



Александр Волочков,  
компания «Концепт Лоджик», ведущий консультант-аналитик

# ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКЛАДСКОЙ ЗОНОЙ ПОГРУЗКИ-РАЗГРУЗКИ

**АННОТАЦИЯ.** В статье описан алгоритм оптимального выбора свободных ворот и участка зоны погрузки-разгрузки для грузового автотранспорта, учитывающий критерии эффективного и рационального управления совмещенной зоной погрузки-разгрузки большого распределительного центра.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** WMS, YMS, алгоритм оптимального управления ресурсами склада.

**ANNOTATION.** The article describes an algorithm for optimal selection of free gate and the area of the loading and unloading of cargo transport, taking into account the criteria for effective and efficient management of the combined area of handling a large distribution center.

**KEY WORDS.** WMS, YMS, the algorithm for the optimal management of warehouse resources.

**Д**ля обеспечения требуемой пропускной способности склада необходимы грамотное проектирование (включающее выбор технологии обработки), сбалансированное технологическое зонирование и подбор соответствующей техники и оборудования [1–4]. После запуска склада в эксплуатацию его пропускная способность находится в прямой зависимости от качества управления в зонах погрузки и разгрузки.

Эффективное управление совмещенной зоной погрузки-разгрузки (ЗПР, или зона ПР) крупных распределительных центров (РЦ) (рис. 1) является сложной и важной задачей, невыполнимой на практике без автоматизации этого процесса. Однако существующие WMS- и YMS-решения<sup>1</sup> не обеспечивают должной эффективности, так как не учитывают реальные особенности ЗПР и не решают задачу оптимального использования ресурсов ЗПР. Фактически базовый функционал обеспечивает только учет транс-

портных средств (ТС) и администрирование процесса погрузки-разгрузки. В алгоритмах YMS и WMS подразумевается, что одному доку соответствует только одна ячейка напольной площади ЗПР, необходимая для погрузочно-разгрузочных работ (ПРР), поэтому отсутствует поиск и выбор наилучшего варианта сочетания дока и участка ЗПР (рис. 2). В связи с этим алгоритмы WMS- и YMS-решений требуют доработки.

Каждый раз перед разгрузкой или загрузкой очередной машины необходимо принимать решение о распределении ресурсов ЗПР, к которым относятся персонал, доки<sup>2</sup>, напольная площадь, погрузчики и другая техника и оборудование. Эти ресурсы объединены в систему ЗПР, сложность управления которой связана с необходимостью одновременной обработки входящего и исходящего грузопотоков, пересекающихся в ЗПР. Кроме того, трудности обусловлены характерными особенностями больших РЦ:

- 1) интенсивный транспортный поток в сочетании с его неравномерностью оставляет мало времени на анализ ситуации и принятие решения по управлению;
- 2) большая площадь ЗПР, много доков и ТС на парковке затрудняют оперативный анализ ситуации;
- 3) фрагментация ЗПР из-за конструктивных особенностей здания или планировки склада накладывает ограничения на использование складских ресурсов;
- 4) большая протяженность и фрагментация ЗПР и погрузочно-разгрузочного фронта здания (ПРФ), а также высокие палеты с товаром делают визуальный контроль этой зоны склада практически невозможным (рис. 3);
- 5) неравномерное расположение доков приводит к делению площади ЗПР на участки разной емкости (рис. 4);
- 6) разные объемы партий товара требуют разной площади ЗПР;

<sup>1</sup> WMS (Warehouse Management System) – информационная система управления складом; YMS (Yard Management System) – информационная система управления двором (склада).

<sup>2</sup> Доки состоят из ворот, выравнивающей платформы, герметизатора проема и другого оборудования. Для погрузки-разгрузки малотоннажных автомобилей у дока может быть установлена эстакада, сглаживающая перепады высоты между полом склада и полом кузова автомобиля.

- 7) наличие большого числа возможных вариантов сочетания доков и смежных участков ЗГП (рис. 2);
- 8) эстакады для малотоннажных ТС, необходимые для палетной погрузки или разгрузки, делают невозможной постановку на док ТС большей массы (рис. 5).

