

УДК 622.331.001.5

**В.Д. Копенкин, Л.В. Копенкина**

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТОРФЯНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

Семинар № 16

---

**М**атематическое моделирование все глубже проникает не только в технику, но и во все сферы человеческой деятельности. В то же время можно признать, что термин «математическое моделирование» пока не имеет общепринятого формального определения, и его границы в смысловом отношении еще четко не очерчены. «Такая ситуация характерна для любого нового научного направления на стадии его становления и быстрого развития» [1]. Особенность математического моделирования состоит в том, что абстрактным отражением существующего или создаваемого объекта является его математическая модель (ММ), количественный анализ которой позволяет получить новые знания об этом объекте [1]. Понятие ММ, по В.С. Зарубину, как и ряд других понятий, используемых в математическом моделировании, не имеет строгого формального определения [1]. Тем не менее, все, кто обращается к математическому моделированию, в качестве ММ используют приближенное описание какого-либо класса явлений (процессов), выраженное с помощью математической символики. Мировоззренческое значение имеет утверждение В.С. Зарубина, что «такие научные дисциплины, как механика, физика и их многочисленные разделы, являются, по существу, упорядоченными множества-

ми ММ, построение которых сопровождается теоретическим обоснованием адекватного отражения этими моделями свойств рассматриваемых процессов и явлений» [1].

Наиболее приемлемым подходом к моделированию таких сложных систем, как объекты (процессы) горного производства, является так называемое **имитационное моделирование**. Имитационная математическая модель лишь имитирует внешние проявления функционирования технического объекта (ТО), не раскрывая и не описывая существа протекающих в нем процессов. Метод имитационного моделирования подчас является единственным практически доступным методом исследования сложной системы [2]. Затраты рабочего времени и материальных средств на реализацию имитационных моделей оказываются незначительными по сравнению с затратами, связанными с натурным экспериментом. Вместе с тем, результаты имитационного моделирования по своей ценности для практического решения возникающих задач оказываются близкими к результатам натурального эксперимента [2].

К основным задачам, определяющим важнейшие характеристики торфяного производства, в анализе которых метод имитационного моделирования полезен и эффективен, можно отнести следующие:

Таблица 1

**Расчет данных к имитационной модели запасов торфяного сырья на площади 1000 га**

Показатели	Значения реализаций						
	1	2	3	4	5	...	50
$h_{cp}$ , м	1,27	1,36	1,49	1,67	2,95	...	2,05
$\gamma_e$ , кг/м <sup>3</sup>	960	790	898	976	999	...	922
$\rho_{в/с}$ , кг/м <sup>3</sup>	192	158	180	195	200	...	184
$P_{пр}$ , млн.т	1,585	1,397	1,743	2,117	3,835	...	2,452

- задача оценки запасов торфяного сырья по данным приближенного определения глубины торфяной залежи и важнейшим характеристикам торфа в залежи, на основе которых рассчитывается мощность предприятия;

- задача определения производительности экскаватора на рытье картовых каналов с учетом изменчивости факторов, влияющих на производительность;

- задача определения сезонной производительности уборочных машин с заданной надежностью, с учетом изменчивости различных факторов производства;

- построение регрессионной модели связи показателей сезонной производительности уборочных машин с сезонными сборами фрезерного торфа.

**Рассмотрим кратко применение метода имитационного моделирования в вышеперечисленных задачах.**

Ошибки в оценке запасов торфяного сырья приводят к неизбежным просчетам в определении мощности предприятия и срока его стабильной работы. Метод имитационного моделирования позволяет избежать просчетов из-за отсутствия статистических данных. Методом статистических испытаний можно получить представительный статистический материал, используя который выбрать с доста-

точной точностью и надежностью значение запасов, на которое и следует ориентировать принятие решения о возможной мощности предприятия. Выполним оценку запасов торфяного сырья в соответствии с принятой методикой [3] для промышленной площади 1000 га:

$$P_{пр} = 10 F_{пр} h_{cp} \beta_{\delta} \rho_{в/с}, \text{ т} \quad (1)$$

где  $F_{пр}$  – площадь торфяной залежи в промышленной границе, га;  $h_{cp}$  – средняя глубина торфяной залежи, м;  $\beta_{\delta}$  – коэффициент использования балансовых запасов; наивероятнейшее значение  $\beta_{\delta} = 0,65$  [3];  $\rho_{в/с}$  – выход воздушно-сухого торфа кг/м<sup>3</sup>;

$$\rho_{в/с} = \gamma_e \frac{100 - w_e}{100 - w_y}, \text{ кг/м}^3 \quad (2)$$

где  $\gamma_e$  – плотность торфа в залежи, кг/м<sup>3</sup>; для торфа верхового типа,  $w_e = 88\%$ , степени разложения 15–45%,  $\gamma_e \in [754; 1012]$  [3];  $w_y$  – условная влажность фрезерного топливного торфа;  $w_y = 40\%$  [3];

