

УДК 004.942

## ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКЛАДСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МНОГОВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ

**Башарина О.Ю., Феоктистов А.Г.**

*ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН»,  
Иркутск, e-mail: basharinaolga@mail.ru*

В настоящее время многие складские комплексы сталкиваются с проблемой рационального планирования использования своих объектов. Это особенно характерно, например, для целого класса хладокомбинатов советской эпохи, расположенных на всем протяжении Транссибирской железнодорожной магистрали и по-прежнему представляющих существенную долю на российском рынке холодильных услуг. Актуальность данной проблемы обусловлена увеличением сложности и динамики бизнеса компаний как регионального, так и национального масштаба, которые нуждаются в постоянном или временном использовании складских помещений различного назначения с широким спектром эксплуатационных характеристик. При этом требования клиентов могут изменяться непредсказуемо. Таким образом, возникает необходимость разработки методов и средств, которые позволили бы оперативно оценивать и гибко модифицировать использование складских объектов. В общем случае такая задача является NP-трудной. Она требует применения высокопроизводительных вычислений. В связи с этим в статье представлено специализированное приложение, разработанное для решения вышеупомянутой задачи. Рассмотрена схема базы данных, а также научный рабочий процесс, реализующий план решения задачи. Результаты практического применения приложения позволили существенно повысить эффективность складских объектов.

**Ключевые слова:** склад, использование помещений, моделирование, многовариантные расчеты, высокопроизводительные вычисления

## PLANNING THE PROCESS OF WAREHOUSE OBJECT USE BASED ON PARAMETER SWEEP COMPUTATIONS

**Basharina O.Yu., Feoktistov A.G.**

*Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Irkutsk,  
e-mail: basharinaolga@mail.ru*

Nowadays, many warehouses are faced with the problem of rational planning warehouse space utilization. For example, this is especially true for a whole class of Soviet-era refrigeration complexes located along the entire length of the Trans-Siberian railway and still representing a significant share in the Russian refrigeration market. The relevance of this problem is due to the increase in the complexity and dynamics of the business of companies of both the regional and national scales, which require permanent or temporary use of warehouse facilities for various purposes with a large spectrum of operational characteristics. At the same time, customer requirements can change at unpredictable times. Thus, there is a need to develop methods and tools that would make it possible to quickly evaluate and flexibly modify warehouse space utilization. In general, such a problem is NP-hard. It requires high-performance computing. In this regard, we represent a specialized application developed to solve the aforementioned problem. The database schema and scientific workflow that implements the problem-solving are considered. The results of practical applying the application made it possible to significantly increase the efficiency of warehouse space.

**Keywords:** warehouse, space utilization, modeling, parameter sweep computations, high-performance computing

Рост товаропотребления оказывает существенное влияние на складской сектор в экономике. Склады являются важными компонентами в цепочках поставок товаров. Повышение эффективности их использования является насущной проблемой любого современного склада. Необходимость оптимизации использования складских объектов возникает как на стадии проектирования складов, так и в процессе их эксплуатации [1].

Склады предназначены для приема, частичной обработки, хранения, сортировки и распространения продукции. Основными задачами оптимизации работы складов являются повышение их производительности и снижение затрат на предоставляемые ими услуги. Большое число

изменяющихся во времени структурных и параметрических особенностей складских процессов, которые оказывают непосредственное влияние на показатели производительности и стоимости складских операций, чрезвычайно увеличивают вычислительную сложность решения задачи оптимизации использования складских помещений [2]. Это в свою очередь ведет к необходимости методов и средств решения задачи, обеспечивающих применение высокопроизводительных вычислительных ресурсов [3]. В современных системах моделирования складской логистики [4–7], доступных для массового применения при решении научных и прикладных задач, такие возможности, как правило, ограничены.

Целью исследования является разработка методов и средств планирования использования складских объектов. Методы и средства, разрабатываемые для решения данной задачи, базируются на применении многовариантных расчетов с использованием высокопроизводительных вычислений. Они реализуются в виде специализированного приложения и обеспечивают возможность оперативного проведения экспериментов.

*Приложение для планирования использования складских объектов*

Процесс моделирования склада включает два основных этапа. На первом этапе решается прямая задача выбора стратегии управления складскими операциями и оптимизации основных показателей работы склада путем исследования его аналитической модели с использованием распределенных вычислений для проведения многовариантных расчетов. На следующем этапе решается обратная задача, заключающаяся в определении параметров выполнения складских операций с учетом найденных оптимальных показателей работы склада и выбранных стратегий управления им.