С целью повышения эффективности управления YMS и WMS необходим алгоритм оптимального выбора свободного дока и участка ПРР для конкретного ТС.

Чтобы назначить док и участок ЗГП для погрузки или разгрузки конкретного ТС, необходимо рассмотреть все возможные варианты и выбрать наилучший в смысле критериев эффективности и рационального управления, т.е. решить классическую оптимизационную задачу [5–7]. Поиск оптимального решения нужно свести к задаче нахождения экстремума целевой функции, для которого выполняются все заданные условия и ограничения. Методы численного решения задач такого рода хорошо изучены [8, 9].

Для построения математической модели нами были использованы следующие особенности подхода к решению задачи:

1. Доки (ворота) и площадь ЗГП рассматриваются как разные ресурсы.
2. Разделяются понятия «тип ТС по грузоподъемности» и «физический объем партии груза», так как они накладывают разные ограничения на решения.
3. Между доками и площадью ЗГП устанавливаются взаимосвязи и взаимозависимости соседства. Для этого площадь ЗГП разделяют на ячейки (в общем случае разной емкости) и вводят единую для ячеек ЗГП и доков систему адресации, основанную на геометрических координатах и линейных расстояниях.

Параметрами оптимизации в рассматриваемой задаче являются диапазон (блок) смежных друг с другом ячеек ЗГП и номер ворот, через которые можно получить доступ к ячейкам блока. Для однозначной идентификации блока смежных ячеек достаточно указать номер первой ячейки блока и его размер, который определяется объемом партии товара (рис. 2). В рассматриваемой задаче объем партии товара измеряют в стандартных палето-местах.

Значения параметров оптимизации имеют следующие ограничения:

- конфигурация ЗГП и доков формирует неделимые группы ячеек ЗГП (рис. 6) и определяет соседство ячеек и ворот;



Рисунок 1. Зона погрузки-разгрузки крупного современного РЦ  
Источник: фото автора

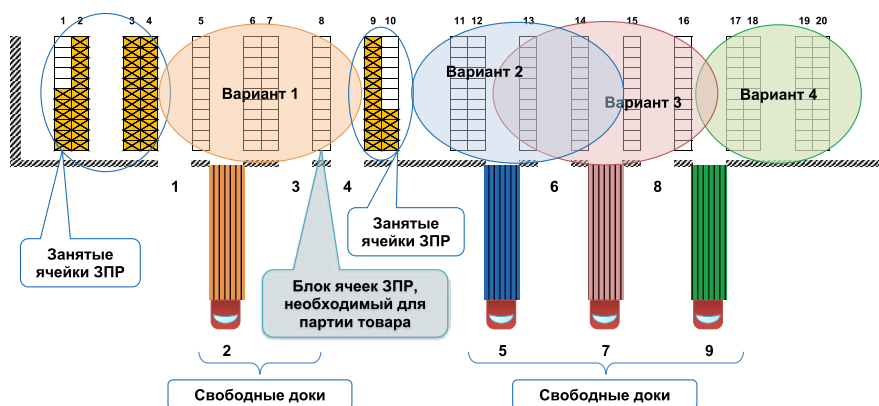


Рисунок 2. Варианты свободных доков и участков ЗГП для погрузки/разгрузки  
Источник: разработано автором



Рисунок 3. Вид на зону погрузки-разгрузки  
Источник: фото автора

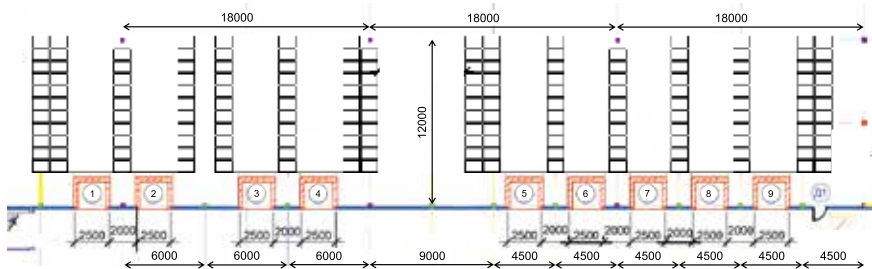


Рисунок 4. Фрагмент чертежа части ЗГР с неравномерным расположением доков  
 Источник: разработано автором



