

12. Edward A.M., Martin A., Bees M.A. Generic dynamics of a simple plankton population model with a non-integer exponent of closure // *Chaos, Solitons and Fractals*. – 2001. – Vol. 12. – P. 289-300.
13. Gin K.Y.H., Guo J., Cheong H.F. A size-based ecosystem model for pelagic waters // *Ecological Modelling*. – 1998. – Vol. 112. – P.53-72.
14. Fennel, K. Interannual and regional variability of chemical-biological variables in a coupled 3-D model of the western Baltic // *Hydrobiologia*. – 1999. – Vol. 393. – P.25-33.
15. Roy S. et al. Sequential variations of phytoplankton growth and mortality in an NPZ model: A remote-sensing-based assessment // *Journal of Marine Systems*. – 2012. – Vol. 92. – P. 16-29.
16. Charria G. et al. Importance of Dissolved Organic Nitrogen in the North Atlantic Ocean in sustaining primary production: a 3D modeling approach // *Biogeosciences*. – 2008. – Vol.5. – P. 1437-1455.
17. Calbet A. Phytoplankton growth, microzooplankton grazing and carbon cycling in marine systems / Calbet A., Landry M.R. // *Limnol. Oceanogr.* – 2004. – Vol. 49. – P. 51-57.
18. Odate T. Seasonal variation in chlorophyll-specific growth and microzooplankton grazing of phytoplankton in Japanese coastal water / Odate T., Imai K. // *J. Plankton Res.* – 2003. – Vol. 25. – P. 1497-1505.
19. Palomares-Garcia R. Pigment-specific rates of phytoplankton growth and microzooplankton grazing in a subtropical lagoon / R. Palomares-Garcia, J.J. Bustillos-Guzman, D. Lopez-Cortes // *J. Plankton Res.* – 2006. – Vol. 28. – P. 1217-1232.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Абакумовым.*

*E-mail:*

*Гиричева Евгения Евгеньевна – evg.giricheva@yandex.ru.*

УДК 004.942

© 2014 г. **В.М. Дмитриев**, д-р техн. наук,  
**О.С. Затик**, канд. техн. наук,  
**Т.В. Ганджа**, канд. техн. наук

(Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники)

### **МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ В КОНТЕКСТЕ СИНТЕЗА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОГРАММ\***

Рассматриваются методика и пример имитационного моделирования деятельности предприятия с учетом экологического аспекта в среде MAPS. Методика основана на формализме метода компонентных цепей для анализа эколого-экономических систем и синтеза производственных экологических программ нефтегазовых предприятий.

**Ключевые слова:** моделирование, программное планирование.

---

\* Исследование проведено при поддержке гранта РФФИ, проект № 13-07-00378а.

## Введение

Современные темпы производства и масштабы работ требуют автоматизировать процесс создания производственных программ предприятия нефтегазовой отрасли, в том числе с учетом экологического аспекта. Целесообразно использовать компьютерные модели, интегрированные с автоматизированной информационной системой предприятия, поскольку проведение реальных экспериментов требует больших затрат и времени, а мера ответственности и степень риска велики.

Имитационное моделирование деятельности предприятия с учетом экологического аспекта – это специфическое сложное направление научных исследований, призванное объединить в единую модель системы компоненты разных подсистем – экономических, экологических, технических – с материальными и информационными потоками в связях [1 – 3].

Актуальным является развитие универсальных расчетно-моделирующих систем и методологических подходов для исследования экономико-экологических систем (ЭЭС) и автоматизации синтеза производственных программ, обеспечивающих устойчивое развитие регионов добычи.

### Методика имитационного моделирования деятельности предприятия на основе метода компонентных цепей

Методика имитационного моделирования деятельности предприятия предполагает представление компьютерной модели в виде компонентной цепи и ее реализацию в среде моделирования MAPC. Методика основана на расширении формализма языка компонентных цепей для исследования экономико-экологических систем и позволяет автоматизировать процесс формирования экологических программ, представляющих собой интерактивные документы [4].

Технологическая схема представлена на рис. 1, а этапы моделирования и синтеза производственных программ описаны в табл. 1.



Рис. 1. Технологическая схема имитационного моделирования:

- 1 – понимание системы; 2 – формулировка цели; 3 – постановка задачи моделирования;
- 4 – разработка моделей компонентов ЭЭС в формате метода компонентных цепей (МКЦ);
- 5 – разработка концептуальной модели; 6 – разработка алгоритма эксперимента;
- 7 – реализация модели и алгоритмов в среде MAPC;
- 8 – планирование и проведение компьютерного эксперимента.

