

Эта информация используется при анализе взаимного влияния и оценке устойчивости открытых и подземных горных выработок при комбинированной системе разработки Акжалского месторождения [2].

Разработка 3D-моделей месторождений является весьма актуальной научной и практической задачей,

от успешного решения которой зависит эффективность работы горно-добывающих предприятий на основе широкого внедрения и использования современных компьютерных технологий при решении горно-геометрических и горно-технических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эрнбергер В., Файкош А. Решение горных ситуаций методами моделирования: Пер. с чешского. М.: Недра, 1988. 133 с.
2. Пересчет запасов свинцово-цинковых руд месторождения Акжал / Совместное предприятие ТОО «Novo – цинк» и ЗАО «Центргеолсъемка». Караганда, 2000.

УДК 622.232-519.872

**КЛИМОВА И.Ю.,
КЛИМОВ А.Ю.**

Применение теории массового обслуживания для оценки эффективности модернизации механизированного угледобывающего комплекса

Недостатком работы современных механизированных комплексов по добыче угля в подземных условиях является отставание передвижки линейных секций крепи на новую дорогу вслед за движущимся комбайном. Это обстоятельство усугубляется, во-первых, тем, что на шахтах в настоящее время применяются мощные высокопроизводительные комбайны, способные обеспечивать скорость подачи до 12 м/мин, а во-вторых, тем, что в большинстве современных шахт используются длинные лавы протяженностью 200 м и более, что увеличивает простои лавы из-за отставания крепи и тем самым снижает производительность добычи.

Увеличить скорость крепления выработки можно за счет снижения продолжительности работы гидростоек и гидродомкратов крепей и, прежде всего, гидродомкратов передвижки секций крепей и конвейерной линии, так как продолжительность работы гидродомкратов передвижки составляет 50-60 % времени цикла [1]. Продолжительность работы гидродомкратов передвижки зависит от расхода рабочей жидкости, поступающей от насосной станции. Большинство современных комплексов оснащены насосными станциями СНТ-32 производительностью 90 л/мин.

Можно добиться повышения расхода рабочей жидкости, поступающей в гидродомкраты передвижки путем соответствующей модернизации гидропривода механизированного комплекса либо за счет замены штатной насосной станции, например, насосной станцией AZE-4 фирмы «POWEN» производительностью 140 л/мин, входящей в состав комплекса «Фазос 24/53», либо за счет замены насосного привода гидродомкратов передвижки на насосно-аккумуляторный [2].

Проведём сравнительный анализ эффективности этих двух способов модернизации с использованием основных положений теории массового обслуживания.

Процесс крепления в комбайновых лавах можно сформулировать в терминах теории массового обслуживания [3]. Для этого необходимо определить: поток

требований на обслуживание, обслуживающие каналы и дисциплину обслуживания.

Рассмотрим входящий поток требований на обслуживание. Пусть ширина секции крепи равна d метров. Тогда расстояние, пройденное комбайном и необходимое для постановки одной секции крепи, можно рассматривать как требование на обслуживание. Совокупность таких отрезков лавы длиной d , проходимых комбайном, образует входящий поток требований на обслуживание, который поступает к звену крепильщиков. Звено крепильщиков n следует рассматривать как многоканальную систему массового обслуживания. Обслуживающим каналом здесь является отдельный крепильщик – исполнитель процесса. Один рабочий может одновременно устанавливать одну крепь или обслуживать только одно требование.

Если максимально допустимая длина лавы, находящаяся в ожидании процесса крепления, не превышает согласно паспорту крепления D метров, то среднее число крепей, которое можно поставить на максимально допустимой не закрепленной длине лавы, равно $s = D/d$, и величина s является максимально допустимой длиной очереди. Максимально возможное число требований, одновременно находящихся в системе $q = n + s$. Следовательно, процесс крепления за комбайном можно рассматривать как функционирование системы массового обслуживания с ожиданием и с ограниченной очередью s . Дисциплина обслуживания соответствует принципу «первым пришел – первый обслужен».

