

УДК 621.002:519.87

## АНАЛИТИЧЕСКО-ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МЕХАНООБРАБОТКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. Л.В. КУРЧ, Е.Р. НОВИЧИХИНА  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Предлагается компьютерная модель механообрабатывающих производственных систем на уровне рабочих позиций, участков или линий. Модель предназначена для оценки целесообразности применения новых видов высокотехнологичного инструмента, в частности на основе твердосплавных пластин с градиентной основой и многослойным структурированным покрытием. Модель позволяет быстро определить технико-эксплуатационные показатели производственной системы с конкурирующими вариантами инструмента. Прогнозируются выработка, производительность, коэффициент использования оборудования, структура простоев по различным причинам. Эти показатели могут выступать в дальнейшем как исходные данные для расчета общесистемного экономического эффекта. В зависимости от имеющихся исходных данных, от требуемой детализации, точности и оперативности анализа может быть выбран один из трех методов моделирования: расчет по формулам объемного временного баланса, моделирование марковских случайных процессов, имитационное моделирование. Отличительная особенность программного комплекса заключается в том, что для всех моделей используется унифицированная система входных, внутренних и выходных показателей и единый формат данных. Этим достигается преемственность и сравнимость результатов при переходе от одной модели к другой.*

**Введение.** Объектом исследования являются производственные системы (ПС) машино- и приборостроения на структурном уровне рабочих позиций, участков или линий. Область исследования – прогнозирование с помощью математического моделирования показателей функционирования ПС для сравнения различных вариантов используемого инструмента.

Ведущие производители металлорежущего инструмента предлагают все более совершенные материалы, конструкции и геометрию для своей продукции. Новые инструменты значительно повышают производительность обработки, имеют повышенный период стойкости и надежность, зачастую позволяют обходиться без смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Для достижения таких характеристик проводятся глубокие теоретические исследования, осуществляется широкий экспериментальный поиск, разрабатываются новейшие технологии. При этом сам инструмент становится наукоемкой и высокотехнологичной продукцией. Например, большинство твердосплавных пластин компании Sandvik Coromant имеет основу, полученную по технологии градиентного спекания, и многослойное покрытие, выполненное по технологии напыления PVD или MTCVD. Метод MTCVD позволяет получать покрытия толщиной 10...12 мкм, состоящее из 15...20 промежуточных слоев, сформированных таким образом, что образуется упорядоченная столбчатая структура. Это позволяет увеличить производительность обработки до 60 % или уменьшить расход инструмента при сохранении производительности. Пластины этой же компании, выполненные по технологии Wiper, имеют вместо обычного округления вершины радиусом по стандарту ISO несколько различных радиусов, сопряженных сложной интерполяционной кривой. Это позволяет увеличить подачу в 2 раза при сохранении заданной шероховатости.

Естественно, что такой высокотехнологичный инструмент дорог. Вопросов не возникает, когда суммарная стоимость нового инструмента оказывается меньшей, за счет сокращения его требуемого количества. В этом случае имеет место очевидный локальный эффект. Например, годовой экономический эффект от применения пластин с упомянутым структурированным покрытием марки GC 4225 при обработке на одном станке детали типа «зубчатое колесо» из низколегированной стали с программой выпуска 36 000 штук составляет более 1000 долларов по сравнению с также достаточно современным покрытием GC 4025. В ряде случаев такой явный локальный эффект для нового дорогостоящего инструмента отсутствует. Это, однако, еще не означает его нецелесообразность, о чем свидетельствует практика широкого применения высокотехнологичного инструмента в развитых странах. Дело в том, что замена инструмента на высокотехнологичный влечет ряд производных благоприятных изменений в ПС: повышение производительности и коэффициента использования оборудования, уменьшение потерь от брака, сокращение простоев при переналадке и техническом обслуживании, снижение общей трудоемкости инструментального обеспечения и пр. Все это имеет экономическое выражение и может обуславливать положительный эффект в рамках всей системы.

Расчет общесистемного экономического эффекта не представляет сложностей [1], однако для него требуются исходные данные в виде технико-эксплуатационных показателей работы конкурирующих вариантов ПС. Такие показатели на период обоснования отсутствуют и могут быть получены только математическим моделированием. Разработке такой специализированной модели и посвящено данное исследование.