Таблица 1

№	Название этапа	Результат
1.	Понимание системы	Компонентный анализ, анализ структуры системы, и процессы, в ней протекающие.
2.	Формулировка цели	Список задач, которые надо решить с помощью имитационного моделирования.
3.	Постановка задачи моделирования	Логико-математическое описание процессов системы. Критерии-функционалы. В качестве параметров для оптимизации выбираются параметры технологического процесса и технических средств. Представление ограничений в виде уравнений или неравенств. Задание начальных состояний компонентов подсистем, ограничений на переменные модели.
4.	Разработка модели компонентов ЭЭС в формате МКЦ	Модели компонентов и конвертеров в формате метода компонентных цепей – в 3-х аспектах: топологическом, физическом и математическом.
5.	Разработка концептуальной модели	Структура многоуровневой компьютерной модели системы.
6.	Разработка алгоритма эксперимента	Алгоритм компьютерного эксперимента, алгоритм структурного синтеза производственной программы, возможно, с учетом экологического аспекта.
7.	Реализация модели и алгоритмов в среде MAPC	Реализованные подсистемы, их параметры и переменные, реализованная логика и связи подсистем. Модели компонентов реализуются с использованием языка программирования и формируют библиотеку моделей компонентов в среде MAPC. Проводятся исследования и делается выбор оптимизатора из библиотеки оптимизаторов в среде MAPC, исходя из характеристик задачи и разработанного критерия-функционала.
8.	Планирование и проведение компьютерного эксперимента	Экспериментальный поиск оптимальных параметров производственных программ, в частности экологических. Результаты моделирования выводятся на цифровое табло измерителя в виде планов, отчетов.

### Описание и анализ процессов в среде моделирования MAPC

Работа предприятий основывается на программном планировании их деятельности. Успешное программное планирование деятельности предприятия является залогом устойчивого развития регионов добычи в целом. В частности, производственные экологические программы направлены на предупреждение и компенсацию техногенного воздействия на экосистему.

Сегодня экологические программы крупных предприятий нефтегазовой отрасли насчитывают порядка 300 типов природоохранных мероприятий (ПОМ). Например, типовым природоохранным мероприятием является процесс «Детоксикация грунта сорбентом». Детоксикация грунта, загрязненного нефтепродуктами, производится путем добавления в грунт сорбента. Актуальной является задача оптимального расхода сорбента, т.е. определение минимальной массы сорбента, которую необходимо внести в грунт, чтобы концентрация нефти в грунте ста-

ла ниже предельно допустимой концентрации. Согласно вышеописанной методике задача решается в несколько этапов.

*Этап 1. Понимание системы.* В процессе «Детоксикация грунта сорбентом» участвуют и взаимодействуют компоненты различных подсистем (рис. 2):

грунт и грунтовые воды, загрязненные нефтью;

распылитель – техническое средство, осуществляющее добавление сорбента в грунт;

сорбент – материальный ресурс, предназначенный для добавления в грунт с целью снижения уровня концентрации нефти в нем до предельно допустимой концентрации;

фонд, затрачиваемый в процессе выполнения технологического процесса на оплату работы распылителя и израсходованного сорбента.

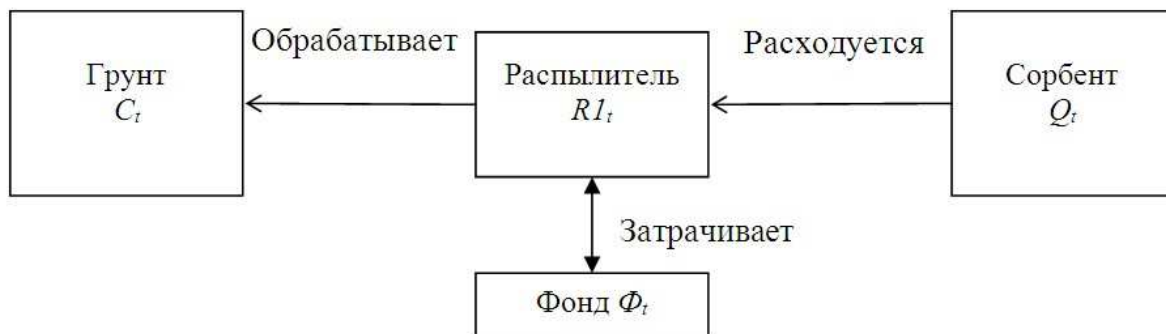


Рис. 2. Взаимодействие компонентов при выполнении процесса «Детоксикация грунта сорбентом».

*Этап 2. Формулировка цели моделирования системы.* Необходимо определить оптимальный расход сорбента и плановые показатели процесса «Детоксикация грунта сорбентом».

*Этап 3. Постановка задачи компьютерного моделирования.* В качестве основных уровней модели процесса «Детоксикация грунта сорбентом», характеризующих состояние ЭЭС, взяты следующие уровни: запаса сорбента  $Q_t$ ; наличия распылителей  $N_t$ ; загрязнения грунта  $C_t$ ; фонда  $\Phi_t$ .

Каждому из этих уровней соответствует определенная уровневая переменная (переменная состояния): запас сорбента  $Q_t$ ; количество распылителей  $N_t$ ; концентрация нефти в грунте  $C_t$ ; объем фондов  $\Phi_t$ .

Запас сорбента  $Q_t$  уменьшается в процессе выполнения ПОМ.

Изменение состояния запаса сорбента  $Q_t$  за момент времени  $t$  дается уравнением

$$dQ/dt = RS_t, \tag{1}$$

где  $Q_t$  – запас сорбента, кг;  $RS_t$  – расход сорбента в момент времени  $t$ .

