

чальной концентрации, мы пришли к выводу, что зависимость коэффициента массопереноса от этих параметров можно представить в виде $k = bw^n$, где коэффициент b зависит от плотности тока и начальной концентрации раствора. Для каналов с турбулизаторами различной конструкции, образованных мембранами с одинаковой природой ионогенных групп, зависимости обобщаются подобными кривыми, независимо от скорости потока. Поэтому предметом дальнейших исследований является:

- 1) определение зависимости природы ионогенных групп на эффективность массопереноса, для возможности прогнозирования характеристик работы электродиализаторов;
- 2) определение оптимальных параметров турбулизаторов;
- 3) определение массообменных характеристик электродиализаторов при разделении многокомпонентных водных систем.

Литература

1. Гуляева Е.С., Беренгартен М.Г. Гидродинамические приемы интенсификации процесса обессоливания для электродиализаторов с тонкими каналами. Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. - №10. – с.3-6.
2. Беренгартен М.Г., Гуляева Е.С. Перенос ионов через ионообменные мембраны в процессе электродиализного концентрирования. Вода: химия и экология. – 2011 - №10 с. 77-81.

О повышении надежности технологического оборудования мусороперерабатывающих предприятий

д.т.н. проф. Гонопольский А.М., к.т.н. проф. Мурашов В.Е., Федорова А.В.
Университет машиностроения
amgonopolsky@mail.ru

Аннотация. В представленной работе методами теории надежности и вариационного исчисления поставлена и решена задача повышения работоспособности промышленного оборудования на предприятиях по переработке твердых бытовых отходов. Экспериментальной базой для исследований послужили реальные данные по наработке на отказ машин и аппаратов действующих мусороперерабатывающих предприятий Москвы. Результаты работы позволяют выбирать эксплуатационные режимы, соответствующие максимальной надежности оборудования.

Ключевые слова: надёжность оборудования, переработка ТБО

Современные территориальные системы переработки ТБО представляют собой комплекс предприятий, использующих взаимодополняющие методы и технологии, обеспечивающие нормативную степень обезвреживания отходов на обслуживаемой территории. В Москве эта система реализована на государственном унитарном предприятии «Экотехпром», которое включает в себя специализированные автотранспортные предприятия, полигоны, мусороперегрузочные и мусоросортировочные станции, мусоросжигательные заводы, обеспечивающие прием на обезвреживание более, чем 80% ТБО города. При этом совокупности и предприятий и основных технологических аппаратов образуют технологические линии вертикального типа, т.е. на них реализуется единый технологический процесс. Отказ одного звена в технологической цепи влечет за собой остановку всего производства на линии и внештатное переключение потоков ТБО на аналогичные линии других производств с целью обеспечения экологической безопасности города. Требования к надежности оборудования в сфере обращения с отходами, в силу важности их для экологической безопасности города, определяют необходимость анализа надежности и минимизации количества отказов по всем технологическим процессам мусороперерабатывающих предприятий.

Анализ надежности работы предприятий ГУП «Экотехпром» был проведен на основе реальных данных по отказам и ремонтам оборудования, используемого в технологических процессах мусоросжигательного завода (перерабатывающая мощность 250 тыс. т/год) и мусоросортировочной станции (перерабатывающая мощность 150 тыс. т/год) из работы [1].

Как показано в [2], при оптимизации мусороперерабатывающего оборудования во всех технологических процессах необходимо рассматривать области конкурирующих управляющих воздействий и ограничений, налагаемых на тот или иной агрегат его конструкцией, материалами и инженерными сетями, эколого-экономическими условиями функционирования предприятия (затратами на ремонт, экологическим ущербом и потерями от простоя оборудования, допустимыми физико-механическими и коррозионными нагрузками на элементы оборудования), что дает основания для постановки и решения вариационных задач Эйлера-Лагранжа. В качестве управляющих воздействий в рассматриваемой задаче выступает и набор параметров, влияющих на надежность системы, в том числе производительность по переработке отходов G и межремонтный период T . Как и в большинстве подобных технических задач, набор технологических параметров системы представляет собой набор кусочно-непрерывных детерминированных функций и их производных до n -го порядка. При этом допустимы их разрывы первого и второго рода, обусловленные режимами эксплуатации оборудования.

Таким образом, задача исследования сводится к нахождению условного экстремума функционала [3]:

$$N = \int_0^{T_1} \Phi(t, X, Y) dt. \quad (1)$$

Здесь N – количество отказов за период наблюдений, а подынтегральное выражение представляет собой целевую функцию, которая может быть представлена в виде [3]:

$$\Phi(t, x, y) = C_{\text{тек}}(t) + \sum \mu_i \varphi_i, \quad (2)$$

где $C_{\text{тек}}(t)$ – функция зависимости количества отказов от управляющих параметров и параметров процесса эксплуатации за определенный период, в данном случае 1 год; μ_i – множители Лагранжа; φ_i – технологические функции, связи между управляющими параметрами, параметрами процесса эксплуатации и ограничениями, которые могут быть представлены в виде:

$$\varphi_i^{(1)} = C_{\text{max}} - C_i \quad \varphi_i^{(2)} = C_i - C_{\text{min}}.$$

Для решения вариационной задачи необходимо найти такие значения параметров T^0 и G^0 , при которых количество отказов оборудования будет минимально, т.е. функционал (1) принимает минимальное значение $\Phi_{\text{min}}(T^0, G^0) \leq \Phi(T, G)$ на интервале $[0, T_1]$ и $[0, G_1]$. При этом знак неравенства соответствует двухстороннему экстремуму, а равенства – крайнему экстремуму, т.е. такому, при котором любая из функций φ или её производных выходит на ограничение.