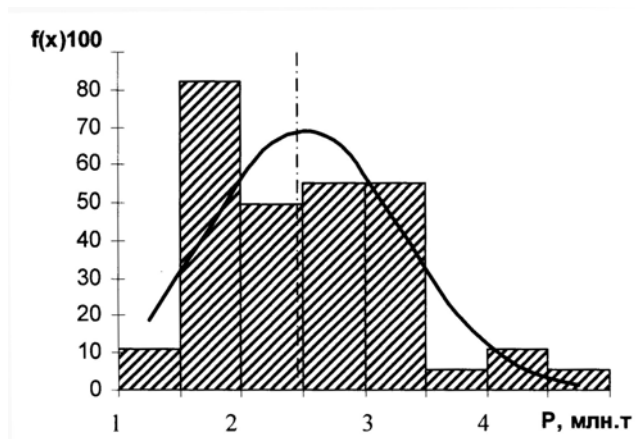
Результаты n-кратного «проигрывания» модели (1) представлены в табл. 1.

Значения  $h_{cp(i)}$  и  $\gamma_{cp(i)}$  рассчитаны для моделей равномерного распределения:

$$h_{cp(i)} = h_{min} + \zeta_i (h_{max} - h_{min}); \quad (3)$$

$h_{min} = 1,2$  м;  $h_{max} = 3,0$  м;  $\zeta_i$  – значения равномерно распределенной случайной величины [4, 5];

$$\gamma_{cp(i)} = \gamma_{e(min)} + \zeta_i (\gamma_{e(max)} - \gamma_{e(min)}); \quad (4)$$



**Рис. 1. Статистическое распределение запасов торфяного сырья на площади 1000 га**

Результаты обработки данных по промышленным запасам представлены на рис. 1. Статистические характеристики этого распределения: среднее – 2,322 млн т; стандартное отклонение – 0,574 млн.т. Доверительный интервал с надежностью 0,95 имеет вид

$$\bar{P}_{np} - \frac{t(\alpha, f) \cdot S_p}{\sqrt{n}} < M(P_{np}) < \bar{P}_{np} + \frac{t(\alpha, f) \cdot S_p}{\sqrt{n}}; \quad (5)$$

$t(\alpha = 0,05, f = 50-1) = 2,01$  [4]; – таким образом,  $2,159 \text{ млн т} < M(P_{np}) < 2,485 \text{ млн т}$ .

Ориентируясь на нижнюю границу доверительного интервала при нормативной длительности функционирования предприятия порядка 20 лет,

получим значение мощности предприятия 108 000 т.

Для построения обобщенной модели сырьевых баз предприятий торфяной промышленности по степени разложения используется модель нормального распределения с параметрами, соответствующими

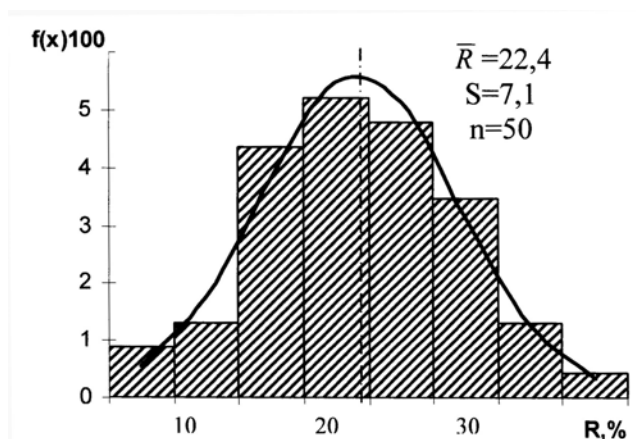
среднестатистическим оценкам (по отчетным данным предприятий торфяной промышленности) среднего значения степени разложения и стандартного отклонения.

На торфяных залежах верхового типа такими характеристиками являются:  $\bar{R} = 23,0 \%$ ;  $S_R = 7,0 \%$ .

