

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ И
РАЗВИТИЯ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ В
УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВАГОНПОТОКОВ**

Бородин А.Ф., Горбунов Г.Г.

АО «Институт экономики и развития транспорта»

borodinaf@mail.ru, gorbunovgg@yandex.ru

Аннотация: Цель исследования – разработка научно-методических решений в области размещения и развития сортировочных станций в условиях неопределенности перспективных вагонопотоков. Сформулированы методические принципы решения задачи с применением сетевых потоковых моделей, методов теории принятия решений и принципов робастного управления.

Ключевые слова: методические принципы, размещение и развитие сортировочных станций, перспективные вагонопотоки, математический аппарат теории принятия решений, критерий среднего экономического риска, принцип робастного управления.

Введение

Рациональное размещение сортировочных станций на сети железных дорог – важнейшая задача в части организации перевозочного процесса на долгосрочную перспективу. Связано это прежде всего с необходимостью заблаговременного планирования как технологии работы железных дорог, так и с необходимостью развития сортировочных станций для обеспечения освоения перспективных поездопотоков.

На отечественной железнодорожной сети, начиная с 1922 года [1], разрабатываются и утверждаются схемы размещения и программы развития сортировочных станций. Всего за почти вековой период было выполнено 10 таких разработок. Но если ранее такие схемы выступали только как программные документы, определяющие целевое состояние на 15-летнюю перспективу, то в настоящее время они служат непосредственной основой для планирования инвестиций, организации проектных и строительных работ на весь период их действия. Это в корне изменило требования и методику разработки таких схем и программ.

1 Состояние вопроса и предыдущих исследований

Решение задачи рационального размещения и развития сортировочных станций заключается в пропуске перспективных вагонопотоков по сети железных дорог с выполнением вариативных расчетов плана формирования грузовых поездов и выбором оптимального, обеспечивающего наиболее экономичную организацию перспективных вагонопотоков в поезда. На основе оптимального варианта перспективного плана формирования поездов необходимо выполнять расчеты потребных пропускных и перерабатывающих способностей рассматриваемых объектов станционной инфраструктуры на расчетную перспективу. В случае возникновения прогнозного дефицита способностей станции и высоких загрузок элементов станционной инфраструктуры должны быть разработаны технологические и инфраструктурные мероприятия, позволяющие устранить выявленные «узкие» места в работе станций и обеспечить освоение перспективных объемов перевозок. Развитие основных методических решений по выполнению расчетов размещения и развития сортировочных станций можно разделить на несколько этапов.

В 1969-72 гг. в ЦНИИ МПС под руководством Бернгарда К.А. было проведено исследование рационального размещения сортировочных станций [1] на основе оптимизации плана формирования, определяющего по каждой станции род и назначения формируемых поездов, а также назначения включаемых в них вагонов.

В 1979 году в МИИТе решена задача комплексного этапного развития сортировочных станций [2, 3]. При этом удалось свести постановку задачи к виду, позволяющему применить методы строгой оптимизации, но только для частного случая рассмотрения нескольких станций одного железнодорожного направления.

В 1985 году ВНИИЖТ, Гипротранстэи МПС СССР и Киевгипротранс под руководством В.К. Буяновой и Е.В. Архангельского разработали Схему размещения и развития сортировочных станций на период до 2000 г. [4] на основе автоматизированного расчета плана формирования, охватывающего 210 узлов железнодорожной сети СССР. Характерным для данной схемы явилось первоочередное развитие сортировочных станций для обязательной переработки вагонопотока в узлах и снижения на этой базе времени простоя местных вагонопотоков. Основным эффектом от усиления технического потенциала станций обеспечивался за счет сокращения затрат на переработку вагонов и накопления составов поездов, минимизации задержек поездов на подходах к станции и повторной переработки вагонов.

В дальнейшем в Схеме размещения и развития сортировочных станций до 2015 года были рассчитаны наборы вариантов оптимального плана формирования при различных степенях жесткости инфраструктурных ограничений, что позволило вычислить эффективный набор реконструктивных мероприятий, сконцентрировать сортировочную работу на более развитых объектах и перепрофилировать высвобождаемые станции. [5, 6]

Известны два принципиальных методических направления в решении задачи размещения и развития сортировочных станций в масштабах всей железнодорожной сети.

