

УДК 622.647.2

д.т.н. Корнеев С. В.,
Доброногова В. Ю.,
Долгих В. П.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, linercos@mail.ru)

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАБОЙНЫХ УГЛЕПОТОКОВ

Приведен анализ использования линейных моделей неопределённых коэффициентов и авторегрессии различного порядка для имитационного моделирования забойного углепотока. Показано, что предлагаемые модели имеют большой процент сходимости. Углепотоки на основе моделей неопределённых коэффициентов и авторегрессии высокого порядка позволяют отказаться от предположения о марковости данного случайного процесса.

Ключевые слова: углепоток, метод неопределённых коэффициентов, метод авторегрессии, случайный процесс.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Моделирование углепотоков является важным этапом проектирования транспортной системы шахты. От того, насколько моделируемые углепотоки окажутся адекватными реальным, зависит эффективность работы шахты. В процессе эксплуатации шахты моделирование углепотоков служит инструментом совершенствования технологической системы шахтного транспорта.

Необходимость постоянного совершенствования методов моделирования забойных углепотоков вызвана изменениями характеристик грузопотоков по мере развития горного производства и оборудования, накоплением опытных и статистических данных, а также возрастающими возможностями вычислительной техники.

Обычно углепоток, поступающий из очистного забоя (ОЗ), представляется в виде произведения [1, 2, 3 и др.]:

$$Q(t) = Q'(t) \cdot Y(t), \quad (1)$$

где t — рабочее время работы ОЗ; $Q'(t)$ — непрерывный забойный углепоток, случайный процесс; $Y(t)$ — функция готовности ОЗ, $Y(t)=1$ при поступлении угля из ОЗ и $Y(t)=0$ в противном случае.

Большинство исследователей в качестве мерного интервала углепотоков Δt принимают одну минуту. При этом непрерыв-

ный минутный углепоток считают эргодическим нормальным случайным процессом и, для удобства его моделирования, однородным марковским с экспоненциальной автокорреляционной функцией:

$$R_{Q1}(r\Delta t) = D_{Q1} \exp[-|r\Delta t| / \tau_k], \quad (2)$$

где τ_k — время корреляции; D_{Q1} — дисперсия.

При мерных интервалах времени Δt , меньших 30 с, закон распределения не является нормальным [4].

Известна модель непрерывного в течение машинного времени t_1 работы ОЗ Δt -углепотока $Q_1(t_1, \Delta t)$, представляемого в виде временного ряда:

$$q_{1r} = cq_{1r-1} + \varepsilon_r, \quad (3)$$

где q_{1r} — реализация Δt -углепотока в момент времени t_{1r} , $t_{1r} = t_{1r-1} + \Delta t$; c — коэффициент участия значения q_{1r-1} в образовании q_{1r} , например, в работе [4] принимается $c=1-1/\tau_k$; ε_r — реализация случайной величины, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием (МОЖ), равным нулю, и среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_ε , равным СКО грузопотока $Q_1(t_1)$.

Информация об оценке точности таких моделей, которые строятся в предположении

марковости процесса $Q_1(t_1)$ и не учитывают «предысторию» его развития, не известна.

Значения Δt -углепотока $Q(t)$, поступающего в течение рабочего времени, в силу дискретности процесса измерения, определяются в моменты рабочего времени t_j , $t_j = t_{j-1} + \Delta t$, $j=1, 2, \dots$.

Перерывы в поступлении груза из ОЗ (паузы) ввиду множества факторов, определяющих динамику этого процесса, в настоящее время не принято подразделять по причинам их возникновения. При этом предполагается, что продолжительности импульсов $t_{\text{и}}$ и пауз $t_{\text{п}}$ подчиняются экспоненциальному закону с плотностью распределения вероятностей [5]:

$$f_{\text{и}}(t_{\text{и}}) = \bar{t}_{\text{и}}^{-1} \exp[-|t_{\text{и}}| / \bar{t}_{\text{и}}]; \quad (4)$$

$$f_{\text{п}}(t_{\text{п}}) = \bar{t}_{\text{п}}^{-1} \exp[-|t_{\text{п}}| / \bar{t}_{\text{п}}], \quad (5)$$

где $\bar{t}_{\text{и}}$ и $\bar{t}_{\text{п}}$ — МОЖ длительностей импульсов и пауз.