Реализации значений степени разложения для нормального закона распределения рассчитываются по формуле

$$R_i = \bar{R} + \xi_i S_R. \quad (6)$$

Значения  $\xi_i$  принимаются по таблице нормально распределенной случайной величины с параметрами (0;1) [5]. Обработка 50-ти реализаций значений  $R_i$  позволила построить гистограмму – модель сырьевых баз предприятий торфяной промышленности (рис. 2) – и определить числовые характеристики этого распределения:  $\bar{R} = 22,4 \%$ ;  $S_R = 7,1 \%$ .



**Рис. 2. Модель сырьевых баз торфяной промышленности по степени разложения**

Таблица 2

**Расчет данных к имитационной модели производительности  
одноковшового экскаватора с объемом ковша 0,65 м<sup>3</sup>**

Показатели	Значения реализаций						
	1	2	3	4	5	...	50
$\tau_{ц}$ , с	19,4	22,6	21,0	22,6	19,4	...	19,0
$K_з$	0,75	0,60	0,81	0,81	0,63	...	0,69
$K_p$	0,80	0,86	0,81	0,84	0,85	...	0,87
$K_t$	0,63	0,66	0,84	0,60	0,87	...	0,87
$Q_{эк}$ , м <sup>3</sup> /ч	45,6	35,5	61,4	42,3	56,2	...	59,9

Доля торфяного сырья различной степени разложения (с учетом классификации торфяного сырья по этому признаку [3]) определена по формулам:

- малоразложившийся торф

$$P(R < 25) = \Phi^*\left(\frac{25 - \bar{x}}{S_x}\right) \approx 0,64;$$

- торф средней степени разложения

$$P(25 < R < 35) = \Phi^*\left(\frac{35 - \bar{x}}{S_x}\right) - \Phi^*\left(\frac{25 - \bar{x}}{S_x}\right) \approx 0,96 - 0,64 = 0,32;$$

- торф высокой степени разложения

$$P(R > 35) = 1 - \Phi^*\left(\frac{35 - \bar{x}}{S_x}\right) \approx 1 - 0,96 = 0,04.$$

Таким образом, в поставках продукции торфяных предприятий, добывающих фрезерный торф, будет преобладать торф пониженной степени разложения (64%); торф средней степени разложения будет приходиться примерно на 1/3 поставок (32 %). Доля торфа высокой степени разложения весьма мала (~4 %).

Часовая производительность одноковшового экскаватора может быть рассчитана по формуле [3]:

$$Q_{эк} = \frac{3600}{\tau_{ц}} V_k K_з K_p K_t, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (7)$$

где  $V_k$  – объем ковша, м<sup>3</sup>; (для экскаватора на рытье картовых каналов применяется экскаватор ТЭ-3М,  $V_k = 0,65 \text{ м}^3$ );  $K_з$  – коэффициент заполнения ковша;  $K_p$  – коэффициент разрыхления;  $K_t$  – коэффициент использования рабочего времени.

Имитационная модель производительности экскаватора может быть построена из условия, что  $\tau_{ц}$ ;  $K_з$ ;  $K_p$  и  $K_t$  варьируют по равномерному закону распределения:  $\tau_{ц} \in [19; 23]$ ;  $K_з \in [0,6; 0,9]$ ;  $K_p \in [0,8; 0,9]$ ;  $K_t \in [0,6; 0,9]$ .

Фрагмент таблицы для расчета реализаций характеристик, влияющих на производительность экскаватора, представлен ниже (табл. 2).

По результатам обработки 50-ти реализаций среднее значение часовой производительности экскаватора равно 51,55 м<sup>3</sup>/ч; стандартное отклонение 8,17 м<sup>3</sup>/ч.

Доверительный интервал для часовой производительности экскаватора с надежностью 0,95 определим из выражения

$$51,55 - \frac{2,01 \cdot 8,17}{\sqrt{50}} < M(Q_{эк}) < 51,55 + \frac{2,01 \cdot 8,17}{\sqrt{50}}; \quad (8)$$

таким образом

$$49,2 \text{ м}^3/\text{ч} < M(Q_{эк}) < 53,9 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Ориентируясь на нижнюю границу доверительного интервала можно оп-

