

INTERNATIONAL CONFERENCE DYNAMICS OF MINING MACHINES
DYNAMACH '89

Юрий РУДЬ
Анна ЛИСТРОВА

Горнорудный Институт
Кривой Рог, СССР

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫБОРА ТИПОРАЗМЕРОВ ОБОРУДОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Резюме. Из-за отсутствия научно обоснованных методов расчета паспортной производительности оборудования технологических систем горно-обогатительных предприятий 40-50% его типоразмеров при условии 100%-го резервирования по нагрузке имеют завышенную производительность, а 10-12% типоразмеров лимитируют производительность этих систем, что приводит к увеличению капитальных и эксплуатационных расходов, и снижению производительности систем. На основе теории надежности разработан метод расчета теоретической производительности оборудования технологических систем, который позволяет на стадии их проектирования обеспечить оптимальный равнонагруженный режим работы оборудования, достигнуть рационального сочетания его производительности во всех последовательно включенных подсистемах, повысить производительность технологических систем за счет исключения лимитирующих элементов, а главное, добиться снижения капитальных затрат при использовании оборудования с меньшей паспортной производительностью. Оптимальность процесса выбора типоразмеров оборудования технологических систем определяется величиной экономического эффекта получаемого от использования оборудования с научно обоснованным уровнем производительности. На основе разработанной методики выполнен проверочный расчет теоретической производительности и выбор типоразмеров оборудования, комплектующего две действующие технологические системы.

Технологические системы горно-обогатительных предприятий отличаются значительной структурной сложностью, различным функциональным назначением и большим числом типоразмеров комплектующего системы оборудования, высокими требованиями к уровню его надежности. Эффективность сложных технологических систем, степень их экономической полезности в процессе эксплуатации в значительной степени зависят от правильного выбора паспортной производительности оборудования и уровня его надежности. При

этом нужно иметь в виду, что повышение надежности технологического оборудования является чрезвычайно сложной задачей, а возможности управления самим процессом повышения надежности оборудования, выпускаемого машиностроительными заводами серийно, практически отсутствуют. Поэтому при выборе величины его паспортной производительности в процессе проектирования технологических систем уровень надежности оборудования принимается равным достигнутому эксплуатационниками на данный момент времени. Однако даже при этих условиях корректное и достоверное решение задачи оптимизации выбора паспортной производительности оборудования, функционирующего в сложных технологических системах, до настоящего времени отсутствовало, так как не было научно обоснованных методов расчета теоретической производительности технологического оборудования. На выбор паспортной производительности оборудования технологических систем сильно влияет целый ряд субъективных факторов: наличие и достоверность исходных данных, квалификация и опыт проектировщиков, их заинтересованность в результатах работы, глубина технической проработки технологической системы и др. Вследствие этого паспортная производительность оборудования существующих технологических систем горно-обогатительных предприятий выбрана с теми или иными отклонениями от научно обоснованного уровня, его эксплуатация производится в различных режимах нагружения, что не может не сказаться на его надежности и экономических показателях системы в целом. Так, например, до 40-50% типоразмеров оборудования проектируемых и действующих фабрик окомкования железорудного сырья имеет паспортную производительность, которая выше оптимальных значений, а 10-12% типоразмеров оборудования этих систем имеют паспортную производительность, значения которой ниже обоснованного уровня, что лимитирует производство окомкованного сырья всей фабрикой окомкования. Отклонения значений паспортной производительности оборудования в большую или меньшую сторону от научно обоснованного уровня являет-

ся причиной экономических потерь промышленных предприятий, так как при этом падает выходной эффект системы, необоснованно растут капитальные затраты и эксплуатационные расходы на поддержание оборудования в работоспособном состоянии. Авторами доклада разработан метод оптимизации процесса научно-технического обоснования паспортной производительности и выбора типоразмеров оборудования технологических систем с использованием критерия надежности. Метод основывается на использовании моделей надежности типовых структурных соединений, имеющихся в исследуемых технологических системах, а также зависимости теоретической производительности оборудования $\Pi_{об.тр}$ от технической производительности систем $\Pi_{пс.тх}$

$$\Pi_{об.тр} = \Pi_{пс.тх} / K_{г.пс} \quad , \quad (1)$$

где $K_{г.пс}$ - коэффициент готовности оборудования подсистем.