Реализации продолжительностей импульсов и пауз, определяемые по методу обратной функции [6]:

$$t_{\text{и}} = \bar{t}_{\text{и}} \ln y; \quad (6)$$

$$t_{\text{п}} = \bar{t}_{\text{п}} \ln y, \quad (7)$$

где y — реализация случайной величины, равномерно распределённой в интервале значений $[0, 1]$.

При моделировании Δt -углепотоков в течение рабочего времени применяется следующий алгоритм определения $Y(t)$.

В начальный момент рабочего времени t_0 определяются реализация $t_{\text{и}}$ продолжительности импульса, время его окончания $S_{\text{и}} = S_{\text{п}} + t_{\text{и}}$, где $S_{\text{п}}$ — время окончания предшествующей паузы, которое в начальный момент времени полагается равным нулю.

При выполнении условия

$$t_j \geq S_{\text{и}} \quad (8)$$

принимается $Y(t_j) = 0$ (наступает пауза), определяются $t_{\text{п}}$ и $S_{\text{п}} = S_{\text{и}} + t_{\text{п}}$.

В процессе продолжающейся паузы при выполнении условия

$$t_j \geq S_{\text{п}} \quad (9)$$

осуществляется переход к импульсу, т. е. принимается $Y(t_j) = 1$, определяются $t_{\text{и}}$, время окончания импульса $S_{\text{и}}$ и т. д.

При такой логике моделирования $Y(t)$ и достаточно больших значениях Δt текущие значения t_j могут значительно превышать значения $S_{\text{и}}$ и $S_{\text{п}}$, что снижает точность моделирования.

Также ни в одной из известных работ не приводится анализ принимаемых при моделировании углепотоков допущений, методов построения, оценки точности и адекватности моделей. В частности, остаются неисследованными возможности применения для моделирования известных методов неопределённых коэффициентов (МНК) и авторегрессии (АР) 2-го и более высоких порядков.

Постановка задачи. Задачей исследования является совершенствование процесса моделирования забойных углепотоков на основе практического опыта.

Изложение материала и его результаты. При моделировании предполагается, что:

– непрерывный Δt -грузопоток $Q_1(t_1, \Delta t)$ является нормальным случайным процессом, его реализации q_{1r} определяются последовательно с шагом Δt в моменты времени $t_{1r} = t_{1r-1} + \Delta t$;

– реализации $t_{\text{и}}$ и $t_{\text{п}}$ длительностей соответственно импульсов и пауз имитируются по методу обратной функции.

Для лучшего приближения концов соответствующих Δt -интервалов к величинам $S_{\text{и}}$ и $S_{\text{п}}$ (см. формулы (8) и (9)) и, таким образом, повышения точности моделирования принимается интервал дискретизации времени τ , меньший Δt . Для удобства расчетов необходимо, чтобы Δt было кратным τ .

Моделируемый углепоток представляется в виде временного ряда. При этом выполняются следующие преобразования:

– рабочее время выражается целыми числами j ($j = \text{ent}(t_j / \tau)$), $j=0, 1, 2, \dots, j_{\text{max}}$,

$j_{\max} = \text{ent}(T/\tau)$, здесь $t_j = t_{j-1} + \tau$, T — заданная длина реализации случайного процесса $Q(t, \Delta t)$ (например, продолжительность смены) в заданных физических единицах времени;

– реализации q_{1j} непрерывного Δt -грузопотока $Q_1(t_1, \Delta t)$, отнесённые к мерному интервалу τ , определяются по формуле $q_{1j} = \tau q_1 / \Delta t$;

– реализации q_j минутного грузопотока в течение рабочего времени лавы принимают значения: q_{1j} , если груз поступает из ОЗ, и 0 — в противном случае;

– реализации I и P длительности соответственно импульсов и пауз, выражаемые в единицах времени τ и округляемые до ближайшего целого числа, определяются по формулам: $I = \text{ent}(t_n/\tau)$ и $P = \text{ent}(t_n/\tau)$, если соответственно $\text{frac}(t_n/\tau) < 0,5$ и $\text{frac}(t_n/\tau) < 0,5$, или $I = \text{ent}(t_n/\tau) + 1$ и $P = \text{ent}(t_n/\tau) + 1$ — в противном случае.