Первое направление предусматривает расчет оптимальных (оптимально-реализуемых) вариантов организации сетевых вагонопотоков на перспективу с последующим определением

инвестиций в развитие станций, с частичной корректировкой отдельных вариантов для снижения общей суммы строительно-эксплуатационных затрат.

Второе направление предусматривает расчет оптимальных (оптимально-реализуемых) вариантов организации сетевых вагонопотоков на перспективу с непосредственным включением в расчеты строительных затрат в развитие станций, с последующим уточнением суммы всех расходов для лучших вариантов.

Синтез обоих методических направлений позволяет целенаправленно сгенерировать несколько вариантов решения с различными эксплуатационными преимуществами, проводя для них уточняющие расчеты по отдельным узлам для окончательного выбора решения.

Важнейшая цель разработки Схемы размещения – устранение существующих и предотвращение возможных узких мест в техническом развитии и технологии работы сети взаимодействующих сортировочных станций. Вместе с тем высокая динамичность транспортно-экономических связей в современных и перспективных условиях приводит к увеличению колебаний прогнозных перспективных транспортных потоков, в связи с чем запланированное развитие сортировочных станций к расчетному периоду может оказаться недостаточным, что, в свою очередь, увеличит эксплуатационные потери, сроки доставки грузов и себестоимость перевозок. Более того, данные риски приведут и к дополнительным капитальным затратам, связанным с необходимостью повторной реконструкции и сопутствующим расходам по организации строительства.

2 Исследование параметров решения

Для каждой станции (сортировочной системы) должны быть установлены: схемы расположения парков; количество сортировочных и приемоотправочных путей; типы и потребная мощность сортировочных устройств; число назначений формируемых поездов и размеры переработки вагонов.

Необходимо по каждому расчетному узлу определить следующие классы технико-технологических решений, принимаемых к реализации (рис. 1).

- 1) Повышение технического оснащения сортировочных станций с укладкой и удлинением путей, повышением мощности сортировочных устройств, но без изменения принципиальной схемы узла и станции при сохранении существующей организации работы.
- 2) Изменение принципиальных схем станций (изменение примыкания линий, сооружение вторых сортировочных систем, новых парков, включая специальные парки и сортировочные устройства для местной работы) при сохранении существующего распределения работы между станциями.
- 3) Концентрация сортировочной работы в узле на меньшем числе существующих сортировочных станций, где при необходимости усиливают техническое оснащение (см. класс 1) или изменяют принципиальную схему станции (класс 2). Станции, освобожденные от сортировочной работы, специализируют как грузовые, пассажирские или пассажирские технические.
- 4) Вынос местной работы или операций с транзитными поездами без переработки на вспомогательную станцию, где при необходимости усиливают техническое оснащение (см. класс 1) или изменяют принципиальную схему станции (класс 2).
- 5) Вынос сортировочной работы в узле на новую станцию (частично или полностью). При этом существующую станцию специализируют для обслуживания пассажирского движения, местной работы в узлах, обслуживания путей необщего пользования и независимых перевозчиков.
- 6) Развитие и использование грузовых станций для сетевой сортировочной работы.
- 7) Сооружение новых станций и развитие узлов в районах новых железнодорожных линий.



Рис. 1. Классы технико-технологических решений по развитию сортировочных станций, принимаемые на уровне железнодорожных узлов

Решение рассматриваемой проблемы осложняется тем, что существующая информация о размерах и структуре вагонопотоков не обладает необходимой глубиной и достоверностью. С достаточной уверенностью можно определить лишь зоны (интервалы), в которых могут находиться значения расчетных вагонопотоков. Порожние вагонопотоки обладают еще большей неопределенностью, чем груженные. На перспективу достаточно сложно указать, какая доля перевозок будет выполняться в вагонах отдельных операторов; какая система регулирования вагонных парков будет выстроена этими операторами; кто из них заключит договора с ОАО «РЖД» на накопление составов и формирование поездов из порожних вагонов на станциях инфраструктуры общего пользования, прежде всего на сортировочных.