При этом предполагается, что между j -й и $(j+1)$ -ой подсистемами технологической системы установлены аккумулирующие бункеры, выполняющие двоякую роль: при отказе оборудования j -й подсистемы и простоя ее в ремонте аккумулирующий бункер является источником питания исходным сырьем оборудования $(j+1)$ -й подсистемы; при отказе оборудования $(j+1)$ -й подсистемы бункер принимает продукцию, произведенную j -й подсистемой, в течение времени простоя в ремонте оборудования $(j+1)$ -й подсистемы.

В общем случае коэффициент готовности подсистемы $K_{г.пс}$ определяется из следующего математического выражения.

$$K_{г.пс} = I / (I + I / \rho_{пс}), \quad (2)$$

где параметр надежности $\rho_{пс}$ находится как частное дроби $M_{пс} / \omega_{пс}$ ($M_{пс}$ - интенсивность восстановления работоспособности оборудования подсистемы, $I/\omega_{пс}$; $\omega_{пс}$ - параметр потока отказов подсистемы, I/λ).

Модели надежности разработаны автором доклада и обеспечивают возможность оценки коэффициента готовности $K_{г.пс}$ типовых структурных соединений оборудования в технологической системе через параметр надежности $P_{пс}$. Основными моделями надежности горно-обогатительных предприятий являются: модель надежности А - для типового структурного соединения, состоящего из n последовательно соединенных образцов оборудования (элементов); модель надежности С - для типового структурного соединения, состоящего из двух равнонадежных параллельных ветвей (состоящих в свою очередь из n последовательно соединенных элементов), работающих в режиме нагруженного резерва; модель надежности F - для типового структурного соединения, состоящего из m равнонадежных параллельных ветвей, работающих в режиме нагруженного резерва. Для названных моделей надежности параметр надежности $P_{пс}$ соответственно равен:

модель надежности А :

$$P_{пс.А} = I / \left[\prod_{i=1}^n \left(I + \frac{I}{P_i} \right) - I \right], \quad (3а)$$

где P_i - параметр надежности i -го образца оборудования подсистемы ($P_i = M_i / \omega_i$);

модель надежности С:

$$P_{пс.С} = (I + P_{пс.А})^2 - I; \quad (3б)$$

модель надежности F :

$$P_{пс.F} = (I + P_{пс.А})^m - I. \quad (3в)$$

Основными этапами научно-технического обоснования теоретической производительности и выбора типоразмеров оборудования, функционирующего в сложных технологических системах, являются:

1) Построение графических моделей надежности (структурно-элементных схем) подсистем оборудования 2-го и 3-го иерархического уровня (ИУ). При этом производится изучение и содержатель-

ное описание функциональной схемы (схемы цепи аппаратов) технологической системы, в том числе рассмотрение элементного наполнения схемы (номенклатуры и типоразмеров оборудования), анализ основных технико-эксплуатационных показателей оборудования, выделение в системе подсистем различного функционального назначения. В первом приближении по общему числу оборудования, используемого в системе, количеству последовательных и параллельных ветвей, их взаимному расположению в системе качественно оценивается степень сложности структуры системы. При этом под сложностью структуры системы понимается комплексный параметр, определяемый количеством элементов, комплектующих системы, и числом связей между ними. Выполняется анализ функциональной схемы с точки зрения выявления возможностей ее функционирования при различных режимах выходного эффекта, оценка характера взаимодействия оборудования в подсистемах различного функционального назначения. Выявляется характер соединения оборудования различных типов и назначения с точки зрения надежности, степень его влияния на общую надежность подсистем. При этом выявляется структура систем, путем построения подсистем 3-го ИУ (ветвей), состоящих из последовательно соединенных элементов, и подсистем 2-го ИУ, содержащих параллельно включенные ветви (подсистемы 3-го ИУ). В структурно-элементную схему включаются лишь те элементы и связи, которые по своему смыслу отражают признаки и свойства надежности систем и проявляются при рассмотрении процесса ее функционирования.