Практика показала, что функция $n_{\text{тек}}$ – количество отказов за межремонтный период – может быть представлена в двух вариантах:

– 1-й вариант, при котором существует выраженный тренд вида: $t=f(n)$, где t – среднее значение наработки на отказ, ч.

Наличие тренда может быть объяснено либо аномально быстрым износом оборудования, что соответствует сокращению периодов наработки на отказ (убывающий тренд), либо значительным увеличением периодов наработки на отказ (возрастающий тренд) по причине приработки новых агрегатов, узлов и деталей.

– 2-й вариант, при котором тренд отсутствует, т.е. величина периода наработки на отказ есть случайная величина, подчиняющаяся некоторому закону распределения.

В обоих вариантах $n_{\text{тек}}$ вычисляется следующим образом [5]:

$$n_{\text{тек}} = \int_0^T \lambda(t) dt \quad (3),$$

где λ – интенсивность отказов; t – средняя наработка на отказ, ч.

Необходимое условие экстремума в данной задаче формулируется с помощью уравнения Эйлера-Лагранжа [2]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial G} - \frac{d}{dT} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial G'} \right) = 0.$$

Заметим, что данная функция является однократно вырожденной по параметрам, что дает тривиальное решение по параметрам T и G в виде:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial G} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial T} = 0. \quad (3)$$

Граничными условиями для поставленной задачи являются условия:

$$\begin{aligned} \Phi(T=0) &= \Phi_0; & \Phi(T_1) &= \Phi_1; \\ \Phi(G=0) &= \Phi_0 \Phi(G_1) &= \Phi_1. \end{aligned}$$

Краевые условия учитываются в условии трансверсальности, которое является необходимым условием обращения в ноль первой вариации функционала.

С учетом того, что функционал не зависит от производной по T и G (это определяется на основании экспериментальных зависимостей, полученных в работе [1]), данное выражение имеет вид:

$$\Phi(T)|_{T=T_1} = 0 \quad \text{и} \quad \Phi(G)|_{G=G_1} = 0.$$

Поскольку значения технологических и конструктивных параметров на практике имеют ряд ограничений, связанных с экономическими, конструктивными и эксплуатационными параметрами, необходимо их учесть.

1. Ограничение по суммарному времени простоя.

$$T_{\text{сумм}} \left(1 - \frac{G_{\text{рег}}}{G_{\text{max}}} \right) \geq \tau_{\text{кап}} + \tau_{\text{тек}} m_{\text{тек}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{рег}}$ – регламентная (запланированная) производительность предприятия, т/год;

G_{max} – максимальная производительность предприятия (производительность предприятия при условии отсутствия остановок), т/год;

$G_{\text{рег}}/G_{\text{max}}$ – коэффициент загрузки оборудования;

$\tau_{\text{кап}}$ – время, затраченное на капитальный ремонт, ч;

$m_{\text{тек}}$ – количество текущих ремонтов за год, ч;

$T_{\text{сумм}}$ – календарный период работы оборудования (принимая 1 год), который определяется как

$$T_{\text{сумм}} = T + \sum n_i \tau_{\text{тек}i} + \tau_{\text{кап}} n_{\text{кап}i}, \quad (5)$$

где $\tau_{\text{тек}}$ – среднее время текущего ремонта, ч,

$\tau_{\text{кап}}$ – среднее время капитального ремонта, ч,

$n_{\text{кап}}$ – количество капитальных ремонтов за календарный год;

T – чистое время работы оборудования, которое является суммой значений межремонтных периодов, укладывающихся в один календарный год.

Данное ограничение говорит о том, что время, затрачиваемое на ремонт, не должно превышать определенного лимита, который бы обеспечивал заданную производительность. В случае нарушения неравенства (4) за оставшееся для работы время предприятие не сможет переработать заданное количество отходов. Из (4) следует:

$$N_{тек} = \frac{T_{сумм} \left(1 - \frac{G_{рег}}{G_{max}} \right) - \tau_{кан}}{\tau_{тек}}, \quad (6)$$

$$\text{Тогда } N_{тек} = \frac{(T + \sum n_i \tau_{теки} + \tau_{кан}) \frac{G_{рег}}{G_{max}} - \tau_{кан}}{\tau_{тек}}. \quad (7)$$

Также необходимо учесть, что в течение первого ремонтного периода T_p вероятность отказа и, как следствие, непланового восстановления j -го элемента [5] может быть учтена в виде: $q_{j_{H_1}} = q_{j_1} = \int_0^{T_p} f_k(t) dt$, т.к. возможно обнаружение и ликвидация недопустимого дегра-
дационного явления или проведение обязательных регламентирующих работ. Поскольку эти события зависимые, вероятность восстановления элемента в период первого планового ре-
монта равна произведению вероятности того, что отказа элемента в этот период T_p не про-
изойдет $(1 - q_{j_1})$, на условную вероятность устранения предпосылок отказа в полном объеме
в плановый ремонт ($\mathcal{E}_B$): $q_{j_{II_1}} = (1 - q_{j_1}) \mathcal{E}_B$.