Рисунок 5. Эстакада для малотоннажных ТС  
 Источник: фото автора

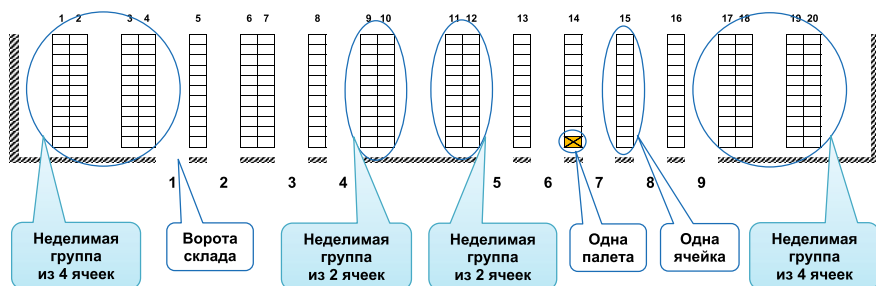


Рисунок 6. Неделимые группы ячеек зоны погрузки-разгрузки  
 Источник: разработано автором

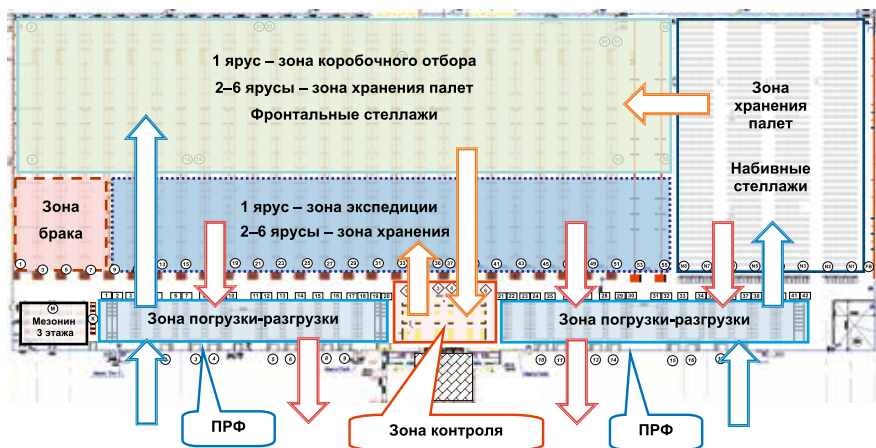


Рисунок 7. Схема технологического зонирования и товаропотоков РЦ с совмещенной ЗГР  
 Источник: разработано автором

- наличие на доках эстакад для малотоннажных ТС исключает выбор этих доков для остальных ТС;
- постоянно меняющаяся занятость и/или блокировка ворот и ячеек ЗГР ограничивают количество возможных вариантов.

Условие неделимости группы ячеек ЗГР означает, что эти ячейки можно использовать только все вместе. Занятие одной ячейки, принадлежащей такой группе, приводит к блокировке остальных, так как отсутствуют другие ворота, через которые можно было бы получить доступ к оставшимся ячейкам (на рис. 6 показаны такие неделимые группы на примере ЗГР, изображенной на рис. 2).

Целевую функцию оптимизации нужно выбрать так, чтобы учесть все критерии сравнения возможных решений. Единственной публикацией, посвященной этому вопросу, является статья Д. Перова [10]. В основе предложенной им целевой функции лежит модифицированный критерий минимального суммарного расстояния между воротами и ячейками ЗГР. Важное отличие заключается в искусственном сдвиге к краям ЗГР «центра тяжести» блока ячеек, используемых для ПРР. Сдвиг тем больше, чем больше партия товара, что объясняется особенностью планировки ЗГР. Кроме того, целевая функция учитывает положение эстакад, а когда для ПРР необходимы 3 ячейки ЗГР, во внимание принимается занятость соседних ячеек зоны, что нужно для борьбы с фрагментацией свободной площади ЗГР.