Поэтому следует разработать метод, позволяющий сравнивать варианты распределения сортировочной работы в условиях неполноты информации о размерах и структуре груженных и порожних вагонопотоков. Это даст возможность выбирать решения, которые не теряют своей эффективности при практически возможных изменениях исходных данных.

3 Формализованное описание постановки задачи

Постановка задачи предусматривает наборы переменных, описывающих:

- исходное технико-технологическое состояние сети взаимодействующих сортировочных станций $\{R_0\}$ на момент времени T_0 ;
- варианты (диапазоны) потоковых нагрузок $\{N_i(T_i)\}$ на заданные расчетные сроки T_i .

На расчетные сроки T_i требуется отыскание значений наборов управляемых переменных следующих классов:

- реконструктивные мероприятия по станциям $\{R_i(T_i)\}$ (см. рис. 1);
- компоненты внестанционной технологии $\{U_i(T_i)\}$ (план формирования поездов, пути следования груженных и порожних вагонопотоков, нормы массы и длины поездов);
- компоненты внутростанционной технологии $\{W_i(T_i)\}$ (число, мощность и расстановка маневровых локомотивов, специализация путей и технологических линий, штат сменных работников и технология обработки составов и групп вагонов в станционных парках).

Предъявляется требование минимизации эксплуатационных расходов и капитальных вложений на реконструкцию существующих и сооружение новых сортировочных станций. При этом учитывают:

- прямые расходы, связанные с содержанием всех видов устройств на сортировочных станциях, с нахождением вагонов на станциях и с их переработкой, с продвижением поездов по участкам и внутриузловым ходам;
- инвестиции, связанные с усилением мощности существующих и сооружением новых сортировочных систем и станций, с расконсервацией существующих парков, сортировочных систем и станций;
- инвестиции в подвижной состав;
- стоимостные оценки рисков, связанных с возможным ухудшением качества перевозочного процесса.

При этом должны определяться значения групп переменных, характеризующих:

1. Использование вагонного парка на станциях и участках.
2. Развитие и использование ресурсов путевого развития, технического оснащения и штата станций, участков, линейных подразделений вагонного хозяйства.
3. Эксплуатационную надежность перевозочного процесса - беспрепятственный прием поездов станциями, выполнение норм продолжительности рабочего времени локомотивных бригад, своевременность доставки грузов и возврата порожних вагонов, своевременность подачи вагонов на железнодорожные пути необщего пользования.
4. Использование локомотивного парка и топливно-энергетических ресурсов - парк маневровых и поездных локомотивов, штат локомотивных бригад, расход топлива и электроэнергии.

Обобщенный стоимостной критерий оценки вариантов распределения сортировочной работы и развития сортировочных станций

$$Z = Z_1 [\{R_0\}, \{N_i (T_i)\}, \{R_i (T_i)\}, \{U_i (T_i)\}, \{W_i (T_i)\}] e_1 + \\ + Z_2 [\{R_0\}, \{N_i (T_i)\}, \{R_i (T_i)\}, \{U_i (T_i)\}, \{W_i (T_i)\}] e_2 + \\ + Y Z_3 [\{R_0\}, \{N_i (T_i)\}, \{R_i (T_i)\}, \{U_i (T_i)\}, \{W_i (T_i)\}] e_3 + \\ + Z_4 [\{R_0\}, \{N_i (T_i)\}, \{R_i (T_i)\}, \{U_i (T_i)\}, \{W_i (T_i)\}] e_4 \rightarrow \min$$

при ограничениях

$$Z_2 [\{R_0\}, \{N_i (T_i)\}, \{R_i (T_i)\}, \{U_i (T_i)\}, \{W_i (T_i)\}] \leq Z^*_2; \\ Z_3 [\{R_0\}, \{N_i (T_i)\}, \{R_i (T_i)\}, \{U_i (T_i)\}, \{W_i (T_i)\}] \leq Z^*_3; \\ Z_4 [\{R_0\}, \{N_i (T_i)\}, \{R_i (T_i)\}, \{U_i (T_i)\}, \{W_i (T_i)\}] \leq Z^*_4; \\ \{R_i (T_i)\} \leq \{R_{i+1} (T_{i+1})\}$$

где Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 - значения переменных соответственно первой, второй, третьей и четвертой групп;

Y - признак (0 или 1) нарушения ограничений (3);

e_1, e_2, e_3, e_4 - стоимостные оценки, связанные с переменными соответственно первой, второй, третьей и четвертой групп, в том числе e_3 – «штрафные» оценки за нарушение ограничений (3);

Z^*_2, Z^*_3, Z^*_4 - предельные значения переменных соответственно второй, третьей и четвертой групп.