Вероятность $\mathcal{E}_B$ зависит от наличия и совершенства средств диагностирования, квали-
фикации ремонтного персонала и, в общем случае, находится в пределах:

$$0 \leq \mathcal{E}_B \leq 1.$$

Полные вероятности восстановления j -го элемента в плановых или неплановых n ре-
монтах [2]:

$$Q_{jH} = \sum_{i=1}^n [(1 - q_{j_1})(1 - q_{j_2}) \dots (1 - q_{j_{i-1}})(1 - \mathcal{E}_B)^{i-1} q_{j_i}] \quad (8)$$

$$Q_{jII} = \sum_{i=1}^n [(1 - q_{j_1})(1 - q_{j_2}) \dots (1 - q_{j_i})(1 - \mathcal{E}_B)^{i-1} \mathcal{E}_B] \quad (9)$$

Q_{jH} и Q_{jII} определяет вероятность своевременного обнаружения отклонений в работе обо-
рудования в момент проведения ремонтных и профилактических работ, что может позволить
увеличить значения наработки на отказ и межремонтных периодов. Тогда

$$N_{тек} = \frac{(T + \sum n_i \tau_{теки} + \tau_{кан}) \frac{G_{рег}}{G_{max}} - \tau_{кан}}{\tau_{тек}} + \quad (10)$$

$$+ \sum \frac{(Q_{jII} (8760 - \sum (T_j + \tau_{канj}) - \sum n_i \tau_{теки}) + Q_{jH} \sum n_i \tau_{теки} + \tau_{кан}) \frac{G_{рег}}{G_{max}} - \tau_{кан}}{\tau_{тек}}$$

2. В качестве примера ограничения управляющего параметра рассмотрим коэффициент
технического использования оборудования. На мусороперерабатывающих предприятиях во-
прос об увеличении коэффициента технического использования не за счет модернизации или
реконструкции предприятий, а за счет уменьшения времени простоя весьма актуален. При-
чина тому: потребности в постоянном увеличении перерабатывающей мощности предпри-
ятия из-за роста населения на обслуживаемой территории и, как следствие, возрастающего

потока отходов. Как правило, запаса мощностей мусороперерабатывающих предприятий нигде в стране нет, поэтому вывод из эксплуатации любого из них приводит к локальной экологической катастрофе. Однако увеличение коэффициента технического использования при определенных условиях может привести и к росту потока отказов.

Для расчета воспользуемся результатом работы [5] и запишем $K_{т.и.}$ – коэффициента технического использования, в виде:

$$K_{т.и.} = \frac{T}{T + t_{рем.} + t_{обсл.}} = \frac{T}{\tau_{тек} n_{тек} + \tau_{кап} + T}, \quad (11)$$

где $t_{сум.}$ – суммарная наработка в течение рассматриваемого промежутка времени;

$t_{рем.}$ – суммарные простои на ремонт в течение рассматриваемого промежутка времени;

$t_{обсл.}$ – суммарные простои на техническое обслуживание в течение рассматриваемого промежутка времени. В этом случае выражение (3а) имеет вид:

$$\frac{d\mu_1}{dT} = \frac{dK_{т.и.}}{dT} - \frac{(\tau_{тек} n_{тек} + \tau_{кап} + T) - T}{(\tau_{тек} n_{тек} + \tau_{кап} + T)^2} = \frac{dK_{т.и.}}{dT} - \frac{\tau_{тек} n_{тек} + \tau_{кап}}{(\tau_{тек} n_{тек} + \tau_{кап} + T)^2}. \quad (12)$$

3. Ограничения по затратам, приведенные к возможной прибыли от утилизации отходов.

Экономические показатели при учете работы оборудования имеют немаловажное значение, поскольку в конечном итоге целью любого производства является получение прибыли. Это значит, что на величину ремонтных затрат необходимо наложить ограничение.

$$C = \frac{C_{кап} + C_{тек} n_{тек} + n_{тек} \tau_{тек} C_{прод} G}{TC_{прод} G} \quad (13)$$

где $C_{кап}$ – стоимость капитального ремонта; $C_{тек}$ – стоимость текущего ремонта; $n_{тек} \tau_{тек} C_{прод}$ – недополученная прибыль.

Выражение (13) учитывает затраты на текущий и капитальный ремонт, а также издержки при простое оборудования. Величина затрат на ремонт не должна превышать определенного значения, которое определяется минимальной прибылью/убыточностью. Для этого параметра уравнение (3а) можно записать в виде:

$$\frac{\partial \mu_2}{\partial T} = \frac{\partial C}{\partial T} - \left(-\frac{C_{кап}}{T^2 C_{прод} G} + (C_{тек} / C_{прод} G + \tau_{тек}) n_{тек} \right). \quad (14)$$

Рассмотренные выше ограничения актуальны для любого вида оборудования и найденные закономерности имеют общий характер. Далее рассмотрим конкретные задачи и введем ограничения, которые напрямую зависят от конструкции оборудования и носят частный характер. В качестве примера рассмотрим условия работы шнека выгрузки золошлаковых отходов мусоросжигательной печи кипящего слоя. Как показано на рисунке 1, мусоросжигательная печь кипящего слоя представляет собой комплекс, состоящий из системы загрузки ТБО, оборудования для поддержания псевдоожиженного слоя, горелок и системы выгрузки золы и шлака.

