

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕМОНТНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОГО ФОНДА СКВАЖИН

*Проведен сравнительный анализ методов имитационного и аналитического моделирования на примере ремонтно-технического обслуживания скважинных систем нефтепромысла, оборудованных установками центробежных электронасосов. Рассмотрен процесс построения аналитической модели ремонтно-технического обслуживания механизированного фонда скважин. Показана достаточно высокая степень сходимости численных и аналитических расчетов.*

В поисках оптимального решения организации ремонтно-технического обслуживания (РТО) скважинных систем (СС) нефтепромыслов была разработана имитационная модель [3–5], позволяющая получать значения основных параметров РТО механизированного фонда скважин (среднее число работающих скважин, среднее число занятых ремонтных линий, средняя очередь на ремонт и т. д.) при задаваемых начальных условиях.

Известно, что системы имитационного моделирования более функциональны в использовании, представляют более точные результаты. Для проверки необходимо убедиться в сходимости результатов имитационных статистических испытаний с данными аналитических исследований по моделям теории массового обслуживания. Естественно, для соответствующего сопоставления настройка имитационной модели предельно упрощается, так как многообразие вариантов статистического моделирования не может поддерживаться схемами теории массового обслуживания.

Механизм построения аналитических моделей систем массового обслуживания рассмотрен в работах [1, 2], в том числе применительно к нефтедобывающей отрасли [6].

Рассмотрим построение аналитической модели РТО механизированного фонда скважин, оборудованных установками центробежных электронасосов (УЭЦН). В основу моделирования положим упрощенную схему (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема РТО СС нефтепромысла:

- 1 — эксплуатационный фонд скважин;
- 2 — очередь отказавшего оборудования для ремонта на БПО;
- 3 — база производственного обслуживания;
- 4 — склад исправных УЭЦН

Данная схема иллюстрирует следующий процесс. Отказавшая УЭЦН извлекается из эксплуатационной скважины 1 и доставляется на ремонтную линию базы производственного обслуживания (БПО) 3, в случае отсутствия свободных линий становится в очередь 2. Взамен отказавшей установки осуществляется монтаж исправной УЭЦН при наличии таковой на складе запасного оборудования 4. По окончании ремонтных работ на БПО восстановленная УЭЦН доставляется на склад.

Обозначим число эксплуатируемых скважин —  $N$ , число ремонтных линий на БПО —  $L$  и число запасного нефтедобывающего оборудования —  $M$ .

Осуществлять проверку имитационной модели будем путем сравнения следующих параметров: среднее число работающих скважин, среднее число УЭЦН в очереди на ремонт, среднее число УЭЦН на складе. Данные параметры рассчитываются по известным математическим выражениям через вероятности состояний системы РТО СС нефтепромысла  $P_i$  [1]. Например, среднее число работающих скважин месторождения определяется по следующей формуле:

$$N_{\text{раб}} = N(P_0 + P_1 + \dots + P_M) + (N - 1)P_{M+1} + \dots + 2P_{N-2} + P_{N-1},$$

где  $P_i$  — вероятность того, что  $i$  УЭЦН находятся в неисправном состоянии.

Таким образом, появляется задача отыскания вероятностей  $P_i$ , которые определяются из уравнений Колмогорова для вероятностей состояний [1]. Уравнения составляются по граф-схеме возможных состояний системы РТО механизированного фонда скважин. Для рассматриваемого случая (см. рис. 1), соответствующие ленточные граф-схемы состояний системы представлены на рис. 2 ( $M \geq L$ ) и 3 ( $L > M$ ).

На граф-схемах фиксируются возможные состояния системы  $S_i$  и связи, характеризующие интенсивность перехода из состояния  $S_i$  в сопредельные  $S_{i-1}$  и  $S_{i+1}$ .

В основе параметров интенсивности перехода в сопредельное состояние лежат характеристики средней скорости износа одной единицы оборудования  $\lambda$  и скорости ремонтно-восстановительных работ одной линии на БПО  $\mu$ , причем  $\lambda \ll \mu$ .

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{раб}}},$$

где  $T_{\text{раб}}$  — время наработки на отказ УЭЦН.

$$\mu = \frac{1}{T_{\text{рем}}},$$

где  $T_{\text{рем}}$  — время ремонта на линии БПО отказавшей УЭЦН.