Величина  $RS_t$  определяется по формуле:

$$RS_t = \frac{t \cdot N \cdot P1 \cdot P2}{3600},$$

где  $t$  – время моделирования;  $N$  – количество распылителей, задействованных в ПОМ;  $P1$  – скорость подачи сорбента, кг/кв.м;  $P2$  – скорость обработки грунта, кв.м/ч.

Количество распылителей  $N_t$  уменьшается в процессе и восстанавливается после завершения технологического процесса (ТП). Изменение состояния  $N_t$  за момент времени  $t$  задается уравнением:

$$\frac{dN}{dt} = -N_t, \quad (2)$$

где  $N_t$  – количество распылителей, задействованных в ТП.

Концентрация нефти в грунте  $C_t$  уменьшается за счет выполнения ПОМ. Изменение состояния  $C_t$  за момент времени  $t$  определяется уравнением:

$$\frac{dC_t}{dt} = -W_t, \quad (3)$$

где  $C_t$  – концентрация нефти в грунте, мг/кг;  $W_t$  – компенсирующее воздействие ПОМ в момент времени  $t$ .

Объем фондов  $\Phi_t$  уменьшается за счет затрат в процессе выполнения технологического процесса на оплату работы распылителя и израсходованного сорбента. Изменение размера фонда  $\Phi_t$  в момент времени  $t$  описывается уравнением:

$$\frac{d\Phi_t}{dt} = -Z_t, \quad (4)$$

где  $\Phi_t$  – объем фондов, руб.;  $Z_t$  – затраты на  $n$  распылителей и сорбент в момент времени  $t$ .

Здесь *переменные модели* – расход сорбента  $RS_t$  – определяет последовательность решений, изменяющих  $(t - 1)$ -ю систему состояний ЭЭС в  $t$ -ю.

Приведенные уравнения (1) – (4) характеризуют состояние ЭЭС в процессе «Детоксикация грунта сорбентом».

*Задача оптимизации параметров процесса «Детоксикации грунта сорбентом»* состоит в оптимизации расхода сорбента  $RS_t$  (скорости подачи сорбента  $P1$  кг/кв.м) как параметра функции от  $t$  в интервале  $t1 \leq t \leq t2$  (при заданных начальных состояниях, ограничениях на переменные состояния и управления), *минимизирующих заданный мультипликативный обобщенный критерий-функционал*:

$$\min MK\Phi(t) = \int_{t1}^{t2} \frac{Z(t) \cdot T(t) \cdot RS(t)}{\Delta M(t) \cdot ПЭУ(t) \cdot W(t)} dt. \quad (5)$$

Он сформирован в результате обобщения следующих критериев-функционалов.

*Функционалы, подлежащие минимизации: затраты на выполнение ПОМ  $Z(t+h)$ , вычисляемые по формуле:*

$$Z(t+h) = Z(t) + \frac{h \cdot N \cdot Ц_p}{3600} + RS(h) \cdot Ц_c, \quad (6)$$

где  $Z(t)$  – затраты предприятия на выполнение мероприятия за время  $t$ ;  $h$  – шаг моделирования;  $N$  – количество распылителей;  $Ц_p$  – цена 1 часа работы распылителя;  $RS_h$  – расход сорбента в момент времени  $h$ , кг;  $Ц_c$  – цена 1 кг сорбента.

*время выполнения ПОМ  $T(t)$ , вычисляемое по формуле:*

$$T(t+h) = T(t) + h, \quad (7)$$

где  $T(t)$  – время выполнения мероприятия в момент времени  $t$ .

Время выполнения мероприятия, когда концентрация нефти в грунте меньше предельно допустимой концентрации  $C_t \leq 500$  мг/кг:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{S}{N \cdot P_2},$$

где  $S$  – площадь загрязнения, кв.м;  $P_2$  – скорость обработки грунта, кв.м/ч.;  $N$  – количество распылителей.

Функционалы, подлежащие максимизации:

*эффективность мероприятия  $\mathcal{E}M(t)$ , вычисляемая по формуле:*

$$\mathcal{E}M(t+h) = \mathcal{E}M(t) + \frac{h \cdot P_2 \cdot N}{3600}, \quad (8)$$

где  $\mathcal{E}M(t)$  – эффективность мероприятия, количество кв.м, восстановленных за время  $t+h$ ;  $P_2$  – скорость обработки грунта, кв.м/ч.;  $N$  – количество распылителей;

*предотвращенный экологический ущерб  $\Pi \mathcal{E}Y(t)$ , вычисляемый по формуле:*

$$\Pi \mathcal{E}Y(t+h) = \Pi \mathcal{E}Y(t) + C_{\Pi \mathcal{E}Y} \cdot \mathcal{E}M(h), \quad (9)$$

где  $\Pi \mathcal{E}Y(t)$  – предотвращенный экологический ущерб, руб.;  $\mathcal{E}M(h)$  – эффективность мероприятия в момент времени  $h$ ;  $C_{\Pi \mathcal{E}Y}$  – цена 1 кв.м восстановленного грунта;

*компенсирующее воздействие сорбента на грунт (понижение концентрации нефти за счет внесения сорбента), измеряемое мг/кг, в момент времени  $t+h$ , вычисляется по формуле:*

$$W(t+h) = W(t) + \frac{h}{3600} \cdot \left( \frac{C_0 \cdot K \cdot N \cdot P_1 \cdot P_2}{100 \cdot S} \right), \quad (10)$$