Выгрузка золы осуществляется поочередно 2-мя разгрузочными водоохлаждаемыми шнеками. Температура золы на входе в шнек составляет 600 – 650 °С. Смесь песка и золы слоя подается шнеком (скорость вращения шнеков 2,3 – 23,3 об./мин.) на один из двух двухдечных виброгрохотов (максимальная производительность 10 т/ч, максимальная температура материала – 500 °С, максимальный размер фракции на входе – 300 мм, на деках колосников установлена ситовая ткань с квадратным плетением). Частицы более 1,6 мм направляют

транспортером на участок переработки шлака, а мелкие – шнековым транспортером, а затем ковшовым элеватором (длина цепи 29,75 м), направляют в перепускную емкость (объем 5 м³, максимальная температура материала 500 °С).

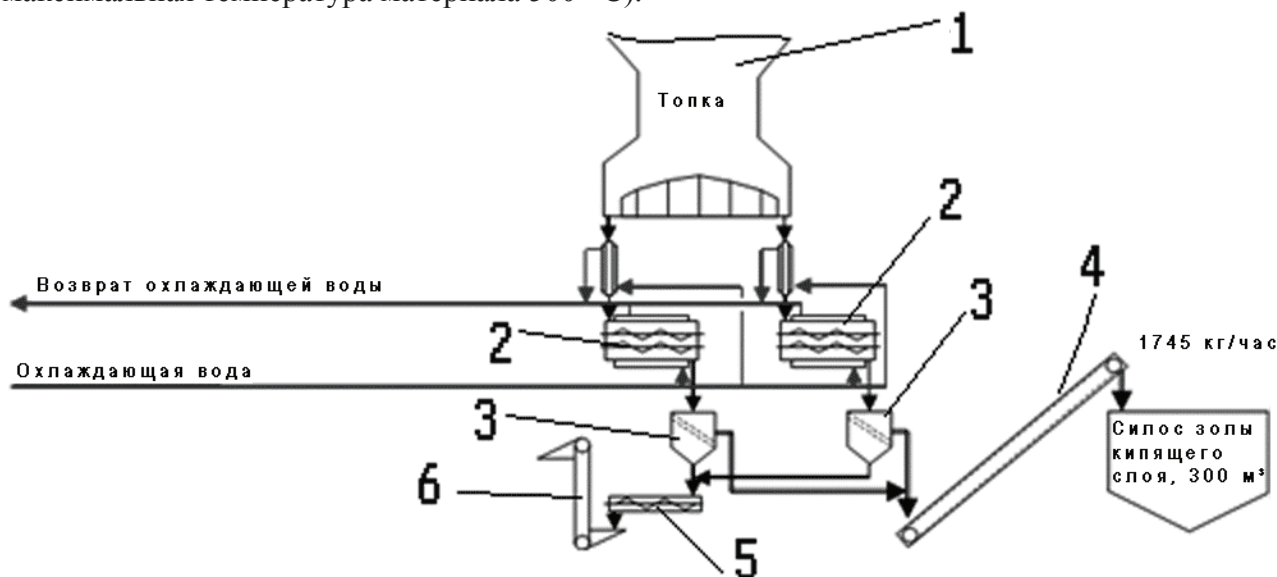


Рисунок 1. Система выгрузки золы на МСЗ.1-топка; 2 – шнек выгрузки; 3 – виброгрохот; 4 – транспортер; 5 – шнековый транспортер; 6 – элеватор

Анализ наработки на отказ шнека выгрузки золошлаковых отходов мусоросжигательной печи кипящего слоя за годовой период ее эксплуатации показал, что распределение величины наработок на отказ подчиняется закону Вэйбулла [1]. Следовательно, значение $n_{тек}$ можно вычислить следующим образом [5]:

$$n_{тек} = \int_0^T \lambda(t) dt = \int_0^T \frac{\alpha}{\beta} t^{\alpha-1} dt = \frac{\alpha}{\beta} \frac{t^\alpha}{\alpha} \Big|_0^T = \frac{T^\alpha}{\beta} - \frac{1}{\beta} = \frac{T^\alpha - 1}{\beta}, \quad (15)$$

где α, β – параметры распределения.

Также следует учесть, что согласно [6], производительность шнека определяется как

$$G_1 = 47 D^2 h n_{шнек} \psi \rho C_k, \quad (16)$$

где D – диаметр шнека, м; h – шаг шнека, м; ψ – коэффициент заполнения объема шнека золошлаковыми отходами; ρ – плотность ТБО, кг/м³; C_k – поправочный коэффициент.

Варьируемым параметром в первую очередь является частота вращения вала $n_{шнек}$.

Исходя из зависимости производительности шнека G_1 от частоты вращения шнека $n_{шнек}$ можно записать следующее выражение:

$$\frac{dG}{dn_{шнек}} = \frac{dG}{dG} \times \frac{dG}{dn_{шнек}}.$$

Проанализируем также ограничение по предельной прочности шнека на нагрузки.

Из выражения (7) видно, что количество отказов является функцией межремонтного периода и производительности оборудования. В свою очередь, производительность определяется максимальными нагрузками, которые могут выдержать детали.

Определим крутящий момент (Н • м) на валу шнека исходя из [4]:

$$M_0 = 1000 \times 60 \frac{N \eta}{2 \pi n}, \quad (17)$$

где N – мощность двигателя в кВт; η – КПД механизма привода; n – в об/мин.