В случае, когда число оборудования на складе не меньше числа ремонтных линий ( $M \geq L$ ), состояния системы будут следующими (см. рис. 2):

- $S_0$  — все скважины функционируют, на складе —  $M$  запасных УЭЦН, на БПО все ремонтные линии свободны;
- $S_1$  — все скважины функционируют, на складе —  $M-1$  запасных УЭЦН, на БПО одна ремонтная линия занята;
- $S_L$  — все скважины функционируют, на складе —  $M-L$  запасных УЭЦН, на БПО все ремонтные линии заняты, очередь на ремонт отсутствует;
- $S_{L+1}$  — все скважины функционируют, на складе —  $M-L+1$  запасных УЭЦН, на БПО все ремонтные линии заняты, одна УЭЦН в очереди на ремонт;
- $S_M$  — все скважины функционируют, на складе запасных УЭЦН нет, на БПО все ремонтные линии заняты,  $M-L$  УЭЦН в очереди на ремонт;
- $S_{M+1}$  — функционируют  $N-1$  скважин, на складе запасных УЭЦН нет, на БПО все ремонтные линии заняты,  $M-L+1$  УЭЦН в очереди на ремонт;
- $S_{M+N-1}$  — функционирует одна скважина, на складе запасных УЭЦН нет, на БПО все ремонтные линии заняты,  $M+N-L-1$  УЭЦН в очереди на ремонт;
- $S_{M+N}$  — все скважины не функционируют, на складе запасных УЭЦН нет, на БПО все ремонтные линии заняты,  $M+N-L$  УЭЦН в очереди на ремонт.

