 - \frac{r}{r_f}}, \quad 0 \le r \le r_f, \quad (3)$$

где ***Cg*** – коэффициент пропорциональности, ***a*** – показатель корня. Эта формула соответствует представлению о зависимости количества выделяющихся сорных примесей от плотности клочка, представленной на рисунке 1, построенной для ***Cg*** = 1.

Деление клочка происходит в том случае, когда его плотность понижается до достаточно низкого уровня, а интенсивность воздействия достаточно высока. Поэтому вероятность P_b разделения клочка на два должна зависеть от этих двух характеристик. Размеры двух вновь образовавшихся клочков могут быть любыми. Масса ***m*** включает в себя и массу сорных примесей ***g***, которые также разделяются между клочками случайным образом.

Поэтому будет разумным считать, что разделение клочка на два меньших происходит в соответствии с равномерным законом распределения ***Un***(0;1). Заметим, что поскольку рассматривается именно деление, то уменьшение плотности, сопровождающее разделение, не включается в этот эффект. Исходя из сказанного, можно предположить следующие зависимости:

$$\begin{aligned} &P_b = (1 - \frac{r}{r_m})(1 - \frac{W}{W_m}); \quad m' = m - g; \\ &m_1 = \xi_m m'; \quad m_2 = m' - m_1; \\ &g_1 = \xi_g g; \quad g_2 = g - g_1; \\ &\xi_m \sim Un(0;1); \quad \xi_g \sim Un(0;1). \end{aligned} \quad (4)$$

Зажгучивание клочка – эффект, противоположный разрыхлению, сопровождающийся не только увеличением плотности клочка, но и его упрочнением вследствие большей спутанности волокон, что усложняет выделение сорных примесей. Последнее можно учесть, уменьшая зна-

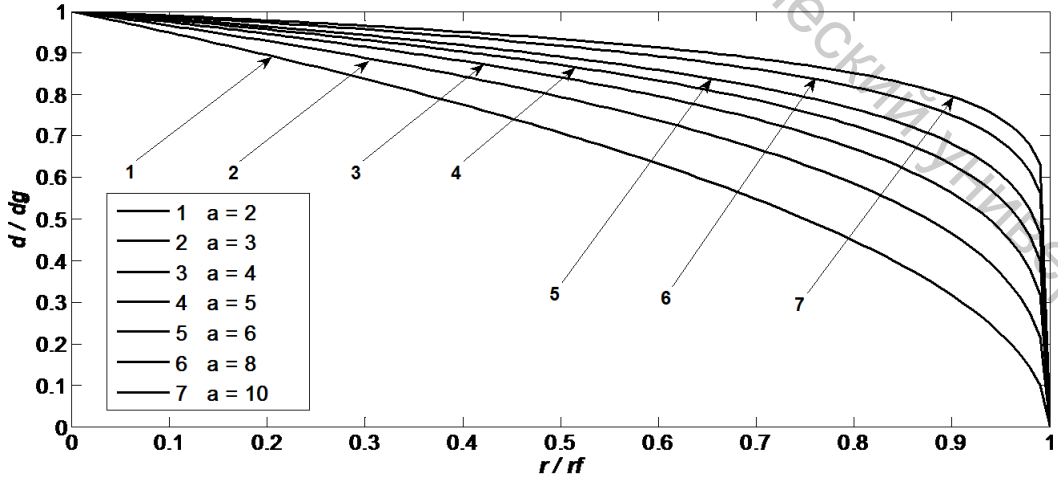


Рисунок 1 – Зависимость (3) при разных значениях показателя корня a

Витебский государственный технологический университет

чение коэффициента Cg.

