Д-р техн. наук профессор
АКУЛИНИЧЕВ В.М.

Организация вагонопотоков

Москва „Транспорт“ 1979

УДК 656.222.073.21

Акулиничев В. М. Организация вагонопотоков. — М.: Транспорт, 1979, 223 с.

В книге изложена современная теория организации вагонопотоков, основанная на математических методах и ЭВМ. Особое внимание уделено вопросам повышения перерабатывающей и пропускной способности сортировочных станций, расширения взаимодействия и взаимосвязи между ними. Освещен порядок оптимизации технического оснащения станций на перспективу. Должное место в книге отводится вопросам управления вагонопотоками, экономико-техническим параметрам.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников, связанных с эксплуатацией железных дорог.

Ил. 39, табл. 12, библиогр. 33 назв.

А $\frac{31802\text{-}193}{049(01)\text{-}79}$ 193-79. 3602050000

© Издательство Транспорт, 1979

От автора

Грузооборот на железнодорожном транспорте нашей страны непрерывно растет. Для его освоения и улучшения эксплуатационной деятельности дорог важное значение имеет совершенствование системы организации вагонопотоков, что способствует внедрению рациональных методов овладения перевозками, установлению наиболее эффективных объемов работы станций, обеспечивает сокращение времени нахождения грузов в пути, повышает интенсификацию использования технических средств. Система эта направлена на решение одной из задач эксплуатации железных дорог — снижение себестоимости перевозок, а следовательно, и транспортных издержек народного хозяйства.

Совершенствование организации вагонопотоков заключается прежде всего в наиболее эффективном распределении работы между станциями. Поэтому особое значение приобретают совершенствование методик расчета планов формирования поездов, точность расчетных нормативов затрат в вариантах распределения сортировочной работы. Благодаря ЭВМ методика выбора оптимального плана формирования подверглась значительному изменению. Увеличилось количество одновременно рассматриваемых станций, существенно изменился и порядок отбора вариантов. Однако расчетные нормативы, как и прежде, устанавливаются до разработки плана формирования и в процессе расчета не пересматриваются. Это было оправдано при ручном способе счета, поскольку решить многовариантную задачу — выбрать оптимальный план по переменным нормативам — практически невозможно из-за трудоемкости вычислений. Быстродействующие вычислительные машины снимают эти ограничения. Однако использование переменных нормативов в расчетах значительно усложняет и машинные программы. Поэтому необходимо установить степень изменения нормативов в вариантах организации вагонопотоков и обосновать правомерность ее учета при выборе оптимального варианта. В настоящей работе автор поднимает все эти вопросы, однако он не ставит перед собой цель полностью осветить современное состояние и перспективы развития методов организации вагонопотоков. В ней изложены в основном научные разработки, анализ организации вагонопотоков на станциях и сети дорог, а также некоторые научно-практические вопросы совершенствования системы организации вагонопотоков.

Автор будет благодарен читателям за все замечания, направленные на улучшение книги.

Раздел I Современная система организации вагонопотоков

Задачи и принципы

Основные расчетные нормативы

Определение затрат и экономии вагоно-часов в плане формирования

Методы расчета плана формирования одногруппных грузовых поездов

Расчет плана формирования поездов на ЭВМ

План формирования специальных поездов

Глава 1 ЗАДАЧИ И ПРИНЦИПЫ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Организация вагонопотоков в поезда соответствующих назначений — один из важнейших элементов перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Осуществляется она в пунктах погрузки или на сортировочных и участковых станциях. Формирование поездов из вагонов назначением на одну станцию обеспечивает следование их без переработки на попутных станциях, однако вызывает дополнительный простой в ожидании накопления на целый состав. Наименьшее время нахождения вагонов в пунктах зарождения вагонопотоков и на станциях формирования достигается при отправлении их с любым поездом попутного назначения, но при этом в пути следования необходима повторная переработка на каждой станции, что не только замедляет продвижение вагонопотоков, но и вызывает дополнительные расходы на маневровую работу. Следовательно, необходима такая система организации вагонопотоков в поезда, которая позволяет максимально сократить сроки доставки грузов и добиться наименьших затрат на перевозки, учитывая перерабатывающую способность сортировочных станций. В широком смысле эту задачу решает план формирования поездов — система организации вагонопотоков в поезда на железнодорожном полигоне или сети в целом, определяющая размеры работы грузовых и технических станций (формирование, расформирование и пропуск транзитных поездов). План формирования предусматривает организацию вагонопотоков на сортировочных, участковых и грузовых станциях и должен обеспечить:

повышение производительности вагона и ускорение доставки груза благодаря сокращению времени нахождения на технических станциях под накоплением и переработкой;

уменьшение затрат на перевозки от сокращения и удешевления переработки вагонов и концентрации маневровой работы преимущественно на хорошо технически оснащенных сортировочных станциях;

правильное распределение сортировочной работы между станциями в соответствии с их технической вооруженностью.

План формирования поездов, определяя порядок рациональной организации вагонопотоков на дорогах, устанавливает пункты формирования и назначения поездов (станции и пути промышленных предприятий грузоотправителей), а также условия подборки вагонов в группы в зависимости от назначения. Поэтому он включает:

план формирования отправительских и ступенчатых маршрутов, организуемых непосредственно в пунктах погрузки;

план формирования поездов (сквозных, участковых, сборных вывозных, передаточных, а со скоропортящимися грузами, перевозимыми в вагонах-ледниках, — скорых и ускоренных) из груженых, не вошедших в отправительские маршруты, и порожних вагонов, организуемых на сортировочных, участковых и грузовых станциях.

План формирования поездов ежегодно разрабатывают и утверждают: для междорожных назначений и важнейших узлов — Министерство путей сообщения, внутридорожных назначений — управления дорог. При изменении направления или мощности вагонопотоков и условий работы станций план формирования корректируют для междорожных назначений — Главное управление движения МПС; поездов, следующих внутри дороги, — начальник службы движения; поездов, обращающихся в пределах отделения, — начальник отделения дороги. При резком колебании вагонопотока, чтобы ускорить продвижение групп вагонов, разовые изменения в план формирования предоставлено право вносить дежурному аппарату управления дороги — для поездов внутридорожных назначений и отделения дороги — для поездов, следующих внутри отделения.

О всех изменениях плана формирования на важнейших узлах начальники служб движения и отделений дорог сообщают в Главное управление движения.

Организацию вагонопотоков в маршруты (в том числе ступенчатые) в пунктах погрузки также ежегодно рассматривает МПС. Порядок маршрутной погрузки на каждый месяц разрабатывают исходя из месячных планов перевозок управления дорог, объявляя план отправительской маршрутизации отделения дорог, станциям и грузоотправителям.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

На основе плана формирования разрабатывается специализация поездов — порядок формирования их из вагонов определенных назначений для данной станции. Поезда можно специализировать и по роду массовых грузов (уголь, руда, лес, нефть и др.). Станции формируют поезда:

отправительские маршруты — составы поездов, сформированных из вагонов, загруженных одним или несколькими отправителями на одной станции, назначением на станцию выгрузки или в распыление. Такие маршруты могут быть кольцевыми; составы их формируют из вагонов, загруженных однородным грузом (уголь,

руда и др.), на одну станцию выгрузки или в распыление. После выгрузки состав возвращается в район погрузки;

ступенчатые маршруты — составы поездов, сформированных из вагонов, загруженных одним или несколькими отправителями на нескольких станциях, назначением на одну станцию выгрузки или в распыление;

сквозные, проходящие одну или более сортировочных или участковых станций без переработки;

участковые, следующие без переформирования в пределах одного участка;

участково-групповые, следующие в пределах одного участка с перецепкой групп на участковых станциях;

сборные, обслуживающие промежуточные станции одного или нескольких участков;

вывозные, следующие с сортировочной или участковой станции до промежуточных станций или обратно;

передаточные, предназначенные для развоза вагонов по станциям, входящим в один узел или промышленный район.

Различают поезда:

по виду перевозок

грузовые, состоящие только из вагонов с грузами или с грузами и людьми (до 10 вагонов);

людские (воинские и др.), включающие 10 и более вагонов с людьми;

грузопассажирские, состоящие из пассажирских и грузовых вагонов;

по скорости движения

ускоренные грузовые (обычно для перевозки скоропортящихся грузов);

грузовые, следующие с установленной скоростью и предназначенные для всех остальных грузов;

по состоянию подвижного состава

груженые;

порожние;

комбинированные из груженых и порожних вагонов;

по условиям формирования

организуемые в пунктах погрузки на одной (отправительский маршрут) или нескольких (ступенчатый маршрут) станциях;

отправительские маршруты, формируемые на заадресовочных базах — станциях, расположенных на выходах из районов зарождения потоков массовых грузов, и следующие, как правило, в пункты распыления. Обычно погрузка и выгрузка вагонов рассредоточены по нескольким грузовым станциям.

Кроме того, в последнее время практикуют маршруты, одна часть которых погружена одним или несколькими отправителями на одной или нескольких станциях погрузки, а другая часть подформирована на технических станциях назначением на станцию выгрузки или в распыление;

по числу групп

одногруппные, состоящие из вагонов, следующих на одну станцию расформирования или выгрузки;

групповые, состоящие из вагонов, подобранных в группы по станциям назначения (в пути следования переформировываются с заменой или отцепкой специально подформированных групп).

3. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ

Инструктивными указаниями Министерства путей сообщения по организации вагонопотоков на железных дорогах определен порядок разработки плана формирования грузовых поездов, а именно: корреспонденций плановых вагонопотоков между выделенными станциями сети, а также внутридорожных; направлений потоков по экономически целесообразным кружным или параллельным ходам; нормативов плана организации вагонопотоков с мест погрузки отправительскими и ступенчатыми маршрутами; категорий поездов для развоза местного груза. План формирования грузовых поездов составляют на основании:

плана перевозок грузов — поструйных корреспонденций вагонопотоков между станциями отправления и назначения;

данных о техническом оснащении станций: числе сортировочных и вытяжных путей, горках, их перерабатывающей способности и условиях организации погрузки и выгрузки;

данных о нормах веса и длины составов разных категорий поездов;

схем участков обращения поездных локомотивов и участков работы локомотивных и поездных бригад;

данных об эксплуатационных расходах на перевозки;

технологических процессов работы сортировочных, участковых и грузовых станций и путей промышленных предприятий;

анализа действующего плана формирования поездов на технических станциях и организации отправительских маршрутов.

Расчет ведется для вагонопотоков плана перевозок III квартала года, наиболее полно характеризующего условия работы каждой дороги. Именно в этот период осуществляются значительные перевозки сезонных грузов, организация вагонопотоков которых в поезда должна быть учтена планом формирования. Вагонопотоки разрабатывают, учитывая пропускные способности железнодорожных направлений и размеры пассажирского движения, также достигающие максимума в III квартале. Поструйные вагонопотоки для сортировочных станций определяют на ЭВМ по программе, составленной ВНИИЖТ. При этом проверяют возможность реализации оптимального варианта по технической вооруженности и перерабатывающей способности станций.

Вагонопотоки с пунктов погрузки разрабатывают исходя из ее объема и мощности грузовых фронтов, а также плана перевозок, взаимных обязательств грузоотправителей и дороги, регламентируемых договорами на эксплуатацию подъездных путей или единым технологическим процессом, учитывая планы формирования поездов на технических станциях, находящихся на пути следования маршрутов, а также условия выгрузки вагонов (маршрутов и групп) на станциях назначения. Наряду с организацией отдельных маршрутов прежде всего для сокращения маневровой работы на станциях предусматривают по согласованию с грузоотправителями календарное планирование погрузки по адресам, отдельным направлениям. В отдельных случаях формируют отправительско-технические маршруты из групп вагонов, загруженных на станциях или подъездном пути промышленного предприятия, с пополнением до установленной нормы транзитными вагонами того же назначения.

В зависимости от характера и объема работы предприятия, а также рода груза может осуществляться заадресовка его (маршрутизация документов). Вагоны на грузовом фронте адресуются одному или группе получателей, расположенных в одном районе. Это возможно для таких массовых грузов, как руда, некоторые нефтепродукты, уголь, минеральные удобрения, соль и др., когда заадресовка не связана с необходимостью подборки по сортности, маркам, качеству и др. В результате при минимальной маневровой работе образуется отправительский маршрут на одну станцию выгрузки или в распыление. Из грузов, характер которых вызывает необходимость ежедневной заадресовки разным потребителям, чаще организуют маршруты в распыление в отдельные районы потребления.

Чтобы сократить время нахождения вагонов на станциях с небольшими размерами погрузки однородных грузов, целесообразно создавать заадресовочные базы. Они позволят сконцентрировать мелкий, раздробленный вагонопоток, не поддающийся маршрутизации на самих станциях. Маршруты же можно организовывать на базе при заадресовке однородных грузов.

При расчетах вариантов плана формирования надо учитывать необходимость в ряде случаев перелома веса или длины состава в пути следования на той или иной станции. Следует считаться с тем, что в большинстве случаев составы пополняются в сортировочном парке, т. е. пропускаются через горку, а это вызывает значительные затраты времени. Правда на некоторых станциях можно принять поезд и пополнить его на пути, параллельном сортировочным, минуя горку. Но это уже не правило, а исключение. Снижаются затраты на перелом массы или длины составов и на станциях с параллельным расположением парков. Менее трудоемки операции при переломе веса в сторону уменьшения, но и в этом случае целесообразность загрузки попутных технических станций дополнительной работой должна быть обоснована. В пунктах перелома веса поезда составы пополняют вагонами только в соответствии с планом формирования, установленным для данной станции.

На направлениях, имеющих резервы пропускной способности, предусматривается также пропуск поездов определенных назначений с параллельными нормами веса для ускорения их продвижения и сокращения размеров переработки на станциях. Эти поезда пропускают без пополнения в пунктах перелома веса. В отдельных случаях для улучшения использования силы тяги локомотивов допускается пополнять такие поезда (в пределах участковой нормы веса) вагонами с местным грузом, при условии прицепки и отцепки за время стоянки по графику. Поезда, пополненные сверх весовой нормы участковым грузом, передают на другие дороги при заблаговременном согласовании с ними. Также обязательно согласовывать пропуск поездов повышенного веса, не предусмотренных графиком движения и планом формирования, с дорогами на всем направлении следования от станций формирования до станции назначения или уменьшения веса. Поезда специального назначения, в том числе людские, пополняют до установленной нормы длины или веса вагонами назначений наиболее дальних групп.

В сборных поездах вагоны подбирают по станциям участка в соответствии с планом формирования. Схему их формирования, а также порядок работы на промежуточных станциях сборных и вывозных поездов, а в узлах передаточных поездов определяет начальник службы движения так, чтобы затраты на маневровые операции были минимальными и простой вагонов наименьший. Время нахождения поездов этих категорий на участках или в узлах наряду с подборкой вагонов по станциям и пунктам назначения сокращается рациональным использованием маневровых средств и поездных локомотивов. Производительность локомотивов сборных поездов повышается, например, за счет пополнения состава вагонами, следующими на ближайшую участковую станцию, использования дифференцированных перегонных времен хода.

Для продвижения отдельных категорий грузов формируют специальные поезда, так на направлениях со значительными размерами перевозок скоропортящихся грузов — ускоренные унифицированного пониженного веса, которым устанавливают стоянки для льдоснабжения и перецепки вагонов. На направлениях, где скоропортящихся грузов меньше, а также пропускная способность не позволяет организовать следование с сокращенными перегонными временами хода, такие поезда формируют полной весовой нормой, предусмотренной для всех остальных грузовых поездов. Если специальные поезда на направлении не курсируют, скоропортящиеся грузы перевозят в обычных грузовых поездах. Причем вагоны-ледники, следующие с охлаждением, включают в них назначением до ближайшего пункта льдоснабжения, чтобы не задерживать транзитные поезда маневровой работой — отцепкой. Прицепляют и отцепляют вагоны к ускоренным и от ускоренных поездов, как правило, на станциях льдоснабжения, куда и откуда их доставляют участковыми, сборными и другими поездами. Для ускорения продвижения скоропортящихся грузов допускается прицеплять вагоны-ледники к ус-

коренным поездам и на других станциях, если это не вызывает задержки поезда по расписанию.

В период массовых сезонных перевозок в специальных поездах транспортируют овощи и фрукты из районов погрузки в крупные административно-хозяйственные центры страны. Специальными поездами перевозят и живность на крупные мясокомбинаты. Перевозки негабаритных грузов требуют особых условий для движения поездов, в том числе прекращения пропуска поездов во встречном направлении на двухпутных перегонах. Чтобы уменьшить число поездов с такими грузами, предусматривается накопление последних на отдельных станциях, специально выделенных для этого, и следование с определенными поездами независимо от станции назначения, формируемыми с отступлением от плана формирования основного вагонопотока.

Чтобы ускорить продвижение порожних вагонопотоков в районы погрузки, в районах выгрузки порожние вагоны, как правило, подбирают по роду подвижного состава, формируют в отдельные маршруты, которые пропускают с дифференцированными перегонными временами хода. С тех станций, где поезда из порожних вагонов не формируют, их отправляют в обычных грузовых поездах назначением, определяемым регулировочным заданием. Специальные порожние вагоны — цистерны для перевозки химических и пищевых продуктов и др., следующие на дороги и станции приписки с перевозочными документами, а также порожние битумные полувагоны-бункера, направляемые в пункты налива, — включают в обычные грузовые поезда. Не допускается ставить этот подвижной состав в маршруты из порожних вагонов, следующих по регулировочным заданиям. В противном случае появится необходимость переформировывать маршрут на попутной сортировочной станции для отцепки специальных вагонов и направления их в пункты назначения.

План формирования поездов предусматривает четкое распределение сортировочной работы между станциями и всякое нарушение его вызывает дополнительную переработку, замедляет продвижение вагонов. В то же время колебания вагонопотоков требуют периодической корректировки плана формирования. Единая сетевая разметка упростила ее. Однако и теперь реализация откорректированного плана формирования требует определенного времени. Корректируют план формирования и для увеличения транзитности вагонопотоков для какой-то станции на короткий промежуток времени. Например, может возникнуть необходимость в связи с ремонтными работами на ней сократить объем переработки. При этом следует учитывать, что для формирования отдельных поездов какого-либо назначения на соседней сортировочной станции потребуется перестройка специализации сортировочных путей, а значит и время на это. Самовольно нарушать план формирования недопустимо. Если станция работает с полной нагрузкой, поезд, требующий переработки из-за этого нарушения, может серьезно осложнить работу не только данной станции, но и целого направления.

4. РАЗРАБОТКА ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ

План формирования поездов и необходимые для него материалы разрабатываются в такой последовательности:

определение размеров груженых вагонопотоков по междорожным стыковым пунктам;

составление схемы продвижения породового подвижного состава с отметкой стыковых пунктов дорог и станций формирования маршрутов из порожних вагонов;

определение возможных размеров грузового движения в зависимости от технической вооруженности участков и станций и предстоящих объемов пассажирских поездопотоков;

разработка порядка направления вагонопотоков в зависимости от возможных размеров грузового движения на направляниях и экономической эффективности пропуска вагонопотоков по тем или иным ходам;

расчет размеров поструйных вагонопотоков в межстанционных корреспонденциях;

определение расчетных нормативов (средних составов сквозных и участковых поездов, параметров накопления вагонов, норм экономии приведенных вагоно-часов от проследования вагонов без переработки) для всех сортировочных и крупных участковых станций;

разработка плана отправительской и ступенчатой маршрутизации и установление весовых норм маршрутов;

расчет на ЭВМ плана формирования поездов из груженых вагонов на железнодорожных направлениях;

определение станций формирования специализированных составов из порожних вагонов, а также скорых и ускоренных грузовых поездов;

проверка возможности реализации плана формирования анализом перерабатывающей способности станций;

изменение порядка направления вагонопотоков с концентрацией отдельных струй на сортировочных станциях для формирования поездов более дальних назначений;

корректировка разработанного плана формирования поездов с учетом этих изменений и перераспределение сортировочной работы между станциями;

определение назначений местных (участковых, сборных, вывозных, передаточных) поездов с указанием междудорожных стыковых пунктов, а также важнейших сортировочных станций. Составление текста книг сетевого и дорожного плана формирования поездов;

подсчет показателей плана формирования для важнейших станций (заполнение паспорта плана формирования станции), каждой дороги и сети в целом.

Сроки подготовки исходных материалов и этапы составления плана формирования поездов устанавливает Главное управление движения МПС. При разработке плановых вагонопотоков для плана

формирования определяют поструйно размеры корреспонденций между выделенными для расчета станциями. В их числе крупные сортировочные, расположенные в районах массового зарождения и погашения вагонопотоков, а также узловые станции, где вагонопотоки разветвляются на несколько направлений. Поструйные вагонопотоки между ними определяют на основе анализа фактически выполненных данных. По форме ФО-4 и альбому кратчайших направлений подсчитывают величину вагонопотоков со станций погрузки за месяц или декаду (в зависимости от заданной программы), выделяя в них отправительские и ступенчатые маршруты на каждую станцию назначения, а затем укрупняют корреспонденции, прикрепляя (привязывая) погрузку на отдельных станциях к выделенным для расчета плана формирования поездов сортировочным станциям и выходным стыковым пунктам дорог отправления, а также входным стыковым пунктам и сортировочным станциям дорог назначения. Результат этой работы — сводные ведомости о фактических корреспонденциях вагонопотоков между стыковыми пунктами и выделенными для расчета плана формирования поездов станциями всех дорог.

Корреспонденции вагонопотоков между стыковыми пунктами дорог необходимы для расчета загрузки железнодорожных направлений и размеров передачи, определения наиболее рационального направления груженых вагонов. Чтобы в дальнейшем можно было определить, из каких поструйных корреспонденций сложится прием и сдача через каждый стыковой пункт груженых вагонопотоков, составляют специальное пособие. В нем записывают, с какой дороги отправления и на какую дорогу назначения проходят через данный пункт вагоны, в каком количестве (в процентах от погрузки дороги отправления на дорогу назначения). Это пособие — эталон, с помощью которого определяют величину плановых груженых вагонопотоков по стыковым пунктам сети. Общая сумма корреспонденций через стыковой пункт выражает степень его загрузки. Делается это для сети дорог на ЭВМ по специальной программе ежемесячно при расчете технических норм эксплуатационной работы дорог.

Плановые потоки порожних вагонов определяют на основе междорожных корреспонденций каждого рода подвижного состава. Для каждой дороги находят баланс порожних вагонов: избыток, когда выгрузка превышает погрузку, и недостаток, когда погрузка превышает выгрузку, и устанавливают схему их направления (с учетом взаимозаменяемости) — междорожную схему регулировки. Дорожную схему плановых порожних вагонопотоков разрабатывает служба движения дороги на основе междорожной схемы регулировки, норм передачи по стыковым пунктам, дорожной таблицы-шахматки плановых груженых вагонопотоков и отчетных данных. В дорожной схеме указывают пункты зарождения, погашения и передачи порожних вагонов по роду подвижного состава и порядок их направления. Схема эта должна предусматривать максимальное сокращение порожнего пробега вагонов, что достигается устранением встречного и излишнего пробега однородных вагонов и широким использованием взаимозаменяемого подвижного состава. Дорожные схемы регламентируют потоки порожних вагонов на станциях и служат источником для расчета плана формирования маршрутов из них.

Для расчета плана необходимы нормативы, определяющие затраты на накопление, формирование, следование поездов по участкам, экономию расходов при проследовании их через технические станции без переработки и др. Основным же критерием для оценки оптимальности плана формирования поездов принято считать эксплуатационные затраты, выраженные для удобства расчетов в приведенных вагоно-часах. Как известно, целесообразность выделения струи вагонопотока в самостоятельное назначение зависит от времени накопления вагонов на состав на начальной станции и экономии вагоно-часов при пропуске их транзитом через последующие станции. Эти условия заложены в существующие методики расчетов плана формирования. Следовательно, для расчета необходимо знать: состав поезда в вагонах, параметр накопления и экономию времени от пропуска через станции без переработки.

Средние составы поездов определяют по плановым нормам веса, принятым в графиках движения, и отчетным данным о средних динамических нагрузках вагонов на каждом участке. Средние составы устанавливаются по направлениям движения. Параметр накопления принимают в зависимости от числа назначений сквозных и участковых поездов, формируемых станцией в данном направлении, и ее типа. Колеблется он от 8 до 11,5.