Входящий поток требований исходит из q ($q > n$) обслуживаемых объектов, которые в случайные моменты времени требуют обслуживания. Под обслуживанием понимается передвижка крепи, причем время обслуживания одного требования есть случайная величина s показательной функцией распределения $F(t) = 1 - e^{-\mu t}$ с параметром $\mu = 1/\tau$, где τ – среднее время обслуживания одного требования. Требование, поступившее в систему в момент, когда обслуживающий канал (крепильщик) свободен, немедленно идет на обслуживание. Если требование застает все каналы

занятыми обслуживанием других требований, то оно становится в очередь и ждет до тех пор, пока один из каналов не станет свободным.

Будем говорить, что система массового обслуживания находится в состоянии k , если общее число требований, находящихся на обслуживании и в очереди, равно k .

Так как входящий поток по предположению является пуассоновским с интенсивностью λ , то вероятность того, что за время t в систему поступит k требований,

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Составив и решив систему дифференциальных уравнений для вероятности $p_k(t)$ того, что система массового обслуживания в момент времени t находится в состоянии $k = 0, 1, \dots, q$, получим

$$p_k = \begin{cases} \frac{\alpha^k}{k!} p_0, & 1 \leq k \leq n; \\ \frac{\alpha^k}{n^{k-n} n!} p_0, & n \leq k \leq q. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $\alpha = \lambda/\mu$ – коэффициент использования обслуживающего канала.

Величину p_0 определяем из условия нормировки $\sum_{k=0}^q p_k = 1$ [4] и полученных формул (2) для $p_k, k = 1, 2, \dots, q$.

Тогда вероятность p_0 того, что все обслуживающие каналы свободны, равна

$$p_0 = \frac{n - \alpha}{\sum_{k=0}^{n-1} \frac{n-k}{k!} \alpha^k - \frac{\alpha^{q+1}}{n! n^s}}. \quad (3)$$

Вероятность p_q того, что поступившее требование получит отказ, т.е. не будет принято к обслуживанию

$$p_q = \frac{\alpha^q}{n! n^s} p_0. \quad (4)$$

Вероятность π того, что все обслуживающие каналы заняты (вероятность возникновения очереди) определится из равенства

$$\pi = p_q \frac{\left(\frac{n}{\alpha}\right)^s - \frac{\alpha}{n}}{1 - \frac{\alpha}{n}}. \quad (5)$$

Среднее число требований, ожидающих начала обслуживания (средняя длина очереди):

$$M_1 = p_n \sum_{k=0}^s k \left(\frac{\alpha}{n}\right)^k, \quad (6)$$

среднее число требований, находящихся на обслуживании:

$$M_2 = \alpha(1 - p_q), \quad (7)$$

среднее число требований, одновременно находящихся в системе обслуживания:

$$M_3 = p_n \sum_{k=0}^s k \left(\frac{\alpha}{n}\right)^k + \alpha(1 - p_q), \quad (8)$$

среднее число свободных от обслуживания каналов

$$M_4 = n - \alpha(1 - p_q). \quad (9)$$

Таким образом, одной из важнейших характеристик качества обслуживания в рассматриваемой системе является вероятность отказа p_q (4).

Другой важнейшей характеристикой качества обслуживания является среднее время $M\theta$ пребывания требования в очереди, т.е. средняя длительность ожидания начала обслуживания.

Если $f(t)$ – плотность вероятности времени θ нахождения требования в очереди до начала его обслуживания, то

$$P(t < \theta < t + dt) \approx f(t) dt.$$

Но за время t нахождения требования в очереди за ним образуется очередь, состоящая в среднем из λt требований (по определению входящего потока требований). Поэтому среднее число требований, находящихся в очереди в интервале времени $(t, t + dt)$, равно $\lambda t f(t) dt$.

Отсюда следует, что для среднего числа требований, находящихся в очереди в интервале времени $(0, \infty)$, т.е. для математического ожидания числа требований, ожидающих начала обслуживания, можно написать

$$M_1 = \int_0^{\infty} \lambda t f(t) dt = \lambda M\theta$$

или

$$M\theta = M_1 / \lambda. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет вычислить математическое ожидание времени θ пребывания требования в очереди без знания закона распределения величины θ .