где  $h$  – шаг моделирования;  $C_0$  – концентрация нефти в грунте в начальный момент времени;  $K$  – коэффициент поглощения нефти сорбентом;  $N$  – количество распылителей;  $P_1$  – скорость подачи сорбента, кг/кв.м;  $P_2$  – скорость обработки грунта, кв.м/ч.;  $S$  – площадь загрязнения, кв.м;

*расход сорбента в момент времени  $t+h$ , вычисляемый по формуле:*

$$RS(t+h) = RS(t) + \frac{h \cdot N \cdot P_1 \cdot P_2}{3600}, \quad (11)$$

где  $RS_t$  – расход сорбента в момент времени  $t$ .

Начальные состояния, ограничения на переменные модели:

*начальные состояния подсистем ЭЭС загружаются из БД – запас сорбента  $Q_{t_0}$ , количество распылителей  $N_{t_0}$ , концентрация нефти в грунте  $C_{t_0}$ , площадь загрязнения  $S_{t_0}$ , объем фондов  $\Phi_{t_0}$ ;*

*начальные данные загружаются из БД – количество распылителей  $N$ ; цена 1 часа работы распылителя  $C_P$ , цена 1 кг сорбента  $C_C$ , скорость подачи сорбента  $P_1$ , скорость обработки грунта  $P_2$ , шаг моделирования  $h$ ,  $C_{\Pi \mathcal{E}Y}$  – цена 1 кв.м восстановленного грунта;*

*условие завершения работы модели:*

$$C_t \leq C_{\text{ПДК}},$$

где  $C_t$  – концентрация нефти в грунте;  $C_{\text{ПДК}}$  – предельно допустимая концентрация нефти в грунте, равная 500 мг/кг;

при оптимизации управления ЭЭС задано ограничение на параметр ТП, скорость подачи сорбента  $P1$ , в виде неравенства:

$$P1_{\min} \leq P1 \leq P1_{\max}, \quad (12)$$

где  $P1_{\min}$  – минимальная скорость подачи сорбента;  $P1_{\max}$  – максимальная скорость подачи сорбента, определяющего замкнутую область допустимых управлений.

Таким образом, поставлена задача оптимизации параметров ПОМ «Детоксикация грунта сорбентом» (5) – (12).

*Этап 4. Разработка моделей компонентов ЭЭС в формате МКЦ.*

В процессе ПОМ «Детоксикация грунта сорбентом» задействованы следующие компоненты:

компонент природной среды – грунт;

техническое средство – распылитель; материальный ресурс – сорбент;

компонент – фонд и конвертеры.

Разработаны условные обозначения и математические модели компонентов (табл. 2) и конвертеров ПОМ (табл. 3):

Таблица 2

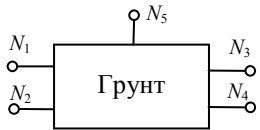
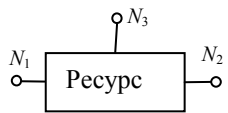
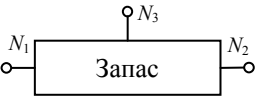
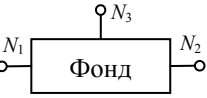
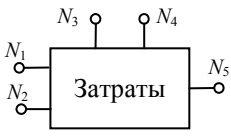

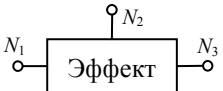
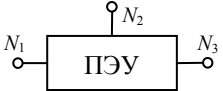
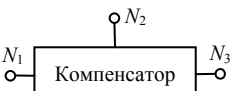
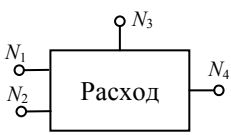
№	Название и изображение	Математическая модель	Параметры
1.	<p>Грунт (КПС)</p> 	$\frac{dV_{N3}}{dt} = -V_{N1t},$ $\frac{dV_{N4}}{dt} = -V_{N2t}$	$V_{N1}$ – компенсирующее воздействие; $V_{N2}$ – скорость обработки грунта; $V_{N3}$ – концентрация нефти в грунте; $V_{N4}$ – площадь загрязнения; $N_5$ – связь для параметризации из БД.
2.	<p>Распылитель</p> 	$\frac{dV_{N2}}{dt} = -V_{N1t}$	$V_{N1}$ – расход распылителей; $V_{N2}$ – ресурс распылителей; $N_3$ – связь для параметризации из БД.
3.	<p>Запас сорбента</p> 	$\frac{dV_{N2}}{dt} = -V_{N1t}$	$V_{N1}$ – расход сорбента; $V_{N2}$ – запас сорбента; $N_3$ – связь для параметризации из БД.
4.	<p>Фонд</p> 	$\frac{dV_{N2}}{dt} = -V_{N1t}$	$V_{N1}$ – затраты; $V_{N2}$ – размер фонда; $N_3$ – связь для параметризации из БД.