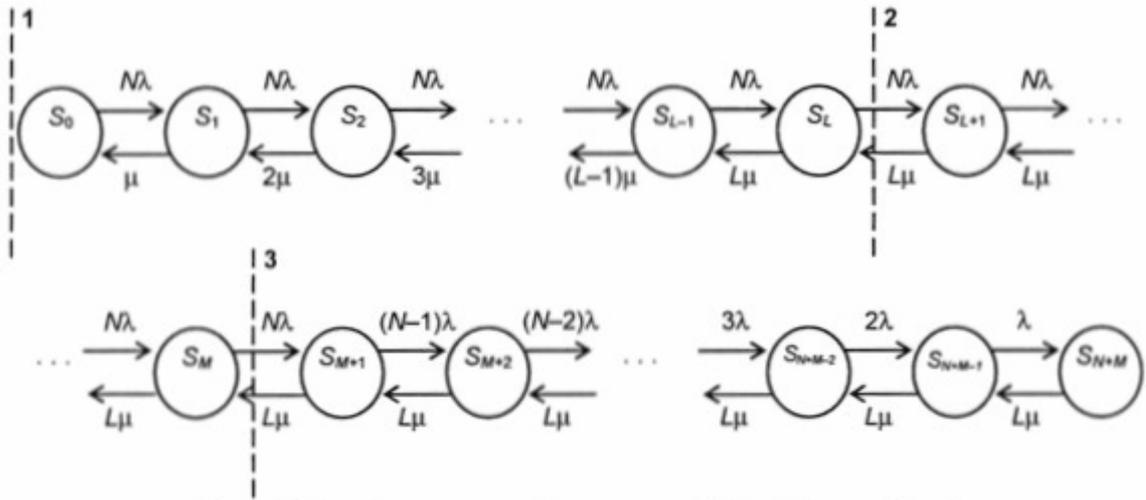


Рис. 2. Граф состояний системы РТО СС при  $M \geq L$

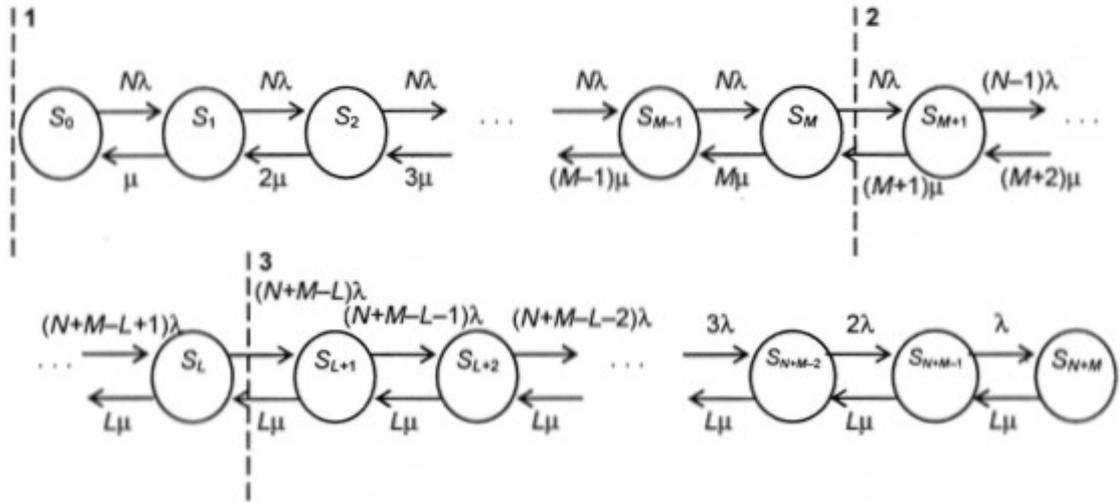


Рис. 3. Граф состояний системы РТО СС при  $L > M$

Рис. 2. Граф состояний системы РТО СС при  $M \geq L$

Рис. 3. Граф состояний системы РТО СС при  $L > M$

Вероятности этих состояний обозначим через  $P_0, P_1, \dots, P_{M+N}$  соответственно. Для определения расчетных формул вычисления данных вероятностей разобьем все состояния системы РТО СС нефтепромысла на три группы:

- 1) число неисправных УЭЦН не больше числа ремонтных линий,  $i \leq L$ ;
- 2) число неисправных УЭЦН больше числа ремонтных линий, но не больше числа запасных УЭЦН на складе,  $L < i \leq M$ ;
- 3) число неисправных УЭЦН больше числа запасных УЭЦН на складе,  $i > M$ .

Составим уравнения Колмогорова для вычисления финальных вероятностей по известному правилу [1].

Для группы  $i \leq L$ :

$$-N\lambda P_0 + \mu P_1 = 0;$$

$$N\lambda P_0 - (\mu + N\lambda)P_1 + 2\mu P_2 = 0;$$

$$N\lambda P_1 - (2\mu + N\lambda)P_2 + 3\mu P_3 = 0;$$

$$N\lambda P_2 - (3\mu + N\lambda)P_3 + 4\mu P_4 = 0 \text{ и т. д.}$$

Из первого уравнения выразим  $P_1$ :

$$P_1 = N \psi P_0,$$

где  $\psi = \frac{\lambda}{\mu}$  — коэффициент загрузки ремонтных линий;  
из второго —  $P_2$ :

$$P_2 = \frac{N^2 \psi^2}{2} P_0,$$

затем соответственно:

$$P_3 = \frac{N^3 \psi^3}{2 \cdot 3} P_0; \quad P_4 = \frac{N^4 \psi^4}{2 \cdot 3 \cdot 4} P_0 \text{ и т. д.}$$

Отсюда формула определения вероятности состояния  $P_i$  для  $M \geq L$ :

$$P_i^{11} = \frac{N^i \psi^i}{i!} P_0, \quad i \in \{0 \dots L\}, \text{ при } M \geq L.$$

Для других групп:

$$P_i^{12} = \frac{N^i \psi^i}{i! L^{(i-L)}} P_0, \quad i \in \{L+1 \dots M\}, \text{ при } M \geq L;$$

$$P_i^{13} = \frac{(N-1)! N^{(M+1)} \psi^i}{i! L^{(i-L)} (N+M-i)!} P_0, \quad i \in \{M+1 \dots N+M\}, \text{ при } M \geq L.$$

В случае, когда число ремонтных линий превышает число запасных УЭЦН на складе (см. рис. 3), расчетные формулы имеют следующий вид:

$$P_i^{21} = \frac{N^i \psi^i}{i!} P_0, \quad i \in \{0 \dots M\}, \text{ при } L > M;$$

$$P_i^{22} = \frac{(N-1)! N^{(M+1)} \psi^i}{i! (N+M-i)!} P_0, \quad i \in \{M+1 \dots L\}, \text{ при } L > M;$$

$$P_i^{23} = \frac{(N-1)! N^{(M+1)} \psi^i}{i! L^{(i-L)} (N+M-i)!} P_0, \quad i \in \{L+1 \dots N+M\} \text{ при } L > M.$$