Норму экономии времени от пропуска транзитных вагонов без переработки устанавливают для каждой технической станции, где она возможна, как разность времени их простоя с переработкой, исключая время накопления, и без переработки. В качестве исходных данных при этом принимают технические нормы простоя. Если таких норм нет, простой рассчитывают по технологическим процессам. В норме экономии от пропуска вагонов транзитом учитывают эквивалент стоимости их переработки, а также экономию локомотиво- и бригадо-часов от ликвидации перецепки локомотивов внутри удлиненного участка обращения. Таким образом эта норма зависит и от технической вооруженности станции.

Для расчета плана формирования поездов составляют косую таблицу и ступенчатый график вагонопотоков. В косую таблицу вносят общие вагонопотоки, следующие в отправительских маршрутах и поездах, формируемых на технических станциях. В ступенчатых графиках указывают только вагонопотоки с технических станций. На схеме направления для каждой станции отмечают основные нормативы плана формирования: состав поезда в каждом направлении, параметр накопления и норму экономии от проследования вагона без переработки. План формирования поездов рассчитывают на ЭВМ, определяя оптимальный вариант и несколько близких к нему. Варианты рассматривают, устанавливая возможность практического распределения сортировочной работы между станциями сети на период действия плана. Окончательный вариант выбирают, рас-

считав эффективность формирования отправительских маршрутов, одногруппных, групповых, местных поездов и маршрутов из порожних вагонов с учетом обеспеченности каждой станции путями в сортировочных парках и перерабатывающей способностью сортировочных устройств (горок и вытяжных путей). Намечают проект специализации сортировочных путей для назначений плана формирования на каждой станции, учитывая передовые приемы использований путей, а также для внутристанционной работы (для вагонов под выгрузку, с мелкими отправками и контейнерами под грузосортировку, углового потока и др.) и определяют количество вагонов, которое намечается перерабатывать на каждой горке и каждом вытяжном пути.

Если оптимальный вариант плана формирования отвечает технической вооруженности станций, то его принимают окончательно. Когда число сортировочных путей или перерабатывающая способность станции меньше, чем требуется, принимают один из ближайших к нему по эксплуатационным затратам, удовлетворяющий требованиям. При окончательном выборе варианта обязательно учитывают необходимость некоторого резерва в перерабатывающей способности сортировочных устройств, имея в виду, что при использовании ее на 75—80% уже возникают дополнительные простои составов в парках прибытия в ожидании расформирования, которые резко возрастают при дальнейшей загрузке станции. При недостатке на какой-либо станции сортировочных путей для числа назначений транзитных вагонопотоков в оптимальном варианте плана формирования в первую очередь выделяют пути накопления и формирования поездов тем назначениям, которые дают наибольшую экономию вагоно-часов. Для местных поездов (вывозных, передаточных и сборных) со слабым вагонопотоком нередко предназначают один путь на два назначения, предусматривая повторную сортировку вагонов.

Подводя итоги разработки плана формирования поездов, подсчитывают его показатели, характеризуют плановые вагонопотоки, распределение их по железнодорожным линиям, обосновывают организацию перевозок отправительскими маршрутами, отмечают отличительные особенности для сортировочных и крупных участковых станций, основные изменения в распределении сортировочной работы. Основные характеристики плана формирования поездов, определяемые как для каждой сортировочной станции, так и сети в целом: число назначений поездов каждого рода; количество вагонов, перерабатываемых и пропускаемых транзитом без переработки; средний простой их под накоплением; средняя дальность пробега груженых вагонов без переработки в сквозных и участковых поездах и коэффициент транзитности. Эти данные заносят в паспорт плана формирования поездов каждой важнейшей станции. Для дороги и сети в целом определяют также показатели плана формирования: охват погрузки вообще и важнейших грузов в отдельности отправительской маршрутизацией.

План формирования поездов издается отдельной книгой под названием «План формирования грузовых поездов железных дорог СССР». Она содержит оперативный перечень важнейших станций (для которых рассчитывается сетевой план формирования), общие указания и собственно планы формирования поездов на важнейших станциях и междорожный. Первый включает перечень всех поездов, их род, станции назначения включаемых в них вагонов, а также, при необходимости, порядок работы с отдельными транзитными составами (перецепка групп, уменьшение веса, пропуск параллельной весовой нормой или длиной и др.). Междорожный план перечисляет все поезда, передаваемые на соседние дороги по каждому стыковому пункту.

На каждой дороге план формирования поездов также издается отдельной книжкой. В ней дается перечень станций, формируемые на них назначения, указываются поезда, принимаемые от соседних дорог и сдаваемые на них.

В дорожных книжках отдельным разделом приводится план формирования отправительских и ступенчатых маршрутов.

5. НАПРАВЛЕНИЕ ВАГОНОПОТОКОВ

Вагонопотоки, как правило, направляют по кратчайшим, а также наиболее экономичным параллельным и кружным ходам. Порядок направления вагонопотоков определяется одновременно с разработкой плана формирования. Распределяя вагонопотоки по ходам, учитывают необходимость обеспечить их пропуск от пунктов зарождения до пунктов назначения не только в заданных размерах, но и с наименьшими эксплуатационными затратами. В общих затратах на перевозки расходы, связанные с маневровой работой при организации вагонопотоков в поезда, имеют значительный удельный вес. Поэтому порядок направления вагонопотоков влияет на показатели плана формирования поездов.

При прочих равных условиях иногда целесообразно вагонопотоки определенных назначений пропускать по ходам так, чтобы укрупнить отдельные струи и организовать формирование на сортировочных станциях более дальних поездов, обеспечив сокращение переработки вагонов в пути следования и ускорение их продвижения к месту назначения. Это особенно важно, когда необходимо регулировать подвод вагонопотоков определенных назначений под выгрузку, а также когда их объемы возрастают так, что превышают перерабатывающую способность сортировочных станций, находящихся на подступах к районам распыления или выгрузки.

Выбирают направления вагонопотоков и распределяют их по параллельным линиям на основе технико-экономической оценки вариантов, пропускной способности линий и перерабатывающей способности станций. Основные показатели технико-экономической оценки направления вагонопотоков следующие: эксплуатацион-

ные расходы на передвижение вагонов и одиночных локомотивов, расход топлива (электроэнергии) и время следования вагонов. Эти показатели определяют для каждой дороги и каждого участка в отдельности и наносят на картосхему, которой пользуются при расчетах направления вагонопотоков. Картосхемы периодически корректируют в зависимости от изменения способов обслуживания участка локомотивами и условий эксплуатационной работы.

Порядок направления по ходам на период действия плана формирования поездов для транзитных вагонопотоков, следующих по двум и более дорогам, разрабатывает Главное управление движения; для местных и передаваемых на соседние дороги без изменения установленных для них пунктов сдачи — управление дороги. При значительном увеличении размеров перевозок (в период массового поступления сезонных грузов и др.) в порядок направления вагонопотоков вносят изменения, устанавливая временные кружности. Все временные изменения подкрепляют технико-экономическими расчетами.

Порядок направления вагонопотоков по железнодорожным линиям на период действия плана формирования поездов утверждает и объявляет для руководства работникам управлений, отделений дорог и станций Министерство путей сообщения.

6. ДИСЦИПЛИНА ВЫПОЛНЕНИЯ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ

Необходимо, чтобы каждый работник станции, отделения, дороги, связанный с формированием поездов, хорошо знал план формирования и порядок направления вагонопотоков. Нельзя забывать, что работа на сортировочных станциях организована поточно и на многих из них очень интенсивна. Поэтому в парках прибытия и транзитных часто не возможно удалять из состава неправильно включенные в него вагоны, а тем более заменять их другими. Если по небрежности, незнанию плана формирования, из-за неправильной разметки в поезда будут попадать вагоны не соответствующего назначения для попутной сортировочной станции, они из транзитных превратятся в разборочные. «Чужак» в большинстве случаев вызывает необходимость пропуска через горку всего состава, на что затрачивается время, почти такое же, как для полной переработки поезда.

Особого внимания требует пропуск транзитных поездов при случайных отцепках вагонов из-за технических неисправностей или на участках с переломом нормы веса. В этих случаях находящиеся на станции вагоны для ускорения продвижения и полного использования силы тяги прицепляют к транзитному поезду и если их назначение не соответствует назначению поезда, это неизбежно приводит к переработке его в пути следования. Следовательно, необходимо строго контролировать соответствие назначений вагонов и

поездов, когда нет специальных указаний о пополнении составов вагонами других назначений. Сдача таких поездов на соседние дороги заблаговременно согласовывается с ними.

За выполнением плана формирования поездов осуществляется постоянный контроль. Начальник станции, его заместители, главный инженер обязаны:

систематически проводить занятия с работниками станции по изучению плана формирования, порядка направления вагонопотоков, проверять знание его составителями, дежурными по станции, горке, операторами технических контор и другими;

следить за обеспечением технических контор действующими руководствами, документами по плану формирования и своевременным внесением в них изменений; систематически контролировать выполнение плана формирования поездов по натурным листам, принимать меры к ликвидации случаев нарушения;

следить за вагонопотоками и правильностью их направления, своевременно ставить вопрос о корректировке плана формирования поездов при изменении грузопотоков.

Станционный диспетчер, а там, где его нет, дежурный по станции через работников технических контор проверяет правильность формирования каждого поезда и принимает немедленные меры для устранения дефектов, не допуская отправления со станции с нарушением плана формирования. Постоянный контроль за вагонопотоками позволяет организовать формирование более дальних маршрутов без дополнительной затраты времени на накопление, сократив и переработку на попутных сортировочных станциях.

В отделении дороги план формирования поездов и порядок направления вагонопотоков контролируют начальник отдела эксплуатации, который постоянно следит за тем и периодически лично проверяет, как выполняют их на сортировочных и участковых станциях, а также старший диспетчер и поездные диспетчеры, которые должны твердо помнить, что все отступления от плана, допущенные на отделении, должны быть устранены в его пределах. Если же необходимо такой поезд передать на соседнее отделение, то это можно сделать только с разрешения дежурного аппарата управления дороги.

Аппарат службы движения также постоянно контролирует правильность формирования поездов по отчетным данным, а также по оперативным сообщениям о нарушениях плана, периодически выезжая на место. Служба движения, постоянно следя за размерами вагонопотоков, оперативно корректирует план формирования поездов внутридорожных и своевременно ставит вопрос об этом для междорожных назначений.

Глава 2 ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ НОРМАТИВЫ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основной критерий для оценки оптимальности плана формирования поездов — затраты на организацию вагонопотоков, выраженные для удобства расчетов в приведенных вагоно-часах. Условие выгодности выделения вагонопотока N в отдельное одногруппное назначение характеризуется неравенством:

$$N\left[\Sigma\left(t_{эк}e_{пн}+e^{зав}_{пер}-e^{зав}_{тр}\right)+\frac{1}{m}\Sigma\left(t^{лок}_{эк}e_{мн}+t^{бр}_{эк}e_{мч}\right)\right]\geqslant cme_{пн}, \quad (1)$$

$$\text{или}\quad N\,\Sigma\,T_{эк}\geqslant cm, \quad (2)$$

где N — суточный вагонопоток;

$t_{эк}$, $t^{лок}_{эк}$, $t^{бр}_{эк}$ — нормы экономии соответственно вагоно-, локомотиво-, бригадо-часов на один вагон при пропуске вагонопотока без переработки на станции;

$e_{пн}$, $e_{мн}$, $e_{мч}$ — расходные ставки приведенной стоимости соответственно 1 вагоно-, локомотиво-, бригадо-ч локомотивных бригад;

$e^{зав}_{пер}$, $e^{зав}_{тр}$ — зависящие от вагонопотока доли стоимости переработки вагона и пропуска транзитного вагона (без переработки);

c — параметр накопления;

m — количество вагонов в составе;

$T_{эк}=t_{эк}+r_{в}+r_{л}$ — общая приведенная экономия времени на один вагон при пропуске вагонопотока без переработки на станции;

$r_{в}=\dfrac{e^{зав}_{пер}-e^{зав}_{тр}}{e_{пн}}$ — эквивалент переработки вагонов (приведенная к стоимости 1 вагоно-ч экономия эксплуатационных расходов станции от сокращения переработки одного вагона);

$r_{л}=\dfrac{t^{лок}_{эк}e_{мн}+t^{бр}_{эк}e_{мч}}{me_{пн}}$ — эквивалент экономии локомотиво- и бригадо-часов (приведенная к стоимости 1 вагоно-ч экономия эксплуатационных расходов от сокращения простоя локомотива и времени работы бригады на станции перецепки локомотивов от одних поездов к другим).

Таблица 1

Значение параметра накопления

Число назначений поездов	Станция				Число назначений поездов	Станция			
	сортировочная для составов		участковая — для груженых и порожних составов	грузовая для порожних составов		сортировочная для составов		участковая — для груженых и порожних составов	грузовая для порожних составов
	груженых	порожних				груженых	порожних		
1	—	9,0	8,0	7,0	7	11,0	10,3	—	—
2	—	9,4	8,5	7,5	8—10	11,1	—	—	—
3	—	9,6	9,0	8,0	11—14	11,2	—	—	—
4	—	9,8	9,4	8,5	15—18	11,3	—	—	—
5	—	10,0	9,8	—	19—25	11,4	—	—	—
6	—	10,2	10,0	—	25 и более	11,5	—	—	—

Таблица 2

Нормы $t_{эк}$ и $r_{в}$

Станции	Общий вагонопоток, тыс. вагонов в сутки	Значения экономии	Коэффициент переработки $k_{п}$				
			до 0,55	0,56—0,65	0,66—0,75	0,76—0,85	свыше 0,85
Сортировочные с механизированными и автоматизированными горками	До 3	$t_{эк}$	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4
		$r_{в}$	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3
	3—4	$t_{эк}$	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1
		$r_{в}$	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2
	Выше 4	$t_{эк}$	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0
		$r_{в}$	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1
Сортировочные с немеханизированными горками	До 0,5	$t_{эк}$	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0
		$r_{в}$	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6
	1,5—3	$t_{эк}$	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8
		$r_{в}$	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4
	Выше 3	$t_{эк}$	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7
		$r_{в}$	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3
Безгорочные и участковые, а также с горками малой мощности и полугорками	До 0,5	$t_{эк}$	3,6	3,5	3,3	3,2	3,1
		$r_{в}$	4,0	3,7	3,5	3,3	3,0
	0,5—1	$t_{эк}$	3,0	2,9	2,8	2,7	2,7
		$r_{в}$	3,3	3,0	2,8	2,6	2,3
	1—2,5	$t_{эк}$	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4
		$r_{в}$	3,0	2,7	2,5	2,3	2,0
	1,5—2,5	$t_{эк}$	2,4	2,3	2,1	2,1	—
		$r_{в}$	2,9	2,6	2,4	2,2	—
	Выше 2,5	$t_{эк}$	2,2	2,1	2,0	—	—
		$r_{в}$	2,8	2,5	2,3	—	—

Таблица 3

Нормы эквивалента $r_л$ для станций, расположенных внутри участков обращения локомотивов

Тип локомотива	Число пассажирских поездов	Состав поезда на станции с расположением парков			
		последовательным		параллельным	
		от 36 до 42 вагонов	от 43 до 50 вагонов	от 35 до 42 вагонов	от 43 до 150 вагонов
Двухпутная линия, оборудованная автоблокировкой					
Электровоз:					
ВЛ8, ВЛ60, ВЛ23	10—40	0,07	0,5	0,5	0,4
Тепловоз:					
ТЭ3 (2 секции)	10—40	1,0	0,8	0,8	0,6
ТЭ10, ТЭ2	10—40	0,8	0,6	0,6	0,5
Двухпутная линия, оборудованная полуавтоматической блокировкой					
Электровоз:					
ВЛ8, ВЛ60, ВЛ23	5—15	0,7	0,5	0,6	0,4
Тепловоз:					
ТЭ3 (2 секции)	5—10	1,0	0,8	0,8	0,6
	11—15	1,6	1,3	1,4	1,1
ТЭ10, ТЭ2	5—10	0,8	0,6	0,6	0,5
	11—15	1,3	1,0	1,1	0,9
Однопутная линия					
Электровоз:					
ВЛ8, ВЛ60, ВЛ23	5—10	0,8	0,6	0,6	0,4
Тепловоз:					
ТЭ3 (2 секции)	5—10	1,2	0,9	0,9	0,7
ТЭ10, ТЭ2	5—10	0,9	0,7	0,7	0,6

Средние составы поездов m определяют по плановым весовым нормам, принимаемым для графика движения поездов, и отчетным данным о средних динамических нагрузках вагонов на каждом участке. Параметр накопления c для сквозных и участковых поездов зависит от числа назначений (в том числе порожних вагонов), формируемых станцией по действующему плану в данном направлении движения (табл. 1). На двусторонних станциях в расчет принимают назначения каждой сортировочной системы отдельно, на односторонних — количество рассчитываемых назначений зависит от числа примыкающих к станции участков (два участка — примерно половина, три — две трети, четыре — три четверти всех назначений формируемых поездов и т. д.). Параметр накопления поездов из порожних вагонов рассчитывают, принимая во внимание их число назначений.

Суточную затрату вагоно-часов на накопление составов сборных, вывозных и передаточных поездов одного назначения при потоке N вагонов в сутки принимают в зависимости от формирования:

Одного поезда	$10N$	Трех поездов	$3{,}3N$
Двух поездов	$5N$	Четырех поездов	$2{,}5N$

Нормы экономии времени $t_{эк}$ и эквивалента переработки вагонов $r_в$ установлены для каждой сортировочной и участковой станции отдельно по направлениям движения (табл. 2) в зависимости от размера суточного вагонопотока и коэффициента его переработки $k_п$ (отношение количества перерабатываемых вагонов к общему вагонопотоку). Нормы экономии приведенных локомотиво- и бригадочасов $r_л$ от ликвидации перецепки локомотивов на станциях, расположенных внутри удлиненного участка обращения, определяют в зависимости от характера железнодорожной линии, типа локомотива, количества пассажирских поездов и схемы расположения приемо-отправочных парков (табл. 3).

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАТИВОВ ДЛЯ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОГРУППНЫХ ПОЕЗДОВ

Параметр накопления сквозных и участковых поездов зависит от числа их назначений $к$:

$$c = 12\left(1 - \frac{2}{к + A}\right). \qquad (3)$$

На величину его влияют также частота поступления вагонопотока для переработки, количество и продолжительность перерывов в процессе накопления, размеры замыкающих групп вагонов и другие факторы, что в формуле (3) учитывается величиной A (табл. 4). Для сквозных и участковых поездов, формируемых на горочных сортировочных станциях, средняя величина потока каждого назначения которых превышает $N = 175$ вагонов в сутки, параметр накопления определяют по формуле

$$c = 12\left(1 - \frac{N}{51к^2}\right). \qquad (4)$$

Таблица 4

Значения коэффициента A

Тип станции	Категория поездов	Значение A
Сортировочная	Сквозные и участковые из груженых вагонов	18
	Маршруты из порожних вагонов	7
Участковая	Сквозные и участковые из груженых и порожних вагонов	5

Для грузовых станций, на которых часть порожних вагонов используют под погрузку, а остальные отправляют маршрутами, параметр накопления можно рассчитать по формуле

$$c = 12\frac{\kappa_{\text{п}}\,\Sigma N_{\text{пор}}}{(0{,}87\kappa_{\text{п}}+0{,}52)\,(\Sigma N_{\text{пор}}+u_{\text{п}})}, \qquad (5)$$

где $\kappa_{\text{п}}$ — число назначений поездов из порожних вагонов;
$\Sigma N_{\text{пор}}$ — общий суточный поток порожних вагонов, отправляемых со станции;
$u_{\text{п}}$ — суточная погрузка в вагонах.

Экономия времени на один вагон при пропуске вагонопотока без переработки на станции равна

$$t_{\text{эк}} = t_{\text{пер}} - t_{\text{тр}} - t_{\text{н}}, \qquad (6)$$

где $t_{\text{пер}}$ — простой транзитного вагона с переработкой, ч;
$t_{\text{тр}}$ — то же без переработки, ч;
$t_{\text{н}}$ — среднее время накопления, ч.

Простой транзитного вагона с переработкой (в часах) складывается из времени выполнения технологических операций (по прибытии, расформирование и формирование составов, по отправлению) $\Sigma t^{\text{пер}}_{\text{техн}}$, накопления $t_{\text{н}}$ и дополнительных простоев (межоперационные перерывы, простои в ожидании отправления) $\Sigma t^{\text{пер}}_{\text{доп}}$:

$$t_{\text{пер}} = \Sigma t^{\text{тр}}_{\text{техн}} + \Sigma t^{\text{тр}}_{\text{доп}} + t_{\text{н}}. \qquad (7)$$

Простой транзитного вагона без переработки—время на выполнение технологических операций $t^{\text{тр}}_{\text{техн}}$ и простоя в ожидании отправления $t^{\text{тр}}_{\text{доп}}$:

$$t_{\text{тр}} = t^{\text{тр}}_{\text{техн}} + t^{\text{тр}}_{\text{доп}}. \qquad (8)$$

Подставив значения $t_{\text{пер}}$ и $t_{\text{тр}}$ из формул (7) и (8) в уравнение (6), получим

$$t_{\text{эк}} = (\Sigma t^{\text{пер}}_{\text{техн}} + \Sigma t^{\text{пер}}_{\text{доп}}) - (t^{\text{тр}}_{\text{техн}} + t^{\text{тр}}_{\text{доп}}). \qquad (9)$$

Время выполнения технологических операций переработки вагонов $\Sigma t^{\text{пер}}_{\text{техн}}$ и пропуска их в транзитных поездах $t^{\text{тр}}_{\text{техн}}$ принимают по нормам технологического процесса работы станции. Дополнительные простои вагонов $\Sigma t^{\text{пер}}_{\text{доп}}$ и $t^{\text{тр}}_{\text{доп}}$ устанавливают по формулам, приведенным далее. Составы в парках приема в *ожидании расформирования* простаивают ($t^{\text{р}}_{\text{ож}}$) при сгущенном прибытии разборочных поездов вследствие пропуска пассажирских и транзитных грузовых и несогласованного подвода с разных направлений, примыкающих к станции. Некоторую часть этих простоев поглощает процесс накопления, другая часть влияет на общую продолжительность нахождения на станции перерабатываемых вагонов. Ожидание расформирования тем больше, чем выше загрузка горки и чем больше участков примыкает к парку приема. На горочных сортировочных станциях его можно подсчитать по формуле [17]

$$t^{\text{р}}_{\text{ож}} = y\,\frac{n^{\text{пс}}_{\text{пр}}\,(8{,}1\gamma^2_{\text{гор}} - 8{,}65\gamma_{\text{гор}} + 2{,}35)}{n_{\text{от}}}, \qquad (10)$$

где y — коэффициент, учитывающий влияние числа участков, примыкающих к парку приема:

$$y = 0{,}34Ux^2 + (0{,}15 + 0{,}09U)\,x + 1{,}0; \qquad (11)$$

U — число участков, примыкающих к парку приема;
x — отношение приведенных чисел грузовых и пассажирских поездов на участках с меньшими и бóльшими размерами движения; если примыканий три, это отношение определяют делением приведенных размеров на одном и том же или двух участках на размеры движения на третьем, наиболее загруженном. Приближенно величину x можно принять равной: одно примыкание $x = 0$; два — $x = 0{,}5$; три — $x = 1{,}2$; четыре — $x = 2{,}1$;
$n^{\text{пс}}_{\text{пр}}$ — количество приведенных к пассажирским транзитных грузовых поездов;

$$n^{\text{пс}}_{\text{пр}} = n_{\text{пс}} + \frac{n_{\text{гр}}}{\varepsilon_{\text{пс}}}; \qquad (12)$$

$n_{\text{пс}}$ и $n_{\text{тр}}$ — количество пассажирских (дальних и местных) и транзитных грузовых поездов, пропускаемых по примыкающим к парку приема перегонам;
$\varepsilon_{\text{пс}}$ — коэффициент съема пропускной способности пассажирскими поездами, принимаемый для однопутных линий равным 1,2; для двухпутных при полуавтоматической блокировке — 1,5 и при автоблокировке — 2,0;
$\gamma_{\text{гор}} = \frac{t_{\text{гор}} n_{\text{пр}}}{24 - T_{\text{пост}}}$ — коэффициент загрузки горки, зависящий от горочного интервала $t_{\text{гор}}$, количества прибывающих разборочных поездов $n_{\text{пр}}$ и времени осмотра, смазки и ремонта горочных устройств $T_{\text{пост}} = 1$ ч;
$n_{\text{от}}$ — количество формируемых станцией грузовых поездов,

Простои в *ожидании окончания формирования* составов

$$t_{ож}^{ф} = \frac{99\gamma_{выт}^2 - 23{,}5\gamma_{выт} - 10}{n_{от}}, \qquad (13)$$

где $\gamma_{выт} = \frac{n_{от} t_{оф}}{B(24 - T'_{пост})}$ — коэффициент загрузки вытяжных путей;

$t_{оф}$ — время окончания формирования состава на вытяжном пути, ч;

$T'_{пост}$ — время отвлечения локомотива для работы, не связанной с формированием поездов (по технологическому процессу работы станции), ч;

B — число вытяжных путей.