Логика моделирования забойного Δt -углепотока $Q(t)$ в течение рабочего времени t , т. е. с учётом перерывов в его поступлении из ОЗ, отражена на рисунке 1, где величины S_n и S_n , выражаемые в единицах времени τ , обозначаются SI и SP .

В соответствии с блок-схемой вначале (блоки 1–6) вводятся исходные данные и формируются реализация q_1 , затем реализация q_{1j} , продолжительности импульса t_n и I производительной работы ОЗ, признак производительной работы очистного забоя Y , который принимается равным единице, что означает поступление углепотока из ОЗ.

Организуется цикл определения реализаций q_j минутного углепотока с шагом τ на оси рабочего времени ОЗ (блоки 7, 27).

Внутри цикла проверяется выполнение условия поступления углепотока из ОЗ, т. е. соблюдения равенства $Y=1$, (блок 8).

При выполнении условия $Y=1$ через каждые $\Delta t/\tau$ единиц времени вычисляется очередная реализация q_1 и момент времени S вычисления следующей реализации q_1 . Формируется массив значений q_1 (блоки 9–11). Затем вычисляется реализация q_{1j} при поступлении груза из ОЗ (блок 12).

Реализация q_j углепотока на рабочем времени ОЗ принимается равной q_{1j} (блок 13). При выполнении условия $j > SI$ (блок 14), т. е. при прекращении поступления углепотока из ОЗ, принимается $Y=0$, вычисляются очередные реализации продолжительности паузы t_n и P , а также момент времени окончания паузы SP и S (блоки 15–19). Принимается $q_j=0$ (блок 20).

Проверяется условие возобновления поступления углепотока $j > SP$ (блок 21). При его выполнении принимается $Y=1$, вычисляются t_n , I и SI (блоки 22–25).

На каждом шаге цикла осуществляется формирование массива q_j .

После выхода из цикла производится статистическая обработка массивов q_1 и q_j (блок 28), а также печать результатов моделирования (блок 29).

Массив значений q_1 используется для определения статистических характеристик моделируемого непрерывного грузопотока: среднего m_{q_1} и оценки корреляционной функции $R_{q_1}(r\Delta t)$, $r=1, 2, 3, \dots$.

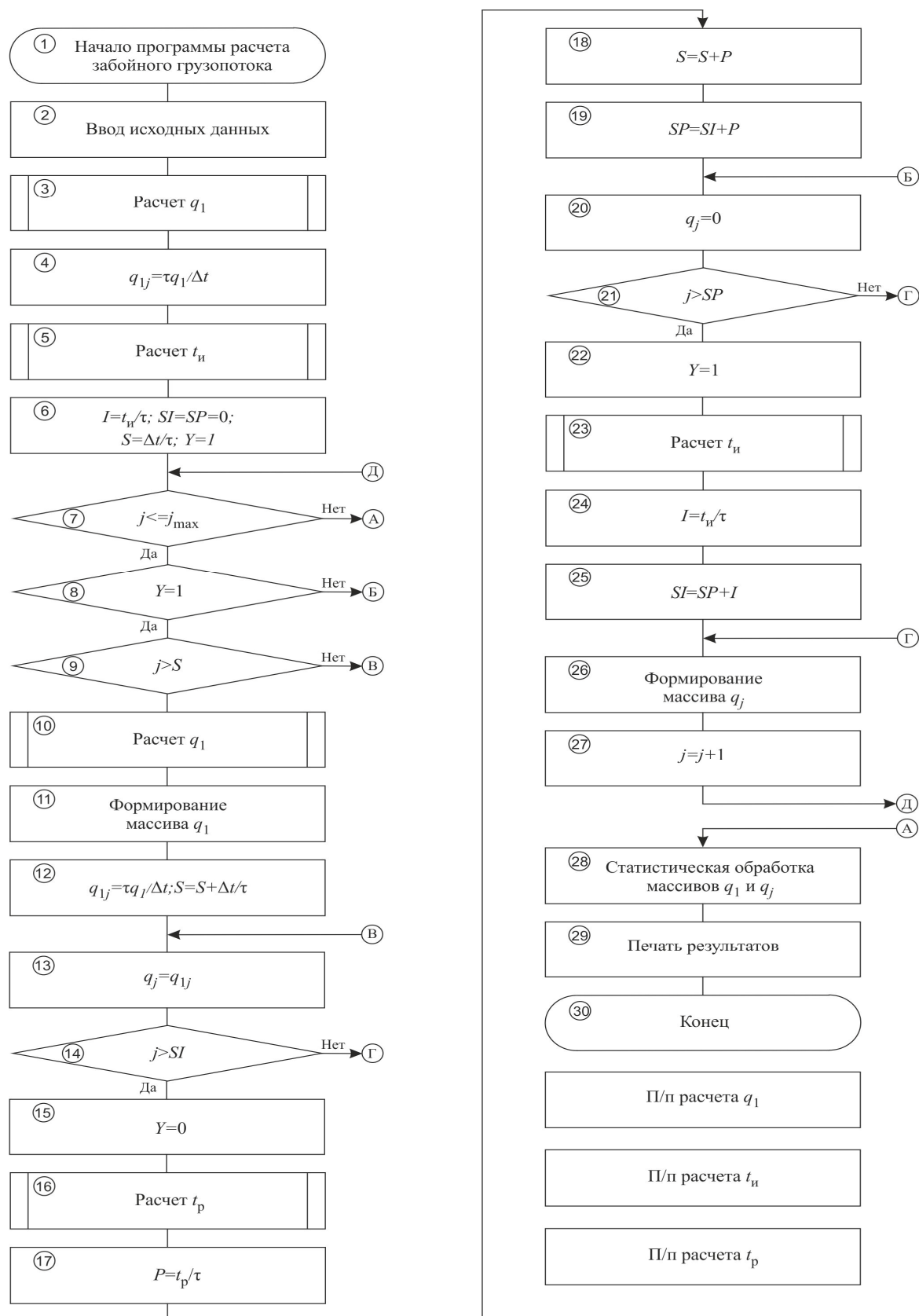
Моделирование реализаций q_1 (блок 10) осуществляется несколькими методами для сопоставления их возможностей.