Неоспоримым преимуществом алгоритма оптимизации, описанного в [10], являются его работоспособность для конкретной конфигурации ЗГР и простота программной реализации. Однако данный алгоритм имеет ряд недостатков и существенных ограничений, что мешает его применению на других складах, отличающихся конфигурацией ЗГР или ПРФ. Во-первых, при выборе сочетания ворот и участка ПРР алгоритм не всегда удачно справляется с фрагментацией и блокировкой свободной площади ЗГР. Во-вторых, он не учитывает количество доков, фактически занимаемых (блокируемых) при выборе участка ПРР. В-третьих, в случае изменения положения эстакад или границ ЗГР требуется перерасчет постоянных коэффициентов, отвечающих за величину сдвига «центра тяжести» участка ПРР, поэтому получаемые решения трудно признать оптимальными, а саму предложенную целевую функцию нельзя считать универсальной.

Чтобы найти корректное представление целевой функции, необходимо использовать следующие критерии эффективности и рационального управления зоной ПР:

- максимальное использование ворот (доков) – отсутствие (минимум) заблокированных ворот (рядом с которыми нет свободных ячеек ЗПР);
- максимальное использование площади ЗПР – полная занятость площади зоны ПР и отсутствие (минимум) заблокированных свободных ячеек в зоне ПР (т.е. ячеек, к которым нет доступа);
- дефрагментация свободной площади ЗПР – отсутствие (минимум) чередования свободных и занятых ячеек зоны ПР (облегчает выбор решения для обработки больших партий товара);
- сокращение пути перемещения палет по складу. При расчете пути необходимо учесть, что центр размещения на хранение («центр тяжести» зоны хранения) не совпадает с центром зоны экспедиции («центр тяжести» зоны экспедиции)<sup>3</sup>, т.е. расчет пути перемещения для входящего и исходящего потоков нужно делать по-разному. Это объясняется схемой зонирования и товаропотоками внутри РЦ (рис. 7);
- направление малотоннажных ТС на доки, оснащенные эстакадами, – обязательное условие для палетной погрузки/разгрузки и желательное в остальных случаях.

По каждому из этих частных критериев можно построить отдельную целевую функцию  $F_i$ , которая будет соответствовать одному из выходных параметров решения. Однако частные критерии оптимальности вступают в противоречие друг с другом. Так, уменьшение фрагментации свободной площади ЗПР приводит к блокировке свободных ячеек или других ворот. Аналогичным образом выбор ворот или блока ячеек ЗПР по принципу минимального пути перемещения может стать причиной фрагментации ЗПР или блокировки других ячеек (рис. 8, 9).

Чтобы удовлетворить всем критериям, в качестве общей целевой функции  $F$  можно использовать взвешенный аддитивный критерий, т.е. алгебраическую сумму функций  $F_i$  с различными весовыми коэффициентами  $k_i$ , которые нормируют и учитывают важность соответствующего критерия оптимальности.