Тогда наибольшая действующая на шнек продольная сила P равна [4]:

$$P = \frac{2M_0}{kDtg(\alpha + \varphi)} = \frac{120000N\eta}{2\pi mkDtg(\alpha + \varphi)}, \quad (18)$$

где D – диаметр вала, м; α – угол подъема винтовой линии шнека на радиусе r ; φ – угол трения материала о поверхность шнека; $tg\varphi = f_l$ (где f_l — коэффициент трения материала о поверхность шнека). В этом случае выражение (3а) принимает вид:

$$\frac{d\mu_3}{dn} = \frac{dP}{dn} + \frac{120000N\eta}{2\pi n^2 kDtg(\alpha + \varphi)}. \quad (19)$$

Для рассматриваемого шнека частота вращения $n_{\text{шнек}}$ может изменяться в диапазоне 2-23 об/мин (по тех. регламенту).

В результате учета указанных выше ограничений функционал N примет вид:

$$\begin{aligned} \Phi(t, x, y) = & \frac{(T + \sum n_i \tau_{\text{теки}} + \tau_{\text{кан}}) \frac{G_{\text{пер}}}{G_{\text{max}}} - \tau_{\text{кан}}}{\tau_{\text{тек}}} + \\ & + \sum \frac{(\mathcal{Q}_{j\Pi} (8760 - \sum (T_j + \tau_{\text{кан}j}) - \sum n_i \tau_{\text{теки}}) + \mathcal{Q}_{jH} \sum n_i \tau_{\text{теки}} + \tau_{\text{кан}}) \frac{G_{\text{пер}}}{G_{\text{max}}} - \tau_{\text{кан}}}{\tau_{\text{тек}}} + \\ & + \mu_1 \left(K_{\text{м.и.}} - \frac{T}{\tau_{\text{тек}} n_{\text{тек}} + \tau_{\text{кан}} + T} \right) + \\ & + \mu_2 \left(C - \frac{C_{\text{кан}} + C_{\text{тек}} n_{\text{тек}} + n_{\text{тек}} \tau_{\text{тек}} C_{\text{прод}} G}{TC_{\text{прод}} G} \right) + \mu_3 \left(P - \frac{60000N\eta}{\pi kDtg(\alpha + \beta)} \right). \end{aligned}$$

Для нахождения неизвестных параметров, с учетом однократной вырожденности системы уравнений Эйлера, запишем систему уравнений, описывающую локальный экстремум функционала N в нормальном виде.

Для проведения численных экспериментов система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка была проинтегрирована стандартным методом Рунге-Кутты в программном комплексе Mathcad 6.0. В качестве граничных условий были приняты проектные конструктивные параметры деталей, штатные рабочие режимы эксплуатации и паспортные характеристики управляющих органов рассматриваемых агрегатов.

Результаты численных исследований условий локального экстремума по числу отказов в рассматриваемых технических задачах представлены на рисунках 2-3. Из графика на рисунке 2 видно, что функционал, определяющий число отказов шнека выгрузки золошлаковых отходов мусоросжигания, имеет выраженный двухсторонний минимум для реальных условий (межремонтный период 6500 ч) в точке с производительностью 13 т/ч и числом отказов в год 8. С учетом того, что в области минимума функционала значения количества отказов меняются плавно, определим область оптимальных значений, как 10%-ое отклонение от линии оптимума значений количества отказов, т.е. принимаем допустимым количество отказов в интервале от 8 до 9. На практике значения производительности могут меняться в широких пределах от 3 до 23 т/ч (зона рабочих значений). Большие значения отказов при малых значениях производительности объясняются ограничением времени простоя, т.е. для того чтобы выполнить плановую загрузку, необходимо увеличивать коэффициент загрузки оборудования, что приведет к увеличению времени работы оборудования в течение календарного года и уменьшению времени простоя, затрачиваемого на ремонт и техническое обслуживание. Увеличение количества отказов при увеличении производительности объясняется увеличением нагрузки, действующей на шнек, что может приводить к повышенному износу оборудования. Наличие достаточно редкого для оптимизации технических систем двух-

стороннего экстремума в данном случае свидетельствует, в том числе, о большом запасе прочности агрегата.