2) Преобразование графических моделей надежности подсистем оборудования 2-го и 3-го иерархического уровней в математические модели надежности путем выбора метода аналитического описания отношений, выраженных в структурно-элементной схеме с помощью моделей надежности типовых структурных соединений А, С, F. Модели надежности типовых структурных соединений позволяют получить численное значение показателей надежности подсистем (прежде всего параметра $\rho_{пс}$).

3) Определение параметра надежности $P_{пс}$ подсистем оборудования 3-го иерархического уровня по аналитическим выражениям, определяемым типом модели надежности.

4) Определение технической производительности подсистем 2-го иерархического уровня по результатам промышленных наблюдений за реально функционирующим оборудованием при проверочном расчете или с помощью технологической схемы при проектном расчете. Технологическая схема представляет собой графическое изображение последовательности технологических операций с указанием количества и качества перерабатываемых на каждой операции материалов.

5) Расчет теоретической производительности оборудования, функционирующего в подсистемах 2-го и 3-го ИУ.

6) Выбор по каталогам типоразмеров оборудования, функционирующего в технологических системах. Выбор типоразмеров оборудования производится на основании результатов расчета теоретической производительности. Оборудование выбирается по каталогам таким образом, чтобы его паспортная производительность была равна или незначительно превышала значения теоретической производительности, которые получены при расчете.

Техническая производительность j -й подсистемы $P_{пс.тхj}$ при заданных значениях производительности $(j+1)$ -й подсистемы $P_{пс.тх(j+1)}$, определяется с учетом коэффициента пропорциональности g

$$P_{пс.тхj} = g P_{пс.тх(j+1)}; \quad j = k, k-1, \dots, 1, \quad (4)$$

где k - общее количество подсистем 2-го ИУ рассматриваемой технологической подсистемы.

При этом удобно производить оценку производительности всех k подсистем начиная с последней, определяющей техническую производительность технологической системы в целом.

Коэффициент пропорциональности g находится на технологической схеме рассматриваемой системы и характеризует измене-

ние количества сырья в результате его технологической переработки в j -й подсистеме

$$g = \Pi_{\text{пс.тх.}j} / \Pi_{\text{пс.тх.}}(j+1), \quad (5)$$

где $\Pi_{\text{пс.тх.}j}$, $\Pi_{\text{пс.тх.}}(j+1)$ - производительность

j -й и $(j+1)$ -й подсистем в соответствии с технологической схемой.

Применение разработанного авторами статьи метода показано на примере системы оборудования фабрики окомкования железных руд (2-я очередь) Северного горно-обогатительного комбината (СевГОК - 2), созданной на базе обжиговых конвейерных машин ОКГ-306 / 3 /.

Годовая производительность технологической системы 4,4 млн.т обожженных окатышей. Графические модели надежности подсистем оборудования фабрик окомкования СевГОК-2 приведены на рисунке. Результаты расчета параметра надежности и производительности представлены в табл. I.

Как видно из табл. I, наибольшие отклонения значений технической и теоретической производительности характерны для подсистем 2-го ИУ № 5 "Транспортирования и загрузка сырых железорудных окатышей на обжиговую конвейерную машину" и № 10 "Термической обработки сырых окатышей". Эти подсистемы отличаются тем, что они укомплектованы оборудованием с недостаточно высоким уровнем надежности. Причем отклонения значений технической производительности оборудования от теоретической тем больше, чем меньше его надежность.