Сравнивая полученные формулы вероятностей состояний  $P_i$  для случаев  $M \geq L$  и  $L > M$ , можно заметить, что они одинаковые при  $i \in \{0 \dots L\}$  (для  $M \geq L$ ) и  $i \in \{0 \dots M\}$  (для  $L > M$ ). Также равные зависимости оказались при  $i \in \{M+1 \dots N+M\}$  (для  $M \geq L$ ) и  $i \in \{L+1 \dots N+M\}$  (для  $L > M$ ).

В вышеприведенные формулы входит неизвестный параметр  $P_0$  — вероятность состояния системы при всех исправных УЭЦН, который находится из нормирующего условия

$$\sum_{i=0}^{N+M} P_i = 1$$

Отсюда

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{N+M} \frac{P_i}{P_0}}$$

При подстановке полученных выражений для  $P_i$  в правую часть вышеприведенной формулы вероятность  $P_0$  в знаменателе сократится.

Вычисления проводились при следующих исходных данных:

$N = 45$  — число скважин;

$M = 5$  — число запасных УЭЦН на складе;

$L = 4$  — число ремонтных линий на БПО;  
 $T_{\text{раб}} = 100$  — время наработки на отказ УЭЦН;  
 $T_{\text{рем}} = 7$  — время ремонта на линии БПО.

В ходе эксперимента изменялся один из трех параметров ( $T_{\text{раб}}$ ,  $L$  и  $M$ ) и вычислялись основные характеристики РТО СС нефтепромыслов:

$N_{\text{раб}}$  — среднее число работающих скважин;  
 $L_{\text{раб}}$  — среднее число занятых линий БПО;  
 $L_{\text{оч}}$  — среднее число УЭЦН в очереди на ремонт;  
 $M_{\text{раб}}$  — среднее число УЭЦН на складе.

Результаты имитационного моделирования и аналитических расчетов приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

**Результаты эксперимента  
при изменении времени наработки на отказ УЭЦН**

$T_{\text{раб}}$	0	1	5	10	20	50	75	100	150	300	500	Способ моделирования
$N_{\text{раб}}$	0,00	0,57	2,88	5,77	11,53	28,69	42,86	45,00	44,99	45,00	45,00	Имитационный
	–	0,57	2,86	5,71	11,43	28,56	40,36	44,00	44,90	45,00	45,00	Аналитический
$L_{\text{раб}}$	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,15	2,10	1,05	0,63	Имитационный
	–	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,77	3,08	2,10	1,05	0,63	Аналитический
$L_{\text{оч}}$	45,99	45,42	43,11	40,22	34,46	17,31	0,28	0,28	0,00	0,00	0,00	Имитационный
	–	45,43	43,14	40,29	34,57	17,44	1,41	1,41	0,21	0,01	0,00	Аналитический
$M_{\text{раб}}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	1,57	1,57	2,90	3,95	4,37	Имитационный
	–	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,51	1,51	2,80	3,94	4,37	Аналитический

Таблица 2

**Результаты эксперимента  
при изменении числа ремонтных линий на БПО**

$L$	0	1	2	3	4	5	10	20	Способ моделирования
$N_{\text{раб}}$	0,60	14,74	28,85	42,85	45,00	44,99	45,00	44,99	Имитационный
	–	14,29	28,57	40,53	44,00	44,62	44,84	44,84	Аналитический
$L_{\text{раб}}$	0,00	1,00	2,00	3,00	3,15	3,15	3,14	3,15	Имитационный
	–	1,00	2,00	2,84	3,08	3,12	3,15	3,15	Аналитический
$L_{\text{оч}}$	49,38	34,25	19,13	4,13	0,28	0,01	0,00	0,00	Имитационный
	–	34,71	19,43	6,08	1,41	0,38	0,00	0,00	Аналитический
$M_{\text{раб}}$	0,00	0,01	0,01	0,01	1,57	1,85	1,86	1,86	Имитационный
	–	0,00	0,00	0,55	1,51	1,88	2,01	2,01	Аналитический