На безгорочных и участковых станциях простои в ожидании расформирования и формирования при одновременном выполнении этих операций на вытяжном пути можно не расчленять. При этом их определяют по формуле (10), заменяя в ней коэффициент загрузки горки коэффициентом загрузки вытяжного пути:

$$\gamma'_{выт} = \frac{(t_р + t_ф)\, n_{от}}{B(24 - T''_{дост})}, \qquad (14)$$

где $t_р$ и $t_ф$ — время расформирования и формирования поездов, ч;

$T''_{пост}$ — время отвлечения локомотива для работы, не связанной с расформированием и формированием (по технологическому процессу работы станции), ч.

Средний простой в *ожидании отправления поездов своего формирования* на сортировочных и участковых станциях

$$t_{ож}^{от} = \frac{n_{пр}^{пс} n'_{max} (0{,}027\gamma^2 + 0{,}013\gamma)}{n_{от}}, \qquad (15)$$

где n'_{max} — часть пропускной способности участка, которая может быть использована для пропуска поездов своего формирования;

$$n'_{max} = n_{max} - (n_{тр} + \varepsilon_{уск}\, n_{уск} + \varepsilon_{сб}\, n_{сб} + \varepsilon_{пс} n_{пс});$$

n_{max} — максимальная пропускная способность участка;

$n_{уск}$, $n_{сб}$ — количество соответственно ускоренных и сборных поездов;

$\varepsilon_{уск}$ — коэффициент съема пропускной способности ускоренными поездами, принимаемый для однопутных линий равным 1,2, для двухпутных 2,5—3,5;

γ — коэффициент заполнения пропускной способности участка;

$$\gamma = \frac{n_{от}}{n_{max} - (n_{тр} + \varepsilon_{уск} n_{уск} + \varepsilon_{сб} n_{сб} + \varepsilon_{пс} n_{пс})}. \qquad (16)$$

Простой *транзитных поездов в ожидании отправления* определяется по действующему графику движения или по формуле

$$t_{доп}^{тр} = \frac{\left[\left(t_{техн}^{тр} + 0{,}1\right) n_{пс}^{тр} + 7{,}3\sqrt{\frac{1440 - I_{min}^{пс} n_{пс}^{м}}{1440 - I_{min}^{пас}}\, n_{пс}^{м}}\right] \varepsilon_{пс} I_р}{1440 - [n_{пс}\varepsilon_{пс} + n_{сб}(\varepsilon_{сб} - 1)]\, I_р}, \qquad (17)$$

где $t_{техн}^{тр}$ — продолжительность обработки транзитного поезда или смены бригад (по технологическому процессу), ч;

$n_{пс}^{тр}$ — количество транзитных пассажирских поездов;

$n_{пс}^{м}$ — число местных пассажирских поездов (включая транзитные, поступающие с боковых линий, которые не входят в участок обращения грузовых локомотивов):

$$n_{пс} = n_{пс}^{тр} + n_{пс}^{м};$$

$I_{min}^{пс}$ — минимальный интервал попутного следования пассажирских поездов, мин;

$I_р$ — расчетный интервал попутного следования грузовых поездов, мин.

Приближенно простой транзитных поездов в ожидании отправления можно рассчитать по формуле

$$t_{доп}^{тр} = 0{,}22 + 1{,}28\xi^2, \qquad (18)$$

где $\xi = \frac{n_{пр}^{пс}}{n_{тр} + n_{пр}^{пс}}$ — коэффициент, характеризующий влияние пропуска пассажирских поездов на дополнительный простой транзитных грузовых поездов.

Эквивалент переработки вагонов рассчитывают по формуле

$$r_в = \frac{e_{пер}^{зав} - e_{тр}^{зав}}{e_{пн}},$$

где $e_{пер}^{зав}$ — зависящая от размера вагонопотока доля стоимости переработки одного вагона:

$$e_{пер}^{зав} = \frac{E_{пер}^{зав}}{N_{пер}};$$

$e_{тр}^{зав}$ — зависящая от размера вагонопотока доля стоимости пропуска одного транзитного (без переработки) вагона:

$$e_{тр}^{зав} = \frac{E_{тр}^{зав}}{N_{тр}};$$

$e_{пн}$ — расходная ставка приведенной стоимости 1 вагоно-ч. Среднесетевая ставка $e_{пн} = 0{,}20$ руб.;

$E_{пер}^{зав}$ — сумма зависящих от размера вагонопотока станционных расходов на переработку вагонов, руб.;

$E_{тр}^{зав}$ — сумма зависящих от размера вагонопотока расходов на пропуск транзитных вагонов без переработки, руб.;

$N_{пер}$ — перерабатываемый станцией транзитный вагонопоток;

$N_{тр}$ — количество проходящих через станцию транзитных вагонов без переработки.

Таблица 5

Распределение расходов сортировочной станции, зависящих от размеров вагонопотока

Расходы	Доля расходов, относимых к зависящим от размера вагонопотока, %	Распределение доли расходов на транзитные вагоны		Показатели, по которым распределяются расходы по категориям перерабатываемых вагонов
		с переработкой	без переработки	
Служба движения				
Заработная плата производственного персонала: маневровых бригад, работающих на сортировочных горках и вытяжных путях формирования	100	+	+	Локомотиво-ч
операторов технических контор, доставщиков документов	100	+	+	Технологическое время
дежурных стрелочных постов в парках приема и отправления	100	+	+	Вагонопоток
то же в сортировочных парках	100	100%	—	—
то же в сортировочно-отправочных парках	100	+	+	Вагонопоток
Расходы на материалы, инвентарь, электроэнергию, топливо и прочие для производственных нужд	25	+	+	То же
Грузовая служба				
Заработная плата приемосдатчиков груза и рабочих по устранению коммерческих неисправностей	100	+	+	Технологическое время
Расходы на материалы и инвентарь для устранения коммерческих неисправностей	100	+	+	То же
Локомотивная служба				
Энергетическая часть расходов на содержание маневровых локомотивов, работающих на сортировочных горках и на вытяжных путях формирования	100	+	+	Локомотиво-ч
Вагонная служба				
Заработная плата производственного персонала пунктов технического обслуживания вагонов осмотрщиков, слесарей, автоматчиков, пролазчиков	35	+	+	Технологическое время

Расходы	Доля расходов, относимых к зависящим от размера вагонопотока, %	Распределение доли расходов на транзитные вагоны		Показатели, по которым распределяются расходы по категориям перерабатываемых вагонов
		с переработкой	без переработки	
Расходы на материалы, инвентарь, электроэнергию и прочие для производственных нужд	35	+	+	Технологическое время
Служба сигнализации и связи				
Заработная плата: сменных электромехаников и монтеров механизированных и автоматизированных горок	100	100	—	—
электромехаников и монтеров, обслуживающих станционные устройства СЦБ и связи	100	+	+	Вагонопоток
Расходы на материалы, инвентарь, электроэнергию и прочие для производственных нужд: на механизированных и автоматизированных горках	100	100	—	—
на содержание остальных станционных устройств связи и СЦБ	100	+	+	Вагонопоток

Примечания. 1. В заработную плату входят все начисления (премиальный фонд, отчисления на соцстрах и др.), а также соответствующие доли накладных и распределяемых расходов.

2 Знак + обозначает, что расходы распределяются пропорционально значениям показателей.

3. Доля станционных расходов в общих расходах пунктов технического обслуживания принимается в размере 35%. Остальные 65% относятся на пробег вагонов (вагоно-осе-км).

Значения $E^{зав}_{пер}$, $E^{зав}_{тр}$, $N_{пер}$ и $N_{тр}$ берут за определенный период времени (месяц, квартал или год). В суммарные значения $E^{зав}_{пер}$ и $E^{зав}_{тр}$ включают расходы служб движения, грузовой, вагонной, локомотивной, сигнализации и связи (табл. 5). Все зависящие от размеров вагонопотока расходы относят на категории вагонов: транзитные с переработкой; транзитные без переработки; с грузовыми операциями; пассажирского парка; нерабочего парка (подача на пути вагонных депо и вагоноремонтных заводов). Например, маневровые локомотивы вытяжных путей формирования в течение месяца выработали 1400 локомотиво-ч, из них 980 — на формировании поездов, 210 — на обслуживании грузовых фронтов, 70 — на обработке транзитных поездов и 140 — на подаче и выводе вагонов

с территории вагонного депо. Общие расходы на заработную плату маневровых бригад распределяются пропорционально затрате локомотиво-часов, а именно: на транзитные вагоны с переработкой (с включением в $E^{зав}_{пер}$) $\frac{980}{1400}\,100 = 70\%$; на транзитные вагоны без переработки (с включением в $E^{зав}_{тр}$) $\frac{70}{1400}\,100 = 5\%$. Аналогично для различных категорий вагонов распределяют расходы по показателю «Вагонопоток».

Расходы на заработную плату по показателю «Технологическое время» распределяют в зависимости от профессий работников. Для

Таблица 6

Простои локомотивов в ожидании отправления (ч) для среднесуточных условий

Тип железнодорожной линии	Общие размеры пассажирского движения $n_{пс}$	Локомотив, прибывающий с поездом: транзитным без перецепки, $t^{тр}_{техн}=20$ мин, $n^{м}_{пс}=2$	$n^{м}_{пс}=6$	$n^{м}_{пс}=10$	$t^{тр}_{техн}=30$ мин, $n^{м}_{пс}=2$	$n^{м}_{пс}=6$	$n^{м}_{пс}=10$	разборочным и с перецепкой
Двухпутная, оборудованная автоблокировкой, $I_р=8$ мин	10	0,20	0,28	0,32	0,22	0,29	0,32	0,44
	20	0,27	0,35	0,39	0,31	0,38	0,42	0,62
	30	0,34	0,42	0,46	0,40	0,47	0,50	0,73
	40	0,43	0,52	0,56	0,52	0,60	0,63	0,84
То же, $I_р=10$ мин	10	0,23	0,32	0,37	0,25	0,33	0,37	0,52
	20	0,32	0,41	0,46	0,37	0,45	0,49	0,72
	30	0,40	0,49	0,54	0,47	0,55	0,59	0,81
	40	0,51	0,61	0,67	0,62	0,71	0,75	0,94
Двухпутная, оборудованная полуавтоматической блокировкой, $I_р=20$ мин	5	0,30	—	—	0,33	—	—	0,61
	10	0,40	0,56	0,63	0,46	0,58	0,63	0,94
	15	0,51	0,69	0,77	0,62	0,77	0,82	1,16
То же, $I_р=25$ мин	5	0,40	—	—	0,42	—	—	0,74
	10	0,56	0,76	0,86	0,61	0,79	0,86	1,18
	15	0,73	0,96	1,10	0,81	1,00	1,10	1,53
Однопутная (с разными способами связи), $T_р=40$ мин	5	0,44	—	—	0,46	—	—	0,81
	10	0,62	—	—	0,68	—	—	1,30

Примечание $n^{м}_{пс}$ — число местных пассажирских поездов в общем количестве $n_{пс}$.

каждой профессии по технологическим нормам определяют затрату рабочей силы (человеко-ч) на операции с вагонами соответствующих категорий и по каждой категории вагонов суммируют заработную плату работников всех профессий, учитываемых по общей группе расходов. Пропорционально суммарным расходам на заработную плату распределяют остальные расходы (на материалы, инвентарь, электроэнергию и прочие для производственных нужд).

Пропуск транзитного вагонопотока в сквозных поездах без переработки на участковых станциях, расположенных внутри удлиненных участков обращения локомотивов, ликвидирует отцепки локомотивов от составов и сокращает общие затраты локомотиво- и бригадо-часов. Сбережения, получаемые от *ликвидации перецепки поездных локомотивов*, учитываются эквивалентом

$$r_л = \frac{\left(t^{п}_{техн} + t^{п}_{ож} - t^{тр}_{техн} - t^{тр}_{доп}\right) e_{мн} + t^{бр}_{эк}\, e_{мh}}{m e_{пН}}, \qquad (19)$$

где $t^{п}_{техн}$ — продолжительность перецепки локомотива по технологическому процессу работы станции, ч;

$t^{п}_{ож}$ — часть простоя локомотива в ожидании отправления, ч (табл. 6);

$t^{тр}_{техн}$ — продолжительность обработки транзитного поезда или смены бригад (по технологическому процессу), ч;

$t^{тр}_{доп}$ — дополнительный простой локомотива в ожидании отправления при следовании с транзитным поездом, вызываемый пропуском пассажирских поездов, ч (см. табл. 6);

$t^{тр}_{техн} + t^{тр}_{доп} = t_{тр}$ — общий простой транзитного поезда без переработки, ч;

$e_{мн}$ — стоимость 1 ч простоя локомотива без бригады, коп.;

$t^{бр}_{эк}$ — сокращение продолжительности работы бригад при следовании с транзитным поездом, ч;

$e_{мh}$ — стоимость 1 бригадо-ч локомотивных бригад, коп.;

m — состав поезда;

$e_{пН}$ — расходная ставка приведенной стоимости 1 вагоно-ч.

Основная причина простоев локомотивов в ожидании отправления в пунктах перецепки — неравномерность прибытия, накопления и отправления поездов со станций в отдельные периоды суток. Затраты локомотиво-часов, вызываемые неравномерностью прибытия и отправления поездов, при прочих равных условиях зависят от количества перерабатываемых на станции поездов. Неравномерные прибытие и отправление грузовых поездов в значительной мере обусловлены неравномерностью движения пассажирских поездов,

которые снимают в отдельные периоды суток разное количество грузовых поездов. При этом увеличение количества транзитных поездов уменьшает колебания прибытия и отправления перерабатываемых поездов, что приводит к сокращению суточных затрат локомотиво-часов в ожидании отправления по графику. Принимая в качестве исходной среднюю неравномерность прибытия и отправления перерабатываемых грузовых поездов, заложенную в графиках движения из-за пропуска пассажирских, искомую величину ожидания отправления локомотива можно найти по формуле

$$t_{ож}^{п} = \frac{10{,}35\varepsilon_{пс} I_р \sqrt{\frac{1440 - I_{min}^{пс} n_{пс}}{1440 - I_{min}^{пс}} n_{пс}}}{1440 - [n_{пс}\varepsilon_{пс} + n_{сб}(\varepsilon_{сб} - 1)] I_р}, \qquad (20)$$

где $n_{пс}$ — количество пассажирских поездов, пропускаемых по участку за сутки;

$I_{min}^{пс}$ — минимальный интервал попутного следования пассажирских поездов;

$I_р$ — расчетный интервал попутного следования грузовых поездов;

$\varepsilon_{пс}$ и $\varepsilon_{сб}$ — коэффициент съема пропускной способности соответственно пассажирскими и сборными поездами.

3. АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ НОРМАТИВОВ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

Параметр накопления вагонов. Аналитическими методами расчета оптимальный вариант плана формирования находят, рассматривая неравенства

$$\sum^{к} cm_i \gtrless \sum^{\Sigma N} N_i \sum^{n-2} T_{эк\,j},$$

где cm_i — суточная затрата вагоно-часов на накопление составов одного назначения;

N_i — размеры среднесуточного вагонопотока каждой струи;

$\sum^{n-2} T_{эк\,j}$ — общая приведенная экономия от проследования вагона (в транзитном поезде без переработки) попутных станций, ч;

$к$ — число назначений оптимального варианта плана формирования;

$n-2$ — максимальное число попутных станций;

n — общее число станций на направлении.

При этом особенно важно точно определить параметр c, так как он сильно влияет на конечные результаты. Однако существующая

методика в значительной степени уравнивает влияние различного технического оснащения станций, а также величины и характера назначений вагонопотоков на время нахождения вагонов на станции, в том числе и простой под накоплением. Для анализа последнего были изучены процессы поездообразования на 14 сортировочных станциях сети — двусторонних и односторонних, с механизированными и немеханизированными горками и др., составлены близкие к реальным условиям рабочие модели накопления составов, с помощью которых на ЭВМ обсчитаны матрицы накопления различных составов в различных условиях за несколько тысяч суток. Для определения области значений параметра накопления c использована стохастическая зависимость его от среднесуточного вагонопотока назначений. При этом целесообразно величину c выразить в виде функции двух переменных $t_н$ и m_c, а именно:

$$\bar{c} + \Delta\varepsilon_c = \frac{\bar{N}(t_н \pm \Delta\varepsilon_{t_н})}{\bar{m}_c \pm \Delta\varepsilon_{m_c}},$$

где $|\Delta\varepsilon_{t_н}|$ и $|\Delta\varepsilon_{m_c}|$ — средние отклонения случайной величины от ее математического ожидания соответственно:

$$M(t_н) = f(\bar{N}_{сут}) \text{ и } M(m_c) = f_1(\bar{N}_{сут}).$$

Чтобы выяснить, как каждая из указанных величин в отдельности влияет на изменение параметра накопления, в дальнейшем предполагается, что для однозначных значений $\bar{N}_{сут}$, определяющих функции f и f_1, распределения случайных величин $t_н$ и m_c независимы друг от друга и равновероятны. На основе статистического материала получены среднеквадратичные отклонения m_c и $t_г$ и границы отклонения параметра накопления для различных количеств назначений и величин состава. Установлено (рис. 1) также, что с увеличением состава среднеквадратичное отклонение количества вагонов в нем уменьшается. Это положение использовано при теоретическом исследовании процесса поездообразования. На всех станциях параметр накопления колеблется от 5 до 17.

Получив экстремальные границы значений параметра c, для полного анализа последнего необходимо было установить закон его распределения, а следовательно, и вероятность различных значений. Как видно из рис. 2, распределение величин параметра накопления близко к закону равномерной плотности. Проверка подтверждает это положение:

$$f(x) = \begin{cases} \dfrac{1}{\beta - \alpha} & \text{при } \alpha < x < \beta \\ 0 & \text{при } x < \alpha \text{ и } x > \beta. \end{cases}$$

Наиболее сильные колебания величины параметра накопления по суткам, декадам и месяцам наблюдаются при небольших раз-

мерах вагонопотока. В отдельные периоды величина c изменяется в несколько раз. Поэтому даже при фиксированном значении вагонопотока функция $c = f(t_н, m_c)$ не однозначна и принять параметр накопления равным постоянному числу нельзя. Более детально влияние различных факторов на колебания параметра накопления изучено с помощью корреляционной теории случайных функций. При этом были использованы понятия:

межгрупповая дисперсия — $\bar{\sigma}^2 = \frac{\Sigma (\bar{y}_i - y)^2 m_i}{\Sigma m_i}$;

внутригрупповая дисперсия — $\bar{D}^* = \frac{\Sigma D_i m_i}{\Sigma m_i}$;

общая дисперсия — $\bar{\sigma}^2 + \bar{D}^* = D^*$;

показатель корреляционного отношения — $\eta = \frac{\bar{\sigma}^2}{D^*}$,

где y — значение случайной величины (параметра накопления);

$\bar{y}_i$ — среднее значение группы случайных величин;

m_i — статистическая численность группы наблюдаемых величин.

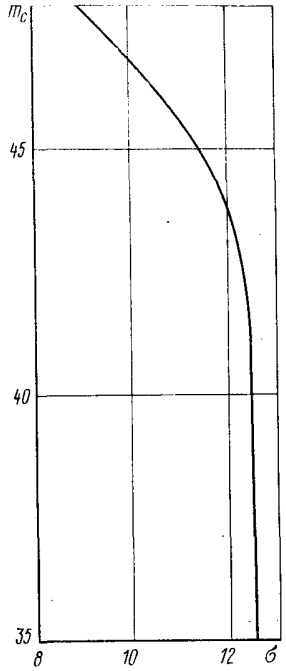

Рис. 1. Зависимость среднеквадратичного отклонения вагонов в составе от величины состава

Исследованием установлен коэффициент, тесноты связи r между параметром накопления и значениями:

суточного вагонопотока на назначение N;

количества вагонов в составе m_c;

среднего простоя вагона под накоплением $t_н$;

средней величины группы вагонов, поступающих на назначение при роспуске одного состава (без учета замыкающей) $m_{гр}$;

средней величины замыкающей группы вагонов $m_{з\,гр}$;

количества групп на состав $n_{гр}$;

интервала прибытия групп $I_{пр}$.

Как показал анализ, эти элементы оказывают наибольшее влияние на параметр накопления при суточном вагонопотоке от 100 до 250. Поэтому в данном диапазоне суточного вагонопотока наблюдаются и наибольшие колебания c. Установлено, что корреляционные зависимости приобретают более устойчивый характер с ростом вагонопотока. Причем наибольшей теснотой связи обладают $r(c, m_c)$ и $r(c, m_{гр})$. При значительных вагонопотоках (более 500 вагонов в сутки) корреляционная связь между c и m_c усиливается, диа-

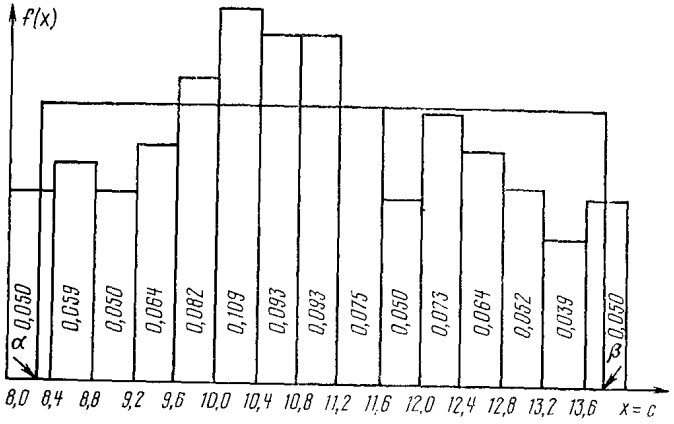

Рис. 2. Гистограмма и плотность распределения параметра c

пазон между минимальным и максимальным значениями c существенно сокращается, а количество факторов, влияющих на дисперсию c, сокращается до трех (m_c, $m_{гр}$, N). Корреляционные зависимости, раскрывая характер связи c с элементами поездообразования, не позволяют оценить влияние на его дисперсию каждого фактора в отдельности. Поэтому, чтобы установить изменение дисперсии, использованы прием линеаризации случайных функций и следующие формулы:

$$\text{общая дисперсия} — D^* = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 D_{\chi_i} + 2\Sigma \left(\frac{\partial y}{\partial \chi_i}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial \chi_c}\right) \kappa_{ic},$$

дисперсия, возникающая за счет факториального признака

$$— D_i = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 D^2_{\chi_i}.$$

Наибольшее влияние на D_c оказывают простой вагонов под накоплением и состав поезда. Однако c довольно тесно связан со всеми элементами поездообразования и при различных размерах суточного вагонопотока они влияют на него различно. Так, влияние колебаний вагонопотока при небольших значениях невелико, а интервала прибытия групп — значительно. При суточном вагонопотоке свыше 250 параметр накопления практически не зависит от интервала прибытия групп, а влияние размеров вагонопотоков на него резко возрастает. Это объясняет значительные колебания абсолютной величины c в связи с изменением элементов поездообразования. При вагонопотоках малых и больших величина параметра накопления возрастает, а в интервале от 150 до 300 вагонов становится наименьшей.

В существующих методиках расчета плана формирования параметр накопления принимают в основном как функцию количества назначений. Но ведь количество назначений устанавливают, используя в расчетах заданные значения параметра накопления. При такой взаимосвязи трудно установить, что же в данном случае яв-

ляется функцией, а что аргументом. Следовательно, надо считать целесообразным использование переменного расчетного норматива параметра накопления, зависящего от вариантов объединения струй вагонопотоков.

Приведенная экономия расходов на станциях при пропуске вагонов без переработки. Общая приведенная экономия с учетом доли себестоимости переработки представляет величину

$$T_{эк} = t_{пер} - t_{н} - t_{тр} + r_{в} + r_{л}.$$

Значение ее на станциях принимают в пределах от 2,6 до 6,6 ч. В последние же годы она изменялась как в большую, так и в меньшую стороны, причем бо́льшие значения $T_{эк}$ приходились на участковые станции, а меньшие — на сортировочные.