В соответствии с МНК модель процесса представляется в виде [6]:

$$q_{1r} = m_{Q1} + \sum_{d=1}^n c_d u_{r-d+1}, \quad (10)$$

где r — номера реализаций грузопотока на оси машинного времени ОЗ; m_{Q1} — математическое ожидание процесса $Q_1(t_1)$; c_d — весовые (неопределённые) коэффициенты; u_{r-d+1} — программно реализованные нормально распределённые с математическим ожиданием, равным 0, и дисперсией, равной 1, некоррелированные псевдослучайные числа; n — порядок модели (число слагаемых, обеспечивающее заданную точность вычисления).

Числа u_{r-d+1} определяются в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей по формуле [6]:

Рисунок 1 Блок-схема моделирования забойного грузопотока $Q(t)$

$$u_{r-d+1} = \sqrt{12/m} (\sum_{i=1}^m a_{r,d,i} - m/2), \quad (11)$$

где $a_{r,d,j}$ — псевдослучайные числа, равномерно распределённые в интервале $(0, 1)$; m — число слагаемых, обычно принимается $m=12$.

Коэффициенты c_d определяются в результате решения системы нелинейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{d=1}^{n-l} c_d c_{d+1} - R_{Q1}(l\Delta t) = 0, \quad (12)$$

$$l = 0, 1, \dots, n-1.$$

Система уравнений (12) решается итерационными методами. Нами рекомендуется метод Ньютона, в соответствии с которым последовательные приближения $c_{d,i}$ ($i=0, 1, 2, \dots$), начиная с выбранного начального приближения $c_{d,0}$, определяются в процессе решения системы уравнений:

$$f_{l,i-1} + \sum_{d=1}^n \frac{df_{l,i-1}}{dc_d} (c_{d,i} + c_{d,i-1}) = 0, \quad (13)$$

$$l = 0, 1, \dots, n-1,$$

где $c_{d,i-1}$ и $c_{d,i-1}$ -е и i -е приближения коэффициента c_d ; $f_{l,i-1}$ и $df_{l,i-1}/dc_d$ — левые части уравнений (12) и соответствующие им частные производные по c_d , полученные на $i-1$ -м шаге вычислений.