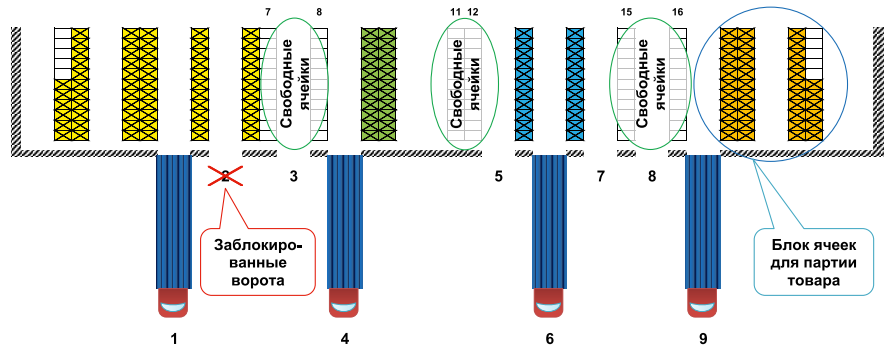


Рисунок 8. Фрагментация свободной площади ЗПР  
Источник: разработано автором

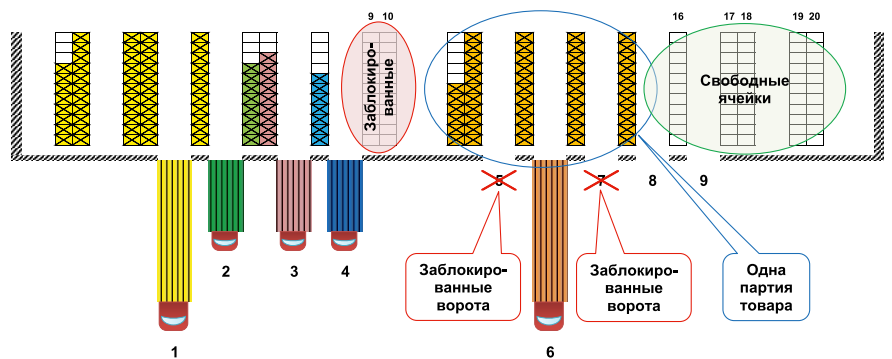


Рисунок 9. Блокирование ворот и площади (ячеек) ЗПР  
Источник: разработано автором

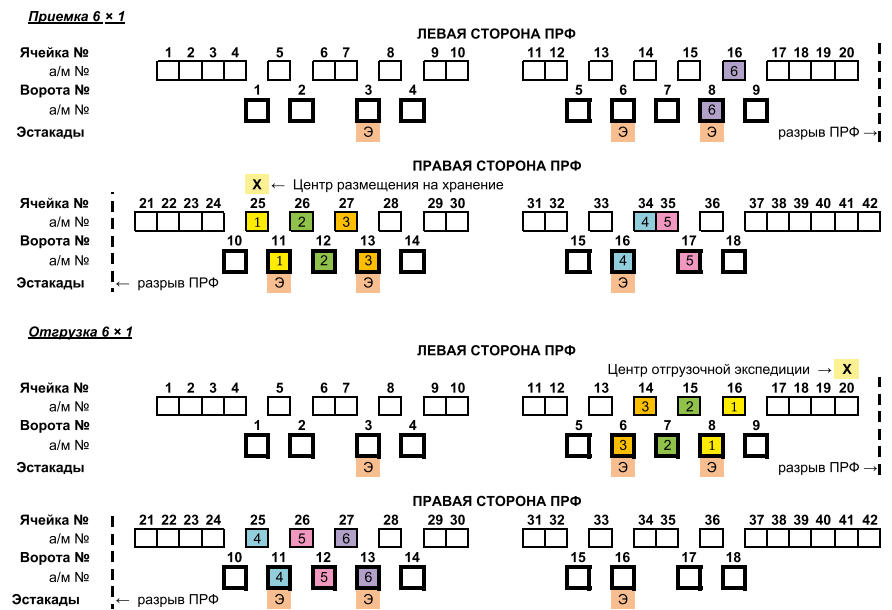
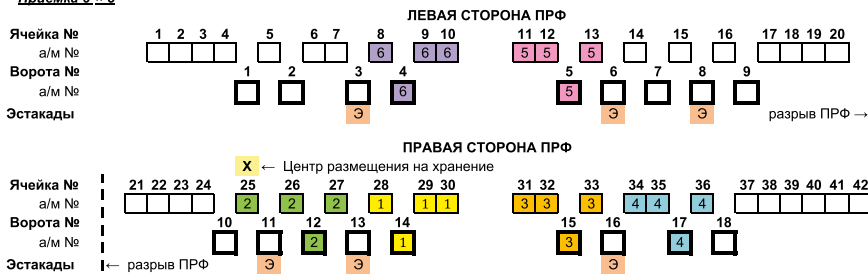


Рисунок 10. Оптимальный выбор ворот для 6 малотоннажных грузовиков (типа «Газель»)  
Источник: разработано автором

<sup>3</sup> Так как адресация построена на одной линейной координате – оси, идущей вдоль ПРФ или центрального проезда внутри склада, здесь под центром подразумевается осевая линия, проходящая через склад перпендикулярно ПРФ.