По величине теоретической производительности $\Pi_{\text{об.тр}}$ (6-я колонка таблицы) выбрано технологическое оборудование системы. Выбор типоразмеров и номенклатуры оборудования системы производится по каталогам при условии обеспечения его 100%-го резервирования по нагрузке. При этом показатели технического использования оборудования, комплектующего систему, почти в два раза ниже, чем при его использовании без резервирования.

Таблица I.

Результаты расчета теоретической производительности и выбор типовых размеров оборудования технологической системы окомкования СевГОК-2

Номера подсистем 2-го и 3-го IV	Количество параллельных подсистем 3-го IV в подсистеме 2-го IV	Параметры надежности ρ	Коэффициент пропорциональности ρ	Техническая производительность подсистемы 2-го IV $\Pi_{\text{т.т.х.}}$, т/ч	Теоретическая производительность оборудования подсистем	
					3-го IV	2-го IV
I	2	3	4	5	6	7
I	2	63,370	0,6934	609,5	309,6	619,1
2	2	236,12	1,0	879,1	441,5	882,9
3	12	41,909	1,4232	879,1	75,0	900,2
4	4	499,12	1,0	615,5	154,2	616,8
5	2	29,539	4,6635	615,5	318,2	636,4
6	2	3874,5	22,0	132,0	66,1	132,2
7	2	434,57	0,436	6,0	3,1	6,1
8	2	3874,6	0,5104	137,6	68,9	137,7
9	2	885,0	0,3320	289,6	135,0	269,9
10	2	7,2289	15,1210	812,0	462,2	924,3
II	2	91,060	0,0661	53,7	27,2	54,3

Продолжение табл. I

I	2	3	4	5	6	7
I2	4	114,44	1,4036	812,0	204,8	819,1
I3	4	812,5	1,0	578,5	144,8	579,2
I4	2	134,79	1,0	578,5	291,4	582,8
I5	2	4555,8	1,0	578,5	289,3	578,6
I6	I	210,93	1,0	578,5	581,2	581,2
I7	I	294,38	1,0	578,5	580,5	580,5
I8	I	5396,7	2,8925	578,5	578,6	578,6
I9	4	683,89	1,0	200,0	50,1	200,3
I20	I	785,25	1,0	200,0	200,3	200,3
I21	2	137,21	2,0	200,0	100,8	201,5
I22	2	1706,7	2,9851	100,0	50,1	100,1
I23	4	106,02	1,0	33,5	8,5	33,6
I24	2	602,62	1,0	33,5	8,4	16,6
I25	2	1024600	1,0	33,5	16,8	33,6
I26	I	996,41	--	33,5	33,6	33,6

Однако появляется возможность во всех подсистемах фабрики работать при одном транспортном потоке, что обеспечивает повышение технического использования обжиговых конвейерных машин, являющихся базовым элементом системы, уникальным по своей конструкции и условиям работы, дорогостоящим, обеспечивающим непрерывность технологического процесса обжига железорудного сырья. Рекомендуемые типоразмеры оборудования, комплектующие отдельные подсистемы фабрики окомкования, приведены в табл.2 (2-я колонка).

Проверка точности и достоверности предложенного в данной статье метода выполнена по результатам промышленных исследований фактической производительности оборудования технологической системы фабрики окомкования СевГОК-2. На производительность оборудования в процессе промышленной эксплуатации влияет множество факторов: ритмичность поставки исходного железорудного сырья, особенности технологического процесса при переработке каждой конкретной партии железной руды, количество работоспособных обжиговых конвейерных машин, техническое состояние комплекса оборудования системы, текущая потребность в окускованном железорудном сырье и др. Эти факторы являются случайными и изменяются по вероятностным законам. В связи с этим определение фактической производительности оборудования системы СевГОК-2 проводилось с применением методов математической статистики. В качестве критерия точности и достоверности разработанной авторами теории принята степень приближения фактической производительности оборудования к его паспортной производительности, выбранной известным в практике проектирования и предлагаемым в данной статье методами. При этом необходимо учесть, что степень приближения паспортной производительности оборудования к фактическим значениям не может быть абсолютной. Величина приближения этих параметров ограничена градами паспортной производительности существующих типоразмеров оборудования выпускаемого машиностроительными заводами.