Центральным вопросом при создании модели является выбор метода моделирования. В монографии [2] приведен обзор и анализ методов моделирования применительно к ПС. В общем случае аналитические модели более универсальные и менее трудоемкие, а имитационные более точные и информативные.

Целью исследования является объединение достоинств аналитического и имитационного моделирования ПС в одном программном комплексе.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) обосновать состав моделей в программном комплексе и выбрать методы моделирования;
- 2) предложить унифицированную систему показателей ПС для всех моделей комплекса;
- 3) разработать единый интерфейс многомодельного программного комплекса.

**Методика исследования.** В исследовании использовалась методология системного анализа и исследования операций. В разработанной программе используется аналитическое моделирование марковских случайных процессов (МСП) с дискретными состояниями и непрерывным временем, имитационное моделирование (ИМ) дискретно-событийного типа. Из предметных областей технологии машиностроения и организации производства использовались положения теорий производительности и надежности, методы технического нормирования, объемного временного баланса и оценки эффективности.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Средние значения всех показателей функционирования ПС могут быть получены, имея долевые коэффициенты  $K_i$  (или вероятности  $P_i$ ) нахождения основного технологического оборудования в каждом  $i$ -м состоянии из возможных. Например, имея значение коэффициента использования оборудования по машинному времени обработки  $K_{\text{маш}}$ , можно рассчитать для ПС среднюю производительность ( $U$ ), среднюю выработку ( $N$ ) и среднюю длительность производственного цикла выполнения заказа ( $T_{\text{ц}}$ ):

$$U = 60 K_{\text{маш}} W_{\text{РП}} / W_{\text{оп}} / t_{\text{маш}} \text{ (шт./ч)},$$

$$N = U T_{\text{ф}} \text{ (шт.)},$$

$$T_{\text{ц}} = (t_{\text{маш}} Q / K_{\text{маш}} / W_{\text{дубл}} + T_{\text{ож.зап}}) W_{\text{оп}} / 60 \text{ (ч)},$$

где  $t_{\text{маш}}$  – среднее машинное время технологической операции (мин);  $W_{\text{РП}}$  – количество обрабатывающих рабочих позиций (РП) в ПС;  $W_{\text{оп}}$  – среднее количество операций в технологическом маршруте;  $T_{\text{ф}}$  – средний фонд рабочего времени оборудования для анализируемого периода (ч);  $Q$  – средний размер партии запуска (шт.);  $W_{\text{дубл}}$  – средняя кратность дублирования РП при диспетчировании;  $T_{\text{ож.зап}}$  – среднее время нахождения операционной партии в ожидании запуска (мин).

Аналогично, имея значение коэффициента простоев оборудования по причине технического обслуживания  $K_{\text{т.об}}$ , можно оценить суммарную трудоемкость этих работ, количество требуемого персонала и затрат на заработную плату.

Таким образом, задачу программного комплекса можно свести к модельному определению значений  $K_i$ . Специализация моделей будет заключаться только в точности и детальности анализа (таблица).

Характеристика моделей комплекса

Признак	Тип модели		
	алгебраическая	марковская	имитационная
Степень идентификации результатов	Усредненные для всей ПС	Для гипотетической средней РП	Для конкретных РП
Учет времени (динамичность)	Статическая модель – результаты не зависят от времени	Стационарная модель – результаты для установившегося режима	Динамическая модель – результаты на конкретный период
Учет случайностей	Детерминированная модель	Стохастическая модель, экспоненциальные законы распределения	Стохастическая модель, заданные законы распределения
Учет особенностей алгоритма работы РП	Отсутствует	Имеется	Имеется
Учет колебаний размера и периодичности партий	Отсутствует	Имеется	Имеется
Учет поддетального прохождения партий	Отсутствует	Отсутствует	Имеется
Возможность оценки дисперсии результатов	Отсутствует	Отсутствует	Имеется

Первая из моделей комплекса, будем называть ее алгебраической, предназначена для укрупненно-оперативного анализа.