Выбранная стратегия управления обуславливает формирование расписания обслуживания клиентов. В качестве исходных данных для генерации различных вариантов расписаний обслуживания клиентов в процессе моделирования используются ретроспективные данные о работе склада.

Многокритериальная оптимизация выполняется с использованием статистических данных, получаемых путем воспроизведения работы склада во времени с помощью имитационного моделирования с сохранением логической структуры, связей между событиями и последовательности протекания их во времени. Моделирование выполняется с учетом большого числа технологических характеристик процесса функционирования моделируемого объекта. Результаты моделирования фиксируются в базе расчетных данных и обрабатываются в дальнейшем с помощью различных универсальных и/или специализированных статистических пакетов. На рис. 1 приведен пример схемы базы данных с описанием предметной области (процессов работы склада).

В схеме базы данных выделены следующие основные таблицы:

- Table1 – данные о клиенте (поля: наименование, уровень обслуживания);
- Table2 – уровни обслуживания клиентов (поля: наименование, стоимость погрузочно-разгрузочных работ, стоимость хранения, минимальный объем хранения);
- Table3 – температурный режим (поля: наименование, температура, влажность);
- Table4 – товарные зоны (поля: наименование);
- Table5 – сведения о складских помещениях (поля: наименование, температурный режим, площадь, высота, кладовщик);

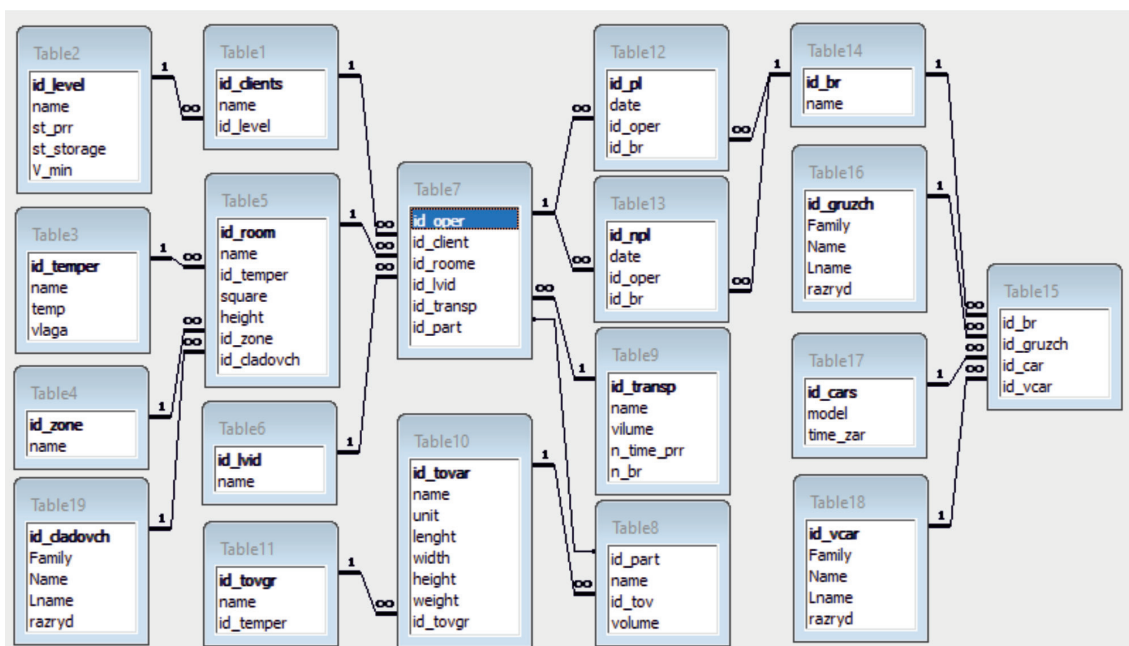


Рис. 1. Схема базы данных с описанием предметной области

– Table6 – вид логистической операции (поля: наименование);

– Table7 – сведения о входных и выходных материальных потоках (поля: партия, клиент, помещение, вид транспортного средства, вид логистической операции);