Система уравнений (13) с учётом уравнений (12) представляется в виде:

$$\sum_{d=1}^{n-l} c_{d,i+1} c_{d+l,i} + \sum_{d=1}^n c_{d+l,i+1} c_{d,i} -$$

$$- \sum_{d=1}^n c_{d,i} c_{d+l,i} = R_{Q1}(l\Delta t), \quad (14)$$

$$l = 0, 1, \dots, n-1.$$

Решение системы уравнений (14) на каждом шаге приближений может осуществляться любым известным методом, например, стандартным методом Гаусса или по компактной схеме исключения неизвестных. Расчёты заканчиваются, если выполняется условие:

$$\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{d=1}^n (c_{d,i} - c_{d,i-1})^2} - \delta \leq 0, \quad (15)$$

где δ — заданная точность решения системы ($\delta > 0$).

Грузопоток может быть также реализован как процесс авторегрессии [7]. В этом случае случайный процесс заполнения конвейера грузом происходит в прямой зависимости от предшествующих значений временного ряда. В общем случае процесс авторегрессии можно представить следующим образом:

$$\tilde{q}_{1r} = c_1 \tilde{q}_{1r-1} + c_2 \tilde{q}_{2r-1} + \dots + c_n \tilde{q}_{nr-1} + \varepsilon_r, \quad (16)$$

где \tilde{q}_{1r-k} — отклонения соответствующих q_{1r-k} от m_{Q1} , $k=1, 2, \dots, n$; n — порядок авторегрессии; c_1, c_2, \dots, c_n — параметры авторегрессии; ε_r — реализация (импульс) случайной величины, подчиняющейся нормальному закону распределения с нулевым средним и некоторой дисперсией σ_ε^2 .

Параметры авторегрессии определяются в результате решения системы линейных уравнений Юла-Уокера порядка n :

$$\rho_k = \sum_{d=1}^k c_d \rho_{k-d}, \quad k = 0, 1, \dots, n, \quad (17)$$

где ρ_k — значение заданной нормированной автокорреляционной функции, $\rho_k = R_{Q1}(k\Delta t) / \sigma_{Q1}^2$; σ_{Q1}^2 — дисперсия процесса $Q_1(t_1)$.

Дисперсия величины ε :

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sigma_{Q1}^2 (1 - c_1 \rho_1 - c_2 \rho_2 - \dots - c_n \rho_n). \quad (18)$$

В качестве примера на рисунке 2 приводятся фрагменты диаграмм забойного углепотока, поступающего в течение рабочего времени, и его непрерывной компоненты, моделируемой посредством авторегрессии 20-го порядка. Принимались следующие типичные исходные данные: МОЖ непрерывного забойного минутного грузопотока — 3,41 т/мин; дисперсия —

$1 \text{ т}^2/\text{мин}^2$ (коэффициент вариации $v = 0,3$); время корреляции — 4 мин; математические ожидания длительностей поступления и отсутствия груза соответственно 5 и 7 мин, интервал дискретизации времени $\tau = 5 \text{ с}$, $j_{\max} = 10^3$.

Полученные диаграммы забойных углепотоков не противоречат представлениям о механизме их образования, а также известным экспериментальным данным.

Точность моделирования непрерывных минутных грузопотоков в рамках принятых допущений оценивается в результате сопоставления оценок m_{q1} , $R_{q1}(r\Delta t)$, полученных для моделируемого временного ряда q_{1r} , и соответствующих исходных статистических характеристик m_{Q1} , $R_{Q1}(r\Delta t)$. Относительная погрешность определения $R_{q1}(r\Delta t)$:

$$\varepsilon = \frac{|R_{Q1}(r\Delta t) - R_{q1}(r\Delta t)|}{R_{Q1}(r\Delta t)} \cdot 100 \text{ \%}.$$

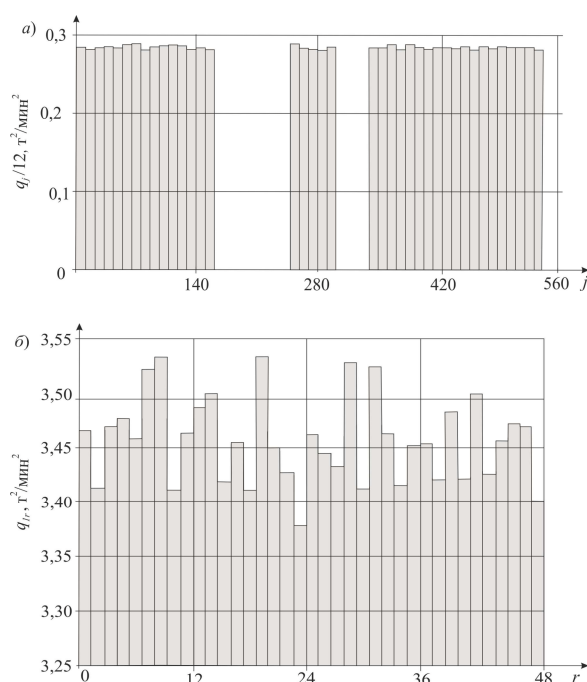


Рисунок 2 Фрагменты диаграмм моделируемых минутных забойных углепотоков: а) q_j ; б) q_{1r}

