

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ПОПЕРЕЧНО-ПОТОЧНОГО И БАЛЛИСТИЧЕСКОГО КЛАССИФИКАТОРА

Для определения оптимальных параметров рабочего процесса и аппарата комбинированного метода поперечно-поточной и баллистической классификации изготовлена экспериментальная установка с дисками ротора, позволяющими изменять радиус закрепления и количество ударных пластин. Высота подачи материала задавалась перемещением загрузочного приспособления, а скорость воздушного потока регулировалась изменением величины проходного сечения кожуха заслонкой. Потребляемая мощность измерялась киловатт метром.

Исследование проводилось по центральному ортогональному композиционному плану. Плечо звездных точек  $\alpha$ , исходя из условия ортогональности плана, приняли равным 1,414 [1]. Материалом для проведения, планируемого многофакторного эксперимента служил отсев дробления Криворожского гранитного карьера. Влажность материала по массе составляет 1,5...2%. Гранулометрический состав приведен в таблице 1.

Классификация материала производилась по границе разделения 0,16 мм.

Таблица 1. Гранулометрический состав отсева дробления (навеска сухого материала 1000 г)

| Размеры<br>отверстий<br>сит | Частные<br>остатки на<br>ситах |    | Полные<br>остатки на<br>ситах | Размеры отверстий<br>сит | Частные<br>остатки на<br>ситах |    | Полные<br>остатки на<br>ситах |
|-----------------------------|--------------------------------|----|-------------------------------|--------------------------|--------------------------------|----|-------------------------------|
| мм                          | г                              | %  | %                             | мм                       | г                              | %  | %                             |
| 2,5                         | 140                            | 14 | 14                            | 0,315                    | 190                            | 19 | 71                            |
| 1,25                        | 250                            | 25 | 39                            | 0,16                     | 190                            | 19 | 90                            |
| 0,63                        | 130                            | 13 | 52                            | Прошло 0,16 (пыль)       | 100                            | 10 | -                             |
|                             |                                |    |                               | Всего                    | -                              | -  | 266                           |

Методикой исследований было предусмотрено определение основных параметров, оказывающих существенное влияние на качество разделения материала: скорость поперечного воздушного потока  $x_1$  (м/с), высота подачи исходного материала  $x_2$  (м), радиус ротора  $x_3$  (м), количество ударных пластин ротора  $x_4$  (шт). Их уровни и интервалы варьирования (рассматриваемые пределы установлены на основании результатов графо-аналитического анализа с учетом конструктивно-технологических требований) приведены ниже.

| Фактор                | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Уровень               |       |       |       |       |
| основной              | 1,25  | 0,85  | 0,3   | 24    |
| верхний               | 1,45  | 0,95  | 0,315 | 28    |
| нижний                | 1,05  | 0,75  | 0,285 | 20    |
| Интервал варьирования | 0,2   | 0,1   | 0,015 | 4     |
| Звездная точка:       |       |       |       |       |
| верхняя               | 1,53  | 1,0   | 0,32  | 30    |
| нижняя                | 0,97  | 0,7   | 0,28  | 18    |

В качестве функции отклика выбрана эффективности классификации (Е), оцениваемая по формуле Ханкока-Луикена [2]

Оценка дисперсии воспроизводимости опытов [3] рассчитана на основании повторения опытов в центре плана ( $m = 6$ ;  $E_1 = 66\%$ ;  $E_2 = E_3 = E_4 = 68\%$ ;  $E_5 = E_6 = 70\%$ ):  $S_y^2 = 2,8$ .

На основании принятых уровней и интервалов варьирования (табл. 2) рассчитаны коэффициенты модели и составлено уравнение регрессии с учетом методики, приведенной в работе [1]

$$E = 68,35 + 2,08x_1 + 1,59x_2 - 1,72x_3 + 2,24x_4 - 2,69x_1x_2 + 1,44x_1x_3 + 4,69x_1x_4 - 0,06x_2x_3 + 1,69x_2x_4 - 1,44x_3x_4 - 1,58x_1^2 + 0,16x_2^2 + 0,41x_3^2 - 5,08x_4^2; |x_i| \leq 1,414. \quad (1)$$