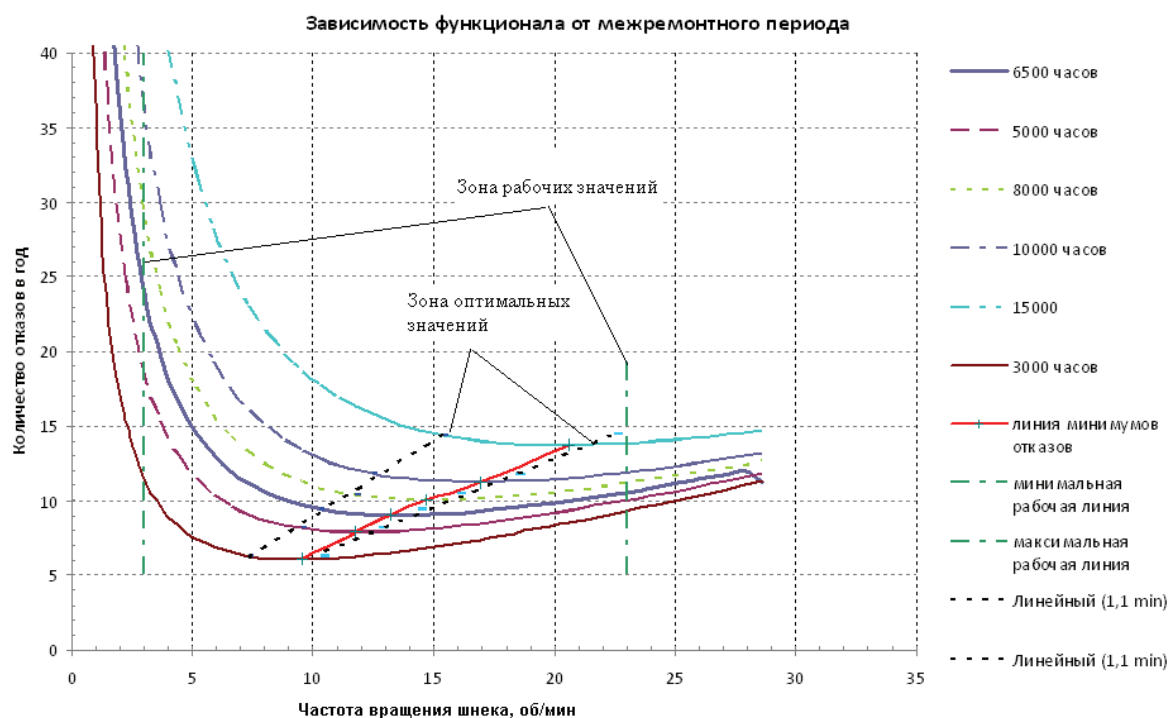


Рисунок 2. Зависимость функционала от производительности для шнека выгрузки

Из графика на рисунке 2 видно, что при увеличении межремонтного периода значение минимума функционала смещается вправо, в сторону увеличения производительности, а сама величина возрастает.

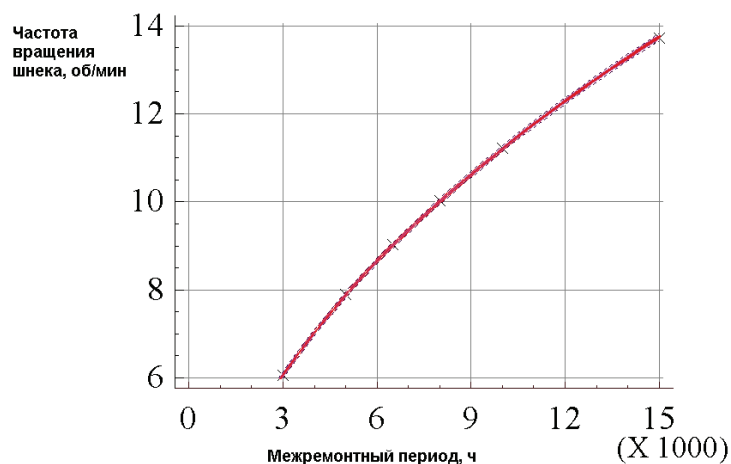


Рисунок 3. Значения параметров процесса выгрузки золы и шлака, при которых число отказов минимально: Коэффициент корреляции $r=1$; Функция вида $n=a+b\sqrt{T}$

Из рисунка 3 видно, что для минимизации количества отказов желательно, чтобы заданные параметры находились в определенной зависимости друг от друга. Точки, лежащие на линии, соответствуют оптимальным значениям с точки зрения надежности.

5. Рассмотрим еще один актуальный пример для мусоросортировочного предприятия, где основная часть отказов приходится на ленточно-цепной конвейер на участке приема ТБО

[1]. Схема технологического процесса представлена на рисунке 4.

Параметры рассматриваемого конвейера: максимальная производительность – 40 т/ч, ширина – 2,25 м, длина – 35 м.

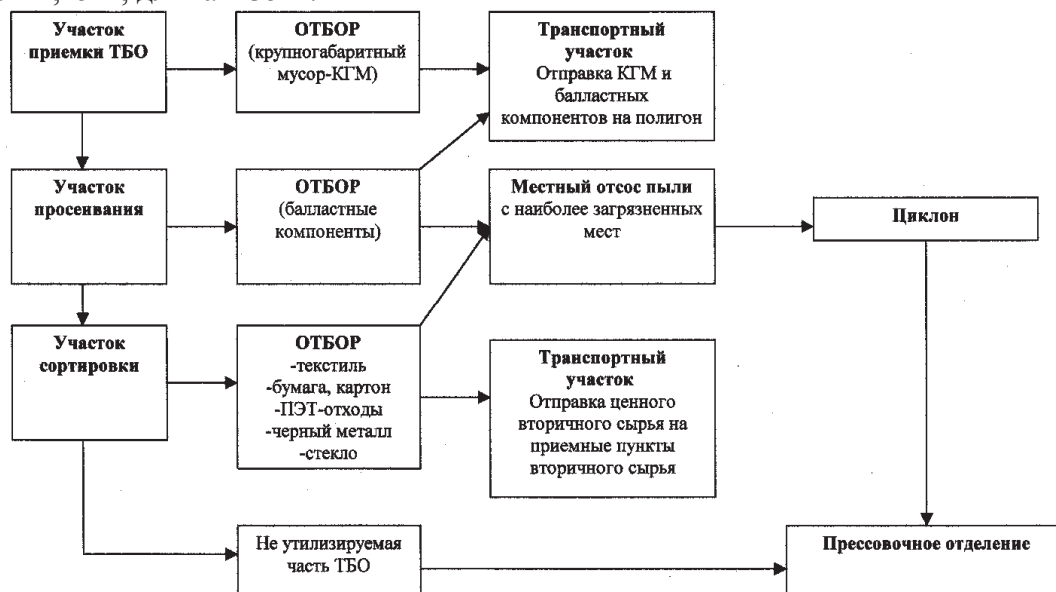


Рисунок 4. Схема технологического процесса на мусоросортировочной станции

На основании данных с предприятия для рассматриваемого оборудования существует зависимость вида $t=f(n)$ [1].