Таблица 3

**Расчет показателей сезонной производительности бункерной уборочной машины**

Показатели	Значения реализаций						
	1	2	3	4	5	...	50
$h_{\phi}$ , м	0,011	0,011	0,010	0,011	0,012	...	0,011
$\gamma_{\phi}$ , кг/м <sup>3</sup>	680	500	680	640	560	...	500
$w_{\phi}$ , %	75,8	73,4	76,2	73,4	73,0	...	73,0
$\alpha_c$	0,61	0,55	0,52	0,49	0,52	...	0,64
$q_{ц}$ , т/га	18,4	13,4	14,0	15,3	15,7	...	15,8
$n_{ц}$	24,8	23,2	23,4	23,2	24,6	...	23,6
$q_c$ , т/га	456	311	328	355	387	...	374
$S_{ц}$ , га	49,4	45,5	44,6	47,3	48,5	...	44,8
$G_{сез}$ , тыс. т	22,5	14,2	14,6	16,8	18,8	...	16,8

ределить потребное количество экскаваторов, зная объемы и сроки выполнения земляных работ с использованием такой техники.

Формула для расчета сезонной производительности уборочной машины (по [3]) – основная математическая структура для имитационной модели названного показателя:

$$G_{сез} = q_{ц} \cdot n_{ц} \cdot S_{ц}, \quad (9)$$

где  $q_{ц}$  – цикловой сбор фрезерного торфа, т/га;  $n_{ц}$  – количество циклов уборки за сезон;  $S_{ц}$  – цикловая производительность уборочной машины.

В реальном процессе торфяного производства каждый из названных показателей изменяется под влиянием множества случайных факторов. Цикловой сбор фрезерного торфа рассчитывается по формуле [3]:

$$q_{ц} = \frac{10 \cdot h_{\phi} \cdot \gamma_{\phi} \cdot (100 - w_{\phi}) \cdot \alpha_c}{100 - w_y}, \quad \text{т/га} \quad (10)$$

где  $h_{\phi}$  – глубина фрезерования, м;  $\gamma_{\phi}$  – плотность фрезеруемого слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $w_{\phi}$  – влажность фрезеруемого слоя, %;  $\alpha_c$  – коэффициент сбора;  $w_y$  – условная влажность торфа, % ( $w_y = 40\%$ ) [3].

Цикловая производительность уборочной машины по [3]:

$$S_{ц} = S_{эк} \cdot t_{сyt} \cdot \tau_{ц}, \quad \text{га} \quad (11)$$

$$t_{сyt} = 16 \text{ ч}; \quad \tau_{ц} = 2 \text{ дня};$$

$$S_{эк} = 0,36 \cdot b \cdot v \cdot k_b \cdot k_v \cdot k_{ц} \cdot k_t, \quad \text{га/ч} \quad (12)$$

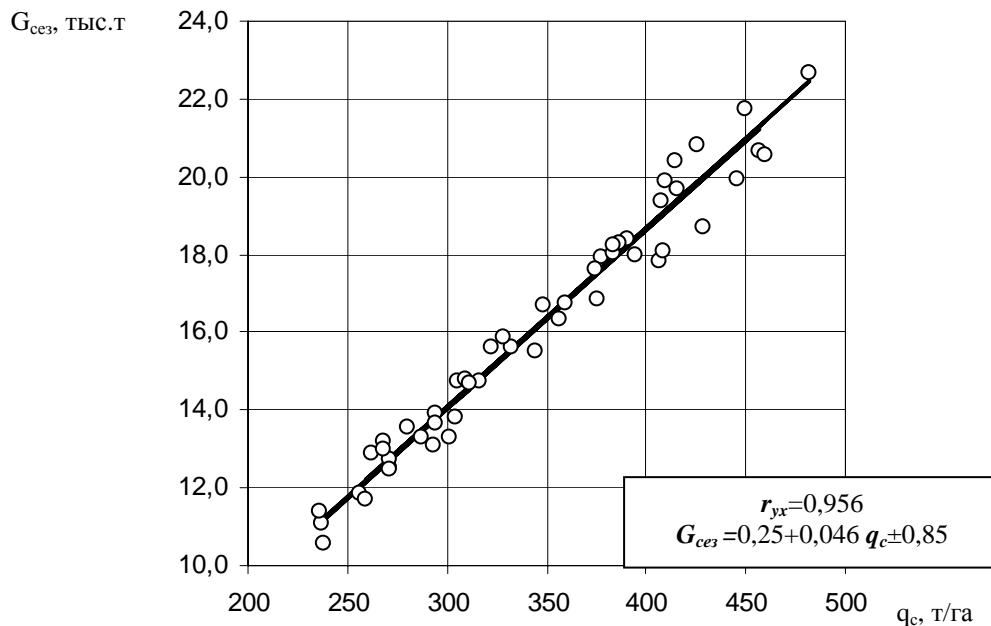
где  $b$  – ширина захвата секции валкователя, м;  $v$  – скорость движения уборочной машины, м/с;  $k_b$ ;  $k_v$ ;  $k_{ц}$ ;  $k_t$  – коэффициенты использования ширины захвата (для уборочной машины бункерного типа  $k_b = 1$ ); скорости ( $k_v = 0,95$ ); циклового и рабочего времени.