Приемка 6 × 3



Отгрузка 6 × 3

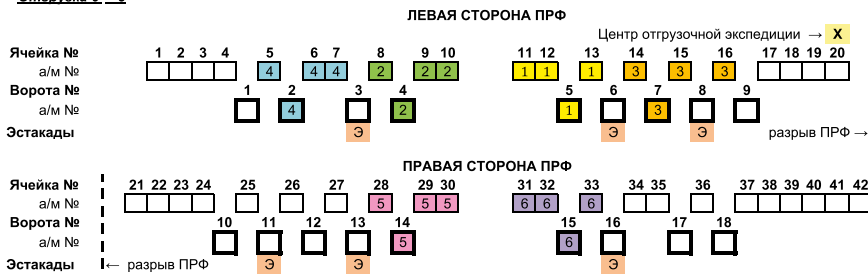
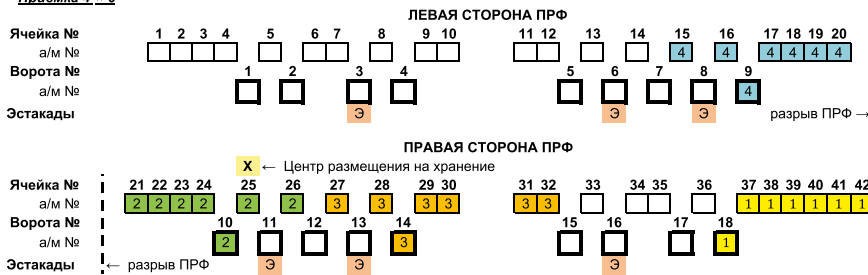


Рисунок 11. Оптимальный выбор ворот для 6 фур с загрузкой от 23 до 33 палет  
Источник: разработано автором

Приемка 4 × 6



Отгрузка 4 × 6

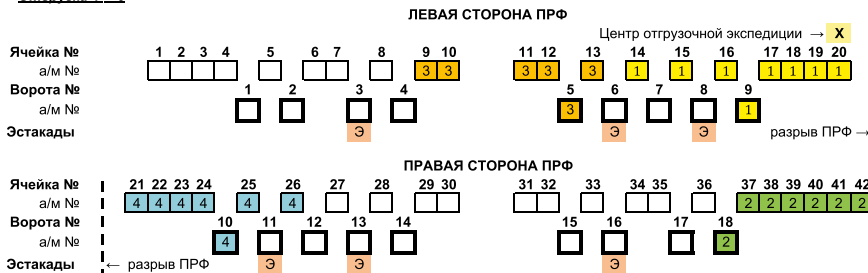


Рисунок 12. Оптимальный выбор ворот для 4 еврофур с загрузкой навалом до 100 м³  
(от 56 до 66 палет)  
Источник: разработано автором

В итоге комплексная целевая функция принимает следующий вид:

$$F = \sum_{i=1}^{N=5} k_i \times F_i -$$

целевая функция (функционал оптимизации),

где  $F_i$  –  $i$ -я составляющая функционала – функция, значение которой равно значению  $i$ -го выходного параметра (связанного с соответствующим крите-

рием оптимальности) для оцениваемого варианта решения:

$F_1$  – количество ворот, занимаемых (и/или блокируемых) при выборе блока ячеек ЗПР;

$F_2$  – наличие свободных ячеек ЗПР в прямом контакте слева и справа от блока (оценка фрагментации ЗПР для рассчитываемого варианта);

$F_3$  – количество заблокированных свободных ячеек ЗПР в результате выбора сочетания блока ячеек и ворот;

$F_4$  – нормированное суммарное расстояние между воротами и ячейками ЗПР и стеллажами (оценка пути перемещения от ворот до зоны хранения или от зоны экспедиции до ворот);

$F_5$  – наличие эстакады (для малотоннажных ТС на эстакаде  $F_5 = 0$ ) или нормированное среднее расстояние до соседних ворот для остальных ТС, поскольку для малотоннажных ТС предпочтение отдается доку – доку на эстакаде, а в остальных случаях – доку на участке ПРФ с наибольшей плотностью ворот;

$k_i$  – весовые коэффициенты для  $i$ -й составляющей функционала ( $k_i \geq 0$ ).