Таблица 2. Матрица плана и результаты опытов

| Элементы       | Номер опыта | Кодированные значения факторов |        |        |        | Эффективность классификации, % |           |
|----------------|-------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------------------------------|-----------|
|                |             | $x_1$                          | $x_2$  | $x_3$  | $x_4$  | $E$                            | $\hat{E}$ |
| Ядро           | 1           | -                              | -      | -      | -      | 63                             | 61,65     |
|                | 2           | +                              | -      | -      | -      | 59                             | 58,93     |
|                | 3           | -                              | +      | -      | -      | 71                             | 66,83     |
|                | 4           | +                              | +      | -      | -      | 50                             | 53,35     |
|                | 5           | -                              | -      | +      | -      | 58                             | 58,21     |
|                | 6           | +                              | -      | +      | -      | 65                             | 61,25     |
|                | 7           | -                              | +      | +      | -      | 65                             | 63,39     |
|                | 8           | +                              | +      | +      | -      | 55                             | 55,67     |
|                | 9           | -                              | -      | -      | +      | 57                             | 56,25     |
|                | 10          | +                              | -      | -      | +      | 71                             | 72,29     |
|                | 11          | -                              | +      | -      | +      | 65                             | 68,19     |
|                | 12          | +                              | +      | -      | +      | 74                             | 73,47     |
|                | 13          | -                              | -      | +      | +      | 51                             | 47,05     |
|                | 14          | +                              | -      | +      | +      | 65                             | 68,85     |
|                | 15          | -                              | +      | +      | +      | 59                             | 58,99     |
|                | 16          | +                              | +      | +      | +      | 69                             | 70,03     |
| Звездные точки | 17          | -1,414                         | 0      | 0      | 0      | 57                             | 62,71     |
|                | 18          | +1,414                         | 0      | 0      | 0      | 73                             | 68,59     |
|                | 19          | 0                              | -1,414 | 0      | 0      | 64                             | 66,59     |
|                | 20          | 0                              | +1,414 | 0      | 0      | 73                             | 71,06     |
|                | 21          | 0                              | 0      | -1,414 | 0      | 73                             | 71,24     |
|                | 22          | 0                              | 0      | +1,414 | 0      | 65                             | 66,38     |
|                | 23          | 0                              | 0      | 0      | -1,414 | 51                             | 55,49     |
|                | 24          | 0                              | 0      | 0      | +1,414 | 65                             | 61,82     |
| Центр          | 25          | 0                              | 0      | 0      | 0      | 69                             | 68,81     |

Оценка значимости коэффициентов уравнений проведена при помощи неравенств [1], при критическом значении  $t$  – критерия Стьюдента с  $\nu = m - 1$  степенями свободы и заданным уровнем значимости  $(1 - \frac{\alpha}{2})$ ;  $t_{kr}(5; 0,975) = 2,571$ . [4]

$$|b_i| > 0,962; |b_{ij}| > 1,075; |b_{ii}| > 1,521.$$

В результате получаем, что  $b_{23} = b_{22} = b_{33} = 0$  с надежностью 95%, следовательно,  $b_0 = 68,81$ .

Окончательно уравнение регрессии имеет вид:

$$\begin{aligned}\hat{E} = & 68,81 + 2,08x_1 + 1,59x_2 - 1,72x_3 + 2,24x_4 - 2,69x_1x_2 + 1,44x_1x_3 + \\ & + 4,69x_1x_4 + 1,69x_2x_4 - 1,44x_3x_4 - 1,58x_1^2 - 5,08x_4^2; |x_i| \leq 1,414.\end{aligned}$$

Адекватность модели по  $F$  - критерию Фишера  $F_{kr}(24;13;0,95) = 2,42$  [3] составляет

$$\frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = 1,735 < F_{kr} = 2,42,$$

где  $S_{ad}^2 = 4,857$  - рассчитанная дисперсия адекватности модели [1]. Модель признана адекватной с надежностью более 95%.

Оценку информационной способности модели проверяем из неравенства  $F_{kr} \leq \frac{S_{ob}^2}{S_{ad}^2}$

где  $S_{ob}^2$  - общая дисперсия функции отклика, оценивающая общее рассеяние результатов определения  $E$  по отношению к общему среднему по всем опытам [1]

$$F = \frac{53,76}{4,857} = 11,07 > 2,42.$$

В соответствии с [1] уменьшение погрешности прогнозирования  $\theta_u = 232,7$ . Гипотеза о равенстве дисперсий  $S_{ob}^2$  и  $S_{ad}^2$  отклоняется с надежностью более 95%, погрешность прогнозирования уменьшилась на 232%. Модель может быть признана информативной.

Для определения оптимальных значений факторов, в диапазоне их варьирования, при которых функция отклика достигает своего максимума, воспользуемся диссоциативношаговым методом [1].