Таблица 3

№	Название и изображение	Математическая модель	Параметры
1.	Затраты 	$V_{N5t} = V_{N1} \cdot V_{N3} + V_{N2t} \cdot V_{N4}$	$V_{N1}$ – количество распылителей; $V_{N2}$ – расход сорбента; $V_{N3}$ – цена 1 ч. работы распылителя; $V_{N4}$ – цена 1кг сорбента; $V_{N5}$ – затраты.
2.	Время выполнения 	$\frac{dV_{N2}}{dt} = V_{N1t}$	$V_{N1}$ – время моделирования; $V_{N2}$ – время выполнения.
3.	Эффективность мероприятия 	$\frac{dV_{N3}}{dt} = V_{N1t} \cdot V_{N2t}$	$V_{N1}$ – объем обработанного грунта; $V_{N2}$ – количество распылителей; $V_{N3}$ – эффективность мероприятия.
4.	Предотвращенный экологический ущерб (ПЭУ) 	$\frac{dV_{N3}}{dt} = V_{N1t} \cdot V_{N2t}$	$V_{N1}$ – эффективность мероприятия; $V_{N2}$ – цена 1 ед. эффекта из БД; $V_{N3}$ – предотвращенный экологический ущерб, руб.
5.	Компенсирующее воздействие 	$VN3_t = \frac{C_0 \cdot K \cdot N \cdot P1 \cdot P2}{100 \cdot S}$	$\overline{V_{N1}} = \{P1, P2, N\}$ – вектор параметров ТП (скорость подачи сорбента $P1$ , скорость обработки грунта $P2$ , количество распылителей $N$ ); $\overline{V_{N2}} = \{C_0, K, N, S\}$ – вектор параметров, загружается из БД (концентрация нефти $C_0$ , площадь загрязнения $S$ , коэффициент поглощения нефти $K$ ); $V_{N3}$ – компенсирующее воздействие.
6.	Расход сорбента 	$\frac{dVN4}{dt} = VN1_t \cdot VN2_t \cdot VN1_t$	$V_{N1}$ – количество распылителей; $V_{N2}$ – объем обработанного грунта; $V_{N3}$ – объем подачи сорбента; $V_{N4}$ – расход сорбента.

### Этап 5. Разработка концептуальной структуры модели.

Разработана структура интегрированной многоуровневой компьютерной модели процесса «Детоксикация грунта сорбентом» (рис. 3).

1. Входные параметры модели:  $\overline{P} = \{P1, P2, N, K, Ц_c, Ц_p, Ц_{пэу}, S, C, \Phi\}$ :

1.1. Управляемый параметр ТП:  $P1$  – скорость подачи сорбента, кг/м<sup>2</sup>;



1.2. *Параметры для конвертации:*  $P2$  – скорость обработки грунта;  $N$  – количество распылителей;  $K$  – коэффициент поглощения нефти сорбентом;  $C_c$  – цена 1 кг сорбента;  $C_p$  – цена 1 часа работы распылителя;  $C_{ПЭУ}$  – цена 1 кв.м грунта;  $S$  и  $C$  – площадь загрязнения и концентрация нефти;  $\Phi$  – объем фонда;  $h$  – шаг моделирования.

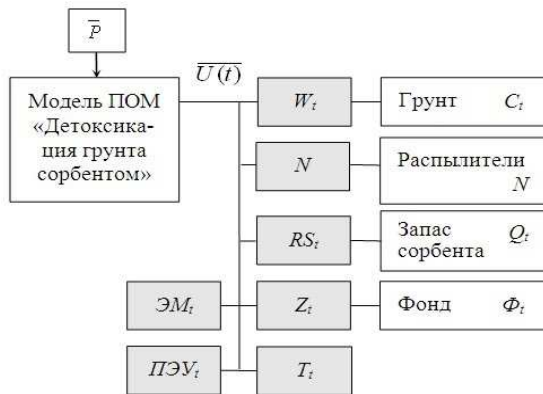


Рис. 3. Структура модели процесса «Детоксикация грунта сорбентом».

моделирования.

2. *Выходные переменные связи модели, отражающие состояние системы*

$\bar{U}(t) = \{Z(t), T(t), ЭМ(t), ПЭУ(t), W(t), RS(t)\}$ :

блок конвертеров параметров ТП;  
затраты на ТП в момент времени  $t + h$

$$Z(t+h) = Z(t) + \frac{h \cdot N \cdot C_p}{3600} + RS(h) \cdot C_c;$$

текущее время  $T(t+h) = T(t) + h$ ; время

$$\text{выполнения } \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{S}{N \cdot P2};$$

$$\text{эффективность мероприятия в } t+h \quad ЭМ(t+h) = ЭМ(t) + \frac{h \cdot P2 \cdot N}{3600};$$

предотвращенный экологический ущерб

$$ПЭУ(t+h) = ПЭУ(t) + S_{ПЭУ} \cdot ЭМ(t);$$

компенсирующее воздействие в  $t + h$

$$W(t+h) = W(t) + \frac{h}{3600} \cdot \left( \frac{C_0 \cdot K \cdot N \cdot P1 \cdot P2}{100 \cdot S} \right);$$

$$\text{расход сорбента } RS(t+h) = RS(t) + \frac{h \cdot N \cdot P1 \cdot P2}{3600}.$$

3. *Переменные связи:*

концентрация нефти в грунте  $dC/dt = -W_i$ ;

площадь загрязнения  $dQ/dt = -RSI_i$ ;

количество распылителей  $dN/dt = -N_i$ ;

изменение запаса сорбента  $dQ/dt = -RS_i$ ;

изменение размера фонда  $d\Phi/dt = -Z_i$ .