Все функции  $F_i$  определены таким образом, что их значения всегда больше и равны нулю ( $F_i \geq 0$ ), при этом для каждой  $F_i$  выполняется правило, что чем меньше ее значение, тем лучше оценка по данному частному критерию, поэтому целью оптимизации является нахождение минимума общей целевой функции  $F$ .

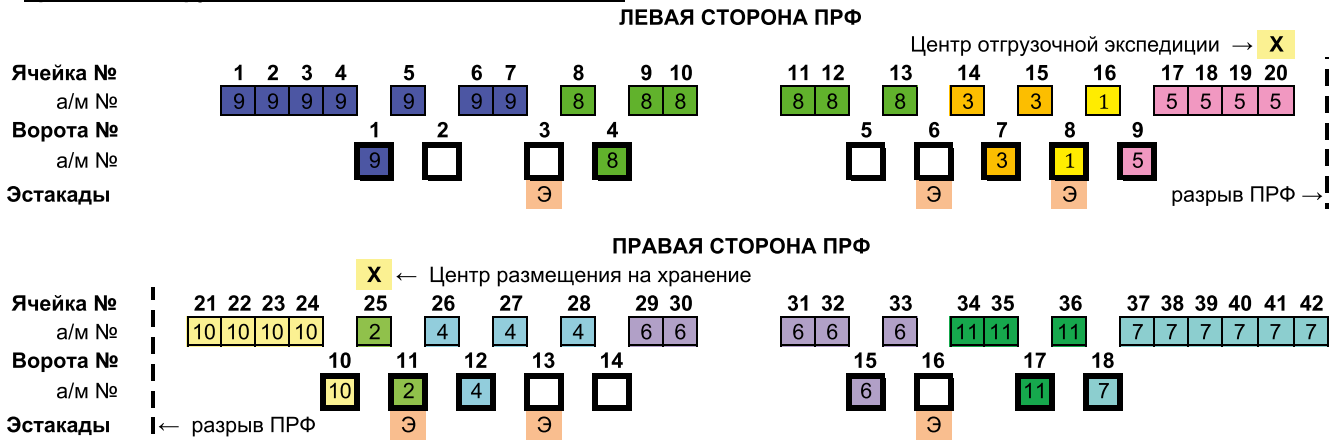
Выбор значений весовых коэффициентов  $k_i$  делается с учетом приоритета каждого критерия. Для разных РЦ, которые отличаются конфигурацией и другими параметрами ЗПР, а также бизнес-процессами и ключевыми показателями деятельности, приоритеты критериев тоже могут отличаться. Однако индивидуальные отличия складов не меняют общего подхода и способа решения задачи, поэтому описанный функционал является достаточно универсальным.

Численное моделирование с помощью MS Excel подтвердило работоспособность и правильность настройки логики разработанного алгоритма. Результаты расчетов для РЦ, изображенного на рис. 7, приведены на рис. 10–13. Здесь схематически показана зона ПР отдельно для случаев приемки (вверху) и отгрузки (внизу). Верхний ряд клеток обозначает ячейки ЗПР, а нижний ряд клеток – доки. Буква «Э» рядом с клеткой дока обозначает эстакаду для малотоннажного ТС. Клетка с цифрой внутри означает занятую ячейку или док, а сама цифра в клетке – порядковый номер ТС.

В приведенном примере ПРФ включает 18 доков, а площадь ЗПР состоит из 42 ячеек с емкостью на 11 палетомест каждая. При этом ЗПР разделена на две неравные части: слева 20 ячеек, а справа 22. Центр размещения в хранение расположен на оси, проходящей рядом с ячейкой ЗПР № 25 (правая половина склада), а Центр экспедиции отгрузки – на оси, проходящей рядом с ячейкой ЗПР № 20.