Инструктивные указания по расчету плана формирования в приведенную экономию, кроме времени выполнения технических операций, включают время ожидания расформирования и отправления. Однако рекомендуемые формулы для определения этих величин требуют уточнения и доработки. Чтобы выяснить зависимости между величинами, входящими в формулу приведенной экономии, рассмотрим порядок их определения для различных категорий станций. Известно следующее неравенство:

$$t_{эк} + t_{н} > t_{пер} - t_{тр}.$$

В расчетах плана формирования величины левой части этого неравенства принимают плановые, а правой части — фактические, т. е.

$$t_{эк}^{пл} + t_{н}^{пл} > t_{пер}^{ф} - t_{тр}^{ф}.$$

Следовательно, расчетную экономию или простой вагонов под накоплением или то и другое принимают заниженными. В настоящее время расчетную приведенную экономию вагоно-часов при пропуске вагонов без переработки $t_{эк}$ принимают такой, чтобы сконцентрировать сортировочную работу на крупных сортировочных станциях, т. е. малую для сортировочных и большую для участковых станций. Однако при этом не учитывают то, что значения $t_{эк}$ переменны и зависят не только от технического оснащения станций. Так, на участковых станциях бывает, как правило, не более 2—3 назначений вагонопотоков средней мощности, в то время как на сортировочных — 15 и более, но мощность многих их них небольшая, что значительно усложняет сортировочную работу, увеличивает межоперационные простои и время выполнения операций, вследствие чего увеличиваются $t_{гр}$ и $t_{н}$, причем первое в большей степени. Ряд же назначений на сортировочных станциях — крупные. Расчет приведенной экономии без учета этих обстоятельств не точен. Кроме того, простой вагонов под накоплением принимают одинаковым для всех назначений, что ведет к ошибке в определении затрат вагоно-часов. Эквивалент переработки, принимаемый для определения приведенной экономии, также требует уточнения (см. разд. II).

Глава 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ И ЭКОНОМИИ ВАГОНО-ЧАСОВ В ПЛАНЕ ФОРМИРОВАНИЯ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Современная техника, совершенствование внутристанционной технологии существенно изменяют как организацию работы сортировочных станций, так и ее показатели, а это требует дальнейшего развития методов нормирования. В настоящее время основные нормативы нового плана формирования — параметр накопления, норму экономии времени и эквивалент переработки вагонов — рассчитывают на основе объемов переработки на станциях, числа назначений, количества транзитных поездов и ряда других данных действующего плана. Это было бы приемлемо, если значения норм в различных вариантах действительно оставались неизменными или параметры существенно не отличались друг от друга. Но такие допущения становятся все менее оправданными по мере роста объема перевозок в течение периода, предшествующего разработке плана, изменения структуры, мощности и конфигурации вагонопотоков, перераспределения их по параллельным ходам, технической вооруженности транспорта, открытия новых станций и реконструкции существующих. Значит перед разработкой плана формирования поездов целесообразно построить такой исходный вариант организации вагонопотоков, который позволял бы найти величину дополнительных затрат или экономии в любом другом. Выбор оптимального плана в этом случае осуществлялся бы последовательным улучшением исходного варианта. Таким исходным может служить сквозной вариант организации вагонопотоков. Предполагается, что объем переработки на каждой станции первоначально определяется только величиной минимального вагонопотока N_{min}, а все дальние вагонопотоки, зарождающиеся и погашающиеся за пределами рассматриваемой зоны, следуют транзитом в сквозных поездах, формируемых на соседних сортировочных станциях. Величина этого потока минимальна и обязательна для переработки независимо от вариантов организации вагонопотоков. Необходимость принятия данного варианта в качестве исходного обусловлена тем, что сортировочные станции предназначены прежде всего для переработки вагонопотоков, зарождающихся и погашающихся в пределах обслуживаемых ими зон.

Наибольший перерабатываемый на каждой станции вагонопоток N_{max}, как известно, не должен превышать объема, соответствую-

щего экономически целесообразному уровню загрузки станции при полном использовании ее технических средств и рациональной организации работы. Учитывая, что величина вагонопотока, перерабатываемого на станции, в различных вариантах может изменяться от N_{min} до N_{max}, дополнительный вагонопоток $N_{доп}$, зависящий от вариантов распределения сортировочной работы с дальними вагонопотоками, колеблется в пределах $0 — (N_{max} — N_{min})$. Различные комбинации выделенных и объединенных вагонных струй изменяют объем переработки (сверх обязательной) и число назначений на рассматриваемых станциях. Соответственно меняются показатели работы (простой вагонов, стоимость переработки и др.) и отдельные характеристики (интенсивность и равномерность поступления поездов, продолжительность выполнения операций и др.). Существенное увеличение объема дополнительной переработки может привести и к необходимости изменения параметров станции (числа горочных и подгорочных локомотивов, групп или бригад для обработки составов и др.). Ясно, что значения нормативов в общем случае не могут оставаться постоянными в различных вариантах и меняются в соответствии с показателями и параметрами станций.

Оптимальный вариант организации вагонопотоков требует, чтобы на каждой станции были рациональные условия переработки вагонов. Только тогда и при минимальном числе назначений будут минимальными приведенные затраты. Поэтому перед распределением сортировочной работы между станциями целесообразно наметить мероприятия по освоению максимально возможного дополнительного перерабатываемого вагонопотока. Затем технико-экономическими расчетами следует установить предельный размер вагонопотока, при котором целесообразны те или иные мероприятия. При этом следует учесть меры, не требующие длительных сроков внедрения, например увеличение парка маневровых локомотивов и изменение организации их работы, параллельный роспуск составов на горке, укладку путей надвига и дополнительных съездов, обходных путей, профилирование вытяжных путей.

Разработка исходного сквозного варианта позволяет получить информацию о состоянии каждой станции к началу расчетов и ее возможностях в освоении дополнительного перерабатываемого вагонопотока; определить затраты на простой вагонов, эксплуатационные расходы и эффективность использования основных средств станции; наметить мероприятия и оптимизировать процесс переработки вагонов при изменении ее объема от минимального до максимально возможного; выявить переменную часть затрат, зависящих от распределения сортировочной работы с дальними вагонопотоками; исследовать характер и степень изменения нормативов в различных вариантах организации вагонопотоков и установить их значения.

Анализ показывает, что при такой постановке задачи осуществляющая методика нормирования не отражает в полной мере возможные изменения в работе станций и не отвечает на основной во-

прос нормирования — какими должны быть нормы при данных объемах переработки и числе назначений в том или ином варианте, уровне технической оснащенности станции и организации ее работы. Это не позволяет установить наивыгоднейшие параметры технической оснащенности каждой станции и потребный контингент, которые в конечном итоге и обеспечивают оптимальный вариант. Другой вопрос нормирования — точность норм и их обоснованность. От этого в значительной мере зависит выбор оптимального варианта. Современные математические методы и ЭВМ позволяют получить более точные зависимости для определения нормативов, что повышает достоверность оптимального варианта организации вагонопотоков, а также обеспечивают более полный анализ факторов, влияющих на величину нормативов.

Более совершенная методика определения расчетных нормативов особенно необходима при решении такой важной задачи, как рациональное размещение и развитие сортировочных станций в перспективе. При этом для освоения дополнительного объема переработки требуется, как правило, существенно изменить параметры технической оснащенности станций — строительство приемо-отправочных и сортировочных путей, реконструкция горловин, автоматизация сортировочных горок и др.— что принципиально отличается от наращивания мощности в текущих условиях. Значит при распределении сортировочной работы в перспективе уже невозможно использовать текущие показатели работы для определения нормативов, а необходимо прогнозировать функционирование станции в новых условиях.

2. РАСЧЕТНАЯ НОРМА

Составная часть методики выбора оптимального варианта организации вагонопотоков — расчет экономии (затрат) времени при пропуске вагонопотока без переработки (с переработкой) через станции. В Инструктивных указаниях по организации вагонопотоков рекомендации по расчету нормы экономии времени $t_{эк}$ сводятся к определению разности между суммарным временем нахождения вагонов в системах расформирования $T_р$, формирования $T_ф$, отправления $T_{от}$ (для поездов своего формирования) и средним временем простоя транзитных поездов $T_{от}$. Представим расчетную норму экономии времени $t^р_{эк}$ в виде двух слагаемых — расчетной нормы экономии времени для систем расформирования и формирования $t^р_{экI}$ и системы отправления $t^р_{экII}$. Исходя из предпосылки о сквозном варианте, каждое слагаемое определится из разности затрат вагоно-часов на переработку и пропуск вагонопотока в рассматриваемом и сквозном вариантах.

Предположим, что параметры технической оснащенности станции остаются постоянными в любом варианте и вероятностные ха-

рактеристики процессов существенно не изменяются. Тогда дополнительный вагонопоток, поступивший в переработку в рассматриваемом варианте, вызывает увеличение межоперационных простоев вагонов в системах расформирования и, следовательно, приведет к увеличению затрат вагоно-часов на величину

$$\Delta B_{\text{I}} = t_{\text{эк I}} (N_{\min} + N_{\text{доп}}) - t^{*}_{\text{эк I}} N_{\min},$$

где $t^{*}_{\text{эк I}}, t_{\text{эк I}}$ — соответственно среднее время нахождения вагонов в системах расформирования и формирования при перерабатываемых вагонопотоках $N_{\min}$ и $N_{\min} + N_{\text{доп}}$.

Удельные затраты вагоно-часов на один дополнительно перерабатываемый вагон составят

$$t^{\text{р}}_{\text{эк I}} = t_{\text{эк I}} + (t_{\text{эк I}} - t^{*}_{\text{эк I}}) \frac{N_{\min}}{N_{\text{доп}}}. \qquad (21)$$

Таким образом, расчетная норма экономии времени равна среднему времени нахождения вагонов в системах расформирования и формирования $t_{\text{эк I}}$, если оно равно $t^{*}_{\text{эк I}}$, или $N_{\min} = 0$. Первое условие выполняется, когда время нахождения вагонов в системах расформирования и формирования сортировочных станций постоянно и не зависит от размера перерабатываемого вагонопотока. Второе соответствует случаю, когда на станции нет вагонопотока обязательной переработки. Но поскольку реально $N_{\min} \geqslant 0$, а время нахождения вагонов в системах зависит от размера перерабатываемого вагонопотока, то в общем случае $t^{\text{р}}_{\text{эк}}$ не равно $t_{\text{эк I}}$.

Второе слагаемое в формуле (21) — дополнительная экономия времени в системах расформирования и формирования от уменьшения простоя вагонов обязательной переработки. Величина ее соизмерима с временем нахождения вагонов в этих системах, а при определенных условиях может и превысить его (если $N_{\min} > N_{\text{доп}}$ и $t_{\text{эк I}}$ значительно больше, чем $t^{*}_{\text{эк I}}$ при поступлении вагонопотока $N_{\text{доп}}$ в переработку). Таким образом, расчетная норма экономии времени включает суммарное время нахождения вагонов в обеих системах $T_{\text{р}} + T_{\text{ф}}$ при перерабатываемом вагонопотоке $N_{\min} + N_{\text{доп}}$ и дополнительную экономию $t^{\text{доп}}_{\text{эк I}}$ от уменьшения простоя вагонов обязательной переработки. Увеличение расчетной нормы на величину $t^{\text{доп}}_{\text{эк I}}$ объясняется тем, что при пропуске вагонопотока $N_{\text{доп}}$ без переработки на станции в связи с уменьшением простоя вагонов обязательной переработки будут получены сбережения вагоно-часов. И, наоборот, поступивший в переработку дополнительный вагонопоток повлияет на время нахождения вагонов в рассматриваемых системах сортировочной станции, замедлит продвижение вагонопотока обязательной переработки и, следовательно, вызовет дополнительные затраты вагоно-часов.

Характерная особенность системы отправления поездов заключается в том, что общий проходящий через нее вагонопоток остается неизменным в любом варианте. Из него при дальнейшем рассмотрении исключается вагонопоток, отправляемый в поездах постоянного расписания. Дополнительные затраты вагоно-часов простоя составов в системе отправления, зависящие от вариантов организации вагонопотоков, определяются из выражения

$$\Delta B_{\text{II}} = (N_{\text{доп}} + N_{\text{оч}}) (T_{\text{ос}} - T_{\text{от}}) - N_{\text{об}} (T^{*}_{\text{оп}} - T_{\text{от}}), \qquad (22)$$

где $N_{\text{об}}$ и $N_{\text{оч}}$ — вагонопоток соответственно суммарный и обязательной переработки, проходящий через систему отправления, за исключением отправляемого в поездах постоянного расписания;

$T_{\text{от}}$ и $T^{*}_{\text{оп}}$ — средневзвешенное время простоя вагонов в системе отправления соответственно в рассматриваемом и сквозном вариантах.

Если в выражении (22) принять $T_{\text{ос}} - T_{\text{от}} = t_{\text{эк}}$ и

$$\frac{1}{N_{\text{доп}}} [N_{\text{об}} (T^{*}_{\text{оп}} - T_{\text{от}}) - N_{\text{оч}} (T_{\text{ос}} - T_{\text{от}})] = t^{\text{доп}}_{\text{эк I}},$$

то удельные затраты вагоно-часов на один вагон определятся как разность этих двух времен. Следовательно, расчетная норма экономии времени для данной системы меньше разности простоев вагонов с переработкой и без переработки на величину $t^{\text{доп}}_{\text{эк I}}$. Это объясняется тем, что при пропуске вагонопотоков простой транзитных поездов в рассматриваемом варианте ниже, чем в сквозном, из-за уменьшения их доли в общем поездопотоке и отправления с приоритетом перед поездами своего формирования. В общем случае расчетную норму экономии времени на один вагон при пропуске вагонопотока без переработки на станции $t^{\text{р}}_{\text{эк}}$ можно представить суммой двух слагаемых — $t_{\text{эк}}$ и $t^{\text{доп}}_{\text{эк}}$. Величина $t^{\text{доп}}_{\text{эк}}$ определяется формулой

$$t^{\text{доп}}_{\text{эк}} = \frac{1}{N_{\text{доп}}} \{N_{\min} [(T_{\text{р}} + T_{\text{ф}}) - (T^{*}_{\text{р}} + T^{*}_{\text{ф}})] - N_{\text{об}} (T^{*}_{\text{оп}} - T_{\text{от}}) + N_{\text{оч}} (T_{\text{ос}} - T_{\text{от}})\}. \qquad (23)$$

Таким образом, разность времени между простоем транзитного вагона с переработкой (исключая время накопления) и без переработки не является расчетной нормой экономии от пропуска вагонопотока без переработки по станции.

Ввиду того что общий вагонопоток, проходящий через систему отправления, в различных вариантах неизменен, интенсивность поступления в нее поездов при равенстве составов своего формирования и транзитных постоянна и не зависит от организации вагонопотоков. Интенсивность же отправления поездов зависит от того, является ли станция пунктом смены локомотивов или нет. Если локомотивы меняются у всех транзитных поездов и они отправляются по графику, то интенсивность отправления (поездов в 1 ч), опреде-

ляемая числом ниток графика, обеспеченных локомотивами,— величина постоянная. Если локомотивы у всех или части транзитных поездов не меняются, то интенсивность их отправления $\mu_{тр}$ может быть несколько выше, чем поездов своего формирования $\mu_{сф}$. Это обусловлено тем, что транзитные поезда, особенно на двухпутных линиях, можно отправлять по готовности, максимально используя пропускную способность участка для грузового движения. В таких пунктах интенсивность отправления поездов — величина переменная, зависящая от соотношения поездов транзитных и своего формирования.

Вероятностные характеристики потока составов, входящего в систему отправления, колеблются в различных вариантах организации вагонопотоков незначительно вследствие противоположного влияния, которое оказывает на них неравномерность поступления составов своего формирования и транзитного поездопотока. Таким образом, при определенных условиях основные параметры системы отправления — интенсивность поступления и отправления поездов, коэффициент загрузки, а также вероятностные характеристики поступающего потока — изменяются незначительно от соотношения числа транзитных поездов и своего формирования. При этом следует ожидать и незначительного изменения вагоно-часов простоя составов в вариантах организации вагонопотоков. Следовательно, в пунктах перецепки локомотивов у всех поездов при равенстве составов, транзитных и своего формирования, время нахождения их вагонов в системе отправления примерно одинаково и расчетная норма экономии $t^{р}_{эк}$ близка к нулю. В случае приоритета в отправлении транзитных поездов разность $T_{ос} - T_{от}$ значительно больше нуля.

Каждый элемент расчетной нормы экономии времени $t^{доп}_{экI}$ включает продолжительность простоя вагонов под технологическими операциями и в ожидании их выполнения, т. е. межоперационные простои. Время на выполнение технологических операций на всех этапах переработки вагонов в основном зависит от технической оснащенности станции и принятой организации работы. Оно достаточно подробно изучено и рекомендации для расчета обобщены в Руководстве по техническому нормированию маневровой работы. Рекомендации для определения межоперационных простоев вагонов даны в инструктивных указаниях по организации вагонопотоков. Однако предлагаемые для расчета зависимости в основном установлены по результатам обработки статистического материала на ряде станций или получены построением специальных графиков, вследствие чего не отражают в достаточной мере влияния различных факторов на длительность времени ожидания, в частности, неравномерности различных станционных процессов. Между тем именно это, как правило, и обусловливает межоперационные перерывы. Более приемлемы для определения среднего времени ожидания в различных системах и на технологических линиях сортировочных

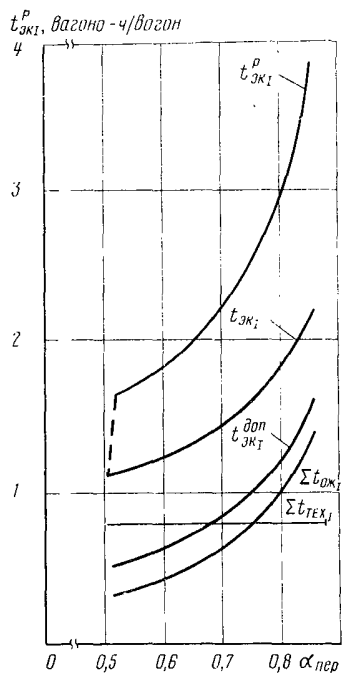

Рис. 3. Зависимость расчетной нормы экономии времени от коэффициента переработки

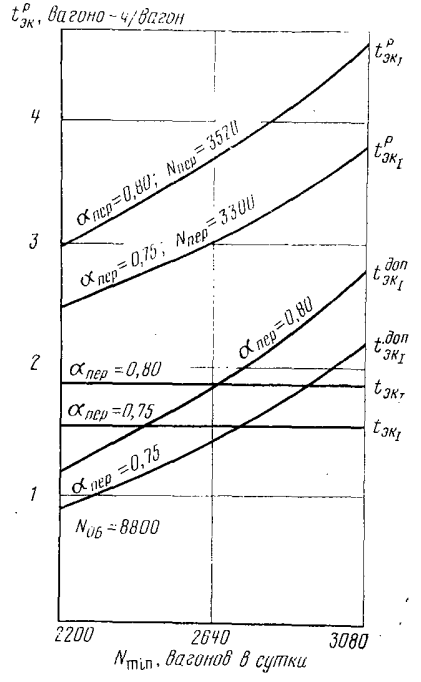

Рис. 4. Зависимость расчетной нормы экономии времени от вагонопотока обязательной переработки

станций аналитические зависимости теории массового обслуживания и моделирование работы систем.

Для примера на рис. 3 показана зависимость расчетной нормы экономии времени в системах расформирования и формирования поездов $t^{п}_{экI}$ и ее составляющих элементов $t_{экI}$ и $t^{доп}_{экI}$ от коэффициента переработки (отношения количества перерабатываемых вагонов к общему вагонопотоку) с учетом изменения вероятностных характеристик потоков. Составы в парке приема обрабатывает одна бригада, роспуск составов последовательный, на горке работают два локомотива, составы формируют и переставляют в парк отправления двумя локомотивами, использование которых обезличено, исходный коэффициент переработки $\alpha_{пер} = 0,5$ (численно равен коэффициенту загрузки горки), поток обязательной переработки 2200 вагонов, показатель неравномерности прокладки ниток графика для грузового движения 0,65, резерв числа ниток графика 0,15.

При увеличении коэффициента переработки от 0,5 до 0,8 расчетная норма экономии времени изменяется с 1,11 до 3,01 вагоно-ч/вагон, т. е. с увеличением коэффициента переработки на 60% $t^{р}_{экI}$ возрастает примерно в три раза, при этом наиболее резко при

коэффициенте переработки более 0,7. С увеличением объема дополнительной переработки экономия времени от уменьшения простоя вагонов обязательной переработки $t_{эк I}^{доп}$ возрастает более интенсивно, чем время нахождения вагонов в системах расформирования и формирования. Поэтому и доля $t_{эк I}^{доп}$ в общей величине $t_{эк I}^{р}$ увеличивается и составляет, например, при $\alpha_{цер} = 0{,}8$ около 67% общего времени нахождения вагонов на станции.

На рис. 4 для тех же условий показана зависимость $t_{эк I}^{р}$ от вагонопотока обязательной переработки. При построении графика принято постоянное значение $\alpha_{цер}$. Поэтому и величина $t_{эк}$ также постоянна. Как видим, дополнительная экономия времени $t_{эк I}^{доп}$ может быть больше или меньше среднего времени нахождения вагонов в системах расформирования и формирования поездов и ее следует учитывать при расчете плана формирования.

3. ПРИВЕДЕННАЯ ЭКОНОМИЯ ВРЕМЕНИ

Переменная часть затрат, связанных с переработкой, простоем и пропуском транзитных вагонов, непосредственно зависящих от распределения сортировочной работы с дальними вагонопотоками, определится из их разности в рассматриваемом $E_{пр}^{р}$ и сквозном $E_{пр}^{с}$ вариантах. Удельные затраты на один дополнительно перерабатываемый вагон среднесуточного потока, приведенные к стоимости 1 вагоно-ч $c_{в\text{-}ч}$, составляют

$$T_{эк} = \frac{E_{пр}^{р} - E_{пр}^{с}}{N_{доп}\, c_{в\text{-}ч}} = \frac{\Delta E}{N_{доп}\, c_{в\text{-}ч}}. \qquad (24)$$

По характеру и степени изменения в зависимости от вагонопотока элементы разности затрат ΔE можно сгруппировать так: связанные с простоем вагонов $E_{вп}$ и соответственно дискретно $E_{вд}$ и непрерывно $E_{вн}$ изменяющиеся. Следовательно, приведенная экономия времени при пропуске вагонопотока без переработки на станции (без экономии от устранения перецепки поездных локомотивов) состоит из суммы расчетной экономии $t_{эк}^{р}$ и эквивалентов переработки вагонов, учитывающих затраты $E_{вд}$ и $E_{вн}$ (соответственно $r_{вд}$ и $r_{вп}$).

Определяя эквиваленты переработки вагонов, необходимо различать две группы сортировочных станций. К первой относятся станции с большим размером вагонопотока обязательной переработки, на которых дополнительный объем сортировочной работы предполагается освоить за счет имеющихся резервов. На таких станциях не предусматриваются мероприятия, требующие единовременных затрат. Следовательно, дискретно изменяющаяся часть затрат и связанный с ней эквивалент переработки равны нулю, т.