Вероятность Pz эффекта зажгучивания тем выше, чем больше клочок и чем выше разница в скоростях клочка и рабочих органов. Поэтому формулу для оценки вероятности можно выбрать в виде

$$P_z = \begin{cases} V/V_m, & 0 \le V \le V_m \\ 1, & V > V_m \end{cases}, \quad (5)$$

а величину нарастания плотности принять по формуле, аналогичной (4):

$$dr = C_r r \frac{mMax}{r_f V_m}\left(1 - \frac{w}{w_m}\right). \quad (6)$$

С использованием принятых зависимостей можно построить алгоритм статистического моделирования процессов разрыхления и очистки клочков. В качестве исходной информации используются начальные распределения клочков по массе $f_0(m)$, плотности $f_0(r)$ и содержанию сорных примесей $f_0(g)$. В соответствии с этими распределениями генерируются значения этих характеристик клочков. Далее разыгрываются эффекты, происходящие с этими клочками, после чего значения характеристик изменяются. На основании этих данных строятся оценки новых распределений тех же характеристик. Число клочков должно быть достаточным для надежной оценки распределений. Затем вся процедура повторяется, причем в качестве стартовых распределений используются распределения, полученные на предыдущем цикле.

В MATLAB была создана программа, реализующая компьютерную модель разрыхления, размельчения и очистки клочков. В качестве исходных условий было принято: все клочки имеют одинаковую массу, равную $mMax$ = 100, и содержание сорных примесей, равное 10 % от массы клочка ($gMax$ = 10); плотность клочков одинакова и равна половине предельно большой плотности rf; скорость клочков равна 0,7 от скорости движения колков барабана; наибольшая вероятность зажгучивания для клочка равна 0,5; число моделируемых клочков в одном цикле (по t) составляет N = 500.

На рисунке 2 представлены распределения массы и плотности клочков и массы сорных примесей, полученные на модели, после 10 (а, б, в) и 30 (г, д, е) циклов. Все распределения строились для одного и того же диапазона изменения каждого из параметров: [0 – $mMax$] для массы, [0 - rf] для плотности, [0 - $gMax$] для массы сорных примесей — с разбиением данных на mf = 15 равных интервалов. На осях абсцисс отложены номера интервалов.

Из сравнения гистограмм видно, как с увеличением числа циклов, то есть числа взаимодействий клочков с колками и колосниками, уменьшается масса клочков, снижается их плотность и масса сорных примесей. Доля клочков, не изменивших своих характеристик, уменьшается, однако не исчезает полностью из-за эффекта зажгучивания.

Построенная модель позволяет на качественном уровне проводить интересные исследования по изучению влияния различных базовых характеристик системы: распределения параметров клочков (m, r, g), плотности расположения колков (через V_m), интенсивности взаимодействия (через соотношение W/W_m) — на степень рыхления, измельчения клочков и их очистки.

Модель может быть использована и для количественных оценок, если предварительно выполнить ее «привязку» к реальному объекту по имеющимся данным натурных наблюдений путем оценки коэффициентов $C0$, Cr, Cg, Cz, Cp.

Метод статистической имитации позволяет построить и более подробную эвристическую модель процесса разрыхления и очистки клочков, вариант которой рассмотрен ниже.

Основные предположения, использованные при построении ИСМ, следующие. Клочки подвергаются разрыхлению и очистке независимо друг от друга. Каждый клочок описывается случайными величинами: массой m, массой содержащихся в нем сорных примесей g, удельной плотностью ρ (принимаемой в качестве характеристики разрыхленности клочка). Среди множества факторов, влияющих на исход взаимодействия клочка с колками и колосниками (степень заполнения рабочей зоны волокнистой массой, линейные размеры клочков, степень их взаимодействия с рабочими органами, извитость и цепкость волокон и т. п.), выделим в рассмат-