Для построения имитационной модели сезонной производительности уборочной машины, учитывая изменчивость всех составляющих формулы (9) под влиянием множества факторов, можно принять для ключевых показателей, определяющих результаты расчета, равномерный закон распределения:

$$h_{\phi} \in [0,010; 0,012 \text{ м}]; \quad \gamma_{\phi} \in [500; 700 \text{ кг/м}^3]; \quad w_{\phi} \in [73; 77 \text{ \%}]; \quad \alpha_c \in [0,4; 0,7]; \quad n_{ц} \in [23; 25]; \quad S_{ц} \in [43,5; 49,5 \text{ га}].$$

В табл. 3 приведен фрагмент результатов расчета сезонной производительности уборочной машины  $G_{сез}$  в тыс. т.

Обработка результатов позволила установить среднее значение сезон-



**Рис. 3. Поле корреляции связи показателей сезонной производительность бункерных уборочных машин с сезонными сборами фрезерного торфа (регрессионная имитационная модель производительности бункерных уборочных машин)**

ной производительности бункерной уборочной машины для принятых условий изменчивости составляющих –  $G_{сез} = 16,15$  тыс. т, стандартное отклонение  $S_c = 2,88$  тыс. т. Доверительный интервал для математического ожидания сезонной производительности с надежностью 0,95:

$$16,15 - \frac{2,01 \cdot 2,88}{\sqrt{50}} < M(G_{сез}) < 16,15 + \frac{2,01 \cdot 2,88}{\sqrt{50}}; \quad (13)$$

15,3 тыс. т <  $M(G_{сез})$  < 17,0 тыс. т.

Имитационное моделирование позволяет изучать влияние изменчивости различных показателей на конечный результат. Представленные в табл. 3 данные позволяют построить регрессионную модель зависимости показателей сезонной производительности уборочных машин от сезонных сборов

фрезерного торфа. Поле корреляции связи этих показателей представлено на рис. 3. Коэффициент корреляции этой связи  $r_{yx} = 0,956$ . Уравнение регрессии имеет вид

$$G_{сез} = 0,25 + 0,046 q_c \pm 0,85.$$

Столь высокая степень сопряженности связи ( $r_{yx} = 0,956$ ) объясняется тем, что была принята изменчивость для цикловой производительности в достаточно узком диапазоне. В реальных условиях этот диапазон значительно шире, поэтому связь рассмотренных в имитационной модели показателей по отчетным данным предприятий промышленности характеризуется коэффициентом корреляции порядка 0,7-0,75.

Приведенные данные по имитационному моделированию технических процессов торфяного производства подтверждают заключение первопро-

ходца в использовании рассмотренных методов в торфяном производстве Б.А. Богатова [6–8] о безусловной

полезности методов имитационного моделирования в теории и практике торфяного производства.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 496 с.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
3. Антонов В.Я., Копенкин В.Д. Технология и комплексная механизация торфяного производства. – М.: Недра, 1983. – 287 с.
4. Богатов Б.А., Копенкин В.Д. Математические методы в торфяном производстве. – М.: Недра, 1991. – 240 с.
5. Большев Б.А., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
6. Богатов Б.А. Анализ проектных показателей торфопредприятия с использованием метода имитационного моделирования // Торфяная пром-сть. – 1984. – №4. – С.19–21.
7. Богатов Б.А. Имитационное моделирование в расчетах производительности горных машин / Сб. «Свойства, структура, методы изучения торфа и слабых грунтов». – Тверь: ТГТУ, 1999. – С. 73-76.
8. Богатов Б.А., Васильев В.Г. Расчет сезонной выработки торфоуборочных машин методом имитационного моделирования // Торфяная пром-сть. – 1979. – №6. – С.14–17. **ГИАС**

#### Коротко об авторах

*Копенкин В.Д.* – профессор кафедры технологии и комплексной механизации разработки торфяных месторождений,  
*Копенкина Л.В.* – кандидат технических наук, доцент кафедры торфяных машин и оборудования,

Тверской государственный технический университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 16 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.С. Коваленко*.