Анализ отказов ленточно-цепного конвейера мусоросортировочной станции показал, что надежность работы конвейера можно оценить по коэффициенту прочности цепи, т.к. анализ отказов показал, что одна из наиболее часто встречающихся проблем, возникающих при работе данного конвейера, – это разрыв цепи. Коэффициент запаса прочности определяется из [4]:

$$K_3 = \frac{Q_{p.v} C_n}{1,05(S_{\min} + \omega \left[\left(\frac{2,73G}{v} + 600B + A \right) L + (600B + A)L + \left(\frac{2,73G}{v} + 600B + A \right) H \right]},$$

где $Q_{p.v}$ – разрушающая нагрузка; $C_n=1,8$ –коэффициент неравномерности натяжения; B – ширина настила, м; A – коэффициент, равный 1000; G – производительность конвейера, т/ч; v – скорость конвейера, м/с; H – высота подъема, м; L – длина конвейера, м; ω – коэффициент сопротивления движению настила на прямолинейных участках.

$$\frac{\partial \mu_4}{\partial G} = \frac{\partial K_3}{\partial G} - \frac{Q_{p.v} C_n}{1,05(S_{\min} + 600B(\omega L + L + H) + A(L + H + \omega L) + \frac{2,73(\omega L + H)G^2}{v})} \times \frac{2,73(\omega L + H)}{v} \quad (20)$$

В результате учета ограничений функционал N для рассматриваемого конвейера примет вид:

$$\begin{aligned}
\Phi(t, x, y) = & \frac{(T + \sum n_i \tau_{\text{теки}} + \tau_{\text{кан}}) \frac{G_{\text{пер}}}{G_{\text{max}}} - \tau_{\text{кан}}}{\tau_{\text{тек}}} + \\
& + \sum \frac{(Q_{j\Pi} [8760 - \sum (T_j + \tau_{\text{кан}j}) - \sum n_i \tau_{\text{теки}}] + Q_{jH} \sum n_i \tau_{\text{теки}} + \tau_{\text{кан}}) \frac{G_{\text{пер}}}{G_{\text{max}}} - \tau_{\text{кан}}}{\tau_{\text{тек}}} + \\
& + \mu_1 \left(K_{\text{м.и.}} - \frac{T}{\tau_{\text{тек}} n_{\text{тек}} + \tau_{\text{кан}} + T} \right) + \\
& + \mu_2 \left(C - \frac{C_{\text{кан}} + C_{\text{тек}} n_{\text{тек}} + n_{\text{тек}} \tau_{\text{тек}} C_{\text{прод}} G}{TC_{\text{прод}} G} \right) + \mu_3 \left(P - \frac{60000 N \eta}{\pi k D t g(\alpha + \beta)} \right) + \\
& + \mu_4 \left(K_3 - \frac{Q_{\text{р.в}} C_{\text{н}}}{1,05(S_{\text{min}} + \omega \left(\frac{2,73G}{v} + 600B + A \right) L + (600B + A)L) + \left(\frac{2,73G}{v} + 600B + A \right) H} \right).
\end{aligned}$$

Для нахождения неизвестных параметров, с учетом однократной вырожденности системы уравнений Эйлера, запишем систему уравнений, описывающую локальный экстремум функционала N в нормальном виде. По аналогии с предыдущим примером для проведения численных экспериментов система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка также была проинтегрирована стандартным методом Рунге-Кутты в программном комплексе Mathcad 6.0. В качестве граничных условий так же, как и в предыдущем случае, были приняты проектные конструктивные параметры деталей, штатные рабочие режимы эксплуатации и паспортные характеристики управляющих органов рассматриваемых агрегатов.