Класс ограничений (5) предусматривает, что набор реконструктивных мероприятий более позднего расчетного срока не должен допускать бросовых работ, то есть не должен переводить станции в менее мощное технико-технологическое состояние. Такие ограничения необходимы также и для того, чтобы не разобрать сегодня те станционные пути и сортировочные устройства, которые будут нужны завтра. Но самих этих ограничений недостаточно.

Во-первых, необходимо обеспечить отсев вариантов решения, теряющих эффективность при небольших изменениях потоковой нагрузки, стоимостных оценок и других исходных условий. Во-вторых, управляемые переменные трёх рассматриваемых классов имеют разные условия их ввода в действие. Реконструктивные мероприятия $\{R_i (T_i)\}$ отличаются от технологических компонентов $\{U_i (T_i)\}$ и $\{W_i (T_i)\}$ тем, что их вводу в действие предшествуют длительные и трудоемкие процессы инвестиционного и проектного цикла, за которыми следуют процессы строительства в условиях действующих железнодорожных объектов и специальных методов организации перевозочного

процесса. Поэтому рассчитанные наборы значений $\{R_i(T_i)\}$, начиная с определенного момента, не должны изменяться. Это необходимо учитывать при выборе методики решения.

4 Анализ принципов решения задачи

4.1 Этапность решения, распределение транспортных потоков и реконструктивных мероприятий

Методика решения задачи размещения и развития сортировочных станций на перспективу предусматривает сочетание общесетевых оптимизационных расчетов с детальными проработками, учитывающими специфику конкретных узлов (рис. 2).

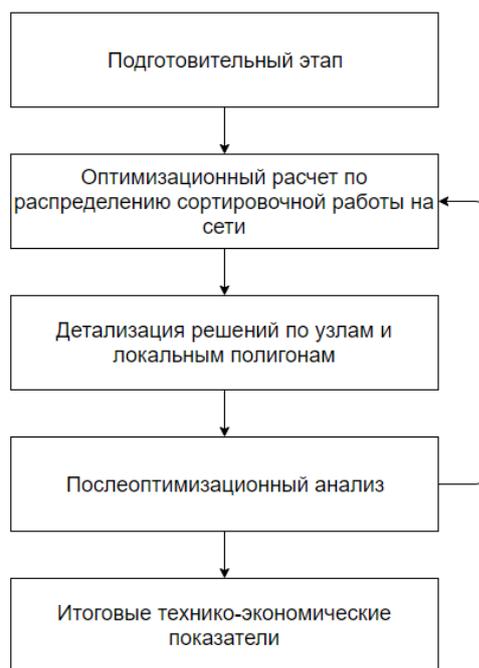


Рис. 2. Порядок расчета исходного и конкурентоспособных вариантов распределения сортировочной работы и развития станций

Рассматриваемая задача относится к классу NP-полных задач [7], для которых не найдено решение путём регулярных алгоритмов строгой оптимизации. Поэтому предусматривается приближенный поиск базового решения (построение сетевых потоковых моделей и пошаговое распределение транспортных потоков и реконструктивных мероприятий по сети взаимодействующих сортировочных станций [8]) и ряд эвристических процедур улучшения этого решения.

Поиск эффективных параметров размещения и развития сортировочных станций при этом рассматривается как итерационный процесс, в котором чередуются оптимизационные расчеты и экспертный анализ. При этом генерируется группа вариантов, из которой отсеиваются непригодные по значениям оценочной функции (1) и ограничениям (2 – 5). Отобранные варианты прорабатываются с глубиной детализации следующего этапа, непригодные опять отсеиваются, и т.д.