Квазиоднофакторные модели имеют вид

$$\begin{aligned}W_1 &= 2,08x_1 - 2,69x_1x_2 + 1,44x_1x_3 + 4,69x_1x_4 - 1,58x_1^2; \\ W_2 &= 1,59x_2 - 2,69x_2x_1 + 1,69x_2x_4; \\ W_3 &= -1,72x_3 + 1,44x_3x_1 - 1,44x_3x_4; \\ W_4 &= 2,24x_4 + 4,69x_4x_1 + 1,69x_4x_2 - 1,44x_4x_3 - 5,08x_4^2; |x_i| \leq 1,414.\end{aligned}\tag{2}$$

Выбранными моделями из системы (2) являются 2 и 3 у которых  $b_{22} = b_{33} = 0$ . Учитывая, что для них  $|b_i| < \sum_j |b_{ij}|$ , можно заключить, что такие модели могут достигнуть максимума при граничных значениях  $x_i$ , т.е.  $x_i = \pm 1,414$ . Для определения знака граничного значения рассмотрены по две модели – при  $x_i = x_{i\max}$  и  $x_i = x_{i\min}$  – и осуществлен поиск оптимума по каждой из них.

Оптимум для моделей 1 и 4 определен из равенства нулю первой частной производной функции  $\hat{W}_i$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \hat{W}_1}{\partial x_1} &= 2,08 - 2,69x_2 + 1,44x_3 + 4,69x_4 - 3,16x_1 = 0; \\ \frac{\partial \hat{W}_4}{\partial x_4} &= 2,24 + 4,69x_1 + 1,69x_2 - 1,44x_3 - 10,16x_4 = 0.\end{aligned}$$

После расчета оптимума для четырех возможных комбинаций значений факторов окончательно получаем, что максимальная эффективность классификации  $\hat{E}_{\max} = 75,91\%$  достигается при следующих значениях факторов

$$x_1 = -0,689; x_2 = +1,414; x_3 = -1,414; x_4 = +0,337.$$

Переход от кодированных переменных к натуральным производим по формуле  $x = x_0 + Sx'$  [4]. В результате проведенного многофакторного эксперимента установлены следующие оптимальные параметры промышленной установки: скорость поперечного воздушного потока – 1,1 м/с, высота подачи исходного материала – 1,0 м, радиус ротора – 0,28 м, количество ударных пластин ротора – 26 шт.

Исследования классификатора на установленных параметрах показали высокую эффективность процесса и удовлетворительную сходимость результатов теоретических [5] и экспериментальных исследований.

Как пример, приведены результаты классификации (табл. 3) для различных значений влажности песка и по обработке серии экспериментов построены графики оценки эффективности (рис. 1) и оценки разделения по крупности (рис. 2).

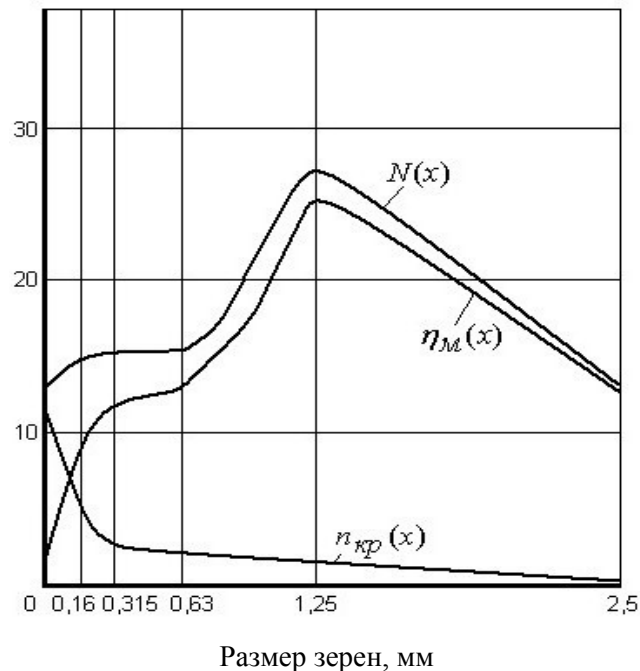


Рис. 1. Оценка эффективности классификации по кривым фракционного состава продуктов до и после разделения ( $w_m = 4\%$ ) при плотности распределения:

$N(x)$  – исходного материала;  $\eta_{кр}(x)$  – крупного продукта;  $\eta_m(x)$  – мелкого продукта