Последовательность размещения на доках малотоннажных ТС (для ко-

## Приемка и отгрузка 1 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 6 + 7 + 4 + 3



Нечетные номера а/м – отгрузка, четные номера а/м – приемка

Рисунок 13. Оптимальный выбор ворот при одновременном выполнении разгрузки и погрузки – очередь ТС в порядке роста объема партий товара  
Источник: разработано автором

торых достаточно одной ячейки) показана на рис. 10. Алгоритм выбирает участки ЗПР с наибольшей плотностью ворот, где между воротами всего одна ячейка (в данном примере нет требования палетной погрузки и разгрузки). Ввиду того что центр размещения в хранение находится в правой части склада, ворота для разгрузки назначаются преимущественно в правой части ЗПР. При отгрузке выбор ворот симметричен, так как центр экспедиции отгрузки находится близко к середине склада.

По мере увеличения объема партий товара начинают доминировать другие критерии оптимального выбора. Важно отметить, что подобранные один раз значения весовых коэффициентов целевой функции  $F$  остаются неизменными для всех рассматриваемых случаев.

Для фур с загрузкой 23–33 палеты алгоритм выбирает ворота таким образом, чтобы, во-первых, избежать фрагментации свободной площади, во-вторых, сохранить свободными участки ЗПР большого размера (от 4 до 8 ячеек), в-третьих, занимать минимальное количество ворот (рис. 11).

Большие партии товара, требующие до 6 ячеек ЗПР, что соответствует 56–66 палетам, в первую очередь размещаются по краям ПРФ, где с крайними воротами связаны неделимые группы из 4 и 6 ячеек (рис. 12). Может показаться странным, что при отгрузке вторым по порядку выбран док № 18, который сильно удален от зоны экспедиции. Однако детальный анализ ситуации на рис. 12 показывает, что ТС № 3 занимает не только ворота № 5, но и блокирует свободные ворота № 6,

т.е. при выборе участка для ПРП алгоритм учитывает фактор пути перемещения палет внутри склада, но фактор количества используемых ворот имеет большой вес (при данной настройке весовых коэффициентов).

Алгоритм также демонстрирует корректную и устойчивую работу в сложных случаях, когда погрузка и разгрузка происходят в одно время, а занятость ворот и ячеек постоянно возрастает. Например, когда размещение ТС идет в порядке возрастания партии загрузки, начиная с ТС самой малой грузоподъемности (рис. 13).

Таким образом, результаты численного моделирования доказывают, что сбалансированная настройка весовых коэффициентов целевой функции обеспечивает выбор дока и участка ПРП в соответствии со всеми определенными ограничениями и критериями эффективности и рационального управления совмещенной ЗПР, т.е. найденные решения являются оптимальными в смысле этих критериев и ограничений. Важное положительное свойство этого алгоритма – его универсальность и адаптивность по отношению к любым ЗПР.

Предложенная доработка WMS-решений еще не отменяет участия диспетчера в процессе управления зоной погрузки-разгрузки, но уже сильно помогает ему в ежедневной работе при выборе решения. Автоматизация процесса управления на основе разработанного алгоритма ощутимо увеличивает пропускную способность склада, позволяя применять динамическое распределение площади ЗПР между дока-

ми, поэтому ожидаемый экономический эффект от внедрения такой автоматизации на складах большой площади превышает несколько миллионов рублей в год, что объясняется общей высокой стоимостью всех складских ресурсов, задействованных при ПРП.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ружицкий В. Анализ параметров товаропотоков при логистическом проектировании склада // Складские технологии. – 2007. – № 2.
2. Иванов А. Второй этап проектирования склада // Складские технологии. – 2007. – № 3.
3. Иванов А. Проектирование склада: пример расчетов // Складские технологии. – 2007. – № 4.
4. Иванов М. Строим склад правильно // Складские технологии. – 2007. – № 5.
5. Аоки М. Введение в методы оптимизации. – М.: Наука, 1977.
6. Гасс С. Линейное программирование. – М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1961.
7. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Линейное программирование. – М.: Наука, 1969.
8. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985.
9. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980.
10. Перов Д. Мастер Yard Management, или На краю склада // Логистика и бизнес. – 2011. – № 10/1.