– Table8 – партия товара (поля: наименование, товар, объем);

– Table9 – данные о видах транспортных средств (поля: наименование, грузоподъемность, норма времени проведения погрузочно-разгрузочных работ, требуемое число бригад);

– Table10 – данные о товаре (поля: наименование, единица измерения, длина, ширина, высота упаковки, товарная группа);

– Table11 – данные о товарной группе (поля: наименование, температурный режим);

– Table12 – сведения о плановых заявках (поля: дата/время, логистическая операция, назначенная бригада);

– Table13 – сведения о случайных заявках (поля: дата/время, логистическая операция, бригада);

– Table14 – сведения о бригадах рабочих (поля: наименование);

– Table15 – состав бригады (поля: грузчики, электропогрузчики, водители);

– Table16 – сведения о грузчиках (поля: фамилия, имя, отчество, разряд);

– Table17 – сведения об электропогрузчиках (поля: модель, время зарядки аккумулятора);

– Table18 – сведения о водителях (поля: фамилия, имя, отчество, разряд);

– Table19 – сведения о кладовщиках (поля: фамилия, имя, отчество, разряд).

Схема расчетной базы данных включает следующие таблицы (рис. 2):

– Table20 – сведения о вычислительном эксперименте (поля: имя модели, время начала, время окончания, время выполнения, входные и выходные параметры, используемый вычислительный ресурс, метод многокритериального выбора);

– Table21 – расчетные значения параметров складских помещений (поля: вычислительный эксперимент, складское помещение, температура, влажность);

– Table22 – расчетные значения параметров товаров (поля: вычислительный эксперимент, клиент, товар, количество, складское помещение).

В базе расчетных данных хранится информация обо всех экспериментах. При подготовке расчетов можно загружать данные предыдущего эксперимента, корректировать и использовать их в новом эксперименте. База расчетных данных определенный период времени содержит теку-

щую информацию о работе склада. Затем она переводится в статус ретроспективной информации. Так как она характеризуется большими размерами, предполагается использовать циклическую базу данных, в которой информация о процессах и объектах усредняется и сжимается по прошествии определенных периодов времени. Данная информация будет собираться и обрабатываться специализированной системой мониторинга инфраструктурных объектов, представленной в [8].

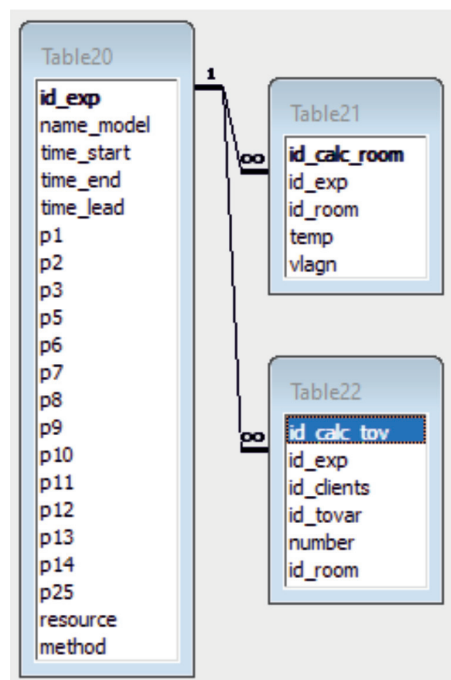


Рис. 2. Схема расчетной базы данных

Приложение для моделирования складских процессов разработано с помощью системы Orlando Tools (OT) [8]. OT применяется для разработки специального класса приложений, которые обеспечивают возможность параллельной обработки структур данных в процессе проведения многовариантных расчетов при решении прикладных задач математического моделирования в разнородных вычислительных средах. В рассматриваемом приложении описание предметной области включает следующие параметры:

- $p_1$  – складские помещения для хранения товаров;
- $p_2$  – товарные зоны;
- $p_3$  – клиенты склада;
- $p_4$  – удовлетворительные уровни обслуживания клиентов;
- $p_5$  – складские операции;
- $p_6$  – транспортные средства;