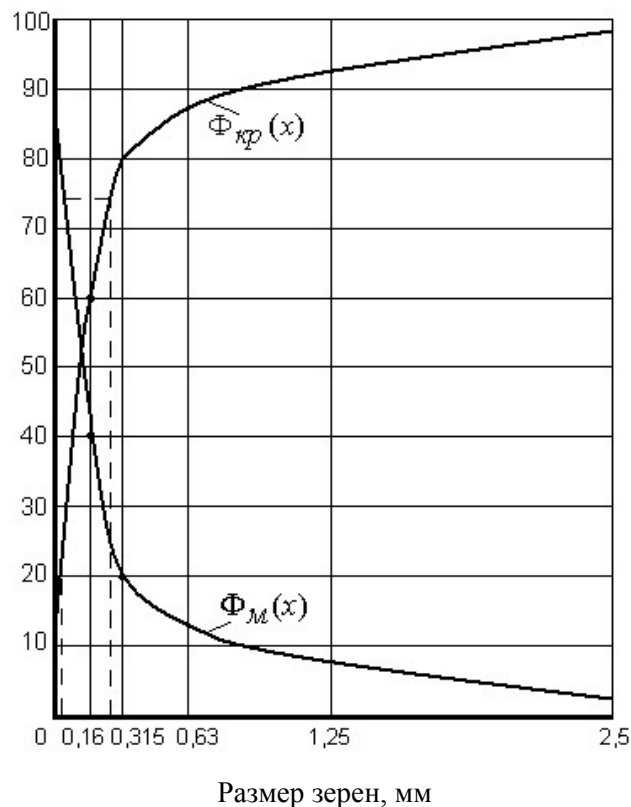


Рис. 2. Определение крупности разделения по ровному распределению зерен ( $w_m = 4\%$ )

$\Phi_{кр}(x), \Phi_m(x)$  - фракционное извлечение соответственно крупного и мелкого продуктов

После проведения экспериментальных исследований установки для производства строительного песка, реализующей принцип поперечно-поточной и баллистической классификации, проведения многофакторного эксперимента и получения оптимальных параметров была разработана техническая документация и изготовлен промышленный образец комбинированного пневмо-баллистического классификатора (ПБК). Промышленные испытания классификатора в условиях действующего производства осуществлены на заводе крупнопанельных конструкций ОАО "Криворожжилстрой" (рис. 3).

Комбинированный классификатор ПБК, установленный на месте перегрузочного узла конвейеров №2 и №3 технологической линии заполнителей, осуществлял разделение отсева дробления по граничной крупности 0,16 мм, а также попутное обеспыливание песка и щебня, поступавших железнодорожным транспортом 1 в приемник 2.



Таблица 3. Результаты классификации отсева дробления

 $W_m=3\%$ 

| Класс<br>крупности,<br>мм | Фракционный состав<br>продукта, % |                     |                         | Извлечение в<br>фракцию, %             |                                            |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
|                           | Исходного<br>$N(x)$               | мелкого<br>$n_m(x)$ | крупного<br>$n_{кр}(x)$ | мелкого<br>продукта<br>$\Phi_m(x), \%$ | крупного<br>продукта<br>$\Phi_{кр}(x), \%$ |
| -5+2,5                    | 13                                | 0,6                 | 12,4                    | 4,62                                   | 95,38                                      |
| -2,5+1,25                 | 27                                | 2,3                 | 24,7                    | 8,52                                   | 91,48                                      |
| -1,25+0,63                | 16                                | 3,0                 | 13,0                    | 18,75                                  | 81,25                                      |
| -0,63+0,315               | 15,5                              | 3,9                 | 11,6                    | 25,16                                  | 74,84                                      |
| -0,315+0,16               | 15                                | 7,1                 | 7,9                     | 47,33                                  | 52,67                                      |
| -0,16+0                   | 13,5                              | 12,1                | 1,4                     | 89,63                                  | 10,37                                      |