Параметры модели ПОМ загружаются из БД. Оптимальные параметры ТП определяются с помощью компонента "Оптимизатор" и на основе уравнений критерия и ограничений (5) – (12). Результаты моделирования сохраняются в базе данных.

*Этап 6. Разработка алгоритма компьютерного эксперимента.*

Разработан алгоритм поиска оптимальных параметров процесса ПОМ «Детоксикация грунта сорбентом» (рис. 4). Имитационное моделирование системы осуществляется во временной области с временным шагом  $h$ . Параметры:  $P1$  – скорость подачи сорбента,  $кг/м^2$ ;  $P2$  – скорость обработки грунта;  $N$  – количество распылителей; переменные, которые зависят от времени;  $C_c$  – цена 1 кг сорбента;  $C_p$  – цена 1 часа работы распылителя;  $C_{пэу}$  – цена 1 кв.м грунта;  $C$  – концентрация нефти в грунте;  $S$  – площадь загрязнения;  $\Phi$  – объем фонда;  $Q$  – запас

сорбента;  $Z$  – затраты;  $T$  – время моделирования;  $ЭМ$  – эффективность мероприятия;  $ПЭУ$  – предотвращенный экологический ущерб. Компьютерная модель распылителя реализует алгоритм работы распылителя (рис. 4). Предложенные алгоритмы эксперимента ПОМ «Детоксикация грунта сорбентом» реализуется в имитационном ядре СМ МАРС.

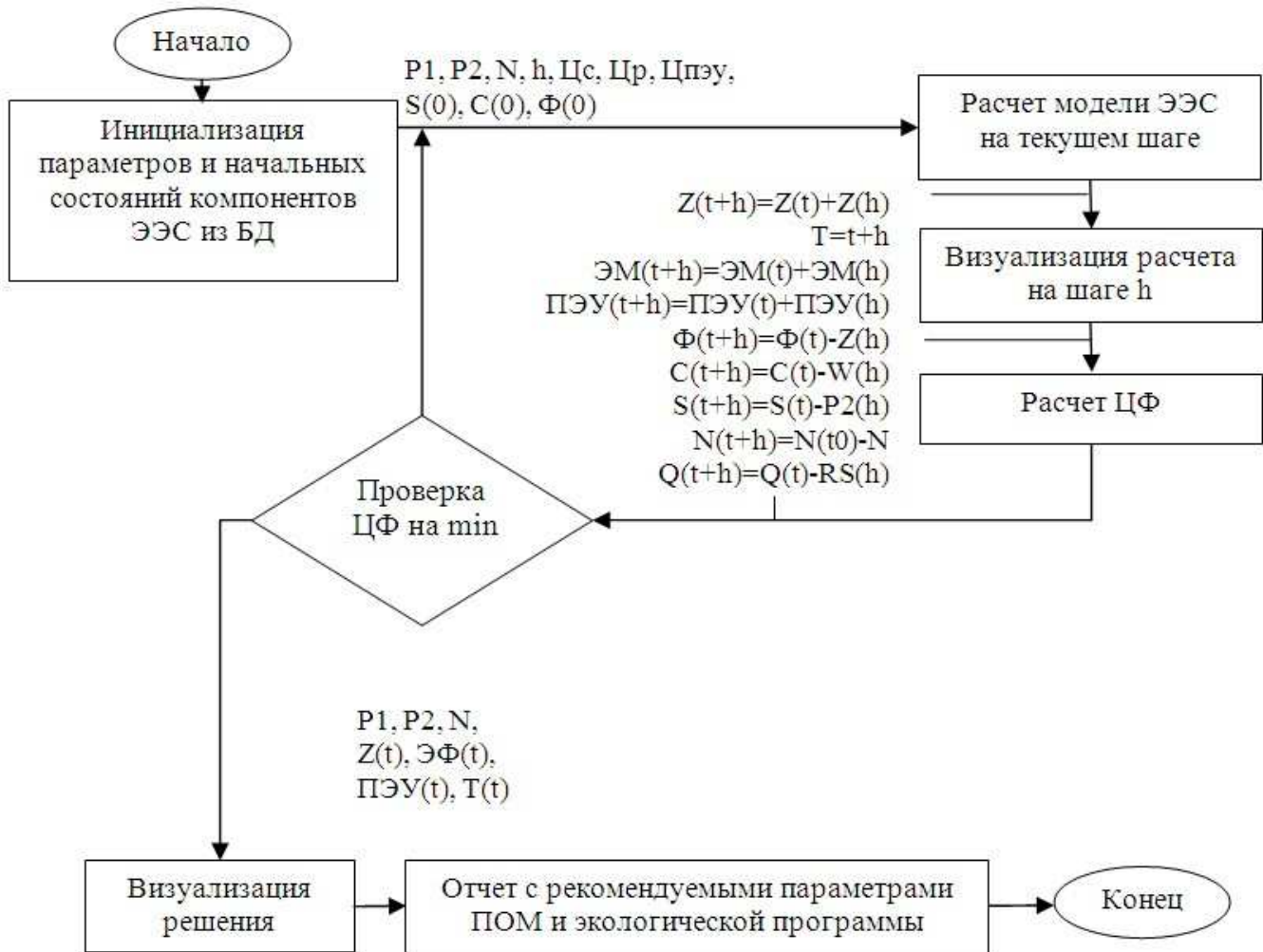


Рис. 4. Алгоритм поиска оптимальных параметров процесса ПОМ «Детоксикация грунта сорбентом».