Витебский государственный технологический университет

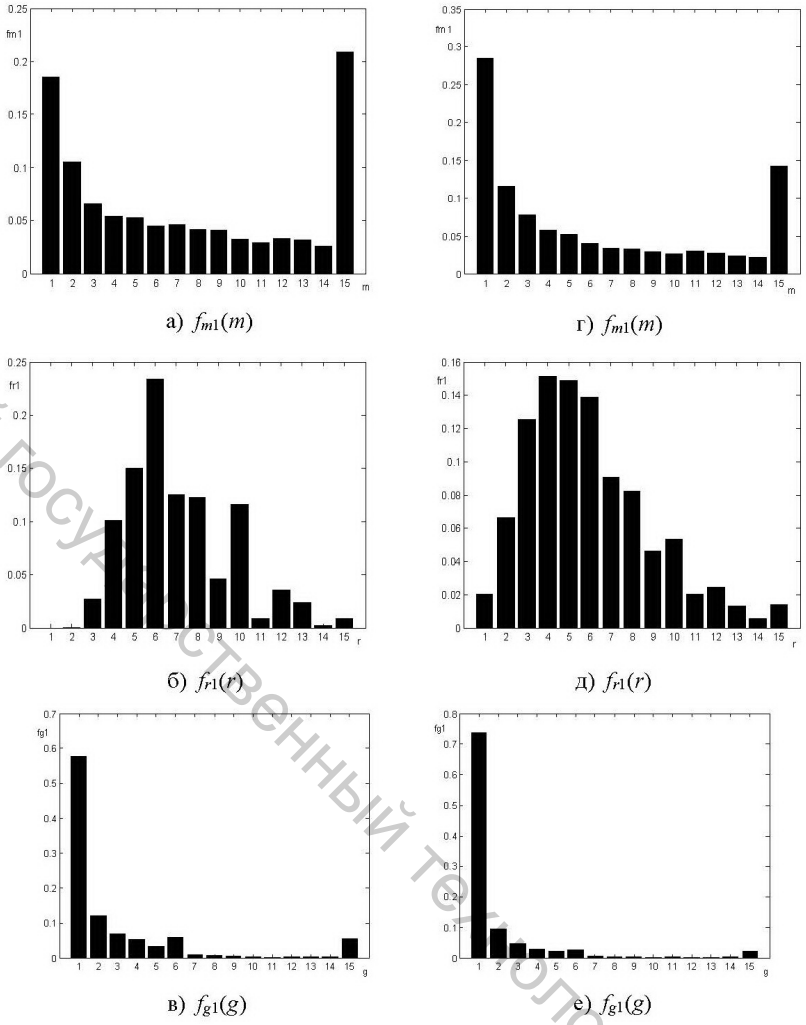


Рисунок 2 – Гистограммы массы, плотности клочков и сорных примесей по результатам моделирования

риваемой простейшей модели лишь степень заполнения клочками рабочей зоны. Чем выше эта степень заполнения, тем выше вероятность зажгучивания клочка. Степень заполнения будем измерять величиной $\overline{VN}\,/\,W$, где $\overline{V} = \overline{m}\,/\,\overline{\rho}$ – средний объем клочка, $\overline{N}$ – среднее число клочков в объеме рабочей зоны W.

Величины $\overline{N}$ и W можно определить по формулам

$$\overline{N} = \Pi\varphi/(\omega\,\overline{m}), \quad W_{p3} = \Delta Z(r+h)\,b\,, \qquad (7)$$

где Π – производительность машины, φ – центральный угол сегмента колосниковой решетки, $\overline{\omega}$ – угловая скорость колкового барабана, $\overline{m}$ – средняя масса клочка, Δ – разводка между колосниками, Z – число колосников, r – разводка между колосниками и колками, h – длина колков, b – ширина рабочей зоны. Исход «зажгучивание» разыгрывается как случайное событие с вероятностью

$$P_{\text{З}} = \overline{VN}\,/W\,. \qquad (8)$$

Закон изменения плотности клочка вследствие разрыхления или зажгучивания неизвестен. Можно лишь предположить, что степень разрыхления возрастает с ростом числа колос-

$$\left(\rho_{н} - \rho_{k}\right)/\rho_{k} = f\left(Z,\varepsilon\right). \qquad (9)$$