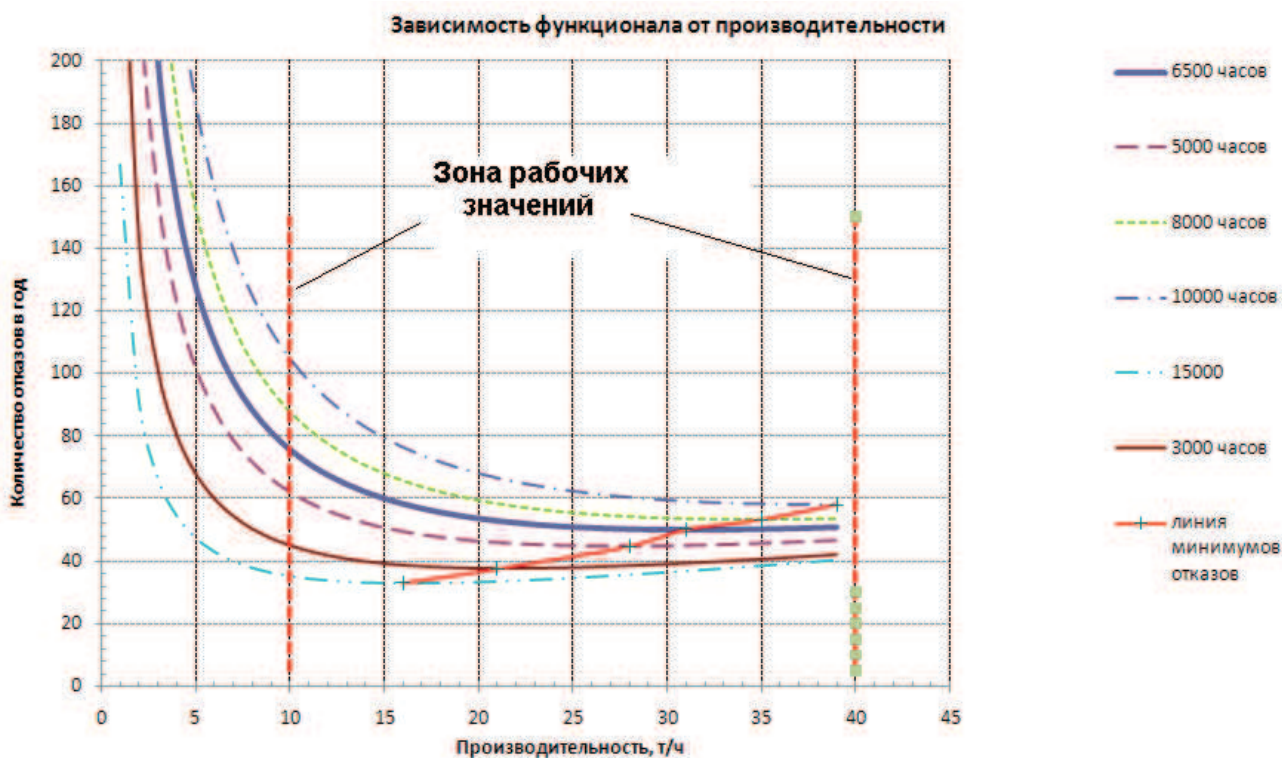
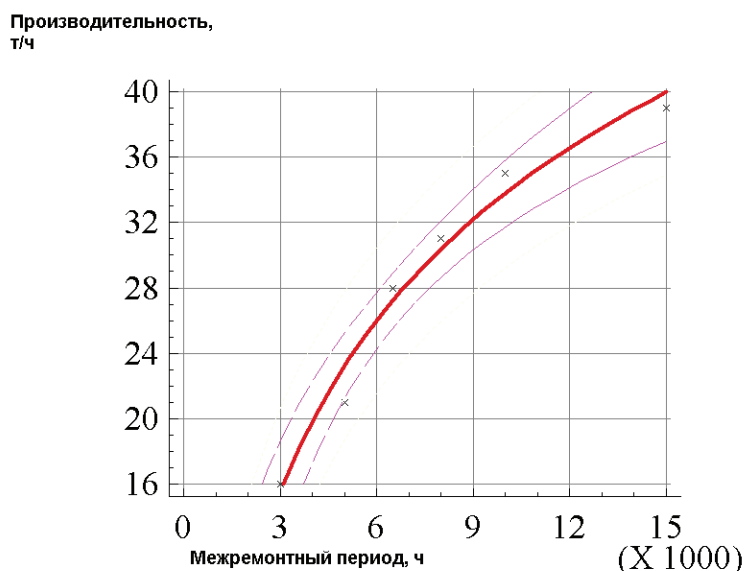


Рисунок 5. Зависимость положения зоны оптимальности по наработке на отказ от производительности ленточно-цепного конвейера

Для ленточно-цепного конвейера результаты решения приведены на рисунках 5 и 6. Из графика видно, что функционал имеет выраженный двухсторонний минимум для реальных условий (межремонтный период 6500 ч) в точке с производительностью 32 т/ч и числом отказов в год 55.



**Рисунок 6. Значения параметров ленточно-цепного транспортера, при которых число отказов минимально: Коэффициент корреляции $r=0,98$.
Коррелирующая функция вида $n=a+b*\ln T$**

Представленные результаты показывают, что для исследованных технических устройств при соблюдении определенных в работе режимных параметров возможен двухсторонний локальный минимум числа отказов, обеспечивающий значительное повышение надежности мусороперерабатывающих производств.

На практике полученные результаты позволяют регулировать технологический процесс так, чтобы количество отказов было минимальным. Ориентируясь на полученные закономерности (рисунки 3 и 6), можно оптимизировать работу предприятия за счет повышения надежности основного технологического оборудования и уменьшения затрат на его эксплуатацию.

Результаты данной работы получены при выполнении государственного контракта № 16.525.11.5003 от 25 мая 2011 г. по теме: «Разработка новой комплексной опытно-промышленной технологии для обеспечения нормативной экологической безопасности высоконагруженного полигона захоронения органосодержащих отходов производства и потребления и его санитарно-защитной зоны».

Литература

1. Гонопольский А.М., Нестеров М.В., Федорова А.В. Анализ надежности оборудования для переработки отходов // Химическое и нефтегазовое машиностроение, №8, 2010, стр. 37-41
2. Гонопольский А.М., Матягина А.М., Киселев А.В., Осадчий С.Ю., Цыбин А.В. Эколого-экономический анализ систем обращения с отходами. – М.: ТЕИС, 2009 г.
3. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем. Под редакцией В.П. Соколова. – М.: «Логос», 2001 г.
4. Ванко В.И., Ермошина О.В., Кувыркин Г.Н. Вариационное исчисление и оптимизационное управление. – Москва, Издательство МГТУ им. Баумана, 2003 г.
5. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины: Учебное пособие для машиностроительных вузов. – М.: Машиностроение, 1983 г.
6. Шубин В.С., Рюмин Ю.А. Надежность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств: учебное пособие. – М.: «Колосс», 2004