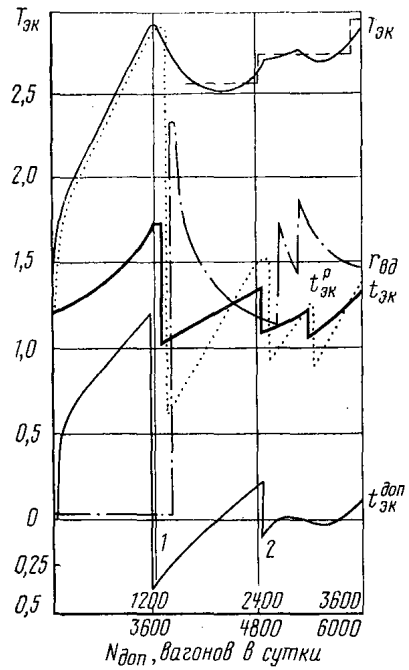

Рис. 5. Зависимость приведенной экономии времени от размера дополнительно перерабатываемого вагонопотока

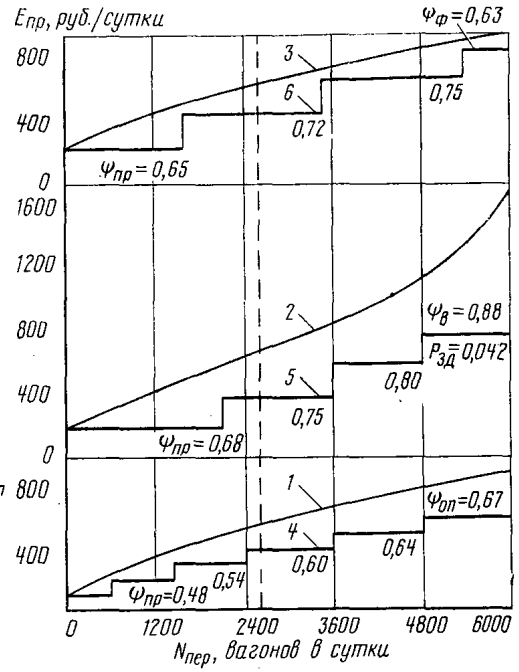

Рис. 6. Зависимость затрат, связанных с простоем и переработкой вагонов, от перерабатываемого вагонопотока

веденная экономия времени зависит главным образом от величины расчетной нормы $t_{эк}^{р}$. Вторая группа включает станции с относительно небольшим вагонопотоком обязательной переработки по сравнению с возможной перерабатывающей способностью при полном использовании технических средств. Размер дополнительно перерабатываемого вагонопотока для них в различных вариантах может колебаться в значительных пределах. Основное условие для определения приведенной экономии времени в каждом варианте для таких станций — соотношение элементов $t_{эк}^{р}$, $r_{вд}$, которое обеспечивает минимальные суммарные приведенные затраты, связанные с простоем и переработкой вагонов. Для этого необходимо найти минимальную разность затрат ΔE при любом дополнительном вагонопотоке. Достаточно составить целевую функцию, позволяющую минимизировать затраты в вариантах изменением значений управляемых переменных (числа горочных и подгорочных локомотивов, групп или бригад для обработки составов и др.). Вид функции для каждой конкретной станции определяют ее техническая оснащенность, технология работы, мероприятия, проводимые для освоения вагонопотока дополнительной переработки. В об-

$t_{эк I}^{р}$ во

щем случае для практических расчетов можно оптимизировать процесс переработки вагонов в каждой из систем (фаз) сортировочной станции с последующей корректировкой временно́го влияния. Тогда определение min ΔE на первом этапе сводится к установлению предельной величины вагонопотока, при котором целесообразно изменять значения переменных параметров технологии и мощности устройств в каждой системе, и, таким образом, находятся границы зон, в пределах которых значения управляемых переменных неизменны. Затем корректируют границы зон, учитывая взаимосвязи в работе систем.

Характер и степень изменения приведенной экономии времени и ее составляющих от размера дополнительно перерабатываемого вагонопотока показаны на рис. 5, при этом условно принято, что $r_{вп} = 0$. Исходные данные соответствуют условиям работы и путевому развитию станции с последовательным расположением парков, на которой горка имеет два пути надвига, роспуск составов последовательный, обрабатывает их в парке приема одна бригада, локомотивы парка формирования не закреплены за маневровыми районами, вытяжек формирования четыре. Размер вагонопотока обязательной переработки 2,5 тыс. вагонов в сутки.

На рис. 6 показана зависимость затрат, связанных с простоем и переработкой вагонов от объема перерабатываемого вагонопотока, затрат в системах расформирования (кривые *1* и *2*) и формирования (кривая *3*) поездов. Ступенчатый график иллюстрирует, как изменяется число групп в бригаде, обрабатывающей составы (линия *4*), число маневровых локомотивов на горке (линия *5*) и в парке формирования (линия *6*). Изменение суммарного времени нахождения вагонов в системах расформирования и формирования $T_{рф}$ и его составляющих $T_{тех}$, $T_{ож}$ (соответственно суммарного технологического времени и межоперационных простоев) показано на рис. 7. Для освоения вагонопотока обязательной переработки (на рис. 6 отмечен штриховой линией) в этих условиях целесообразно иметь соответственно по два локомотива на горке и в парке формирования и четыре группы в бригаде. При изменении перерабатываемого вагонопотока с 2,5 до 6 тыс. вагонов в сутки потребуется увеличить общее число маневровых локомотивов до восьми, а число групп в бригаде до шести или перейти на обработку составов двумя бригадами. Величины предельной загрузки локомотивов и групп в бригаде $\psi_{пр}$, при которой экономически целесообразно увеличивать их число, также отмечены на рис. 6. Экономически оправданный уровень межоперационных простоев при этих значениях $\psi_{пр}$ заключен в пределах 40—60% общего времени нахождения вагонов в системах. Приведенная экономия времени возрастает по мере роста дополнительного перерабатываемого вагонопотока до тех пор, пока параметры станции остаются неизменными. Возрастают также расчетная норма экономии времени $t^{р}_{эк}$ и дополнительная экономия $t^{доп}_{эк}$ от уменьшения простоя вагонов обязательной переработки. Эквивалент переработки вагонов $r_{вд} = 0$.

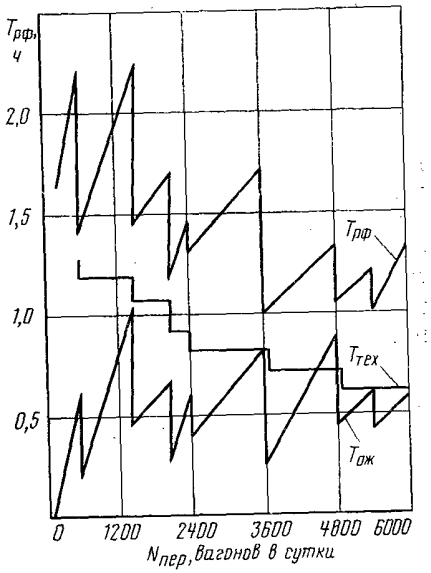

Рис. 7. Зависимость суммарного времени нахождения вагонов в системах расформирования и формирования от перерабатываемого вагонопотока

С вводом дополнительного количества маневровых локомотивов и увеличением числа групп в бригаде эквивалент переработки вагонов, учитывающий дискретно изменяющуюся часть затрат, скачкообразно возрастает. При этом расчетная норма экономии времени уменьшается, значение же $T_{эк}$ остается неизменным.

Практика установления норм экономии, бо́льших для районных и участковых станций и меньших для основных горочных станций, привела к чрезмерно высокой концентрации переработки на основных фабриках маршрутов и недоиспользованию мощностей других станций. Поэтому, на наш взгляд, степень концентрации переработки вагонов на каждой станции следует устанавливать только расчетами при выборе оптимального варианта организации вагонопотоков по переменным нормативам, учитывая характер и степень их изменения в вариантах распределения сортировочной работы. Расчеты показали, что нормативы, рекомендуемые Инструктивными указаниями по организации вагонопотоков, значительно занижены. Особенно при высоких значениях коэффициента переработки вагонов. Разработка норм, учитывающих современные условия эксплуатационной деятельности сети, будет способствовать эффективному распределению сортировочной работы между станциями, повышению транзитности вагонопотоков.

Глава 4 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОГРУППНЫХ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

1. МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКИХ СОПОСТАВЛЕНИЙ СТРУЙ ВАГОНОПОТОКОВ

Метод аналитических сопоставлений до 1944 г. был основным методом расчета эффективного варианта плана формирования. В нем впервые были сформулированы основные условия для специализации струй вагонопотоков. Многие последующие способы расчета плана формирования включают эти условия. Поэтому часто преимущества или недостатки новых предложений по определению оптимального варианта выявляют, сравнивая именно с этим методом. В основе метода аналитических сопоставлений лежит сравнение вагоно-часов накопления и переработки струй вагонопотоков. Это сравнение можно делать для одной, двух или нескольких струй на одной или нескольких попутных станциях.

Аналитические сопоставления выполняют последовательно, начиная с самой дальней струи, выходящей с начальной и следующей на конечную станцию направления. На первом этапе расчета находят лучшее сочетание струй, выходящих с одной станции, т. е. получают вариант плана формирования для каждой станции в отдельности. Затем определяют целесообразность переноса формирования поездов отдельных назначений на другие станции. Это можно делать и параллельно с определением вариантов плана для каждой станции.

Перенос формирования поездов отдельных назначений или объединение струй вагонопотоков, выходящих с предыдущих и последующих станций, целесообразен, если экономия вагоно-часов на попутных станциях при пропуске вагонов без переработки больше, чем затраты при выделении в самостоятельные назначения каждой струи вагонопотоков.

Для выявления специализации струй вагонопотоков используются два основных условия — необходимое и достаточное, которые позволят установить взаимосвязь специализации струй вагонопотоков с затратами вагоно-часов накопления и экономией при пропуске вагонов через станции без переработки. Струя удовлетворяет *необходимому условию*, если

$$N_i \sum_{j=1}^{n-2} T_{\text{эк } j} \geqslant cm_i, \qquad (25)$$

где N_i — среднесуточный размер струи вагонопотока;

$\sum_{j=1}^{n-2} T_{\text{эк } j}$ — общая экономия приведенных вагоно-часов от проследования вагона в составе транзитных поездов через попутные технические станции;

cm_i — суточная затрата вагоно-часов на накопление составов одного назначения на станции формирования;

n — число станций на направлении.

Струя, удовлетворяющая необходимому условию, рассматривается как конкурентоспособная с другими объединениями струй вагонопотоков, выходящих с той же станции. Каждую конкурентоспособную струю при определенных условиях можно выделить как в самостоятельное назначение, так и объединить с другими струями. Окончательно вариант, обеспечивающий минимальные суммарные затраты вагоно-часов на накопление и переработку выбирают в зависимости от наличия и размеров параллельно расположенных струй вагонопотоков. Причем экономия вагоно-часов при объединении струй должна превышать количество вагоно-часов переработки, вызванной этим объединением. Только при таком условии вариант плана экономически оправдан.

Если рассматриваемая струя, кроме необходимого, удовлетворяет и достаточному условию дополнительных сравнений объединения с другими параллельными струями вагонопотоков, выходящими с этой же станции, не делают. Если же она удовлетворяет только необходимому условию, то, прежде чем выделить ее в самостоятельное назначение, необходимо выявить вариант, обеспечивающий бóльшую суммарную экономию вагоно-часов при совместном проследовании нескольких струй вагонопотоков в транзитных поездах через попутные станции направления. Струя удовлетворяет *достаточному условию*, если

$$N_i \sum_{\text{уст}} T_{\text{эк } j} \geqslant cm_i, \qquad (26)$$

где $\sum_{\text{уст}} T_{\text{эк } j}$ — общая приведенная экономия вагоно-часов от проследования вагоном без переработки одной или нескольких технических станций, включая станцию назначения наиболее короткой струи и расположенных за нею.

В нескольких вариантах с равными затратами вагоно-часов переработки и накопления распределение сортировочной работы между станциями может быть различным. Эти варианты следует проверить на соответствие объема сортировочной работы перерабатывающей способности станций.

Наиболее сложен в методе аналитических сопоставлений — перенос назначений с начальных на последующие станции.

В 1948 г. отделение эксплуатации ВНИИЖТ с участием И. И. Васильева внесло изменения в последовательность расчета,

предложив рассматривать целесообразность переноса формирования поездов с предыдущей на последующую станцию после нахождения предварительного варианта плана формирования для двух станций. Это несколько ускоряет процесс нахождения лучшего варианта. Однако аналитический метод не гарантирует нахождения оптимального варианта плана формирования поездов.

Дополняя метод аналитических сопоставлений графическим изображением вагонных струй, В. С. Ларионов [20] предложил их в зависимости от величины подразделять по мощности: достаточной, необходимой и малой. Кроме того, струи, выходящие с одной станции, он группировал по расчетным зонам. Границами зон служили станции, на которые следовали опорные струи, т. е. те, которые удовлетворяли достаточному условию, а зоны подразделялись по поясам, ограниченным станциями, на которые следовали струи необходимой мощности. В этом предложении сохранены не только основные положения метода аналитических сопоставлений, но и выдержан общий порядок расчета, предложенный И. И. Васильевым. В то же время графоаналитический способ несколько улучшает наглядность выполнения расчетов. Определение лучшего варианта плана рекомендуется начинать с выделения в самостоятельные назначения опорных струй, к которым относятся струи, удовлетворяющие:

абсолютному условию

$$N_i T_{эк}^{min} > cm_i; \tag{27}$$

достаточному условию по уступам

$$N_i \sum_{уст} T_{эк} > cm_i; \tag{28}$$

необходимому условию

$$N_i \sum_{1}^{n-2} T_{эк} > cm_i. \tag{29}$$

Для нахождения оптимального варианта плана достаточно найти лучшие комбинации в пределах изолированных зон и нижних опорных струй, а после этого увязать выбранный план с верхней опорной струей. За исходное положение для каждой промежуточной и нижней зоны принимают объединение всех струй каждой из них со своей верхней опорной струей. Если в пределах промежуточной или нижней зоны ни одно из объединений струй не удовлетворяет достаточному условию, то целесообразно все струи объединить с верхней опорной струей. Однако, как нетрудно увидеть, такое присоединение струй справедливо только для изолированного рассмотрения планов формирования станций. Кроме того, если в верхней зоне ни одно из объединений струй не удовлетворяет необходимому условию, то эти струи не рассматриваются как конкурентоспособные. Чтобы упростить объединение струй необходимой мощности, расчетные зоны разбивают на пояса и оптимальные комбинации струй определяются по ним.

Наиболее сложно найти оптимальную комбинацию объединений струй в общем случае. Рекомендуется расчеты выполнять в два этапа. На первом найти оптимальные комбинации для отдельных станций, а затем, сопоставляя уже отобранные конкурентоспособные объединения,— лучшие из них. Однако в этой части расчета строгой последовательности нет, и поэтому получить оптимальный вариант для всех станций одновременно невозможно. Отсутствие теоретических положений для объединения конкурентоспособных струй, а также строгих правил объединения струй даже в одной зоне и выбора варианта плана для всего направления не дает преимуществ этому методу перед аналитическими сопоставлениями и его практически не применяют для расчета плана формирования на сети.

На уточнение аналитических расчетов направлено также предложение проф. Л. В. Одинцова [21]. Он предлагает сначала определить расчетное количество назначений, а затем, используя это число, найти и сам вариант плана формирования. Целесообразность специализации струй вагонопотоков κ назначений определяется неравенством

$$\frac{\sum_{1}^{\kappa} t_{сб}}{\kappa}\left(1-\frac{1}{\kappa}\right)N_i \geqslant 12m_c\left(1-\frac{1}{\kappa}\right)\kappa, \tag{30}$$

из которого находится расчетное число назначений

$$\kappa = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{\kappa} t_{сб} N}{12m_c}} \tag{31}$$

при

$$\frac{\sum_{1}^{\kappa} t_{сб}}{\kappa} = \frac{t_{сб_1}(\kappa-1)+t_{сб_2}(\kappa-2)+\ldots+t_{сб_\kappa}}{\kappa} \tag{32}$$

и

$$N_{ср} = N - \frac{N}{\kappa} = \left(1-\frac{1}{\kappa}\right)N, \tag{33}$$

где $t_{сб_1}, t_{сб_2}, t_{сб_\kappa}$ — сберегаемое вагоном время на участковых или сортировочных станциях;

$N_{ср}$ — вагонный поток, следующий до первой участковой или сортировочной станции;

κ — расчетное число назначений;

m_c — число вагонов в составе.

Причем, если число назначений больше количества струй вагонопотоков или равно ему, то надобности в определении оптимального варианта нет. В этом случае вагонопотоки каждой струи приобретают право самостоятельного назначения. Если число назначе-

ний меньше количества струй вагонопотоков, рекомендуется отменить наиболее слабые из них, обеспечивающие наименьшие сбережения вагоно-часов. Предлагается отменить и участковое назначение, следующее на первую попутную техническую станцию, как не обеспечивающее сбережения вагоно-часов.

В данной методике число назначений специализированных поездов определяют для каждой станции в отдельности. Однако известно, что это в большинстве случаев не может обеспечить нахождение оптимального варианта плана для всего направления. Кроме того, в расчете часы экономии для всех струй вагонопотоков суммируются, а следовательно, по затратам вагоно-часов струи приравниваются друг другу. Поэтому наличие крупных струй вагонопотоков часто искусственно увеличивает число назначений. Такой порядок выделения струй вагонопотоков в самостоятельные назначения должен быть подкреплен дополнительными проверками и расчетами. Методика предлагает выделять струи вагонопотоков в самостоятельные назначения так, чтобы покрыть затраты на их накопление. Этот прием может обеспечить нахождение одного из эффективных вариантов, но не оптимального, так как параллельно расположенные вагонопотоки не рассматриваются. К сожалению, в предложении отсутствуют правила объединения струй вагонопотоков, а следовательно, и определения минимальных затрат вагоно-часов накопления и переработки.

К. А. Бернгард [13], считая методику аналитических сопоставлений ВНИИЖТ несовершенной, уточнил и развил ее, предложив определять оптимальный вариант плана для одной технической станции непосредственно по ступенчатому графику вагонопотоков. Он рекомендует отбирать конкурентоспособные варианты по группам струй. Число таких групп для каждой станции устанавливают по минимальному количеству попутных станций на направлении, на которых суммарные сбережения от проследования вагонов наиболее дальней струи без переработки превышают *ст*. Предположим, что сбережения для струи N_1 (рис. 8) превышают вагоно-часы накопления на последних двух станциях *Д* и *Е*. Тогда число групп вариантов для струй N_1 и N_2 не должно превышать двух, так как ограничивать дальность пробега поездов до предпоследней станции нецелесообразно. Поэтому следует рассматривать отдельно две струи N_1 и N_2 и для каждой из них установить отдельное назначение. В этом и заключается основное допущение.

Если рассматривать совместно только две струи N_1 и N_2, то целесообразно формировать поезда более дальнего назначения, т. е. до конечной станции направления *Ж*. Проследование вагонов струи N_1 без переработки через станции *Д* и *Е* дополнительно обеспечит экономию 120 вагоно-часов в сутки, так как переработка их на станции *Е* больше, чем струи N_2 на станции *Д* (330—210 = = 120 вагоно-ч). В качестве исходного предлагается принимать вариант, включающий назначения, состоящие из нескольких дальних струй вагонопотоков. Если самая дальняя из них не

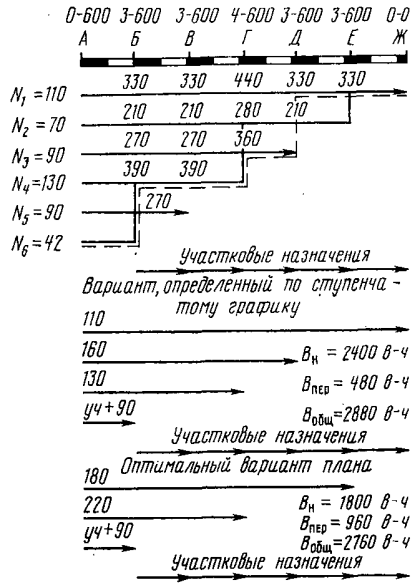

Рис. 8. Схема выбора плана формирования поездов по ступенчатому графику

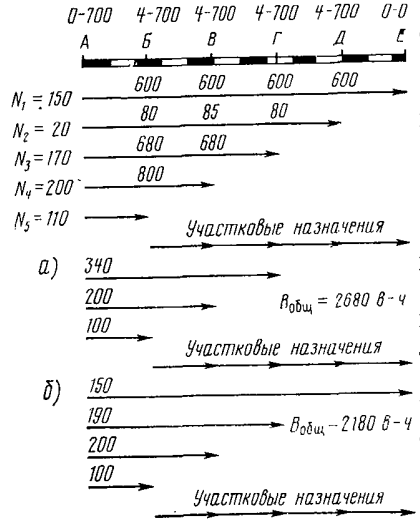

Рис. 9. Схема определения оптимального варианта плана формирования

удовлетворяет необходимому условию или сбережение вагоно-часов от проследования следующей струей последней опорной станции превышает сбережение от проследования другими более дальними струями следующей опорной станции, то вагонопоток таких струй не специализируется. На основе этого и решен вопрос о формировании поездов из вагонов струй N_1 и N_2. Остальные назначения в этом примере намечены к выделению исходя из того, что каждое из них на опорных станциях, расположенных дальше следования поездов более короткого назначения, обеспечивает сбережение вагоно-часов. Самое короткое назначение проверяется по необходимому условию.

Серьезно усовершенствовал метод аналитических сопоставлений Л. П. Тулупов [30]. Табличный способ, предложенный им, позволяет рассчитывать план формирования поездов для направлений любой конфигурации с большим числом станций. Специальная таблица состоит из нескольких частей, отражающих первичную координацию вагонопотока; суммы отправляемых вагонов со всех предыдущих станций; общий вагонопоток. Начиная с тупиковых станций, суммируя струи вагонопотоков, получают различные объединения их. Оптимальный вариант получают в несколько этапов. Сначала исключают все дальние назначения, мощность потока которых

$$N_i < \frac{\min ст}{\frac{2}{3}\max T_{ск}}. \quad (34)$$

Оставшиеся назначения проверяют последовательно по поясам дальности, начиная с самого дальнего. В процессе расчета при необходимости намечают ряд вариантов, учитывающих местные условия, для которых подсчитывают показатели плана формирования. Этот метод обычно использовали для получения вариантов при изменении вагонопотока или проверки целесообразности действующего плана формирования.

А. К. Угрюмовым [32] предложен несколько иной вариант объединения вагонных струй, выходящих с одной технической станции, что также направлено на уточнение метода аналитических сопоставлений. Рекомендуется сопоставлять струи не попарно, а группами, поскольку условия объединения вагонов нескольких струй в одно назначение зависят от мощности не только второй, но и третьей, четвертой, а иногда и следующих более коротких струй. Поэтому можно сказать, что варианты объединения струй зависят от наличия и величины параллельно расположенных струй. Расчеты необходимо выполнять, начиная с наиболее дальней струи.

Например (рис. 9), струя N_1 не удовлетворяет достаточному условию, так как $N_1 T_д < cm$, т. е. $600 < 700$. Если $(N_1 + N_2)\, T_г > cm$, то рекомендуется не объединять три струи, так как присоединение $N_1 + N_2$ к N_3 ликвидирует одно назначение оптимального варианта и, следовательно, затраты вагоно-часов увеличатся. Но так как в примере $(N_1 + N_2)\, T_г < cm$, а $(N_1 + N_2 + N_3)\, T_в > cm$, объединение трех струй с N_4 нецелесообразно, и струи N_1, N_2, N_3 составят группу, в которой имеется назначение оптимального варианта. Это утверждение — основное для объединения струй вагонопотоков.

Как уже говорилось, объединения струй вагонопотоков рекомендуется группировать, начиная с самых дальних. Струю, удовлетворяющую достаточному условию, маршрутизируют без дополнительных сравнений. Разделив все струи, выходящие с одной станции на группы, выделяют назначения оптимального варианта плана, а затем выбранный вариант корректируют. Однако считается, что этого можно не делать, если:

в дальней группе выгодно специализировать короткую струю;

ближняя группа состоит из одной струи, удовлетворяющей достаточному условию;

в рассматриваемой группе выгодно специализировать дальнюю струю.

Такое утверждение, как будет видно далее, не совсем точно и не позволяет во всех случаях найти оптимальный вариант плана формирования. На рис. 9, *а* показан вариант плана, в котором выходят со станции A два назначения сквозных поездов $A — Г$ и $A — В$. Суточные затраты вагоно-часов на их накопление (участковое назначение $A — Б$ в сравнение не принимают, так как оно остается во всех вариантах) составят $2\, cm = 700 \cdot 2 = 1400$, а вагоно-часы переработки $N_1 (T_г + T_д) + N_2 T_г = 1200 + 80 = 1280$. Общие затраты выбранного варианта 2680 вагоно-часов. В оптимальном же варианте (рис. 9, *б*) вагоно-часы накопления $3\, cm = 3 \cdot 700 = 2100$, а вагоно-часы переработки $NT_{эк} = N_2 T_г = 20 \cdot 4 = 80$. Общие затраты 2180 вагоно-часов. Таким образом, вариант, получаемый по рассматриваемой методике, отличается от оптимального в сторону увеличения на 500 вагоно-часов.