Рассмотрим процесс обслуживания (передвижки) линейной секции крепи. Под обслуживанием здесь понимается выполнение нескольких рабочих операций по перемещению крепи на новую дорогу, число которых зависит от типа используемых крепей в механизированном комплексе. Так, для крепей типа «Пиома» таких операций восемь: опускание и распор козырька перекрытия; распор и снятие распора домкрата реборды; разгрузка и распор гидростоек крепи; передвижка секции конвейера и подтягивание секции крепи.

Наши хронометражные наблюдения [1] за работой крепей механизированных комплексов показывают, что продолжительности рабочих операций в цикле обслуживания являются величинами случайными и подчиняются произвольным законам распределения. Однако, как показано в работе [5], в дальнейшем исследовании можно использовать математический аппарат теории массового обслуживания, основанный на показательном распределении времени обслуживания с параметрами μ_0 , но при этом средние значения времени обслуживания (длительностей рабочих операций) соответствующих произвольного и показа-

тельного законов распределения должны быть равны между собой.

Для установления связи между параметрами μ и μ_v , относящимися, соответственно, к интервалам времени цикла обслуживания крепи ζ_j и к интервалам времени отдельных рабочих операций ζ_{jv} , воспользуемся математической схемой потоков, известных как обобщение потоков Эрланга порядка m [6].

В нашем случае между случайными событиями, состоящими в передвижке очередной секции крепи, происходит восемь случайных событий, заключающихся в выполнении восьми рабочих операций.

В общем случае при m слагаемых для этого потока имеем

$$f(t) = \left(\prod_{v=1}^m \mu_v \right) \sum_{v=1}^m \frac{e^{-\mu_v t}}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq v}}^m (\mu_i - \mu_v)}, \quad (11)$$

где $\mu_{v,i}$ – интенсивности обслуживания, соответствующие рабочим операциям цикла работы секции крепи.

Интенсивность обслуживания при передвижке секций (суммарной продолжительности обслуживания в цикле) μ может быть вычислена по формуле

$$\mu = \frac{\prod_{v=1}^m \mu_v}{\sum_{i=1}^m \frac{\prod_{v=1}^m \mu_v}{\mu_i}}. \quad (12)$$

Оценим эффективность применения предлагаемых способов модернизации механизированных комплексов с использованием насосно-аккумуляторного и нового насосного приводов передвижки крепи по сравнению с существующим штатным насосным приводом на примере комплекса «Пиома-25/45-ОЗ».

Продолжительности рабочих операций передвижки секций крепи при штатном насосном приводе характеризуются интенсивностями $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_6, \mu_7$; при насосно-аккумуляторном приводе на базе штатного насосного привода – $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_6, \mu'_7$; при новом насосном приводе – $\mu''_1, \mu''_2, \dots, \mu''_6, \mu''_7$, т.е. количество рабочих операций во всех случаях одинаково и равно семи (операция по передвижке секции конвейера из цикла исключена). При использовании насосно-аккумуляторного привода вместо насосного в цикле передвижки изменяется только интенсивность подтягивания крепи μ'_7 , а интенсивность остальных операций остается неизменной. Сумма продолжительностей рабочих операций по передвижке составляет время обслуживания крепи, так что процесс обслуживания очередного требования имеет в первом случае интенсивность μ , во втором – μ' и в третьем – μ'' . Здесь параметры с одним штрихом относятся к насосно-аккумуляторному приводу, а параметры с двумя штрихами – к новому насосному приводу.