Оценки корреляционных функций непрерывного минутного грузопотока, моделируемого с применением моделей авторегрессии различного порядка n , а также, для сравнения, упрощенной модели авторегрессии 1-го порядка (формула (3)), полученные в результате статистической обработки массивов q_1 (см. блок-схему на рис. 1), представлены на рисунке 3. При $n=20$ погрешность составила 7,2 %. При $n=1$, что отвечает предположению о марковости процесса, наблюдается наибольшая погрешность 40,6 %, в случае применения упрощенной модели авторегрессии 1-го порядка — 54 %. По мере увеличения порядка модели точность повышается.

Оценки корреляционных функций непрерывного минутного грузопотока, моделируемого с применением моделей авторегрессии, по методу неопределенных коэффициентов, а также в соответствии с моделью, рассматриваемой в работе [4] (формула (3)), приведены на рисунке 4.

Аналогично определяются погрешности вычисления m_{q1} и других величин.

Погрешности при определении оценки МОЖ m_{q1} для различных вариантов моделей авторегрессии различного порядка n незначительны и не превышают 2 %.

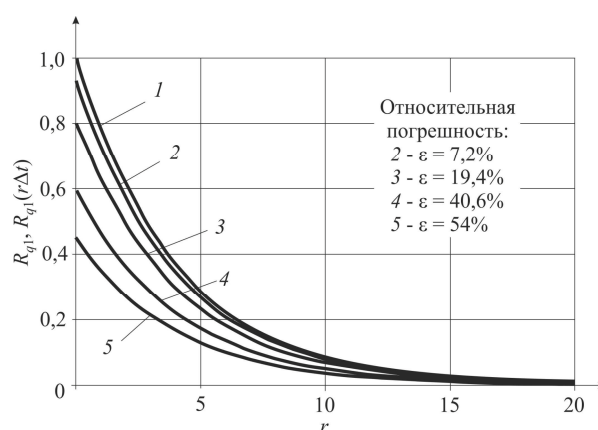


Рисунок 3 Корреляционные функции непрерывного минутного грузопотока, моделируемого по методу авторегрессии: 1 — R_{Q1} ; 2 — $n=20$; 3 — $n=10$; 4 — $n=1$; 5 — модель (3)

Полученные с применением методов АР и неопределенных коэффициентов результаты позволяют считать эти методы практически равноценными.

Для оценки влияния τ сравниваются заданные МОЖ и полученные в результате моделирования оценки МОЖ импульсов и пауз в поступлении грузопотока. Точность вычисления оценок величин \bar{t}_n и \bar{t}_i составила 6,8 % и 0,1 % соответственно, что подтверждает правильность уменьшения интервала дискретизации времени в 12 раз.

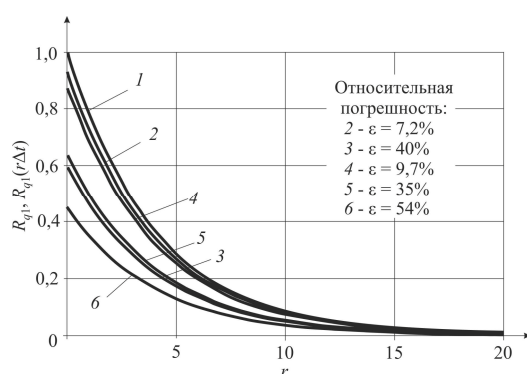


Рисунок 4 Корреляционные функции непрерывного минутного грузопотока, моделируемого различными методами:

- 1 — R_{Q1} ; 2–5 — R_{q1} ; 2 — АР, $n=20$;
3 — МНК, $n=20$; 4 — МНК, $n=1$;
5 — АР, $n=1$; 6 — модель (3)

Влияние на точность моделирования значений величин n , j_{\max} , τ и методов моделирования q_1 оценивалось для широкого диапазона на характеристик грузопотоков. Принимались

$\bar{t}_n = 5 \dots 20$ мин, $\bar{t}_i = 2 \dots 9$ мин, $\tau_k = 4 \div 20$ мин, $m_{q1} = 1,5 \dots 7$ т/мин и коэффициент вариации минутных грузопотоков $v = 0,1 \dots 0,45$.