Следует отметить, что, несмотря на определенную ценность предложений А. К. Угрюмова, описания строгой последовательности корректировки при наложении вариантов плана у него нет. Поэтому для больших направлений ее часто приходится выполнять только подбором наиболее эффективных назначений, что не во всех случаях гарантирует оптимальность плана.

2. МЕТОД АБСОЛЮТНЫХ РАСЧЕТОВ

Массовые расчеты с определением показателей каждого варианта для небольшого направления, где количество станций не превышает пяти-шести, можно делать методом абсолютных расчетов, предложенным проф. А. П. Петровым [23]. Разработанные им таблицы позволяют выбрать эффективные варианты плана из определенного их количества. Для каждого варианта заполняется отдельная таблица (рис. 10). Она разбита на две части: в верхней записывают вагонопоток и вагоно-часы переработки, в нижней — вагоно-часы накопления. Справа от таблицы помещена характеристика варианта, т. е. порядок объединения струй. Так, для первой станции $Б + В, Г, Д$ означает, что вагонопотоки, следующие на станции $Б$ и $В$, объединяются и перерабатываются на станции $Б$, а на станции $Г$ и $Д$ следуют в самостоятельных назначениях без переработки на $Б$ и $В$. В данном случае в таблицу включено только число вагонов, которые отправляет станция $А$ на $В$. Количество вагонов проставляется под станцией $Б$, так как на ней они должны перерабатываться.

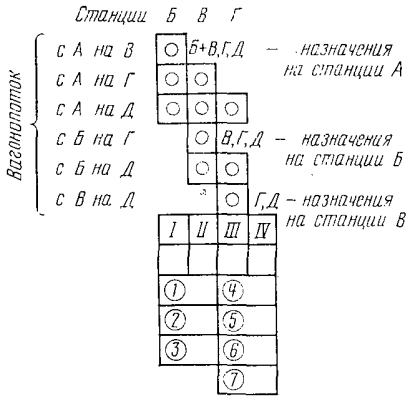

Рис. 10. Расчетная таблица для полигона из пяти станций:

1, 2, 3 — число назначений соответственно на станциях *А, Б, В*; *4, 5, 6* — вагоно-часы накопления соответственно на станциях *А, Б, В*;
7 — общие вагоно-часы в варианте;
I, II, III — число перерабатываемых вагонов на станциях *Б, В, Г*;
IV — общее число перерабатываемых вагонов в варианте

Расчеты делятся на два этапа. Вначале находят план для основных опорных сортировочных станций, затем определяют наиболее выгодные варианты его

между опорными станциями. К опорным относятся станции начала и конца направления, крупные сортировочные, массового зарождения или погашения вагонопотока, а также технические, прибывающий на которые и отправляющийся с которых вагонопоток удовлетворяет необходимому условию. В число опорных на первом этапе не включают станцию, вагонопоток которой (прибывающий и отправляющийся) не удовлетворяет необходимому условию. Однако следует отметить, что расчет плана формирования сначала для опорных, а затем для станций, расположенных между ними, не позволяет во всех случаях найти действительно оптимальный вариант, так как сам выбор небольшого числа станций уже предрешает определение окончательного варианта.

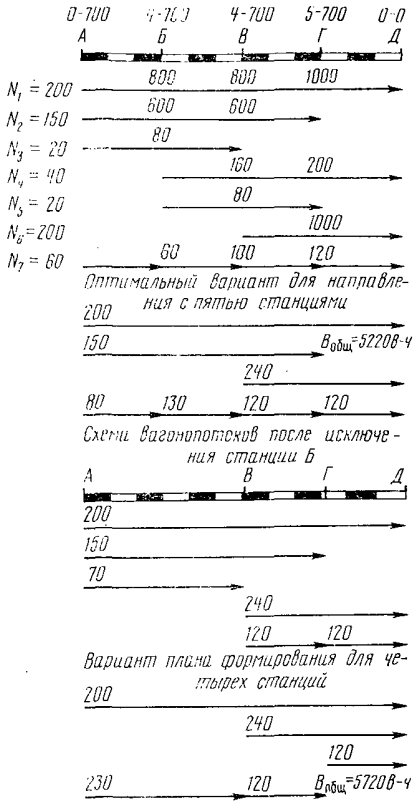

Рис. 11. Схема определения числа опорных станций на направлении

Отбор опорных станций — составная часть расчета плана формирования. На этом следует остановиться отдельно. Использование указанного выше условия, по которому устанавливают опорные станции методом абсолютного расчета, может в отдельных случаях привести к выбору неоптимального варианта плана формирования.

Например (рис. 11), вагонопоток станции *Б* не удовлетворяет необходимому условию. Поэтому станцию *Б* следует исключить из расчета. Это меняет условия специализации не только тех струй вагонопотоков, которые зарождаются или погашаются на ней, но и тех, которые проходят ее транзитом. Так, это в первую очередь отражается на струе N_2, которая станцию *Б* проходила транзитом. До исключения станции *Б* струя N_2 удовлетворяла необходимому условию и из ее вагонов можно было формировать поезда, а теперь она превратилась в струю, которую надо перерабатывать на каждой станции, например *В*, так как $N_2 T_в < cm$, или $150 \cdot 4 = 600 < 700$.

На втором этапе при расчете плана между опорными станциями *А* и *В* струю N_2 также следует перерабатывать на станции *Б*, так как $(150+20)\,4 = 680 < 700$ вагоно-ч. Если же станцию *Б*

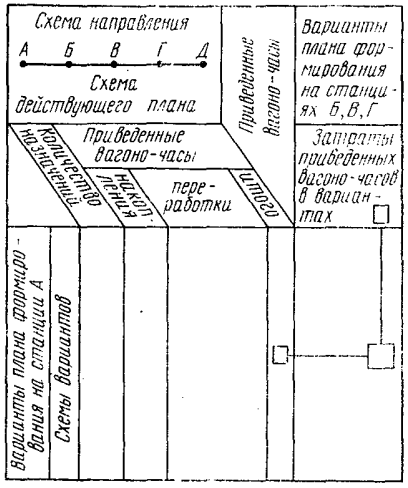

Рис. 12. Расчетная таблица

оставить в расчете, струя N_2 проследует станции *Б* и *В* транзитом. Поэтому переработка струи на станциях *Б* и *В* дает потерю 150 (4+4)—700 = 500 вагоно-ч. Еще большие расхождения с оптимальным вариантом могут получиться при исключении ответвления, так как многие струи или группа струй, которые удовлетворяют необходимому или даже достаточному условию, должны прерываться, а следовательно, и перерабатываться на узловой станции. Это может привести к перегрузке последней.

С помощью таблиц подсчитывают и основные показатели плана для каждой станции и для всего варианта в целом, а именно: число вагонов, подлежащих переработке на попутных станциях; вагоно-часы переработки, накопления и общие; число назначений плана формирования. К сожалению, сфера применения рассмотренного метода ограничена, так как таблицы можно составить только для прямолинейных направлений с пятью опорными станциями. С небольшими допущениями метод используется для направления с шестью станциями.

В развитие метода абсолютных расчетов К. А. Бернгард сделал несколько дополнений [11]. Таблицы всех 64 вариантов плана для пяти станций он объединил в одну общую (рис. 12). Это позволило подсчитать вагоно-часы и показатели не для каждого варианта, а для групп струй и объединять струи на разветвленных направлениях, включающих пять опорных станций.

3. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУППЫ ЛУЧШИХ ВАРИАНТОВ

Основной критерий для выбора оптимального варианта методом, который получил название метода МИИТ (предложение В. Г. Саенко и Б. Дел Рио), — также затраты вагоно-часов переработки и накопления. Однако аналитические сопоставления в нем несколько уточнены. Вагонные струи, например, попарно не сопоставляются. Предварительно находят группы вариантов плана с примерно одинаковым числом назначений, предполагая, что среди них должен находиться и оптимальный вариант. Максимальное число назначений в группе лучших вариантов не должно превышать количества струй, удовлетворяющих необходимому условию. Это

утверждение недостаточно теоретически обосновано, так как количество назначений в таких вариантах плана формирования зависит как от мощности, так и от числа и взаимного расположения отдельных струй.

Известно, что струи, каждая из которых в отдельности не удовлетворяет необходимому условию, при суммировании могут удовлетворять не только необходимому, но и достаточному условию и обеспечивать необходимую экономию вагоно-часов.

Группу лучших вариантов определяют в зависимости от числа переработок струй вагонопотоков (струепереработок) и количества назначений плана формирования. Эту зависимость можно выразить графиком (рис. 13). Пользуясь нижней кривой $\gamma_{min} = f(\kappa)$, можно теоретически (практически этот вывод справедлив только при равенстве величин всех струй и экономии времени от проследования станций) определить варианты с одинаковым числом назначений. Выделение сквозных назначений сокращает количество струепереработок.

При подсчете затрат в вариантах допускается, что вагоно-часы накопления на одно назначение на всех станциях равны и зависят только от числа назначений.

В начале расчета для каждого варианта находят наименьшие общие затраты вагоно-часов, предполагая равенство вагоно-часов накопления на всех станциях и теоретически возможное сокращение числа переработок струй. Затем выбирают лучший вариант плана формирования. Для облегчения этой довольно трудоемкой работы строят специальную таблицу, в верхнюю часть которой для каждого варианта заносят количество вагоно-часов в возрастающем порядке, в нижней для соответствующих вариантов проставляют вагоно-часы накопления, которые при постоянном числе назначений не меняются. Складывая вагоно-часы переработки и накопления, получают общие затраты для данного варианта. Эта сумма вагоно-часов называется *критической*. Авторы предполагают, что оптимальный вариант находится в группе имеющих одинаковое число назначений или на одно больше или меньше.

Методика предусматривает, что после установления количества назначений надо приступить к выделению конкретных струй. Расчеты начинают с исходного варианта, в который включают струи с наибольшей экономией вагоно-часов. Максимальное число выделяемых струй соответствует количеству назначений, удовлетворяющих необходимому и достаточному условиям. Затем от исходного переходят к оптимальному варианту, заменяя и объединяя отдельные струи так, чтобы увеличение вагоно-часов от поступления в переработку части дальних струй было меньше, чем сокращение их от изъятия из переработки ближних струй, вновь выделенных в назначение.

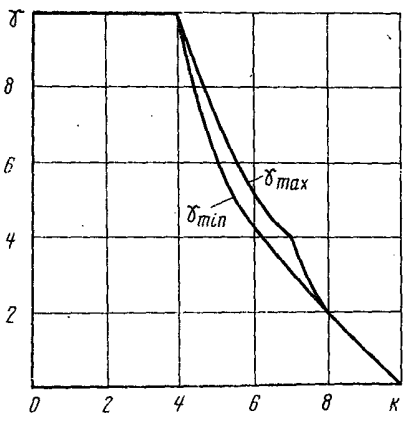

Рис. 13. График зависимости $\gamma = f(\kappa)$ для пяти опорных станций

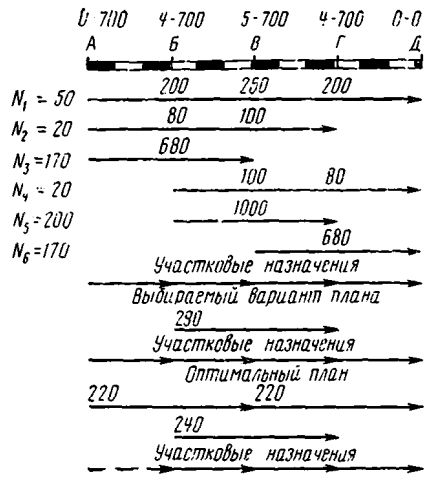

Рис. 14. График вагонопотоков на направлении А—Д и оптимальный вариант плана формирования

Следовательно, при переходе от исходного к оптимальному варианту используют метод аналитических сопоставлений, который несколько уточнен для объединения струй. Последовательность же и порядок выделения назначений в оптимальный вариант определяют подбором. Поэтому трудно гарантировать, что выбранный вариант действительно оптимален. Затрудняет применение этого метода громоздкость и сложность расчета и построения таблиц. Кроме того, одинаковые величины *ст* для всех станций также дают большие погрешности.

Пример расчета. Определим оптимальный вариант плана для прямолинейного направления *А—Д* (рис. 14). Сначала строим расчетную таблицу (табл. 7). Наименьшие затраты 5420 вагоно-ч будут достигнуты при пяти назначениях ($\kappa = 5$). Из них одно сквозное и четыре участковых. Варианту из четырех участковых назначений соответствуют 6170 вагоно-ч затрат, поэтому его во внимание не принимаем. Вариант, расположенный справа от оптимального (шесть назначений), увеличивает общие затраты только на 110 вагоно-ч. Следовательно, в данном случае необходимо рассматривать варианты с пятью и шестью назначениями ($\kappa = 5$ и $\kappa = 6$). Однако оптимальный вариант, рассчитанный другими способами, должен иметь не пять, а семь назначений.

Итак, методом МИИТ в оптимальный вариант плана включают четыре участковых и одно дальнее назначение. Поэтому, чтобы получить исходный вариант, выбирают назначение с максимальной экономией вагоно-часов, а именно струю N_5, которая проходит одну станцию *В* транзитом и удовлетворяет достаточному условию. Поэтому вопрос об ее укорочении или перенесении не рассматривают. Все расположенные выше струи N_1, N_2 и N_4 на участках *Б—В* и *В—Г* целесообразно объединять с ней. Других назначений нет и расчет оптимального варианта на этом кончается. Расчетная таблица в данном примере не используется, так как определять число сокращаемых струй и количество переработок нет необходимости.

Интересно отметить, что в оптимальном варианте, как уже говорилось, должно быть семь назначений, а методом МИИТ получается только пять. Для уточнения этого обратимся к рис. 14. При четырех назначениях все дальние струи перерабатываются на каж-

Таблица 7

Расчетная таблица для определения затрат вагоно-часов

	Вариант			
	$к=4$	$к=3$	$к=5$	$к=6$
	650	Б, В, Г — 650	Б, Г — 400	Б, Г — 450
	180	Б, В — 180	Б — 180	Г — 100
	680	Б — 680	Б — 680	—
	180	В, Г — 180	Г — 80	Г — 80
	1000	—	—	—
	680	Г — 680	Г — 680	Г — 680
	3570	2370	2020	1310
А	700	700	700	1400
Б	700	1400	1400	1400
В	700	700	700	700
Г	700	700	700	700
$T_{нак}$	2800	3500	3500	4200
$T_{общ}$	6170	5870	5420	5510

дой станции (всего 10 переработок), а при пяти назначениях четыре переработки снимаются. На самом же деле при выделении в рассмотренном примере одного назначения $Б — Г$ фактически снимаются только две переработки (1000 и 250 вагоно-ч), а две остальные (по 680 вагоно-ч) останутся. Таким образом, расчетный график на рис. 14 не позволяет решить вопрос о выделении конкретных струй и не может служить основой для определения оптимального варианта, так как не учитывает взаимного расположения различных по мощности струй. Кроме того, построение зависимости $\gamma = f(к)$ для больших направлений требует много времени и не гарантирует того, что число назначений и их переработка установлены правильно.

Большие пробелы имеет вторая часть расчета (переход от исходного к оптимальному варианту), которая основывается больше на сообразительности, чем на теоретических доказательствах и обоснованиях целесообразности объединения струй. Неудачна также и форма расчетной таблицы для нахождения исходных вариантов по сбережениям вагоно-часов. В нее же заносятся абсолютные затраты вагоно-часов. Все это сокращает область применения метода, несмотря на его ценные стороны, одна из которых — установление числа назначений оптимального варианта и зависимости числа струепереработок от количества назначений.

4. МЕТОД СОВМЕЩЕННЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СОПОСТАВЛЕНИЙ

Определение лучших вариантов плана формирования методом совмещенных аналитических сопоставлений основано на последовательном отборе наивыгоднейших и исключении нецелесообразных по приведенным вагоно-часам сквозных назначений. Все расчеты выполняют с помощью специального графика возможных назначений с учетом изложенных далее пяти положений. Введены следующие понятия и обозначения. Назначения, обеспечивающие наибольшую экономию вагоно-часов, именуются исходными. Каждое из них может быть одно- и многоструйным. В многоструйное назначение включают две или несколько струй вагонопотоков. Исходное одноструйное назначение, удовлетворяющее так называемому общему достаточному условию, еще до построения графика включают в оптимальный вариант. Считается, что струя, удовлетворяющая общему достаточному условию, должна обеспечивать на любой попутной опорной станции сбережения

$$N_i \min T_{эк\,j} > cm_i. \qquad (35)$$

Ранее это понятие называлось достаточным или *абсолютным условием* для выделения струй. Для струй вагонопотоков определяют и экономию вагоно-часов по уступам — попутным техническим станциям, не входящим в маршрут исходного назначения, включая и станции назначения. Соприкасающимися называют группу коротких струй, которые проходят по тем же станциям, что и дальняя, и, будучи последовательно расположенными, в сумме образуют маршрут ее следования. Две струи соприкасаются на одной станции, три — на двух и т. д. Если назначения расположены параллельно и их пункты отправления и назначения сдвинуты вправо или влево на одну станцию, они называются нахлестывающимися.

Согласно методике сначала устанавливают назначения наиболее дальних струй вагонопотоков. Струи, удовлетворяющие общему достаточному условию и следующие с начальной до конечной станций, выделяют в самостоятельные назначения без каких-либо сопоставлений. Для всех остальных вагонопотоков составляют график всех возможных назначений. Для каждого назначения находят разность приведенных вагоно-часов возможной экономии и накопления. Назначения с положительной разностью относят к категории конкурентоспособных, все другие — к неэффективным.

Затем выявляют исходное назначение, обеспечивающее максимальную экономию приведенных вагоно-часов. Положения для выделения исходного назначения в самостоятельное назначение оптимального варианта разработаны К. А. Бернгардом [13]. После каждого выделения исходного или другого эффективного назначения в самостоятельное график корректируют, исключая струи, вошедшие в выделенное назначение. Затем по новому графику опять находят наиболее эффективное назначение, которое также

проверяют на право выделения в оптимальный вариант. Расчеты выполняют до тех пор, пока не рассмотрят все эффективные назначения. Следует отметить, что график назначений несколько облегчает расчеты и увеличивает их наглядность. В то же время процесс его пересоставления после каждого выделения назначения практически требует большой затраты времени. Окончательный вариант позволяет, как правило, обеспечить наибольшую экономию вагоно-часов и для данного направления является одним из лучших.

Пять основных положений расчета плана формирования следующие:

1. Исходное одноструйное назначение, удовлетворяющее общему достаточному условию, включается в оптимальный вариант плана без каких-либо сопоставлений с другими назначениями. Это позволяет до составления графика назначений специализировать крупные струи вагонопотоков, следующие с начальной и до конечной станции направления. Однако при включении в исходное назначение нескольких струй вагонопотоков, пробег которых превышает путь следования поездов исходного назначения, требуется выполнить более сложные расчеты, для чего используются последующие теоретические положения.

2. Исходное многоструйное назначение, содержащее струю вагонопотока, которая удовлетворяет общему достаточному условию, включается в оптимальный вариант плана, если

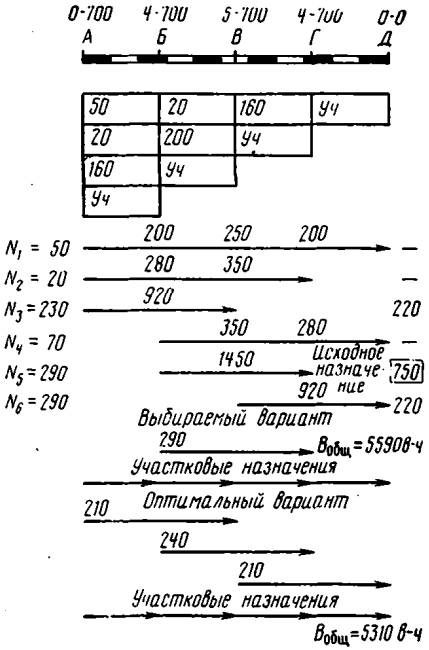

Рис. 15. Схема выбора плана формирования

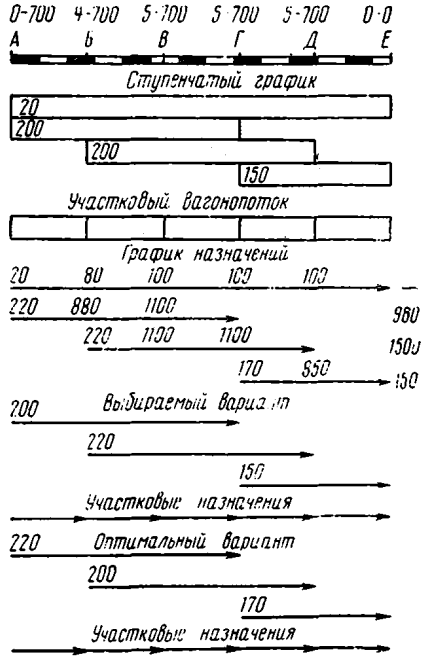

Рис. 16. Схема для выделения эффективных назначений

все более дальние назначения дают на опорных станциях, не совпадающих с маршрутом следования поездов исходного назначения (по уступам), сбережения менее *ст* вагоно-часов. Рассмотрим это положение на графике назначений (рис. 15). Для данного примера многоструйное назначение *Б — Г* (290 вагонов) исходное, обеспечивает максимальную экономию 750 вагоно-ч. Кроме того, струя N_5 (200 вагонов), входящая в него, удовлетворяет общему достаточному условию, так как $N_5 T_B > ст$ или $200 \cdot 5 = 1000 > 700$ вагоно-ч. Поэтому назначение *Б — Г*, включающее струи N_1, N_2, N_4 и N_5, следует выделить в оптимальном варианте в самостоятельное назначение, поскольку струя N_5 удовлетворяет общему достаточному условию. Для всех дальних струй соблюдается неравенство

$$N_{\text{дал}} \sum_{\text{уст}} T_{\text{эк}} < ст.$$

Следовательно, так же как и в уточненном методе аналитических сопоставлений, в оптимальный вариант надо выделить одно сквозное назначение *Б — Г* (290 вагонов). В действительности же в оптимальный вариант плана должно входить не одно назначение *Б — Г*, а три — *А — В*, *Б — Г* и *В — Д*. Поэтому для нахождения оптимального варианта необходимо выявить целесообразность оставления маломощных струй в исходном назначении, так как наличие самой короткой мощной струи и величина экономии вагоно-часов по уступам для остальных струй не могут однозначно решить вопрос о том, к каким назначениям следует присоединять маломощные струи. Как видно из примера, если маломощную струю N_1 включить в исходное назначение *Б — Г*, то назначения *А — В* и *В — Д* отпадут как нецелесообразные. В то же время при проследовании вагонов струи N_1 в назначении *Б — Г* экономится только 250 вагоно-ч ($N_1 T_B = 50 \cdot 5$). При включении же струи N_1 в назначение *А — В*, а затем *В — Д* общая экономия составит $N_1 (T_Б + T_Г) = 50\ (4+4) = 400$ вагоно-ч. При таком объединении общие затраты уменьшатся на 150 вагоно-ч. Это может обеспечить выделение одного или нескольких самостоятельных назначений. Чтобы получить оптимальный вариант, необходимо это положение дополнить условиями, которые позволят безошибочно решить вопрос: оставить или выделить в самостоятельные назначения объединенные струи.

3. Из назначений с большей дальностью пробега (чем поездов исходного назначения) в оптимальный вариант плана включают то, которое содержит мощную струю вагонопотока, удовлетворяющую общему достаточному условию и на опорных станциях, не совпадающих с маршрутом следования поездов исходного назначения, обеспечивает наибольшие сбережения вагоно-часов (за вычетом *ст* на накопление составов). Однако расчеты показывают, что объединение струй по этому положению не всегда обеспечивает их оптимальное проследование.

4. В остальных случаях исходное назначение, а также более эффективное дальнее дополнительно сопоставляют с группами коротких соприкасающихся назначений и отбирают сочетание назначений, дающее наибольшие сбережения.