- $p_7$  – технические средства;
- $p_8$  – товары;
- $p_9$  – товарные группы;
- $p_{10}$  – критерии работы склада;
- $p_{11}$  – показатели работы склада;
- $p_{12}$  – количественные ограничения на пропускную способность склада;
- $p_{13}$  – критерии расписания обслуживания клиентов;
- $p_{14}$  – информация о текущем состоянии складских объектов;
- $p_{15}$  – мощность освоенных услуг (текущих и завершенных);
- $p_{16}$  – затраты на обеспечение услуг;
- $p_{17}$  – оценка потенциальной мощности услуг;
- $p_{18}$  – расписания обслуживания клиентов;
- $p_{19}$  – суммарный доход;
- $p_{20}$  – суммарные затраты;
- $p_{21}$  – оценка мощности неосвоенных услуг;
- $p_{22}$  – прибыль;
- $p_{23}$  – рентабельность;
- $p_{24}$  – оптимальные показатели работы склада;
- $p_{25}$  – оптимальное расписание обслуживания клиентов.

Прикладное программное обеспечение приложения представлено следующими модулями:

- $m_1(p_1, p_2, p_3, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14})$ ;
- $m_2(p_3, p_8, p_4)$ ;
- $m_3(p_{14}, p_{15}, p_{16}, p_{17})$ ;
- $m_4(p_1, p_2, p_5, p_6, p_7, p_9, p_{11}, p_{12}, p_{18})$ ;
- $m_5(p_4, p_{18}, p_{15}, p_{16}, p_{17}, p_{19}, p_{20}, p_{21}, p_{22}, p_{23})$ ;

- $m_6(p_{10}, p_{19}, p_{20}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24})$ ;
- $m_7(p_{13}, p_{18}, p_{24}, p_{25})$ .

В приведенных выше спецификациях модулей списки их входных и выходных параметров разделены символом ‘;’. Рабочий процесс, реализующий план решения задачи, представлен на рис. 3. Модуль  $m_1$  осуществляет подготовку исходных данных. Модули  $m_2 - m_4$  производят их расщепление. Эти модули могут выполняться параллельно. Экземпляры модуля  $m_5$  реализуют многовариантные расчеты на основе расщепленных данных. Модуль  $m_6$  производит агрегирование данных. Модули  $m_6$  и  $m_7$  выполняют многокритериальную оптимизацию. Они реализуют правила многокритериального выбора, представленные в [9].

Результаты профилирования и тестирования модулей приложения в узлах вычислительной среды позволяют предсказывать время их выполнения на реальных данных [10]. В таблице приведены прогнозное и реальное время выполнения рабочего процесса на ПК и с использованием высокопроизводительного вычислительного кластера [11] для разных экспериментов, отличающихся степенью детализации постановки задачи и, соответственно, числом вариантов. Погрешность предсказания не превышает 8%. С повышением сложности решения задачи, характеризующейся увеличением числа вариантов расписаний обслуживания клиентов, мощности персональных компьютеров становится недостаточно и преимущество использования высокопроизводительных вычислительных ресурсов становится очевидным.