Таблица 3

**Результаты эксперимента при изменении числа запасных УЭЦН на складе**

$M$	0	1	2	3	5	10	20	Способ моделирования
$N_{\text{раб}}$	42,01	42,93	43,90	44,81	45,00	45,00	45,00	Имитационный
	41,25	42,06	42,75	43,30	44,00	44,71	44,97	Аналитический
$L_{\text{раб}}$	2,94	3,01	3,07	3,13	3,15	3,15	3,14	Имитационный
	2,89	2,94	2,99	3,03	3,08	3,13	3,15	Аналитический
$L_{\text{оч}}$	0,04	0,04	0,01	0,02	0,28	0,89	0,62	Имитационный
	0,86	0,96	1,08	1,19	1,41	1,80	2,08	Аналитический
$M_{\text{раб}}$	0,00	0,00	0,00	0,05	1,57	5,96	16,24	Имитационный
	0,00	0,04	0,18	0,48	1,51	5,35	14,80	Аналитический

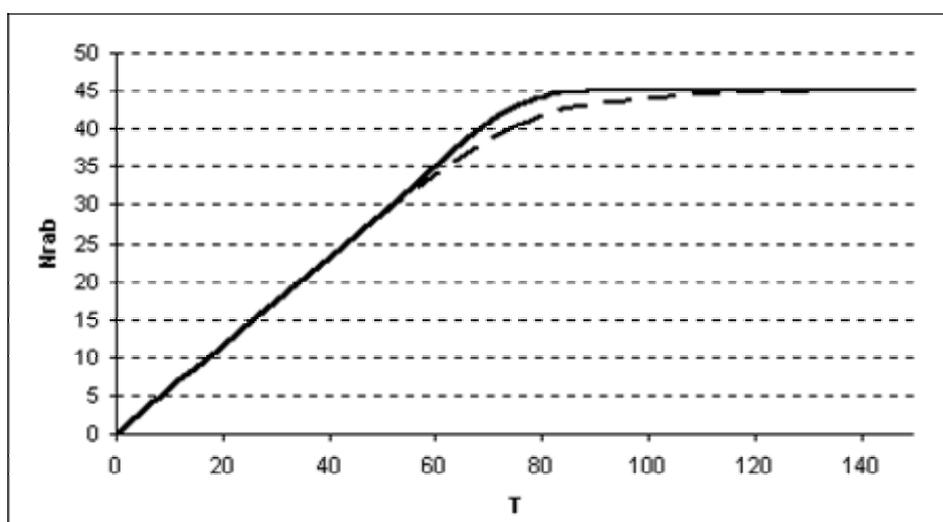
Зависимости среднего числа работающих скважин от времени наработки на отказ УЭЦН и числа запасных установок на складе графически представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о достаточно высокой степени сходимости численных и аналитических расчетов. Небольшое различие характеристик в переходных режимах объясняется, прежде всего, погрешностями методов моделирования, а также погрешностями счета малых величин.

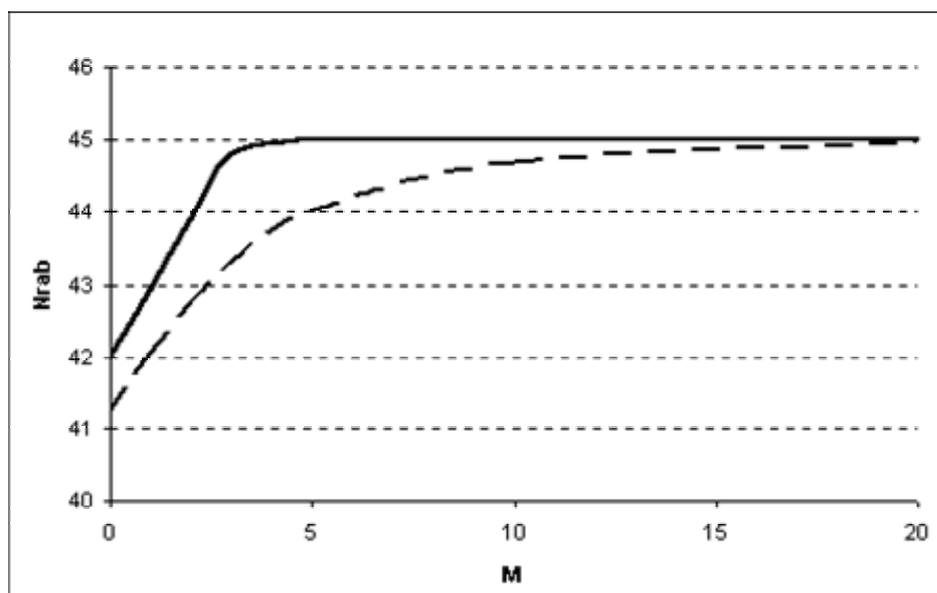
Показатели эффективности РТО СС нефтепромысла определяются главным образом