4.2 Оценка экономического риска

Выбор варианта технического состояния совокупности сортировочных станций и организации вагонопотоков на сети производится с использованием математического аппарата теории принятия решений. Сравнительный анализ ряда методов и критериев показал, что для рассматриваемой задачи наиболее приемлемым является критерий среднего экономического риска, рекомендованный, в частности, в приложении 1 Методических указаний [9].

На стадии послеоптимизационного анализа (см. рис. 2) предусматривается оценка результатов реализации задачи (1 – 5) для наборов заданных внутренних и внешних условий (см. таблицу).

Таблица 1. Выбор эффективных решений на основе критерия среднего экономического риска

Варианты внешних условий	$i = 1$			...			I		
	$j = 1$	...	J	$j = 1$	...	J	$j = 1$	...	J
Эффективный вариант решения	η_{11}^*	η_{1j}^*	η_{1J}^*	η_{11}^*	η_{1j}^*	η_{1J}^*	η_{11}^*	η_{1j}^*	η_{1J}^*
Ближайший к эффективному вариант решения	$E_{\eta 11}$	$E_{\eta 1j}$	$E_{\eta 1J}$	$E_{\eta 11}$	$E_{\eta 1j}$	$E_{\eta 1J}$	$E_{\eta 11}$	$E_{\eta 1j}$	$E_{\eta 1J}$
...

В таблице применены следующие обозначения:

η_{ij}^*, η_{ij} - характеристика соответственно эффективного и близкого к нему варианта решения при i -м варианте реализации внешних условий (стоимостных параметров, размеров вагонопотоков) и j -м варианте внутренних условий (технологии организации и пропуска вагонопотоков);

$E_{\eta ij}^*, E_{\eta ij}$ - суммарные сопоставимые расходы в эффективном и близком к нему вариантах решения;

$R_{\eta ij}$ - величина экономического риска варианта (η, i, j) ,

$$(6) R_{\eta ij} = E_{\eta ij} - E_{\eta ij}^*$$

В таблицу, в отличие от рекомендаций [9], заносятся данные не заранее сформированного набора альтернатив (вариантов решения задачи), а данные вариантов (эффективного и ряда близких к нему), полученных в результате решения задачи распределения сортировочной работы и развития станций (1 – 5). По данным таблицы для каждого η -го варианта решения вычисляется среднее значение экономического риска, и рекомендуется к реализации вариант, у которого величина указанного риска минимальна. Если варианты условий (i, j) равновероятны, то решением задачи, как правило, будет вариант η , остающийся эффективным в большинстве вариантов (i, j) .

Рассмотренный принцип обеспечивает снижение рисков получения неэффективных значений целевой функции, но сам по себе не обеспечивает учет дифференциации управляемых переменных различных классов по сложности и длительности ввода управляющих воздействий. Поэтому его целесообразно дополнить компонентами робастного управления.

4.3 Компоненты робастного управления

Выполнение требований инвариантности реконструктивных мероприятий к изменениям исходных условий в определенном диапазоне значений оценочной функции иллюстрирует рис. 3.

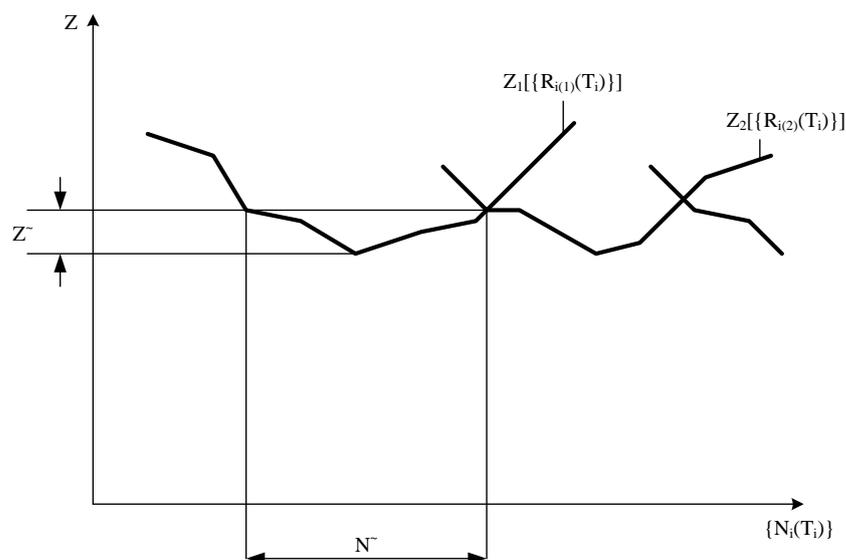


Рис. 3. Инвариантность реконструктивных мероприятий к изменениям исходных условий (принцип робастного управления в задаче размещения и развития сортировочных станций)