Для такого анализа достаточно рассмотреть период, равный средней длительности производственного цикла операционной партии  $t_{ц}$ :

$$t_{ц} = [(t_{маш} + t_{у-с} + t_{изм} + t_{т.о} + t_{о.о} + t_{отд} + t_{нак}) q + t_{тр} + t_{схр}] Q/q (1 + B) + t_{пер} + t_{рем} + t_{орг} + t_{о.р}, \quad (1)$$

где  $t_{маш}$  – время машинное (работы по управляющей программе);  $t_{у-с}$  – время установки, снятия и закрепления детали;  $t_{изм}$  – время измерений;  $t_{т.о}$  – время технического обслуживания в процессе обработки;  $t_{о.о}$  – время организационного обслуживания в течение смены;  $t_{отд}$  – время на отдых и естественные потребности;  $t_{нак}$  – время простоя при приемке-выдаче локального накопителя;  $t_{тр}$  – время простоя при транспортном обслуживании;  $t_{схр}$  – время простоя из-за неполной синхронизации со смежными операциями (голодание, блокировка);  $t_{пер}$  – время переналадки (подготовительно-заключительное);  $t_{рем}$  – время ремонта РП, приведенное к  $t_{ц}$  с сохранением коэффициента готовности;  $t_{орг}$  – время простоя по организационным и прочим причинам;  $t_{о.р} = (t_{нед} + t_{ож})$  – время отсутствия работы, вызванное недостаточностью заказов в плане или ожиданием плановых заказов из-за неритмичности их поступления;  $q$  – размер транспортной партии;  $B$  – доля брака. Значения  $t_{маш}$ ,  $t_{у-с}$ ,  $t_{изм}$ ,  $t_{т.о}$ ,  $t_{о.о}$ ,  $t_{отд}$  и  $t_{нак}$  в (1) соответствуют нормам времени на одну деталиеоперацию.

Варианты инструментального обеспечения могут влиять на значения следующих компонентов формулы (1):  $t_{маш}$  – за счет повышения производительности;  $t_{изм}$  – за счет уменьшения периодичности контроля;  $t_{т.о}$  – за счет снижения трудоемкости работ по смене изношенного инструмента и подналадке;  $t_{схр}$  – за счет расшивки узких мест путем ужесточения режимов;  $t_{пер}$  – за счет устранения необходимости смены и настройки более универсального инструмента;  $t_{орг}$  – за счет сокращения номенклатуры применяющегося инструмента;  $t_{рем}$  и  $B$  – за счет повышения надежности инструмента.

Интересующие значения долевых коэффициентов находятся по формуле:

$$K_i = T_i / t_{ц},$$

где  $T_i$  – суммарное время пребывания оборудования в  $i$ -м состоянии за период  $t_{ц}$ , например,  $T_{маш} = t_{маш} Q$ ,  $T_{тр} = t_{тр} Q / q$ ,  $T_{пер} = t_{пер}$ .

Алгебраическая модель оперирует средними и номинальными значениями исходных данных. Если некоторые из них отсутствуют, то в программе предусмотрены значения по умолчанию, соответствующие среднестатистическим или нормативным значениям.

Вторая из моделей комплекса – *марковская*. Она применяется, если имеется более детальная информация по вариантам и время на подготовку исходных данных в нужной форме. Модель базируется на непосредственном использовании уравнений Колмогорова для МСП. Это обеспечивает ей большую общность, гибкость и информативность по сравнению с другими разновидностями МСП, например, моделями теории массового обслуживания или стохастических сетей. Последние используют формулы решения системы уравнений в конечном виде, но только для частного случая – схемы гибели и размножения.

Показатели функционирования всей ПС рассчитываются по результатам моделирования работы одной «средней» РП, которая по поведению и характеристикам является типичным представителем остальных РП. Это может быть одна из реальных РП системы или РП, сформированная гипотетически. Функционирование средней РП описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова, неизвестными в которых выступают вероятности нахождения РП в каждом из возможных состояний во времени. Вид уравнений:

$$\frac{dP_i}{dt} = \sum_{j=1}^J \lambda_{ji} P_j - \sum_{l=1}^L \lambda_{il} P_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (2)$$

где  $i$  – номер рассматриваемого состояния;  $N$  – общее количество состояний;  $J, j$  – количество и номер состояний, предшествующих  $i$ -му;  $L, l$  – количество и номер состояний, следующих за  $i$ -м;  $P_i, P_j$  – вероятности пребывания объекта в  $i$ -м и  $j$ -м состояниях;  $\lambda_{ji}, \lambda_{il}$  – интенсивности переходов из  $j$ -го состояния в  $i$ -е и из  $i$ -го состояния в  $l$ -е.