Витебский государственный технологический университет

ников и кинетической энергии клочков ε:

Вид зависимости (9) неизвестен, но можно предположить, что она монотонная, а значения конечной плотности клочка $\rho_к$ должны лежать в пределах $0 \le \rho_к \le \rho_н$, где $\rho_н$ – начальная плотность клочка. Учитывая, что ε пропорциональна начальной массе клочка $m_н$ и квадрату скорости колкового барабана ω и оставляя в (9) линейные члены зависимости, получим:

$$\rho_k = \frac{\rho_н}{1 + C_p \xi Z m_н \omega^2} \quad . \qquad (10)$$

В этой формуле C_p – коэффициент пропорциональности, определяющий степень влияния выделенных факторов, а ξ – равномерно распределенная на интервале (0; 1) случайная величина, введенная для учета случайного характера влияния факторов Z, $m_н$ и ω^2.

Аналогично, зажгучивание проявляется в увеличении плотности клочка без изменения его массы, но не более чем до величины $\rho_т$ – плотности вещества волокон.

Учитывая предельные значения для $\rho_к$, $\rho_н$ и $\rho_т$, получим приближенное представление для зависимости $\rho_к$ от Z и ε:

$$\rho_k = \rho_т - \frac{\rho_т - \rho_н}{1 + C_з Z \xi m_н \varepsilon^2} \quad . \qquad (11)$$

Масса сорных примесей gy, выделяемых из клочка, – случайная но пропорциональная разрыхленности клочка и количеству примесей в клочке:

$$g_y = \xi g_н \frac{\rho_н - \rho_k}{\rho_н} \quad . \qquad (12)$$

где $g_н$ – начальная масса сорных примесей в клочке.

Если плотность клочка $\rho_к$ оказывается достаточно малой, то возможно деление клочка на две или большее число частей. Предположим, то число частей u, на которое делится клочок, подчиняется распределению Пуассона с параметром $a = (\rho_н - \rho_к)/\rho_н$. Тогда всего будет получаться $u + 1$ клочок, причем их массы буем определять по формуле

$$m_i = m_н \frac{\xi_i}{\xi_1 + \ldots + \xi_{u+1}} \quad . \qquad (13)$$

Аналогично будем определять массу сорных примесей во вновь образовавшихся клочках:

$$g_{нi} = g_н \frac{\xi_i}{\xi_1 + \ldots + \xi_{u+1}} \quad . \qquad (14)$$

Выделение клочков ВМ в отходы возможно, если их размеры допускают проход между колосниками. Форма клочков чрезвычайно разнообразна, изменчива и практически не поддается формальному описанию. В рассматриваемом приближенном описании процесса будем считать, что клочок выделяется в отходы (угары) с вероятностью $1 - V/\Delta^3$ при $V \le \Delta^3$.

Все изложенные предположения использованы в приведенном ниже алгоритме имитационного моделирования рыхления и очистки ВМ.

Алгоритм:

1. Ввод исходных данных: $k = 1, N_з = 0, N_y = 0, N_g = 0, N_p = 0$.
2. Генерация $m_н, \rho_н, g_н$.
3. Генерация ξ ~ Un(0; 1). Если $\xi \ge P_з$, то перейти к п. 5.
4. «Зажгучивание клочка»: генерация ξ ~ Un(0; 1); вычисление $\rho_к$ по формуле (11); $m_к = m_н$; $g_к = g_н$; $Nз = Nз + 1$; перейти к п. 13.
5. Проверка «размельчения»: генерация ξ ~ Un(0; 1); вычисление $\rho_к$ по формуле (10); $a = (\rho_н - \rho_к)/\rho_н$; генерация u ~ $P_0(a)$; если $u > 0$, то перейти к п. 8.
6. «Разрыхление и очистка»: генерация ξ ~ Un(0; 1) и вычисление g_y по формуле (12); $m_к = m_н$; $g_к = g_н - g_y$.
7. Проверка выделения клочка в отходы: $V_k = m_k/\rho_k$; генерация ξ ~ Un(0;1); если $\xi < 1 - V_k/\Delta^3$ и $V_k \le \Delta^3$, то $N_y = N_y + 1$ (клочок «выделился в отходы»); иначе $N_p = N_p + 1$ (клочок «разрыхлился»). Перейти к п. 9.
8. Для $i = 1, \ldots, u + 1$ выполнить генерацию ξ_i ~ Un(0; 1).
9. Для $i = 1, \ldots, u + 1$ вычислить m_i по формуле (13).
10. Для $i = 1, \ldots, u + 1$ выполнить генерацию ξ_i ~ Un(0; 1).
11. Для $i = 1, \ldots, u + 1$ вычислить g_{ni} по фор-