Здесь $Z_1[\{R_{i(1)}(T_i)\}]$, $Z_2[\{R_{i(2)}(T_i)\}]$, ... – оценочные функции при фиксированных наборах реконструктивных мероприятий $\{R_{i(1)}(T_i)\}$, $\{R_{i(2)}(T_i)\}$, ... и вычисляемых эффективных технологических компонентах $\{U_i(T_i)\}$ и $\{W_i(T_i)\}$ в зависимости от изменяемых потоковых нагрузок $\{N_i(T_i)\}$; Z^{\sim} – область эффективных значений оценочной функции Z ; N^{\sim} – диапазон потоковых нагрузок, в котором набор реконструктивных мероприятий $\{R_{i(1)}(T_i)\}$ обеспечивает удержание оценочной функции Z в области Z^{\sim} за счет управляющих воздействий исключительно в области технологии $\{U_i(T_i)\}$, $\{W_i(T_i)\}$ при $\{R_{i(1)}(T_i)\} = const$.

Данное требование реализует принцип робастного управления [10] в задаче размещения и развития сортировочных станций.

Выводы

При разработке технологических и инфраструктурных мероприятий необходимо обеспечить нахождение значения оценочной функции в диапазоне, обеспечивающим наибольшую устойчивость пропускных и перерабатывающих способностей станций к неопределенности перспективных вагонопотоков и позволяющим увеличить долгосрочность реализуемых мероприятий с исключением повторных капитальных затрат на организацию проектно-исследовательских и строительно-монтажных работ.

Выполнение данных условий обеспечивает постановка задачи с дифференциацией классов управляемых переменных (реконструктивные мероприятия по станциям, компоненты внестанционной технологии, компоненты внутростанционной технологии). Для решения задачи в такой постановке сформулированы методические принципы с применением комбинированных алгоритмов, объединяющих пошаговое распределение транспортных потоков и реконструктивных мероприятий по сети взаимодействующих сортировочных станций, оценку среднего экономического риска и компоненты робастного управления.

Литература

1. Бернгард К.А., Межова Р.В., Шулько В.П. Размещение сортировочных станций (теория и методика расчетов). Труды ЦНИИ МПС, вып. 458, «Транспорт», 1972, стр.1-160.
2. Акулиничев В.М. Организация вагонопотоков. – М.: Транспорт, 1979, 223 с.
3. Червяков В.И. Комплексное решение задачи развития и распределения сортировочной работы между станциями. – Тр. МИИТ, 1978. – Вып. 592. – С. 61 – 84.
4. Буянова В.К., Сметанин А.И., Архангельский Е.В. Система организации вагонопотоков. – М.: Транспорт, 1988.
5. Бородин А.Ф. Схема размещения и развития сортировочных станций ОАО «РЖД» до 2015 года. – Железнодорожный транспорт, 2008. - № 1. – С. 48 – 54.
6. Бородин А.Ф., Агеев Р.В., Крылов А.С., Сиротич М.Б. Сортировочные станции: взаимодействие, размещение, развитие. Методологические принципы. – Железнодорожный транспорт, 2010. - №7. – С. 20 – 27.
7. Томас Х. Кормен и др. Глава 34. NP-полнота // Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. — 2-е изд. — М.: «Вильямс», 2006. — 1296 с. — ISBN 0-07-013151-1.
8. Батурич А.П., Бородин А.Ф., Панин В.В., Шумская О.А., Пояркова М.А. Организация сетевых вагонопотоков в однопутные поезда. – Ж. д. транспорт, 2005. - № 6. – С. 17 – 24.
9. Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, узлов и станций. – МПС СССР, Минтрансстрой СССР. – М.: ВПТИТрансстрой, 1988. – 468 с.
10. Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. — СПб.: Наука, 2003. — 282 с.