Для стационарного режима работы ПС левые части уравнений (2) обращаются в 0, и они из дифференциальных превращаются в алгебраические. Для возможности аналитического решения такой системы уравнений одно из них заменяется очевидным нормировочным условием:

$$\sum_{i=1}^N P_i = 1. \quad (3)$$

Найденные значения  $P_i$  соответствуют интересующим нас значениям долевых коэффициентов  $K_i$ .

Для формирования уравнений Колмогорова используется связный, ориентированный, размеченный и взвешенный граф состояний РП, пример которого представлен на рисунке 1.

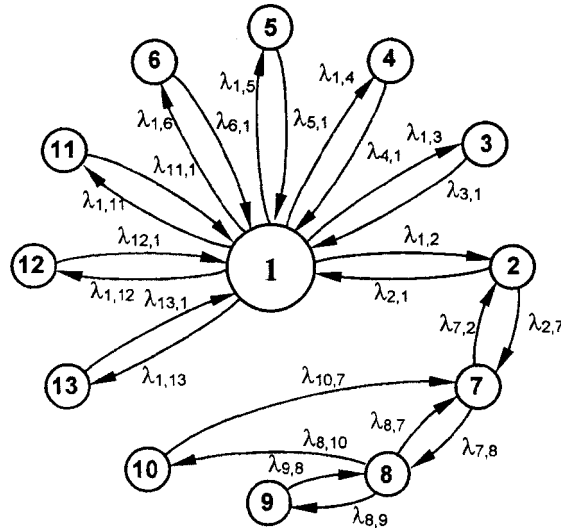


Рис. 1. Граф состояний рабочих позиций в производственных системах

В нашем случае количество уравнений Колмогорова составляет 13 по числу состояний. Состав состояний соответствует компонентам с обозначением  $t$  в правой части формулы (1), сокращенное название состояний – нижним индексам при  $t$ , а номера состояний  $i$  – порядковому номеру компонента  $t$  в формуле (1). Например, состояние РП № 10 ( $i = 10$ ) соответствует состоянию переналадки. Инструментальное обеспечение может сказываться на длительности пребывания РП в состояниях с номерами 1, 3, 4, 9...12 (см. комментарии к формуле (1)), т.е. на значении интенсивностей  $\lambda$  соответствующих переходов.

Хотя количество состояний в программе зафиксировано, при необходимости можно учитывать и другие состояния, объединяя их с уже имеющимися, близкими по смыслу. При этом следует пересчитать значения интенсивностей согласно свойству суперпозиции простейших потоков событий:

$$\lambda = \sum_{k=1}^K \lambda_k,$$

где  $k$  и  $K$  – номер и количество объединяемых состояний.

В отличие от алгебраической модели, марковская модель учитывает случайный характер событий и величин, а также особенности алгоритма прямого управления РП. Например, на графе (см. рис. 1) отражена ситуация, когда измерение параметров качества обработанной детали (состояние 3) производится на станке до ее снятия. Если бы измерение производилось на вынесенном автоматическом устройстве с доставкой к нему детали роботом, то дуги  $\lambda_{1,3}$  и  $\lambda_{3,1}$  на графе отсутствовали бы, но добавились бы дуги  $\lambda_{2,3}$  и  $\lambda_{3,2}$ . Соответственно, изменится вид уравнений (2) для состояний № 1...№ 3 и результаты в целом.

Третья из моделей комплекса – имитационная. Она применяется, когда есть основания полагать, что отличия процессов в ПС от марковских существенно влияют на результат.