*Этап 7. Реализация эксперимента в среде МАРС.* Предложенные выше модели компонентов, структура модели и алгоритмы эксперимента процесса «Детоксикация грунта сорбентом» реализованы в среде МАРС. Для реализации примера компьютерного моделирования разработана база данных параметров модели в среде MS Access.

*Выбор метода оптимизации.* Проведено исследование по теме выбора оптимизатора из библиотеки оптимизаторов среды МАРС, с учетом характеристик задачи управления, вида критерия-функционала и уравнений ограничений. В результате исследований для решения задачи оптимизации расхода сорбента при выполнении процесса «Детоксикация грунта сорбентом» выбран метод для решения одномерной оптимизации – *метод золотого сечения*, поскольку варьируется один параметр – расход сорбента. Данный метод обладает вычислительной эффективностью и простотой реализации.

*Этап 8. Планирование и проведение компьютерного эксперимента.*

Планирование эксперимента с оптимизацией параметров процесса. Пусть заданы следующие начальные данные:

запас сорбента  $Q_{i0} = 30$  кг, количество распылителей  $N = 2$ , концентрация нефти в грунте  $C_{i0} = 3850$  мг/кг, площадь загрязнения  $S_{i0} = 300$  кв.м, объем фондов  $\Phi_{i0} = 572,8$  тыс.руб.;

параметры для конвертации: цена 1 часа работы распылителя  $C_P = 2,2$  тыс.руб., цена 1 кг сорбента  $C_C = 0,2$  тыс.руб., цена 1 кв.м грунта  $C_{ПЭУ} = 1,2$  тыс.руб., коэффициент поглощения нефти для сорбента «Глауконит»  $K = 19,4$  (на 1 кг/ кв.м), скорость обработки грунта  $P2 = 20$  кв.м/ч;

условие завершения работы модели системы – ограничение на концентрацию нефти в грунте  $C_t \leq 500$  мг/кг;

ограничение на параметр ТП, скорость подачи сорбента на 1 кв.м  $P1$ , задано в виде неравенства:  $1 \leq P1 \leq 10$ , определяющего замкнутую область допустимых управлений. При оптимизации шаг  $P1$  равен 0,1кг/ кв.м.

Задача оптимизации параметров процесса «Детоксикация грунта сорбентом» состоит в определении оптимального расхода сорбента (скорости подачи сорбента  $P1$ ) при выполнении ТП как параметров функции от  $t$  в интервале  $t1 \leq t \leq t2$ , минимизирующих заданный мультипликативный обобщенный критерий-функционал (5).

Компьютерный эксперимент направлен на поиск оптимального расхода сорбента при выполнении процесса «Детоксикация грунта сорбентом» (рис. 5) и показателей экологической программы в среде MAPC (рис. 6).



Рис. 5. Алгоритм работы распылителя в ПОМ «Детоксикация грунта сорбентом».