Например, изменение времени корреляции с 4 до 20 мин приводит к увеличению величины относительной погрешности вычисления МОЖ для АКФ ($n=20$) с 3,8 до 7,2 %.

Начиная с $j_{\max} = 10^3$ точность моделирования практически не повышается.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Применение для имитационного моделирования непрерывной составляющей забойного углепотока линейных моделей неопределенных коэффициентов или авторегрессии достаточно высокого порядка позволяет отказаться от предположения о марковости данного случайного процесса, добиваясь повышения адекватности модели.

2. Для проверки адекватности модели и точности имитационного моделирования непрерывной составляющей забойного углепотока необходимо производить сопоставление задаваемых и полученных в результате моделирования статистических характеристик углепотоков.

3. Для лучшего согласования принятого мерного интервала минутного грузопотока с продолжительностью имитируемых импульсов и пауз и, таким образом, повышения точности моделирования рекомендуется уменьшать интервал дискретизации времени в 12 раз.

Библиографический список

1. Кариман, С. А. Моделирование и оптимизация производственных процессов при добыче угля [Текст] / С. А. Кариман, А. В. Брайцев, В. М. Шрамко. — М. : Наука, 1975. — 135 с.
2. Заика, В. Т. Влияние регулируемого привода на грузопотоки и энергоэффективность системы шахтного конвейерного транспорта [Текст] / В. Т. Заика, Ю. Т. Разумный, В. Н. Прокуда // Науковий вісник Національного гірничого університету. — 2015. — № 3. — С. 82–88.
3. Дьяченко, В. П. Вероятностное представление грузопотоков при расчётах ленточных конвейеров горных предприятий [Текст] / В. П. Дьяченко // Горное оборудование и электромеханика. — М. : Новые технологии, 2009. — № 1. — С. 53–55.
4. Инструкция по использованию специализированной программы «Конвейерный транспорт» для расчётов нагрузок действующих и вновь вводимых конвейерных линий [Текст]. — М. : ИГД им. А. А. Скочинского, 1981. — 95 с.

5. Красников, Ю. Д. Повышение надёжности горных выемочных машин [Текст] / Ю. Д. Красников, С. В. Солод, Х. И. Хазанов. — М. : Недра, 1989. — 215 с.
6. Потапов, В. Д. Имитационное моделирование производственных процессов в горной промышленности [Текст] / В. Д. Потапов, А. Д. Яризов. — М. : Высш. школа, 1981. — 191 с.
7. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Выпуск 1 [Текст] / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. — М. : Мир, 1974. — 408 с.

© Корнеев С. В.

© Доброногова В. Ю.

© Долгих В. П.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н., к.т.н., доц., и.о. зав. каф. ГЭМиТС СУНИГОТ «ЛНУ им. В. Даля» Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 26.02.18.

д.т.н. Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ДОСВІД МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБІЙНИХ ВУГЛЕПОТОКІВ

Наведено аналіз використання лінійних моделей невизначених коефіцієнтів та авторегресії різного порядку для імітаційного моделювання вибійного вуглепотoku. Показано, що запропоновані моделі мають великий відсоток збіжності. Вуглепотoki на основі моделей невизначених коефіцієнтів та авторегресії високого порядку дозволяють відмовитися від припущення щодо марковості даного випадкового процесу.

Ключові слова: вуглепотік, метод невизначених коефіцієнтів, метод авторегресії, випадковий процес.

Dr. Tech. Sci. Korneiev S. V., Dobronogova V. Yu., Dolgykh V. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

MODELLING EXPERIENCE FOR THE FACE COALFLOW

There has been given the analysis of using the linear models of indefinite coefficients and autoregressions of various order for simulation modelling for the face coalflow. It is proved that proposed models have a high convergence rate. The coalflow based on models of indefinite coefficients and the high order autoregression allow refusing hypothesis of this random Markovian character.

Key words: coalflow, method of indefinite coefficients, autoregression method, random process.