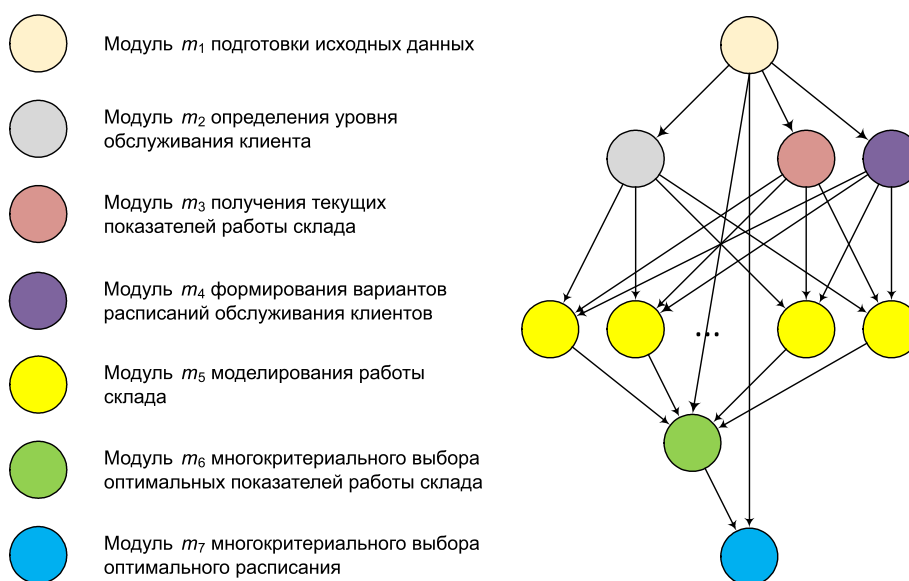


Рис. 3. Рабочий процесс и его модули



Время выполнения рабочего процесса

Число вариантов	$t_1$ , с	$r_1$ , с	$\varepsilon_1$ , %	$t_2$ , с	$r_2$ , с	$\varepsilon_2$ , %
142560	209,00	193,61	7,36	0,73	0,68	6,85
285120	418,00	388,03	7,17	1,47	1,37	6,80
570240	836,00	778,46	6,88	2,94	2,74	6,80
1140480	1672,00	1557,31	6,86	5,88	5,49	6,63

В таблице переменные интерпретируются следующим образом:  $t_1$  и  $r_1$  – соответственно прогнозируемое и реальное время решения задачи на ПК,  $\varepsilon_1$  – погрешность прогнозирования для ПК,  $t_2$  и  $r_2$  – соответственно прогнозируемое и реальное время решения задачи на кластере,  $\varepsilon_2$  – погрешность прогнозирования для кластера.

**Заключение**

Статья посвящена проблеме решения задач планирования использования складских помещений. Предложен оригинальный подход к ее решению с применением высокопроизводительных вычислений. С этой целью разработано специализированное приложение для проведения крупномасштабных экспериментов на основе многовариантных расчетов. Полученные результаты показали эффективность его применения на практике.

Дальнейшее направление исследований связано с детальной оценкой эффективности складских операций. Методы получения таких оценок будут базироваться на интеллектуальном анализе результатов обработки текущих и ретроспективных данных о работе склада. Представленная в статье схема базы данных обеспечивает необходимые возможности хранения и обработки всей информации о функционировании склада, необходимой для выполнения такого анализа.

*Исследование выполнено в рамках проекта IV.38.1.1 программы фундаментальных исследований СО РАН.*

**Список литературы**

1. Binos T., Adamopoulos A., Bruno V. Decision Support Research in Warehousing and Distribution: A Systematic Literature Review. *International Journal of Information Technology & Decision Making*. 2020. Vol. 19. № 3. P. 653–693. DOI: 10.1142/S0219622020300013.
2. Ribino P., Cossentino M., Lodato C., Lopes S. Agent-based simulation study for improving logistic warehouse performance. *Journal of Simulation*. 2018. Vol. 12. № 1. P. 23–41. DOI: 10.1057/s41273-017-0055-z.
3. Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Bogdanova V., Dyadkin Yu., Andrukhova V., Basharina O. Simulation Modeling in Heterogeneous Distributed Computing Environments to Support Decisions Making in Warehouse Logistics. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 201. P. 524–533. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.647.
4. Система управления складом Logistics Vision Suite. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ant-tech.ru/solutions/> (дата обращения: 01.10.2020).
5. Автоматизация складской логистики eme-wms.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eme-wms.ru/> (дата обращения: 01.10.2020).
6. Солво – разработка и внедрение информационных систем. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solvo.ru/> (дата обращения: 01.10.2020).
7. LEAD WMS. Система управления складом. [Электронный ресурс]. URL: <https://leadwms.ru/> (дата обращения: 01.10.2020).
8. Tchernykh A., Feoktistov A., Gorsky S., Sidorov I., Kostromin R., Bychkov I., Basharina O., Alexandrov A., Rivera-Rodriguez R. Orlando Tools: Development, Training, and Use of Scalable Applications in Heterogeneous Distributed. *Computing Communications in Computer and Information Science*. 2019. Vol. 979. P. 265–279. DOI: 10.1007/978-3-030-16205-4\_20.
9. Шоломов Л.А. Логические методы исследования дискретных моделей выбора. М.: Наука, 1989. 288 с.
10. Феоктистов А.Г., Горский С.А., Сидоров И.А., Костромин Р.О., Фереферов Е.С., Бычков И.В. Непрерывная интеграция функционального наполнения распределенных пакетов прикладных программ в Orlando Tools // Труды ИСП РАН. 2019. Т. 31. № 2. С. 83–96. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(2)-7.
11. ЦКП Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН. [Электронный ресурс]. URL: <http://hpc.icc.ru/> (дата обращения: 01.10.2020).