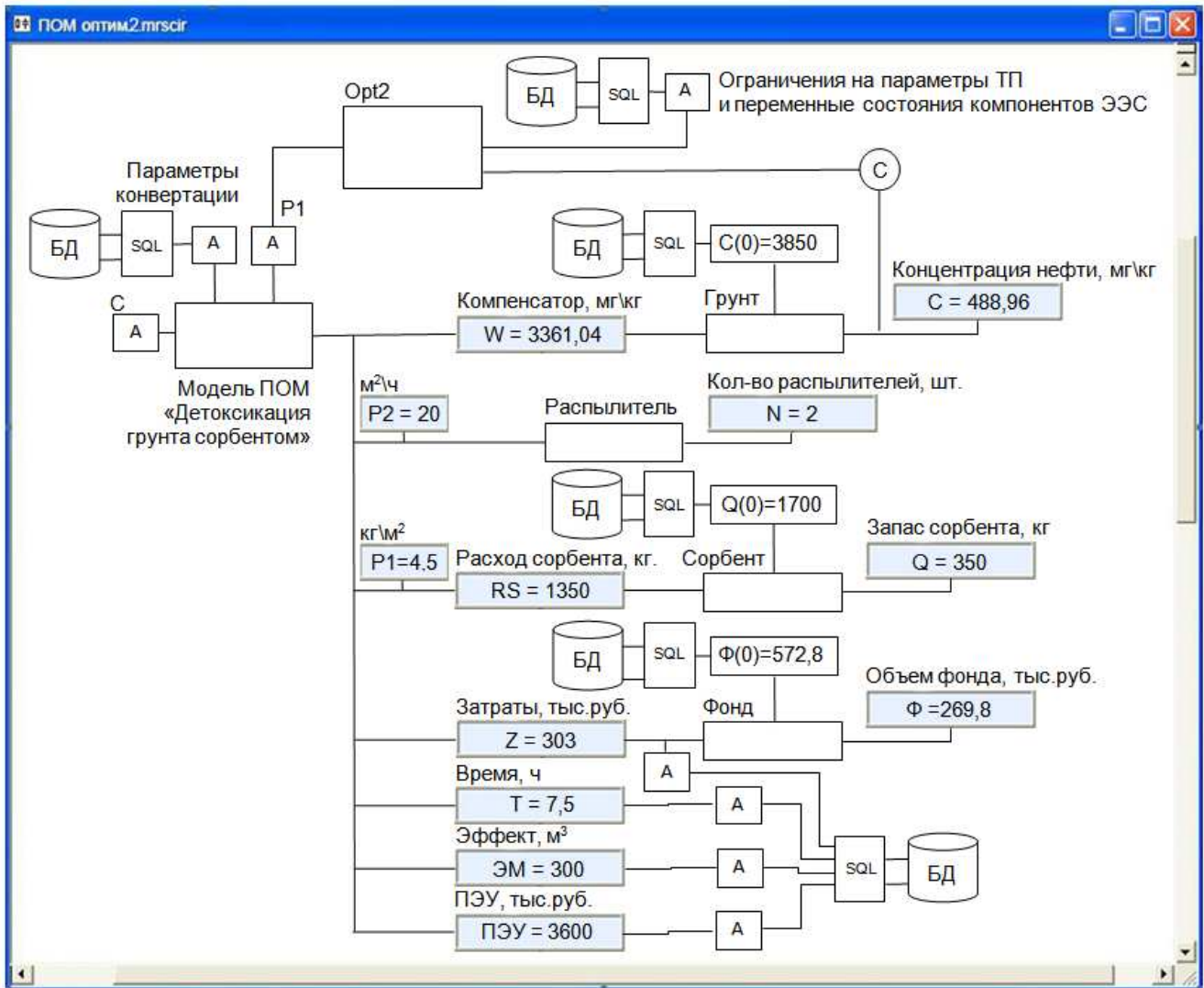


Рис. 6. Результат оптимизации расхода сорбента ПОМ «Детоксикация грунта сорбентом» в среде MAPS.

Сравним результаты моделирования без оптимизации и с таковой (табл. 4).

Таблица 4

Параметры ПОМ «Детоксикация грунта»	Без оптимизации	С оптимизацией
Темп подачи сорбента, кг/ кв.м	5	4,5
Расход сорбента, кг	1500	1350
Затраты, руб.	333	303
Эффективность мероприятия, м <sup>3</sup>	300	300
Предотвращенный экологический ущерб, руб.	3600	3600
Время, ч.	7,5	7,5

Определена скорость подачи сорбента  $P1 - 4,5$  кг/ кв.м. При этом расход сорбента составил 1350 кг. Затраты на выполнение ТП уменьшились на 30 тыс.руб.

Концентрация нефти в грунте снижена до значения  $C(t) = 488,96$  мг/кг, что не превышает  $C_{пдк} = 500$  мг/кг. Результаты моделирования можно использовать при описании фрагмента производственной экологической программы.

## Заключение

Предложенная методика имитационного моделирования деятельности предприятия в контексте синтеза производственных программ, с учетом экологического аспекта, предполагает реализацию компьютерной модели системы в виде компонентой цепи в среде MAPC. Методика основана на расширении формализма языка компонентных цепей для анализа эколого-экономических процессов и синтеза экологических программ.

Рассмотренные модели и алгоритмы эксперимента необходимы для понимания и достаточны для обоснования работоспособности предложенной методики имитационного моделирования в среде MAPC.

Для промышленной организации автоматизированного синтеза, в частности экологической программы предприятия, необходимо разработать библиотеку моделей процессов и комплексный алгоритм структурного синтеза программы с учетом технико-экономических возможностей предприятия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гурман В.И., Булдаев А.С., Расина И.В., Скитневский Д.М.* Проблемы и перспективы развития и применения социо-эколого-экономических моделей // Современный рынок товаров и услуг: проблемы и перспективы развития (Чтения памяти Н.Ф.Салацкого): Сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. (9 – 16 апреля 2012 г.). – Иркутск: Изд-во ООО «Мегапринт», 2012. – С. 273-379.
2. *Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В.* Модели и механизмы управления эколого-экономическими системами // Проблемы управления. – 2009. – № 1. – С. 2-7.
3. *Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Затик О.С.* Компьютерная модель эколого-экономической системы нефтегазодобывающего региона для формирования экологических программ // Информатика и системы управления. – 2011. – № 4. – С. 27-39.
4. *Ганджа Т.В., Панов С.А.* Задачи и архитектура подсистемы документирования исследований в среде многоуровневого моделирования MAPC // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2. – С. 334-338.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Шелупановым.*

*E-mail:*

*Дмитриев Вячеслав Михайлович – dmitriewvm@gmail.com ;*

*Ганджа Тарас Викторович – gandgatv@gmail.com;*

*Затик Ольга Сергеевна – olga\_sur@mail.ru.*