 $W_m=5\%$ 

| Класс<br>крупности,<br>мм | Фракционный состав<br>продукта, % |                     |                         | Извлечение в<br>фракцию, %             |                                            |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
|                           | исходного<br>$N(x)$               | мелкого<br>$n_m(x)$ | крупного<br>$n_{кр}(x)$ | мелкого<br>продукта<br>$\Phi_m(x), \%$ | крупного<br>продукта<br>$\Phi_{кр}(x), \%$ |
| -5+2,5                    | 13                                | 0,2                 | 12,8                    | 1,54                                   | 98,46                                      |
| -2,5+1,25                 | 27                                | 1,7                 | 25,3                    | 6,3                                    | 93,7                                       |
| -1,25+0,63                | 16                                | 2,0                 | 14,0                    | 12,5                                   | 87,5                                       |
| -0,63+0,315               | 15,5                              | 2,7                 | 12,8                    | 17,42                                  | 82,58                                      |
| -0,315+0,16               | 15                                | 5,5                 | 9,5                     | 36,67                                  | 63,33                                      |
| -0,16+0                   | 13,5                              | 10,4                | 3,1                     | 77,04                                  | 22,96                                      |

 $W_m=4\%$ 

| Фракционный состав<br>Продукта, % |                     |                         | Извлечение в<br>фракцию, %             |                                            |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| исходного<br>$N(x)$               | мелкого<br>$n_m(x)$ | крупного<br>$n_{кр}(x)$ | мелкого<br>продукта<br>$\Phi_m(x), \%$ | крупного<br>продукта<br>$\Phi_{кр}(x), \%$ |
| 13                                | 0,4                 | 12,6                    | 3,08                                   | 96,92                                      |
| 27                                | 2,0                 | 25,0                    | 7,41                                   | 92,59                                      |
| 16                                | 2,3                 | 13,7                    | 14,37                                  | 85,63                                      |
| 15,5                              | 3,1                 | 12,4                    | 20,0                                   | 80,0                                       |
| 15                                | 6,0                 | 9,0                     | 40,0                                   | 60,0                                       |
| 13,5                              | 11,4                | 2,1                     | 84,44                                  | 15,56                                      |

 $W_m=6\%$ 

| Фракционный состав<br>Продукта, % |                     |                         | Извлечение в<br>фракцию, %             |                                            |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| исходного<br>$N(x)$               | мелкого<br>$n_m(x)$ | крупного<br>$n_{кр}(x)$ | мелкого<br>продукта<br>$\Phi_m(x), \%$ | крупного<br>продукта<br>$\Phi_{кр}(x), \%$ |
| 13                                | 0,2                 | 12,8                    | 1,54                                   | 98,46                                      |
| 27                                | 1,6                 | 25,4                    | 5,93                                   | 94,07                                      |
| 16                                | 2,0                 | 14,0                    | 12,5                                   | 87,5                                       |
| 15,5                              | 2,8                 | 12,7                    | 18,06                                  | 81,94                                      |
| 15                                | 5,5                 | 9,5                     | 36,67                                  | 63,33                                      |
| 13,5                              | 9,9                 | 3,6                     | 73,33                                  | 26,67                                      |