Модели МСП исходят из допущения о простейшем (пуассоновском) характере потоков событий в системе. Потоки должны обладать свойствами ординарности, стационарности и отсутствия последовательности. Закон распределения времени наступления и длительности событий должен быть экспоненциальным. Для ПС такие условия не вполне реалистичны. Действуют обратные связи и блокировки, т.е. многие события являются зависимыми. Чаше детали поступают партиями, т.е. имеют место неординарные заявки. Некоторые величины не являются случайными. Например, можно допустить, что машинное время обработки  $t_{\text{маш}}$  меняется от партии к партии случайным образом, но для всех деталей одной партии оно должно оставаться одинаковым, так как однозначно регламентировано технологическим процессом и физически определяется постоянной длительностью данной управляющей программы ЧПУ. Часть случайных величин не подчиняются экспоненциальному закону распределения. Например, экспериментально установлено, что период стойкости для упомянутого инструмента со структурированным покрытием подчиняется нормальному закону [1]. Большинство случайных величин с любыми законами распределения не может быть описано без смещения и усечения. Например, для станка с ЧПУ время обработки

меньшее определенное значения экономически невыгодно и не применяется. Понятно, что в номенклатуре деталей данной ПС имеется ограничение времени обработки и сверху. Все эти особенности учитываются в имитационной модели.

Как и в марковской модели, объектом первоначального анализа ИМ является отдельная РП. Это может быть та же средняя РП или любая заданная, например, выпускная или лимитирующая. При необходимости можно перебрать все рабочие позиции ПС. При этом рассматриваются те же 13 состояний РП, что и в модели МСП, однако процесс представляется более реалистично. Кроме того, учитывается не только состояние оборудования, но и отражаются этапы прохождения операционных партий и отдельных деталей через него (рис. 2).

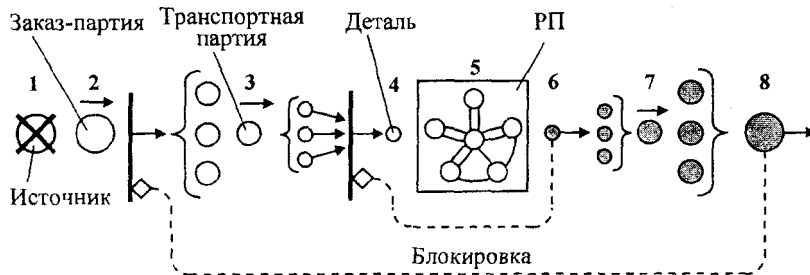


Рис. 2. Схема имитации

Как видно из рисунка 2, процесс имитации несколько отличается от классического дискретно-событийного подхода. Наряду с разомкнутой схемой продвижения транзактов (партий и деталей) используется замкнутая схема имитации внутри РП (см. рис. 2, этап 5) на графе состояний оборудования (см. рис. 1), который формировался для модели МСП.

Такой подход обеспечивает имитационной модели достоинства, присущие марковской модели, а именно универсальность и возможность задавать различные алгоритмы функционирования РП параметрически без перепрограммирования.

По сравнению с марковской моделью имитационная модель отражает процесс и условия ПС более детально и точно.

**Практическая реализация результатов исследования.** Модельный комплекс реализован в виде программы PIMMS\_Poz с единым для всех моделей интерфейсом. Его основу составляет бланк матрицы смежности состояний РП (рис. 3).

**Смежность состояний**

Состояния	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Обработка (Тмаш)													
Установка-снятие													
Измерения													
Тех. обслуживание													
Орг. обслуживание													
Отдых													
Приемка-выдача накл.													
Транспортн. простои													
Простои несинхрониз.													
<b>Переналадке</b>													
Ремонт													
Орг. и прочие простои													
Отсутствие работы													

**Переход 10 → 7**

Ср. вр. до выхода из состояния: 50  
 Интенсивность (1/мин): 0.02  
 Закон распределения: Гамма  
 Параметры: полож (α): 20, масштаб (β): 10, форма (α): 3

Принять для всех один закон  
 нет С Д О Р С Н С З С Г С Т

показать все времена  
 показать все законы

**Плотность**

Рис. 3. Фрагмент экранной формы для задания переходов

На бланке отмечаются переходы, имеющие место по алгоритму работы РП данной ПС. Для перехода, образованного перекрестием выделенных состояний, задаются или отражаются вид и параметры закона распределения времени перехода:

- для алгебраической модели доступен только детерминированный закон;
- для марковской – только экспоненциальный;
- для имитационной – детерминированный, равномерный, нормальный, экспоненциальный и закон гамма-распределения;
- для эмпирических распределений, несовпадающих ни с одним из стандартных, предусмотрено задание закона в табличной форме.