$$\Psi = \frac{N_{\text{ж}}}{L_{\text{ж}}}$$

отношением  $\Psi = \frac{N_{\text{ж}}}{L_{\text{ж}}}$ , в то время как влияние склада проявляется тогда, когда число УЭЦН в обороте немногим отличается от числа функционирующих скважин. Из примера следует, что при объеме склада выше 5 основные функциональные параметры РТО СС остаются практически неизменными и не зависят от дальнейшего увеличения складских запасов. Результаты моделирования свидетельствуют, что если отношение  $\Psi \leq 1$  не выполняется, то в пределе все множество работающего оборудования выстраивается в очередь на БПО, а следовательно, увеличение числа запасного оборудования дает лишь кратковременный положительный эффект.



**Рис. 4.** Зависимость среднего числа работающих скважин от времени наработки на отказ УЭЦН:  
1 — результаты имитационного моделирования;  
2 — результаты аналитических расчетов



**Рис. 5.** Зависимость среднего числа работающих скважин от числа запасных установок на складе

- от числа запасных УЭЦН на складе:  
1 — результаты имитационного моделирования;  
2 — результаты аналитических расчетов

Отметим преимущества и недостатки предложенных методов. Аналитическое моделирование выгодно отличается обозримостью результатов (конкретные формулы), но неприменимо для сложных процессов, когда не удается описать математическим языком влияние многих факторов. Имитационное моделирование, напротив, позволяет учесть множество различных параметров, влияние дисперсии возмущающих воздействий, но двигаться к оптимальным настройкам приходится «на ощупь», со значительной затратой машинного времени. Учитывая вышесказанное, в современных условиях все большее применение находит метод имитационного моделирования с использованием алгоритмов отыскания оптимального решения.

## Литература

1. *Вентцель Е. С.* Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972. 552 с.
2. *Кудрявцев Е. М.* Исследование операций в задачах, алгоритмах и программах. М.: Радио и связь, 1984. 184 с.
3. *Портнягин А. Л., Соловьев И. Г.* Разработка имитационной модели ремонтно-технического обслуживания // Международные и отечественные технологии освоения природных минеральных ресурсов. Материалы науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и научных работников (17–18 окт. 2002 г.). Астрахань: Изд-во Астрахан. гос. пед. ун-та, 2002.
4. *Портнягин А. Л., Власов Е. В.* Программный комплекс имитационного моделирования и анализа эффективности системы ремонтно-технического обслуживания скважинных систем нефтепромыслов // Роль информационных технологий в обучении: проблемы, перспективы, решения. Материалы обл. науч.-метод. конф. Тюмень: ТюмГНГУ, 2003.
5. *Портнягин А. Л.* Задачи оптимального обслуживания нефтепромыслового оборудования на основе имитационного моделирования // Новые информационные технологии в нефтегазовой промышленности и энергетике: Материалы междунар. науч.-техн. конф. 7–9 окт. 2003 г. Тюмень: ТюмГНГУ, 2003.
6. *Хачатуров В. Р., Астахов Н. Д., Вексельберг В. Ф., Кветкин В. С., Ливанов Ю. В.* Автоматизация проектирования систем производственного обслуживания в Западно-Сибирском нефтедобывающем регионе. М.: ВНИИОЭНГ, 1986.

*A. L. Portnyagin, V. V. Polozkov*

### *COMPARATIVE ANALYSIS WITH REGARD TO MODELING MAINTENANCE AND REPAIRS OF POWERED WELL STOCK*

*The article undertakes comparative analysis of simulation and analytical modeling methods basing on example of maintenance and repairs of oil wells supplied with centrifugal electric pumping units. The authors consider a process of creating an analytical model of maintenance and repairs of powered well stock demonstrating a good convergence between numerical and analytical results.*