Степень приближения фактической производительности оборудования к его паспортной производительности оценивалась относительным отклонением

$$\delta = 100 (\Pi_{\text{п}} - \bar{\Pi}) / \bar{\Pi}, \% \quad (6)$$

где $\Pi_{\text{п}}$ - паспортная производительность оборудования, т/ч;

$\bar{\Pi}$ - верхняя доверительная граница фактической производительности оборудования в процессе промышленных испытаний (т/ч), определяемая по формуле

$$\bar{\Pi} = M (\Pi) + t_{\beta} \sigma (\Pi) / \sqrt{n} \quad (7)$$

где $M (\Pi)$ и $\sigma (\Pi)$ - соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение фактической производительности оборудования в процессе исследований;

t_{β} - квантиль нормального распределения для доверительной вероятности β (для $\beta = 0,99$ $t_{\beta} = 2,576$); n - количество наблюдений в выборке при оценке параметров нормального распределения.

Относительные отклонения паспортной производительности оборудования, выбранного по известному и разработанному авторами методам приведены в табл. 2.

Среднее относительное отклонение паспортной производительности оборудования технологической системы окомкования СевГОК-2 при использовании научно обоснованного метода расчета в два раза меньше, чем при использовании метода, известного в практике проектирования.

Выбор типоразмеров оборудования по значениям технической производительности, найденным с помощью математических моделей надежности типовых структурных соединений элементов, позволяют на стадии проектирования исключить возможность установки в технологической системе оборудования, производительность которого превышает научно-обоснованный уровень или лимитирует производительность отдельных подсистем системы. Научно-техническое обоснование производительности оборудования позволя-

ет снизить капитальные затраты на создание сложных технологических систем, а также эксплуатационные расходы на поддержание их в работоспособном состоянии.

Таблица 2

Относительные отклонения паспортной производительности оборудования, выбранного по известному и предлагаемому методам

Номера подпис- тем, элемен- тов	Верхняя довери- тельная граница значений	Проектные значения паспортной производи- тельности оборудова- ния, П, т/ч	Обоснован- ные значе- ния паспор- тной произ- водитель- ности обо- рудования, П _{п.п} , т/ч	Относи- тельное откло- нение $\delta_{п.п}$ %	Относитель- ное отклонение $\delta_{п.о}$ %
	П, т/ч	П _{п.п} , т/ч	П _{п.п} , т/ч	П _{п.о} , т/ч	П _{п.о} , т/ч
I - 2	631,9	950,0	50,3	950,0	50,3
I - 4	631,9	850,0	34,5	850,0	34,5
2 - 5	911,4	1187,5	30,3	950,0	4,2
2 - 6	911,4	1100,0	20,7	950,0	4,2
2 - 7	911,4	1710,0	87,6	1273,0	39,7
3 - 10	151,9	348,8	129,6	209,0	37,6
3 - 11	151,9	228,0	50,1	228,0	50,1
3 - 13	151,9	480,0	216,0	480,0	216,0
3 - 14	151,9	90,0	-40,8	130,0	14,4
3 - 15	151,9	100,0	-34,2	170,0	11,9
4 - 16	321,9	900,0	178,6	360,0	11,8
5 - 17	321,9	900,0	178,6	360,0	11,8
5 - 19	321,9	360,0	11,8	360,0	11,8
5 - 20	321,9	360,0	11,8	360,0	11,8
12 - 50	412,0	272,0	-34,0	510,0	23,8