Витебский государственный технологический университет

муле (14).

12. Для $i = 1, \ldots, u + 1$ выполнить процедуры, совпадающие с пп. 6 и 7; $N_g = N_g + 1$.

13. $k = k + 1$. Если $k \le M$, то перейти к п. 2.

В алгоритме $N_з$, N_y, N_g и N_p – соответственно числа клочков зажгученных, удаленных в отходы, разделившихся на более мелкие и разрыхлившихся.

В алгоритме есть два неизвестных параметра: C_p и $C_з$. Их значения подбирают при адаптации модели к конкретному моделируемому объекту.

Достоинство модели в том, что она дает возможность учесть влияние большого числа конструктивных и заправочных параметров: Δ, Z, r, h, b, φ, ω, $П$, характеристик входящего потока клочков – распределения $m_н$, $\rho_н$ и $g_н$.

Несмотря на условность многих предположений, использованных при построении алгоритма, имитационная статистическая модель качественно правильно описывает процесс. Это видно из графиков полигонов частот для $m_н$, $\rho_н$ и $m_к$, $\rho_к$, полученных в результате имитации последовательного прохода ВМ через три однотипные рабочие зоны (рисунок 3).

Начальное распределение массы клочков равномерное, начальная плотность клочков принята одинаковой для всех клочков. Графики показывают образование распределений массы и плотности клочков с сильной положительной асимметрией независимо от исходного распре-