В приведенном ранее примере включение в расчеты исходных и соприкасающихся назначений вместо конкретных струй приводит к отходу от оптимального варианта. Значит это теоретическое положение также не полностью учитывает все случаи объединения струй. В практических расчетах плана часто возникает необходимость выделить одну или две струи из исходного назначения и включить их в другое, на первый взгляд, менее эффективное, но обеспечивающее проследование маломощных струй с большой экономией приведенных вагоно-часов. Определена также последовательность выделения исходного многоструйного назначения. Считается, что его можно отбирать в качестве первоочередного в оптимальный вариант плана, если нет более дальних эффективных назначений, дающих по уступам сбережения большие, чем *ст*. Рекомендуется не сопоставлять это назначение с более короткими, если в отдельных случаях не минимизируются затраты приведенных вагоно-часов. Если требуется выделить более дальнее по сравнению с исходным назначение, то делать это целесообразно в зависимости от числа попутных технических станций, а не от исходного назначения. Не уточнен вопрос о небольших струях: по каким дополнительным условиям их можно оставлять в исходном или следует включать в другие назначения.

5. Из двух назначений сквозных поездов, пункты формирования и расформирования которых сдвинуты по отношению друг друга на одну опорную станцию (нахлестывающиеся), независимо от того, какое из них исходное, в оптимальный вариант плана отбирают то, которому соответствует пропуск дальней струи без переработки через опорную станцию с большей расчетной экономией.

Как уже рассматривалось, пропуск дальних струй, входящих в назначение, необходимо решать не только через одну опорную станцию, а и через все предыдущие и последующие, которые иногда не входят в маршрут следования нахлестывающихся струй. Определим вариант плана с помощью этого положения на примере (рис. 16). В данном случае назначения *Б — Д* и *А — Г* нахлестывающиеся. Исходное же *Б — Д*. Проследование назначения *Б — Д* транзитом через станцию *Г* обеспечивает экономию в размере 5 ч, а *А — Г* через станцию *Б* — 4 ч. Следовательно, струю N_1 надо присоединить к назначению *Б — Д*. Однако при этом не учитывается струя N_4. Если вагонопоток струи N_1 присоединить к назначению *А — Г*, а потом к *Г — Е*, будет достигнута дополнительная экономия 80 вагоно-ч.

Рассмотрение каждого положения метода совмещенных аналитических сопоставлений позволяет сделать общий вывод, что для получения действительно лучших вариантов плана формирования необходимо разработать дополнительные условия. В то же время

при составлении во ВНИИЖТ программы расчета плана формирования поездов на ЭВМ влияние отмеченных недостатков сглаживается просчетом большого числа вариантов. Затруднения вызывает выбор оптимального варианта методом совмещенных аналитических сопоставлений на разветвленных направлениях.

5. НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ РАСЧЕТ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ

Сопоставление приведенных вагоно-часов переработки и накопления или их суммирование в большом числе вариантов определяют сложность выполнения расчетов и недостаточную их наглядность. Одна из модификаций аналитических методов расчета плана формирования — непосредственный расчет — в значительной степени устраняет эти недостатки. Оптимальный и близкие к нему варианты плана формирования одногруппных поездов находят, предварительно определяя различные сочетания конкурентоспособных струй вагонопотоков. При этом классификация вагонных струй позволяет, не уменьшая точности, резко сократить число рассматриваемых вариантов, исключив из расчетов небольшие по мощности струи вагонопотоков. В оптимальный вариант включают назначения, удовлетворяющие условиям:

$$N_i T_{\text{эк } j} \geqslant cm_i; \quad N_i \Sigma T_{\text{эк } j} \geqslant cm_i; \tag{36}$$

$$\sum^{\kappa} N_i \sum^{n} T_{\text{эк } j} \geqslant cm_i, \tag{37}$$

где N_i — суточный размер струи, вагонов;

$T_{\text{эк}j}$ — расчетная экономия от проследования вагона в транзитных поездах, ч.

Минимальное число назначений оптимального варианта

$$\kappa_{\min} = \kappa_{\text{уч}} + \kappa_{\text{исх}}^{\text{посл}} + \kappa_{\text{исх}}^{\text{пар}}, \tag{38}$$

где $\kappa_{\text{уч}}$ — число участковых назначений;

$\kappa_{\text{исх}}^{\text{посл}}$ — число исходных струй вагонопотоков, расположенных последовательно;

$\kappa_{\text{исх}}^{\text{пар}}$ — число исходных струй (основных, дополнительных и вспомогательных назначений), удовлетворяющих условию самостоятельного выделения и расположенных параллельно или последовательно-параллельно.

Теоретически возможное число назначений плана формирования определяют по формуле

$$\kappa_{\text{макс}} = \kappa_{\text{уч}} + \kappa_{\text{осн}} + \kappa_{\text{доп}} + \kappa_{\text{всп}}, \tag{39}$$

где $\kappa_{\text{осн}}$, $\kappa_{\text{доп}}$, $\kappa_{\text{всп}}$ — число выделенных назначений, соответствующих основным, дополнительным струям и вспомогательным назначениям.

Следовательно, число назначений в оптимальном варианте плана находится в пределах:

$$\kappa_{уч} + \kappa_{исх}^{посл} + \kappa_{исх}^{пар} \leqslant \kappa_{опт} \leqslant \kappa_{уч} + \kappa_{осн} + \kappa_{доп} + \kappa_{всп}. \quad (40)$$

Пользуясь этими формулами, еще до завершения расчетов можно с достаточной степенью точности определить число назначений в оптимальном и близких к нему вариантах плана. Причем при наличии участковых назначений на всех участках направления часто определяют только число дальних назначений по следующей формуле

$$\kappa_{исх}^{посл} + \kappa_{исх}^{пар} \leqslant \kappa_{опт} \leqslant \kappa_{осн} + \kappa_{доп} + \kappa_{всп}. \quad (41)$$

Разработку плана формирования одногруппных технических маршрутов методом непосредственного расчета целесообразно выполнять в строго определенной последовательности:

составление графика вагонопотоков, на котором указывают схему полигона, станции, номера и величины вагонных струй, количество вагоно-часов накопления и переработки для каждой струи, станции;

классификация вагонных струй, определение числа и категории исходных и не влияющих на выбор вариантов плана (исходные струи на графике помечают особо);

определение исходного варианта плана формирования поездов для некоторых объединений струй, расположенных параллельно (обычно для больших направлений);

нахождение целесообразного объединения выделяемых струй, оптимального и нескольких близких к нему вариантов плана формирования поездов.

Расчеты выполняют с помощью расчетной схемы вагонопотоков (рис. 17) без дополнительных таблиц и зависимостей. Классификация вагонных струй почти не увеличивает сложность расчетов, а разветвленность полигонов даже несколько упрощает их, так как многие выделяемые струи окончательно специализируются уже до

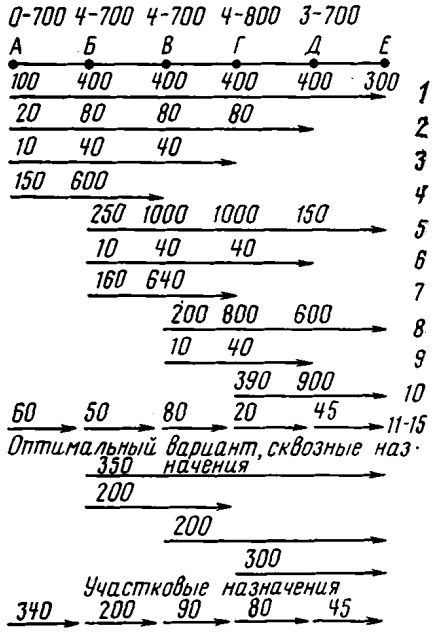

Рис. 17. Схема вагонопотоков на направлении А—Е

первой узловой станции. Поэтому варианты плана определяются без деления полигона на части как для прямолинейных, так и для разветвленных направлений. Все струи вагонопотоков на данном направлении или полигоне сети классифицируют в зависимости от степени их влияния на выбор оптимального варианта плана формирования, что характеризуется затратами вагоно-часов возможной переработки каждой струи на попутных технических станциях и накопления в пунктах формирования. Струи вагонопотоков делятся на исходные и остальные или присоединяемые. К исходным относятся:

основная струя, удовлетворяющая достаточному условию на каждой попутной технической станции (35). На рис.17 это струи *5* и *10*;

дополнительные струи, подразделяющиеся на удовлетворяющие достаточному условию на отдельных попутных технических станциях (I категория) и только необходимому условию (II категория). В первом случае

$$\min T_{эк\,j} N_i < cm \leqslant \max T_{эк\,j} N_i; \quad (42)$$

во втором

$$\max T_{эк\,j} N_i < cm < N_i \sum_{j=1}^{n-2} T_{эк\,j}, \quad (43)$$

где $\max T_{эк\,j}$ — максимальная общая приведенная экономия на один вагон при проследовании вагонопотока без переработки через станцию, ч;

$\sum_{j=1}^{n-2} T_{эк\,j}$ — суммарная экономия на всех попутных станциях (для данной струи), ч.

Дополнительные струи I категории *8*, а II — *1* (см. рис. 17);

вспомогательное назначение — две или несколько струй вагонопотоков, совместно удовлетворяющие условию

$$\max N \sum_{j=1}^{n-2} T_{эк\,j} < cm < \sum_{i=2}^{p} N_i \sum_{j=1}^{n-2} T_{эк\,j}, \quad (44)$$

где p — число объединяемых струй.

Одни и те же струи могут входить в разные вспомогательные назначения, образуя варианты объединения. Выбирают вариант с максимальной экономией вагоно-часов. Так, на рис. 17 возможны два варианта выделения вспомогательного назначения: объединение струй *2*, *3* и *4*, для которых на станции *Б* экономия равна 720 вагоно-ч, и струй *2*, *3*, *6* и *7* (экономия на станции *В* равна 800 вагоно-ч). Поскольку второй вариант дает большую экономию, то его и принимают для дальнейших расчетов. Следовательно, в данном примере одно вспомогательное назначение *Б — Г* включает струи *2*, *3*, *6* и *7*. Если на общем пути следования двух

или нескольких струй, удовлетворяющих при объединении условию

$$\sum_{i=2}^{p} N_i \sum_{j=1}^{n-2} T_{эк\,j} > cm, \quad (45)$$

есть более короткая исходная струя, то это объединение можно отнести к категории вспомогательного назначения только, когда вагоно-часы экономии на станциях, расположенных вне пути следования короткой исходной струи, превышают вагоно-часы накопления вагонов на составы. Так, при объединении струй *Б — Ж* и *Б — Е* (рис. 18) экономия на попутных станциях *Г* и *Д*, расположенных вне пути следования короткой основной струи *Б — Г*, превышает вагоно-часы накопления на станции *Б* (160 + 160 + + 200 + 200) = 720 > 700. Следовательно, в данном случае можно объединить струи *Б — Е* и *Б — Ж* и отнести их к категории вспомогательного назначения. Последнее всегда совпадает с назначением более короткой струи (*Б — Е*). Струи *А — Д* и *А — Е* (рис. 19), хотя и удовлетворяют в объединении необходимому условию, не образуют вспомогательного назначения, так как экономия 360 вагоно-ч (200 + 160) на станции *Б*, расположенной вне пути следования короткой дополнительной струи, меньше затраты вагоно-часов накопления на станции *А*.

К категории *остальных* относят струи вагонопотоков, не удовлетворяющие и в объединении необходимому условию

$$\sum_{i=2}^{p} N_i \sum_{j=1}^{n-2} T_{эк\,j} - cm. \quad (46)$$

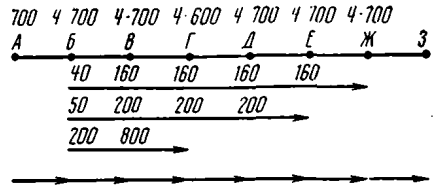

Рис. 18. Исходная и объединяемые струи на направлении А—Е

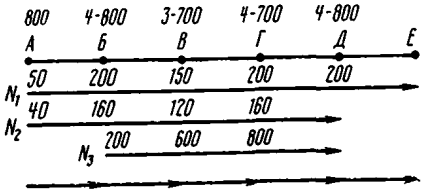

Рис. 19. График вагонопотоков на направлении А—Е

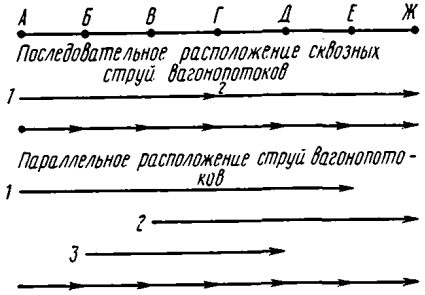

Рис. 20. Последовательное и параллельное расположение струй вагонопотоков

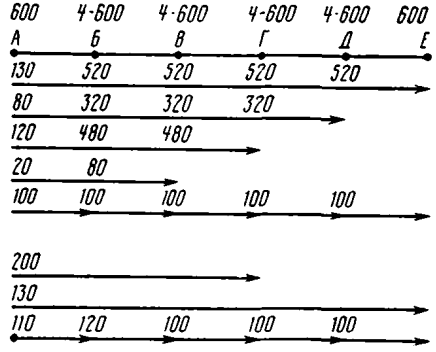

Рис. 21. График назначений на направлении А—Е при отсутствии струи Г—Е

В соответствии с этой классификацией каждую категорию струй отмечают на графике вагонопотоков (цветом). Все струи вагонопотоков располагаются (рис. 20) последовательно или параллельно друг друга. При последовательном расположении (с разграничением и без разграничения дальних назначений участковыми поездами) основные, дополнительные струи и вспомогательные назначения выделяют в самостоятельное назначение и включают в оптимальный вариант, так как переработка их вагонопотока на попутных технических станциях, т. е. включение в участковые назначения, даст потерю вагоно-часов, равную:

$$\Delta B = N_{исх} \sum_{j=1}^{n-2} T_{эк\,j} - cm, \quad (47)$$

где $N_{исх}$ — суточный вагонопоток исходного назначения.

Следовательно, если при последовательном расположении допустить переработку выделяемых струй на попутных технических станциях, вагоно-часы ее возрастут, а вариант будет хуже оптимального на это же количество вагоно-часов. При параллельном расположении исходных струй находят лучший вариант их прослеживания, используя следующие основные положения.

Положение 1. Объединение двух или нескольких струй в одно назначение целесообразно, если вагоно-часы переработки их на станциях, не входящих в маршрут совместного следования, а также в маршруты последовательно с ними расположенных исходных струй не превышают вагоно-часов накопления, сэкономленных от объединения. Так, экономия исходной (дополнительной) струи *А — Д* на станции *Г* (рис. 21), не входящей в маршрут следования короткой исходной струи *А — Г*, 320 вагоно-ч не превышает вагоно-часов накопления на станции *А* (320 < 600). Следовательно, струю *А — Д* целесообразно объединить с назначением *А — Г*. Экономия же струи *А — Е* на станциях *Г* и *Д* 520+520 = 1040 вагоно-ч превышает вагоно-часы накопления на станции *А* (1040> > 600). Поэтому исходную струю *А — Е* нецелесообразно объединять с более коротким назначением *А — Г*.

Из рис. 22 видно, что при тех же исходных данных и размерах вагонопотоков, отправляемых со станции *А*, но с последовательно расположенной исходной струей *Г — Е*, решение о выделении струи *А — Е* в самостоятельное назначение должно быть иным, чем в предыдущем примере. В самом деле, если ее выделить в самостоятельное назначение, то на это будет затрачено в сутки 600 вагоно-ч накопления на станции *А*, а если присоединить сначала к назначению *А — Г*, а затем включить в последовательное назначение *Г — Е*, то только 520 вагоно-ч (переработка струи *А — Е* на станции *Г*). Выбирается второй вариант, так как он обеспечивает наименьшую затрату вагоно-часов.

Таким образом, при объединении вагонопотоков необходимо учитывать исходные струи, зарождающиеся на попутных техни-

ческих станциях. Объединять струи, выходящие с одной станции, необходимо в такой последовательности. Расчеты начинают с наиболее короткой исходной струи, проходящей транзитом одну станцию, так как целесообразность ее включения в участковые назначения зависит только от мощности вагонопотока, а не от параллельно расположенных струй. Затем решают вопрос о присоединении к этой, уже выделенной короткой струе, всех выше расположенных струй. Как только для какой-то выше расположенной струи положение 1 не соблюдается, присоединение струй прекращают. В дальнейшем все вышерасположенные струи присоединяют к вновь образованному назначению.

Положение 2. Из нескольких вариантов возможного объединения струй с более короткими исходными струями выбирают тот, который обеспечивает наибольшую экономию вагоно-часов. Рассмотрим это на примере, в котором заданы три сквозных струи (рис. 23). Дополнительную струю $А — Е$ можно объединить с основными струями $А — Г$ или $Б — Е$. Одновременно в оба назначения струю $А — Е$ влить нельзя, так как они расположены параллельно. В первом случае объединения $А — Г \div А — Е$ экономия на станциях $Б$ и $В$ для струи $А — Е$ составит $200 + 200 = 400$ вагоно-ч. Во втором случае ($Б — Е \div А — Е$) экономия от проследования струей $А — Е$ без переработки станций $В$, $Г$ и $Д$ равна $200+250+250 = 700$ вагоно-ч.

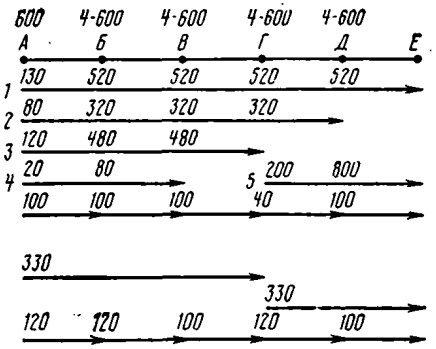

Рис. 22. График назначений на направлении А—Е при наличии струи Г—Е

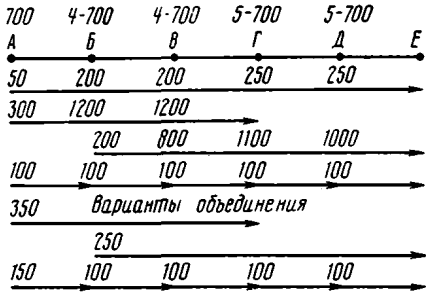

Рис. 23. Сквозные струи на направлении А—Е и возможные варианты их объединения

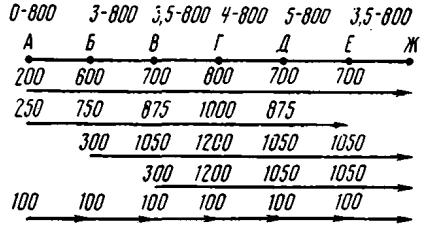

Рис. 24. Схема вагонопотоков на направлении А—Ж

Следовательно, эффективнее вариант объединения струи $А — Е$ со струей $Б — Е$. Как видно из примера, для сопоставления вариантов пропуска вагонопотоков через попутные станции вполне достаточно определить:

вагоно-часы экономии на тех станциях, через которые вагонопоток пропускается без переработки;

вагоно-часы накопления составов рассматриваемых струй вагонопотока на станциях формирования;

разность вагоно-часов экономии и затрат для рассматриваемых струй.

Сопоставляя балансы вагоно-часов в вариантах, определяют наиболее эффективный из них. Для упрощения расчетов следует:

экономию вагоно-часов учитывать только на тех станциях, через которые один и тот же поток проходит в одном варианте без переработки, а в другом — с переработкой;

при одинаковых в вариантах числе назначений и нормах времени на накопление составов сопоставляют только вагоно-часы переработки вагонов, а в отдельных случаях только вагоно-часы экономии от проследования технических станций транзитом.

Последовательность расчета и порядок включения назначений в оптимальный вариант таковы:

по графику вагонопотоков классифицируют струи одновременно для всего направления;

определяют порядок пропуска исходных струй вагонопотоков через попутные технические станции. Для этого сначала намечают, без каких-либо сопоставлений, назначения, соответствующие основным струям, для включения в оптимальный вариант. Для основных струй, следующих с начальной до конечной станции направления, сразу указывают число вагонов. Для всех других основных струй, которые зарождаются или погашаются на попутных технических станциях, сначала количество вагонов не указывают, так как к ним могут присоединяться более дальние, но менее мощные струи. Из нескольких вариантов возможного объединения основных струй в соответствии с положением 2 выбирают наиболее выгодный;

в последующих расчетах, соблюдая положения 1 и 2 , к основным струям присоединяют более дальние струи;

выделяют назначения, соответствующие другим исходным струям. Порядок выделения зависит от величины вагонопотоков, часов экономии, числа станций и конфигурации направления.

Для небольших направлений расчеты выполняют сразу. Для направлений с большим числом станций и дополнительных струй рассмотрение можно начинать с головной станции и более короткой струи, но обязательно и одновременно учитывая исходные струи, зарождающиеся на попутных станциях. Дополнительные струи I категории можно перерабатывать не более чем на одной из станций, где $N_i T_{эк j} < cm$. Чтобы определить оптимальный вариант, необходимо сопоставить вагоно-часы пропуска их без переработ-

ки и с переработкой на одной из станций, где вагоно-часы переработки меньше, чем вагоно-часы накопления. Так, для струи *А —Ж* (рис. 24) необходимо сопоставить три варианта:

пропуск без переработки через все станции. При этом затраты на накопление равны 800 вагоно-ч;

объединение со струей *А—Е* и переработка струи *А — Ж* на станции *Е*. Затраты на переработку составят 700 вагоно-ч;

объединение со струей *Б — Ж* и переработка струи *А — Ж* лишь на одной станции *Б*. Затраты на переработку составят 600 вагоно-ч.

Последний вариант объединения наиболее выгодный. Вариант объединения струи *А — Ж* со струей *В — Ж* не рассматривается, так как в этом варианте первая перерабатывалась бы на двух станциях *Б* и *В*, что заведомо невыгодно.

Дополнительную струю II категории, удовлетворяющую только необходимому условию, можно в оптимальном варианте либо пропускать через все станции без переработки, либо перерабатывать, как правило, один-два и редко три раза на станциях, не входящих в маршрут следования более короткой исходной струи. Поэтому, чтобы найти оптимальный вариант ее пропуска, следует сопоставлять по вагоно-часам только эти варианты. Оптимальный вариант соответствует наименьшим затратам.

Выгодность присоединения к наиболее короткому назначению оптимального плана формирования более дальних струй определяют в соответствии с положениями 1 и 2.

Глава 5 РАСЧЕТ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ НА ЭВМ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Составление плана формирования поездов — трудоемкая инженерная комбинаторная задача — связано с расчетом большого количества различных вариантов и достаточно сложными логическими операциями. В общем случае количество теоретически возможных вариантов плана только одногруппных сквозных поездов на направлении равно сумме произведений числа возможных вариантов объединения (смежных) струй на каждой станции:

$$P = \sum^{n-1} P_1, P_2, P_3, \ldots, P_n, \qquad (48)$$

где n — количество станций на направлении;

$P_1, P_2, \ldots, P_n$ — количество вариантов плана формирования для каждой станции.

Исследования показывают, что число возможных схем формирования поездов зависит от числа станций на направлении:

	Число вариантов проследования струй
Три станции	2
Четыре »	16
Пять станций	1024
Шесть »	1 048 576
Семь »	1 099 511 627 776

До введения дифференцированной стоимости перевозимого груза многие схемы формирования можно исключить из расчета, так как часть назначения отправляется с одних и тех же станций и прибывает на одни и те же станции. Число же вариантов объединения каждой струи зависит от количества проходимых станций и числа параллельно расположенных струй. Так, если струя проследует одну станцию, число вариантов объединения равно двум; две станции — четырем; три станции — восьми, четыре станции — 16 вариантам (рис. 25); 22 станции — 4 194 364 вариантам. Число возможных вариантов резко возрастает при формировании отправительских, ступенчатых, порожних и других специализированных маршрутов. Поэтому для расчета плана форми-

рования поездов становится необходимым применение электронных вычислительных машин. Однако для расчета всех возможных вариантов плана для больших направлений даже на ЭВМ требуется достаточно длительное время. Поэтому многие рассматриваемые далее алгоритмы составления плана формирования поездов предусматривают исключение из расчета заведомо неэффективных вариантов. Нормативы, методика и последовательность расчета плана формирования на ЭВМ аналогичны ручным способам расчета.