Продолжение таблицы 2

I	2	3	4	5	6
I2 - 51	412,0	416,2	1,0	416,2	1,0
I2 - 52	412,0	450,0	9,2	450,0	9,2
I2 - 54	824,0	850,0	3,2	850,0	3,2
I4 - 56	599,7	1139,0	89,9	1139,0	89,9
I5 - 57	599,7	1062,5	77,2	850,0	41,7
I7- 60	599,7	1062,5	77,2	850,0	41,7
I8 - 63	599,7	850,0	41,7	850,0	41,7
I9 - 64	104,7	272,0	159,8	153,0	46,1
20 - 65	208,2	850,0	308,3	217,6	4,5
21 - 67	208,2	850,0	308,3	217,6	4,5
21 - 69	208,2	340,0	63,3	217,6	4,5
22 - 70	104,7	340,0	224,7	107,1	2,3
Среднее относительное отклонение			91,58		42,88

ОПТИМАЛИЗАЦЈА ПРОЦЕСУ ВЫБОРУ ТЫПОВЫМІАРЉВ ВЫПОЗАЖЕНІА
СИСТЕМЉВ ТЕХНОЛОГІЧНЫХ ПРЕДСІЉБІОРСТВ ГЉРНИЧО-ВЗБОГАЦАЈАЦЫХ
НА ПОДСТАВІЕ МОДЕЛОВАНІА МАТЕМАТЫЧНОГО

Streszczenie

Z powodu braku uzasadnionych naukowo metod obliczeń podanej w metryce maszyny wydajności wyposażenia technologicznego systemów górnictwo-wzbo-
gających przedsiębiorstw 40-50% typowymiarów wyposażenia, pod warunkiem
stuprocentowego rezerwowania obciążeniowego, wykazuje zawyżoną wydajność,
a 10-12% typowymiarów ogranicza wydajność tych systemów, co doprowadza do
powiększenia nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych oraz do
obciążenia wydajności systemów. Na podstawie teorii niezawodności opraco-
wano metodę obliczania teoretycznej wydajności wyposażenia systemów tech-
nologicznych. Ta metoda na etapie projektowania tych systemów zapewnia
optymalne równomierne obciążenie warunków pracy wyposażenia, zapewnia
osiągnięcie racjonalnego połączenia jego wydajności we wszystkich włączo-
nych szeregowo podsystemach, podwyższenie wydajności systemów technolo-
gicznych dzięki wyeliminowaniu wpływów ograniczających, a przede wszyst-
kim pozwala obniżyć nakłady inwestycyjne przy wykorzystaniu wyposażenia

o mniejszej wydajności podanej w metryce. Optymalność procesu wyboru typów wymiarów wyposażenia systemów technologicznych określa się wielkością efektu ekonomicznego otrzymywanego z wyposażenia o poziomie wydajności udokumentowanym w sposób naukowy. Opierając się na opracowanej metodycy wykonano obliczenia sprawdzające teoretyczną wydajność i wybór typowymi-
arów wyposażenia uzupełniającego dwa działające systemy technologiczne.

MATHEMATICAL MODELLING-BASED OPTIMIZATION OF THE
TYPE DIMENSION SELECTION FOR TECHNOLOGICAL SYSTEM
EQUIPMENT IN MINING AND ENRICHMENT PLANTS

S u m m a r y

Because of the lack of scientifically grounded methods of calculating the efficiency of the technological equipment (stated in the machine card) within the mining and enrichment systems, 40-50% of type dimensions show overestimated efficiency (assuming a 100% load reserve) while 10-12% of type dimensions limits the system efficiency, causing the increased investment expenses and operating costs as well as influences the system efficiency. A method of calculating a theoretical efficiency of the technological system has been developed, basing on the reliability theory. This method allows, at the stage of system design, optimum and uniform loading of the operating conditions of the equipment and obtained a rational efficiency linking at all the subsystems connected in series, increasing the efficiency of the technological systems by eliminating the constraints and decreasing the investment costs by applying the equipment with lower efficiency stated in the machine card. The optimality of the type dimension selection process of the technological systems is determined by the magnitude of the economic effects obtained by applying the equipment, with scientifically grounded efficiency level. Basing on the developed methodology, the calculations have been performed, aimed to verify a theoretical efficiency. The type dimensions have been selected for the equipment complementing two operating technological systems.