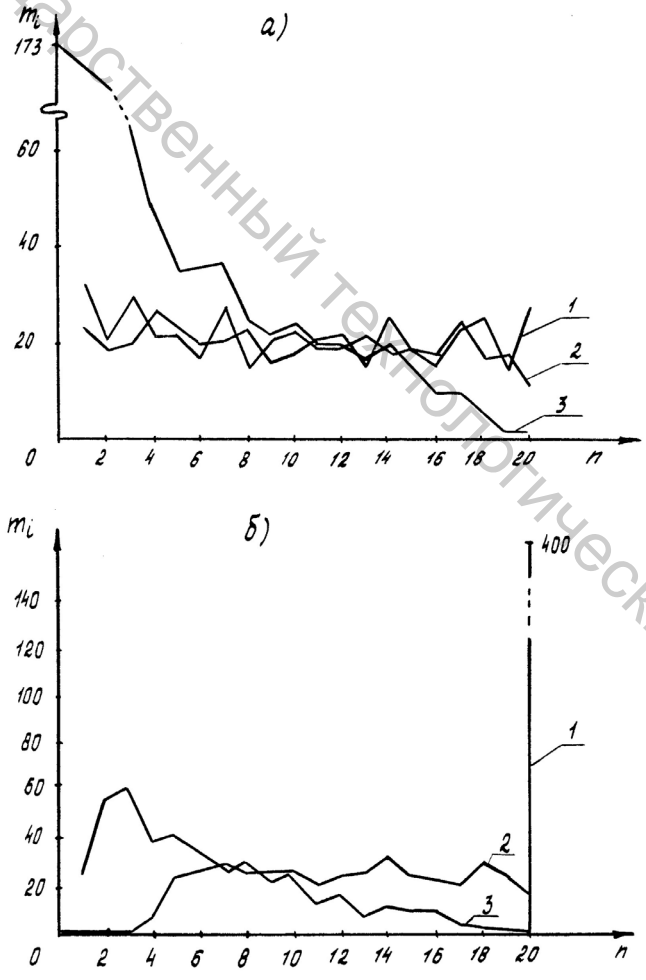


Рисунок 3 – 1) начальное распределение, 2) распределение после 1-й зоны рыхления, 3) распределение после 2-й зоны рыхления, а) масса клочков, б) плотность клочков, n – номер класса полигона частот, m_i – число попаданий в класс

Витебский государственный технологический университет

деления после обработки ВМ на одной–двух рабочих зонах.

Данные, полученные в результате моделирования, соответствуют распределениям, которые наблюдаются в натурных экспериментах [2—6] и предсказываются общей теорией дробления частиц.

ВЫВОДЫ

Построены модели процессов рыхления и очистки клочков волокнистого материала, позволяющие изучить влияние различных характеристик системы на степень разрыхления, измельчения и очистки клочков.

Витебский государственный технологический университет

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Самойлова, Т.А., Севостьянов, П.А., Забродин, Д.А., Савельев, С.Г. (2013), Статистические аспекты моделирования рыхления клочков хлопка, *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, № 1, С. 147–150.

2. Barella A., Pujol C. Sur la Distribution Statistique du poids des Flocons en ouverture et Battage du Cotton et Fibranne, *Bulletine ITF*, v. 24, № 149, pp. 617 – 635.

3. Akami, H., Kawakami, T. A S*imulation of breakage of cotton tuft by breaker*, Sen-i Gakkaishi, 1973, v. 29, 2, pp. 58 – 69.

4. Akami, H., Kawakami, T. *Change of size distribution of cotton tuft and evaluation of breakage*, Sen-i Gakkaishi, 1970, v. 26, 11, pp. 516 – 522.

5. Akami, H., Kawakami, T. *Matrix representation of blowing process in cotton spinning system*, Sen-I Gakkaishi, 1969, v. 25, 2, pp. 40 – 47.

6. Akami, H., Kawakami, T. *Relation between size distribution of cotton tuft and unevenness of random lap*, Sen-I Gakkaishi, 1970, v. 26, 11, pp. 523 – 529.

REFERENCES

1. Samoylova, T.A., Sevotyanov, P.A., Zabrodin, D.A., Savelyev, S.G. (2013), Statistical aspects of breaking simulation of cotton flocks [Statisticheskie aspekty modelirovanija ryhlenija klochkov hlopka], I*zvestija vuzov: Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti - Proceedings of the universities: Technology textile industry*, № 1, pp. 147–150.

2. Barella, A., Pujol, C. Sur la Distribution Statistique du poids des Flocons en ouverture et Battage du Cotton et Fibranne, *Bulletine ITF*, v. 24, № 149, pp. 617 – 635.

3. Akami, H., Kawakami, T. A *Simulation of breakage of cotton tuft by breaker,* Sen-i Gakkaishi, 1973, v.29, 2, pp. 58 – 69.

4. Akami, H., Kawakami, T. *Change of size distribution of cotton tuft and evaluation of breakage,* Sen-i Gakkaishi, 1970, v. 26, 11, pp. 516 – 522.

5. Akami, H., Kawakami, T. *Matrix representation of blowing process in cotton spinning system*, Sen-I Gakkaishi, 1969, v. 25, 2, pp. 40 – 47.

6. Akami, H., Kawakami, T. *Relation between size distribution of cotton tuft and unevenness of random lap*, Sen-I Gakkaishi, 1970, v. 26, 11, pp. 523 – 529.

Статья поступила в редакцию 20. 11. 2015 г.