Согласно (12), интенсивности процесса передвижки секций крепи соответственно при штатном насос-

ном, насосно-аккумуляторном и новом насосном приводах для эрланговского потока седьмого порядка будут

$$\mu = \frac{\prod_{v=1}^7 \mu_v}{\sum_{i=1}^7 \frac{\prod_{v=1}^7 \mu_v}{\mu_i}}, \quad (13)$$

$$\mu' = \frac{\mu'_7 \prod_{v=1}^6 \mu_v}{\sum_{i=1}^6 \frac{\mu'_7 \prod_{v=1}^6 \mu_v}{\mu_i} + \prod_{v=1}^6 \mu_v} \quad (14)$$

и

$$\mu'' = \frac{\prod_{v=1}^7 \mu''_v}{\sum_{i=1}^7 \frac{\prod_{v=1}^7 \mu''_v}{\mu''_i}}, \quad (15)$$

где $v \neq i$ – индексы, соответствующие отдельным рабочим операциям цикла передвижки крепи.

Интенсивности обслуживания при выполнении отдельных рабочих операций μ_v определяются через соответствующие математические ожидания, полученные путем обработки хронометражных наблюдений, а μ'_7 и μ''_7 – с учетом результатов моделирования, т.е.

$$\mu_v = \frac{1}{M\tau_v}; \quad \mu'_7 = \frac{1}{M'\tau_7}; \quad \mu''_7 = \frac{1}{M''\tau_7}, \quad (16)$$

где $M\tau_v, M'\tau_7$ и $M''\tau_7$ – математические ожидания продолжительностей рабочих операций по перемещению секции крепи соответственно для штатного насосного, насосно-аккумуляторного и нового насосного приводов.

Выполним оценку эффективности насосно-аккумуляторного и нового насосного приводов с учетом данных, полученных при хронометражных наблюдениях и при моделировании. При этом значения интенсивностей обслуживания отдельных операций при использовании всех трех приводов рассчитаем по формуле (16).

Определим с учетом формул (13) – (15) параметры интенсивности цикла обслуживания. Эти параметры оказались соответственно равными: $\mu = 0,024$; $\mu' = 0,025$ и $\mu'' = 0,037$. При средней скорости подачи комбайна $v_n = 4$ м/мин и ширине основания крепи $d = 1,5$ м, интенсивность потока требований на обслуживание $\lambda = 1/\tau = 0,044$, где $\tau = d/v_n = 22,5$ с – средний промежуток времени между двумя очередными требованиями. Если допустимая длина незакрепленного участка лавы составляет $D = 12$ м, то максимально допустимая очередь требований на обслуживание будет $s = D/d = 8$ и $q = s + n = 10$, где q – число требований, одновременно находящихся на обслуживании и в очереди, а $n = 2$ – число обслуживающих каналов.

Тогда с учетом формул (3) – (10) найдем следующие статистические характеристики процесса передвижки крепи соответственно при штатном насосном; насосно-аккумуляторном и новом насосном приводах: вероятность того, что все обслуживающие каналы свободны, – 0,073; 0,086 и 0,255; вероятность того, что поступившее требование получит отказ, – 0,061; 0,048 и 0,0028; вероятность возникновения очереди – 0,794; 0,762 и 0,441; средняя длина очереди – 2,72; 2,41 и 0,61; среднее число требований, находящихся на обслуживании – 1,72; 1,68 и 1,19; среднее число требований, одновременно находящихся в системе обслуживания – 4,44; 4,09 и 1,80; среднее число свободных обслуживающих каналов – 0,28; 0,32 и 0,81; математическое ожидание времени пребывания требования в очереди – 61,86 с; 54,81 с и 13,86 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупник Л.А., Климов А.Ю., Климова Н.Ю. Определение длительности рабочих операций при передвижке крепи на основе хронометражных наблюдений // Статья в настоящем сборнике.
2. Насосно-аккумуляторный привод передвижки крепи механизированного комплекса / Ю.И. Климов, Н.А. Дрижд, А.Ю. Климов и др. // Сб. тр. второй междунар. научн.-практ. конф. КазНТУ. Алматы, 2006. С. 249-252.
3. Шульга Ю.Н., Суслов О.П., Анохин В.С. Применение методов теории массового обслуживания при исследовании процессов добычи и транспортирования угля. М.: Недра, 1971. 159 с.
4. Саульев В.К. Математические модели теории массового обслуживания. М.: Статистика, 1979. 96 с.
5. Севастьянов Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1982. 256 с.
6. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 399 с.