По заполненному бланку автоматически формируется граф переходов РП.

Если выбрана марковская модель, то автоматически составляется система уравнений Колмогорова и решается методом LU-разложения.

Если выбрана имитационная модель, то начинается прогон, в котором задействовано 14 генераторов случайных чисел. Значение времени моделирования по умолчанию соответствует периоду входа ПС в установившийся режим работы. Это значение рассчитывается по следующей эмпирически установленной зависимости:

$$T_{\text{уст}} = [(Q - 269 \ln d) t_{\text{маш}} \rho^{-1} + 0,2] \cdot 10^4 \text{ (мин)},$$

где  $d$  – допустимая погрешность оценки величины  $K_{\text{маш}}$ ;  $\rho$  – планируемый коэффициент загрузки основного технологического оборудования.

Зависимость справедлива в следующих диапазонах исходных данных:  $Q = [1; 2000]$  шт.;  $d = [0,0005; 0,05]$ ;  $t_{\text{маш}} = [0,2; 125]$  мин;  $\rho = [0,1; 1]$ .

Программная модель внедрена в постоянную эксплуатацию и используется представителем компании Sandvik Coromant в Республике Беларусь в качестве штатного инструмента обоснования технических предложений для потенциальных заказчиков металлорежущего инструмента. Программа является дополнением и поставщиком исходных данных для другой штатной программы этой компании Productivity Analyzer 3.7.0, которая оценивает общесистемный эффект инструментального обеспечения.

**Заключение.** Результатом проведенного исследования явилась разработка программного комплекса для прогнозирования показателей функционирования ПС с различными вариантами инструментального обеспечения. Применение комплекса позволяет повысить объективность и убедительность обоснования предлагаемых решений, в частности по применению твердосплавного инструмента со структурированным покрытием. Практическое использование комплекса при работе с заказчиками инструмента подтвердило его полезность и дружелюбность.

#### Выводы:

1) в программном комплексе указанного назначения достаточно иметь модели 3 видов: алгебраическую – для укрупненного и оперативного анализа; марковскую – для более детального и точного анализа; имитационную – для наиболее точного и информативного анализа;

2) в качестве универсальной системы показателей для всех моделей комплекса целесообразно использовать долегие коэффициенты нахождения оборудования в различных состояниях, при этом минимально достаточный состав таких состояний должен содержать 13 позиций и отражать общепринятые компоненты объемного временного баланса;

3) в качестве единого программного интерфейса для моделей комплекса можно рекомендовать экраный бланк, отражающий матрицу смежности состояний оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Курч, Л.В. Техничко-экономический анализ на основе моделирования показателей эффективности технологических процессов на Минском тракторном заводе / Л.В. Курч, И.А. Варварина // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Д. Экономические и юридические науки. – 2006. – № 8. – С. 77 – 84.
2. Новичихин, Р.В. Моделирование производственных систем обработки деталей в машино- и приборостроении / Р.В. Новичихин, Е.Р. Новичихина. – Минск: БНТУ, 2010. – 309 с.

Поступила 09.09.2010

#### ANALYTICAL-SIMULATION MODEL OF PRODUCTION MACHINE PROCESSING SYSTEMS FOR INSTRUMENTAL PROVISION EFFICIENCY ESTIMATION

L. KURCH, E. NOVICHIKHINA

*It is offered computer model of production machine processing systems at the level of workstation, area or line. The model is intended to estimate the practicability of using new type high-tech instrument, in particular based on hard-facing alloy plates with multilayered structured covering. The model allows fast defining the technician-working factors of the production system with rival variant of the instrument. It is forecasted production, capacity, tool utilization, structure of idle time on various reasons. These factors can be used further as initial data for calculation economic effect of all system. Depending on available initial data, required detailing, accuracy and efficiency analysis it can be chose one of three methods of modeling: calculation on formula volume time balance, modeling Markov random processes, simulation modeling. The discriminating particularity of the program complex is the using of unified system of input, internal and output factors and united format of data. It allows to reach receivership and comparability of the result when turning from one model to another.*