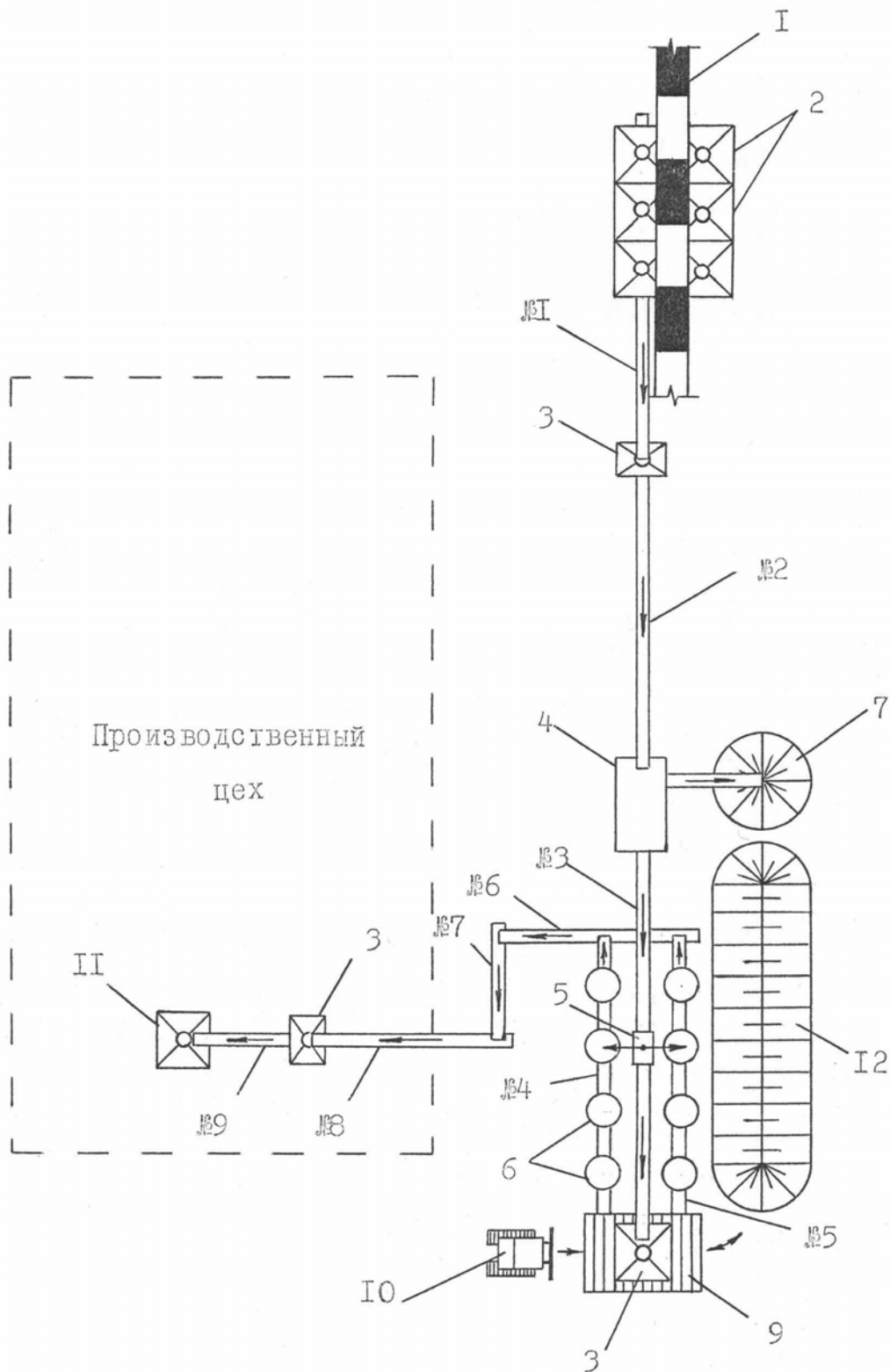


Рис.3. Технологическая линия заполнителей завода крупнопанельных конструкций с установленным классификатором

После установки классификатора 4 в линию было произведено ее испытание следующим образом: из подземной галереи конвейером №1 через перегрузочный уезд 3 по конвейеру № 2 материал подавался на пневмо-баллистический классификатор 4, откуда мелкий продукт класса -0,16+0 мм поступает в открытый конусный склад 7, а крупный



продукт +0,16 мм по конвейеру № 3 через разгрузочную тележку 5 – в закрытый склад 6 сыпучих заполнителей бетона или через колосниковую решетку 9 на конвейеры № 4 и № 5, а также с помощью бульдозера 10 в открытый конусный склад 12. Из открытых конусных складов 7 и 12 продукт периодически, через решетку 9, также направляется на конвейеры № 4 и № 5. Подача заполнителей со складов осуществлялась по системе конвейеров № 6...9 в приемный бункер дозаторов (11).

В результате было установлено, что разработанный классификатор позволяет осуществлять необходимое разделение практически всех заполнителей поступающих на бетоносмесительный узел, работая, таким образом, в режиме контрольной классификации. При этом осуществлялось эффективное разделение отсевов дробления по крупности 0,16 мм с практическим использованием получаемых продуктов классификации. Подтверждена возможность эффективного промышленного применения пневмо-баллистического классификатора для получения строительного песка при переработке нерудных полезных ископаемых.

### **Выводы**

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить рациональные параметры классификатора на основе которых разработана техническая документация, изготовлен промышленный образец и осуществлено его внедрение на производстве.

Установлена удовлетворительная сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований с их расхождением в пределах 11-12%.

### *Литература*

1. *Рубинштейн Ю.Б., Волкова Л.А.* Математические методы в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 296с.
2. *Шохин В.Н., Лопатин А.Г.* Гравитационные методы обогащения. – М.: Недра, 1980. – 400с.
3. *Красовский Г.И., Фияретов Г.Ф.* Планирование эксперимента. – Минск: Издательство БГУ, 1982. – 302с.
4. *Шупов Л.П.* Прикладные математические методы в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 296с.
5. *Сергеев А.М., Афанасьев В.В.* Застосування математичних методів при удосконаленні сортування по пружності гірничої маси залізорудних та нерудних підприємств //Відомості Академії Гірничих Наук України. – 1999. – №І. – С.18-20.