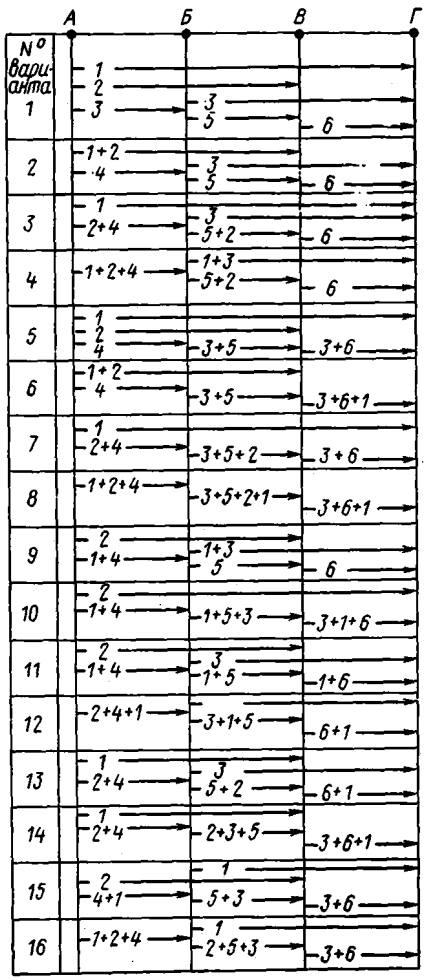

Рис. 25. Теоретически возможные варианты схем формирования поездов

2. АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОГРУППНЫХ ПОЕЗДОВ

Алгоритм составления плана формирования *методом абсолютного расчета* разработан ВНИИЖТ под руководством проф. А. П. Петрова и представляет собой ряд формул для определения затрат вагоно-часов в каждом варианте. Как достоверный и точный его можно рекомендовать для расчета плана на направлениях с четырьмя и пятью опорными станциями. Для пяти опорных станций на направлении используют те же формулы, что и для четырех. Результаты, полученные по ним, комбинируют с дополнительными затратами на пятой станции. Аналогичные операции выполняют и для направления с шестью станциями. Составить алгоритм расчета для направления с семью станциями невозможно. Предварительно следует установить общие правила для определения целесообразности включения в расчет вариантов с объединением несмежных струй, а уже потом выбирать из них оптимальный. А. П. Петров считает, что в данном случае более целесообразно исключить группы заведомо невыгодных вариантов.

Следует отметить, что если прием наложения вариантов для небольшого числа станций не вызывает особых трудностей и, как правило, обеспечивает нахождение оптимального варианта, то при большом числе станций этот прием значительно усложняется. Кроме того, предположение о том, что сочетание потоков не надо рассматривать, ничем не оправдано. Известно, что выгодность переработки вагонопотока на той или иной станции определяется не только экономией на ней, но и наличием и величиной более коротких параллельно расположенных струй. Есть и другие причины, которые несколько сужают область применения метода абсолютного расчета для направлений с числом станций более пяти.

Метод последовательных расчетов плана формирования предложен в 1948 г. А. П. Петровым и В. П. Чернииным. Последний в 1959 г. разработал алгоритм и составил программу для расчета плана формирования на ЭВМ. Для нахождения оптимального варианта плана расчетное железнодорожное направление представляют в виде графа, вершины которого однозначно соответствуют техническим станциям, а ребра — участкам дороги между соседними опорными станциями. За исходный вариант принимают объединение всех вагонопотоков с участковыми поездами. Экономию рассчитывают с помощью двух матриц. По первой устанавливают, с какими параллельными назначениями может следовать вагонопоток, по второй — все возможные допустимые комбинации назначений, не имеющих общих путей следования. Используя теорию множеств, любой вариант плана рассматривают как множество назначений, являющихся подмножеством всех возможных струй вагонопотоков.

Выделяется (отменяется) каждое специализируемое назначение по экономии вагоно-часов для каждой группы струй вагонопотоков. Однако при этом не исключена возможность потери оптимального варианта, так как некоторые варианты плана обеспечивают большую экономию вагоно-часов только после перехода через невыгодный вариант. Теоретические предпосылки метода последовательных расчетов заключаются в том, что из множества струй вагонопотоков выбирают обязательно выделяемые назначения; затем из конкурентоспособных струй — такое минимальное число назначений, чтобы из оставшихся никакие два не смогли бы образовать нового назначения.

Алгоритм расчета плана формирования методом *совмещенных аналитических сопоставлений* разработан Г. А. Кутуковой под руководством К. А. Бернгарда. Алгоритм разбит на 11 блоков, каждый из которых предназначен для решения определенных логических и арифметических задач. Проверка исходного назначения, зарождающегося или погашаемого на узловой станции, на замену его более дальним, проходящим эту станцию транзитом, — дополнение к основным теоретическим положениям метода совмещенных аналитических сопоставлений. Второе важное дополнение к тому же методу — сравнение отобранного назначения с такими возможными вариантами объединения струй вагонопотоков, которые включают два

и более коротких соприкасающихся назначения. Соприкасающиеся назначения рассматривают, если их путь полностью совпадает с отобранным назначением или превышает его на один участок: до станции зарождения, после станции погашения, а также как в ту, так и в другую сторону. Это значительно увеличивает вероятность получения оптимального плана формирования или близкого к нему, что ставит алгоритм, а соответственно и машинную программу на одно из первых мест по предпочтительности использования. Однако отсутствие доказательства правомерности указанных сравнений не позволяет утверждать, что они верны во всех случаях. Практика показывает, что для получения оптимального варианта отобранное назначение надо сравнивать со всеми струями, расположенными последовательно-параллельно. Точность расчетов снижается и тем, что при выборе оптимального варианта плана формирования рассматривается целесообразность переработки на станциях не отдельных струй, а назначений, т. е. групп струй, объединение которых по существу уже предрешено. Это предварительное объединение лишает возможности в процессе расчета выбрать для каждой струи наиболее выгодные станции переработки.

На основе положений теории графов и существующих методик направленного перебора вариантов рассчитывают план формирования для участков с параллельными ходами с *использованием замкнутых контуров*. Все варианты делят на группы с одним и тем же числом назначений так же, как в последовательных расчетах и методе МИИТа. Первой рассматривают группу вариантов, у которых число назначений на единицу больше, чем у исходного варианта. Во второй группе, включающей два добавочных назначения, рассматривают только такие варианты, которые включают назначение лучшего варианта первой группы. Расчеты продолжают до тех пор, пока не получат вариант, в который входят неэффективные назначения. На этом заканчивается первая часть расчета плана. Считают, что уже на этом этапе вычислений часто наилучший вариант из рассмотренных — оптимальный. Однако оптимальный вариант может и выпасть, поэтому рекомендуется выполнять вторую часть расчетов в обратном порядке. Чтобы получить действительно оптимальный вариант, необходимо каждую струю вагонопотоков при включении в вариант проверять на возможное объединение со всеми параллельно расположенными. Вторая часть расчета плана формирования состоит из установления наиболее целесообразного следования вагонопотоков в зависимости от расстояния.

Для нахождения оптимального варианта плана формирования поездов *методом ХабИИЖТа* (предложение С. Г. Стопичева) используют основные теоретические положения предыдущих методов. На первом этапе расчета анализируют план формирования для головной станции направления при последовательном объединении сначала коротких, а потом длинных струй вагонопотоков. На втором этапе сначала объединяют длинные струи. Расчетные же варианты объединения получают из исходных аналогично 1 и 2 положениям

непосредственного расчета. Основное отличие метода ХабИИЖТа от ранее рассмотренных заключается в том, что в нем все струи вагонопотоков, прежде чем будут выделены в самостоятельные назначения, просчитываются дважды — от самых коротких до самых длинных и наоборот. Необходимость в повторении расчетов обычно возникает при изменении условий объединения параллельных струй вагонопотоков. Чаще всего это происходит в связи с укорочением вышерасположенных струй. В этом случае обычно и делают повторный расчет.

Несмотря на отдельные неточности машинная программа этого метода в 1960 — 1964 гг. была основной для расчета сетевого плана формирования поездов. Удачными в ней надо считать порядок кодирования исходных данных и выдачу результатов на печать. Не вызывает особой сложности также ввод, вывод и расшифровка исходных данных. Однако метод в целом относится к приближенным методам расчета плана формирования.

Алгоритм расчета плана формирования *методом направленного перебора* предусматривает рассмотрение всех практически возможных вариантов по принципу наименьших затрат приведенных вагоно-часов с использованием теории множеств и теории графов. В сравнениях участвуют отдельные струи вагонопотоков. Менее эффективные варианты отбраковывают, используя пять теоретических положений, разработанных А. И. Поповым. Следует также отметить, что затраты приведенных вагоно-часов определяют по известным расчетным нормативам — параметру накопления и расчетной экономии вагоно-часов от прохождения вагона без переработки через попутную станцию. Предусмотрен просмотр только определенной группы вариантов плана. Количество их сокращается установлением общих затрат приведенных вагоно-часов как функции соответствующих вариантов плана формирования поездов. Для этого множество вариантов разбивают на классы по числу выделенных назначений. В соответствии с отношением порядка между элементами множества вариантов и на основании теоремы о вполне упорядоченных множествах все назначения располагают в порядке убывания. Для упрощения расчета используют граф, вершинами которого служат элементы множества вариантов, а ребрами — соответствующие им разности количества выделяемых назначений и общего числа струй вагонопотока. Значительная часть вариантов исключается уже при рассмотрении только двух соседних элементов графа. Однако в связи с тем, что лучшие варианты в отдельных случаях могут находиться за менее эффективными, окончательный выбор направления перебора определяется разницей затрат рассчитываемого варианта и наилучшего из ранее рассмотренных. Если эта разница превышает 0,8 затрат вагоно-часов на накопление составов вновь выбранного назначения, то все последующие варианты множества из расчета исключают. При несоблюдении этого условия дополнительно рассчитывают варианты, одновременно выделяя рассматриваемую струю и те из последующих, которые не имеют

общего пути следования с ней. Это положение — основное дополнение к методу направленного перебора — позволяет найти во многих случаях оптимальный вариант плана формирования. Однако величина коэффициента 0,8 теоретически не обоснована и поэтому не может гарантировать во всех случаях нахождение действительно оптимального варианта. Практическая проверка алгоритма показала, что это один из самых точных методов расчета плана формирования поездов по приведенным затратам вагоно-часов накопления и переработки.

Метод *непосредственных расчетов* на ЭВМ имеет несколько самостоятельных алгоритмов (и программ). Первый (1961 г.) представляет собой ряд зависимостей, по которым определяют затраты вагоно-часов переработки и накопления в выбираемом варианте плана формирования поездов. Однако реализовать его трудно из-за сложности кодирования исходных данных. Во втором алгоритме решение делится на блоки, каждый из которых предназначен для определенной задачи.

Переход от одного блока к другому выполняется в последовательности, которая зависит от результатов предыдущих расчетов. Особенности данного алгоритма:

возможность составления плана формирования для полигона любого, в том числе разветвленного, с 24 станциями (при необходимости полигон можно увеличить до 28 станций);

сравнительно небольшое машинное время (для полигона с 24 станциями план формирования рассчитывается в течение 25 мин);

возможность дальнейшего совершенствования программы без существенных изменений;

автономность использования частей программы.

Алгоритм включает ряд зависимостей, по которым определяется для струй вагонопотоков лучшая станция (или две) переработки. Оптимальный вариант выбирают на основе установления станций переработки струй вагонопотоков с минимальными затратами вагоно-часов. Рассмотрение струй начинается с самой короткой, при этом принимают, что участковые струи есть на всех участках направления.

Для всех струй устанавливают одну лучшую станцию переработки по максимуму экономии вагоно-часов, но с учетом станций переработки других струй. Затем устанавливаются две лучшие станции, на которых по критерию минимума затрат вагоно-часов эффективно перерабатывать вагонопоток струи, и сравнивают экономию вагоно-часов на одной и на двух станциях, выбирая наиболее целесообразные. Вариант плана с этими станциями переработки и выдается на печать, причем в оптимальном варианте рассмотрение струй начинается в обратном порядке, т. е. с самой длинной струи. Условно предполагают, что станция переработки делит струю на две части: «голову» — от начальной станции до станции переработки и «хвост» — от станции переработки до станции назначения.

Для установления одной лучшей станции подсчитывают вагоно-часы для каждой задаваемой по формуле

$$N_i \sum^{n-3} T_{эк\,j} = \left(N_1 \sum^{n_1} T_{эк\,j} + N_2 \sum^{n_2} T_{эк\,j+1}\right) - (cm_1 + cm_2 + NT_{эк\,j}), \quad (49)$$

где $N_i \sum^{n-3} T_{эк\,j}$ — экономия от прохождения попутных станций без переработки «хвоста» и «головы» струи с присоединенными нижележащими струями;

$N_1 \sum^{n_1} T_{эк\,j}$ — экономия от прохождения без переработки попутных станций «хвоста» струи с присоединенными нижележащими струями,

$N_2 \sum^{n_2} T_{эк\,j+1}$ — то же для «головы» струи;

cm_1 — затраты на накопление «хвоста» струи;

cm_2 — то же «головы» струи;

$NT_{эк\,j}$ — затраты на переработку данной струи на заданной станции переработки;

n_1 и n_2 — число станций в первой и второй части струи.

Переработка струи вагонопотока на станции невозможна:

если $T_{эк} = 0$. В этом случае струя данную станцию не проходит (вариант возможен на разветвленном направлении);

если $N_i T_{эк\,j} > cm_i$. Перерабатывать струю на данной станции невыгодно, она является основной (или дополнительной I категории).

Вагоно-часы накопления для участковых назначений не считают. Предусмотрен обход суммирования затрат. Для установления двух лучших станций переработки (неподвижной и подвижной) струя условно разбивается на три части: «хвост», среднюю часть и «голову». Экономию подсчитывают для одной неподвижной и остальных подвижных станций по формуле

$$N_1 \sum^{n-4} T_{эк\,j} = \left(N_1 \sum^{n_1} T_{эк\,j} + N_2 \sum^{n_2} T_{эк\,j+1} + N_3 \sum^{n_3} T_{эк\,j+2}\right) - (cm_1 + cm_2 + cm_3 + N_i \sum^{n} T_{эк\,j}), \quad (50)$$

где $N_1 \sum^{n_1} T_{эк\,j}$ — экономия от прохождения без переработки попутных станций «хвоста» струи;

$N_2 \sum^{n_2} T_{эк\,j+1}$ — то же «головы» струи;

$N_3 \sum^{n_3} T_{эк\,j+2}$ — то же средней части струи;

cm_1 — затраты на накопление «хвоста» струи;

cm_2 — то же «головы» струи;

cm_3 — то же средней части струи;

$N_i \sum^{n} T_{эк\,j}$ — затраты на переработку данной струи.

Выбор оптимального варианта заключается в том, чтобы отыскать такое деление струи, т. е. такие станции переработки, для которых сумма вагоно-часов накопления и переработки будет минимальной. Объединенные струи, для которых сумма вагоно-часов минимальная, отмечаются соответствующими признаками и в дальнейших расчетах не рассматриваются. Чтобы принять решение, вагонопотоки частей струи умножаются на сумму расчетной экономии. Если $N_i \sum_{j}^{n} T_{экj} < cm$, то часть рассматриваемой струи и все пронумерованные нижележащие назначаются в переработку на всех станциях. Установление лучших станций переработки для каждой струи позволяет не только найти наилучший вариант плана формирования, но и обеспечивает необходимую концентрацию сортировочной работы на крупных станциях.

Для расчета плана формирования одногруппных поездов используют *методику С. В. Дуваляна* [16], позволяющую автоматически определять оптимальный план формирования на полигоне сети, включающей до 170 станций. Выбрав несколько перекрывающихся полигонов, можно достаточно полно рассчитать план формирования для сети в целом. Минимизация суммы затрат, связанных с простоем вагонов под накоплением и выполнением сортировочной работы, решается как задача целочисленного программирования. Алгоритм и программа предусматривают решение следующих вопросов:

автоматизация построения маршрутов следования вагонопотоков;

определение матрицы плановых корреспонденций вагонопотоков между сортировочными станциями;

расчет на ЭВМ оптимального плана формирования грузовых поездов;

расчет показателей оптимального и принятого плана формирования грузовых поездов.

Автоматизация расчетов по установлению маршрутов следования вагонопотоков осложняется необходимостью учета отклонения их от кратчайших (или оптимальных) путей из-за ограничений в пропускной способности. Поэтому маршруты следования вагонопотоков выбирают в такой последовательности:

в ЭВМ вводят описание транспортной сети (не только сортировочные, но и все узловые станции), а также список номеров вершин, соответствующих сортировочным станциям и пунктам разветвления маршрутов следования вагонопотоков;

строятся таблицы кратчайших путей до заданных сортировочных станций и выдаются два или более кратчайших пути между некоторыми парами станций;

готовится информация для выбора кратчайшего маршрута и корректируются таблицы кратчайших путей;

готовится информация, характеризующая разветвления маршрутов для обеспечения прохождения их через близлежащие сортировочные станции (маршруты следования снова корректируются);

готовится информация, характеризующая правила отклонения маршрутов от кратчайших путей. Маршруты следования вагонопотоков корректируются окончательно.

Так как для дальнейших расчетов нужны маршруты следования вагонопотоков между сортировочными станциями, рамки таблиц суживаются — исключаются дополнительно введенные пункты. Правила, характеризующие отклонения маршрутов от кратчайших путей, преследуют цель разгрузить направления, где чрезмерно увеличиваются размеры движения, и использовать экономически выгодные маршруты. Матрицы плановых корреспонденций вагонопотоков между сортировочными станциями определяют по формуле

$$N'_{ij} = \frac{N_{ij} \sum\limits_{\substack{k \in M_i \\ l \in M_j}} N'_{kl}}{\sum\limits_{\substack{k \in M_i \\ l \in M_j}} N_{kl}}, \qquad (51)$$

где N'_{ij} — плановый вагонопоток от станции i до станции j

N_{ij} — этот же вагонопоток за отчетный период;

M_i и M_j — множества номеров станций, принадлежащих дорогам, к которым относятся станции i и j.

Плановые вагонопотоки между дорогами $\Sigma N'_{kl}$ считаются заданными. Величины же N_{ij} (а также и ΣN_{kl}) определяют в результате обработки информации о выполненных перевозках. Трудности определения плановых корреспонденций заключаются, во-первых, в том, что на некоторых станциях сети формируют отправительские маршруты, которые проходят ряд попутных станций без переработки. Однако неизвестно заранее, какая часть вагонов в планируемый период будет включена в отправительские маршруты. Во-вторых, обработка отчетных данных о перевозках между отдельными станциями не может быть выполнена без учета того, что некоторые вагоны включены в отправительские маршруты. В этом случае необходимо в вычислительной машине строить маршруты следования вагонопотоков между всеми станциями сети, что очень сложно и не получило до сих пор удовлетворительного решения.

Оптимальный план формирования грузовых поездов рассчитывают методом улучшения плана. $M^в = \{(i, j)\}$ означает множество назначений плана формирования [если $(i, j) \in M^в$, то на станции i формируется поезд, следующий без переработки до станции j]. Для реализации метода улучшения плана первоначально в $M^в$ включают только обязательные назначения (например, пары ij, когда на маршруте следования от i до j нет сортировочных станций). Затем для каждой пары $(i, j) \notin M^в$ изменяется целевая функция $\Delta E_{ij} = E_2 - E_1$ при включении назначения ij в множество $M^в$:

$$E_{ij} = \sum_{i,\ j=1}^{N} \{[cm]_{ij} \dots h_{ij} + n_{ij} T_{ij}\}, \qquad (52)$$

где

$\sum_{i,\ j=1}^{N} h_{ij} \ldots [cm]_{ij}$ — приведенные затраты вагоно-часов на накопление на станции i;

$\sum_{i,\ j=1}^{N} n_{ij} T_{ij}$ — то же на переработку.

Назначение, удовлетворяющее условию

$$\Delta E_{ij} = \min \{\Delta E_{kl}\} < 0,$$

включается в множество $M^{в}$. Последовательное включение назначений в множество $M^{в}$ не гарантирует построения оптимального плана. Поэтому, если $(i, j) \in M_{в}$ и (ij) обозначают необязательное назначение, рассматривают множество $\overline{M}^{в} = M^{в} - [(i, j)]$. Этот план улучшается описанным выше методом и если $\overline{M}^{в}$ лучше, чем $M^{в}$, то $\overline{M}^{в}$ заменяют $M^{в}$.

Специальная нумерация вершин сети позволяет при определении величины ΔE_{ij} исключать из рассмотрения те вагонопотоки N_{kl}, маршруты которых не содержат отрезка s_{ij}. Кроме того, вычисления выполняются так, чтобы величины ΔE_{ij} определялись параллельно для всех (ij) с заданным j. Удается значительно уменьшить время на определение величин ΔE_{ij} методом улучшения плана по приближенным оценкам $\Delta \bar{E}'_{ij}$. Анализ показывает, что при определении величины $\Delta E'_{ij}$ можно учитывать только те вагонопотоки N_{kl}, которые при заданном $M^{в}$ перерабатываются хотя бы на одной из станций множества $M_{ij} = \{i, j, p_1, p_2, \ldots, p_n, \ldots, p_2, q_1, q_2, \ldots, \ldots, q_m, \ldots, q_s\}$, причем $p_n \in M_{ij}$, если $(p_n i) \in M^{в}$, и $q_m \in M_{ij}$, если $(j, q_m) \in M^{в}$. При расчете плана формирования учитывается допустимое число назначений поездов, формируемых на одной станции. Показатели принятого плана формирования грузовых поездов рассчитывают для всей сети в целом, хотя оптимальный план можно находить на отдельных перекрывающихся полигонах. В результате расчета печатаются табуляграммы показателей плана формирования грузовых поездов, характеризующих организацию вагонопотоков на каждой сортировочной станции.

3. РАСЧЕТ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ МЕТОДАМИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Рассмотренные ранее методы расчета плана формирования не всегда подкреплены достаточными математическими обоснованиями и поэтому не обеспечивают получения оптимального варианта. Точность расчета ими значительно снижается, если необходимо учесть ограничения в путевом развитии и перерабатывающей способности станций. Существующие методы не позволяют одновременно рассчитывать план формирования в четном и нечетном направлениях, что еще в большей степени может привести к неправильным результатам. До сих пор не решена задача одновременного

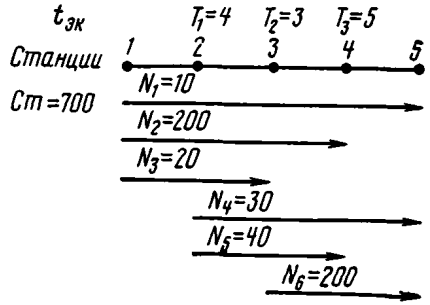

Рис. 26. Схема направления и исходные данные для расчета плана формирования

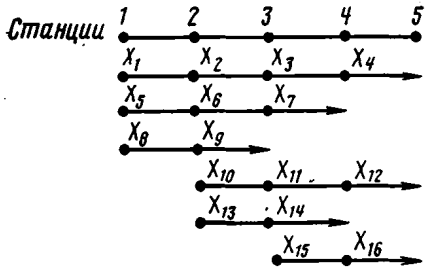

Рис. 27. Схема направления и величины, характеризующие наличие или отсутствие переработки вагонов

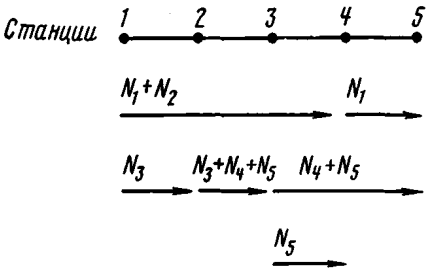

Рис. 28. Схема оптимального варианта плана формирования

расчета плана формирования одногруппных и групповых поездов. Методы линейного программирования, в частности симплекс-метод, позволяют находить оптимальные варианты плана формирования за ограниченное число шагов (итераций) для задач, условия которых можно выразить линейными уравнениями. Покажем на примере определение оптимального варианта плана формирования поездов для пяти опорных станций на неразветвленном железнодорожном направлении (рис. 26). Условие для варианта организации вагоно-потоков, который обеспечил бы минимальную затрату приведенных вагоно-часов, можно выразить следующим образом:

$$C = cm\,(x_1 + x_5 + x_8 + x_{10} + x_{13} + x_{15}) + N_1\,(T_1 x_2 + T_2 x_3 + T_3 x_4)\,N_2\,(T_1 x_6 + T_2 x_7) + N_3 T_1 x_9 + N_4\,(T_2 x_{11} + T_3 x_{12}) + N_5 T_2 x_{14} + N_6 T_3 x_{16} \to \min,$$

где cm — затрата вагоно-часов накопления на одно назначение (в примере $cm = 700$);

$N_1, N_2, \ldots, N_6$ — мощность струй вагонопотоков (рис. 26);

T_1, T_2, T_3 — общая приведенная экономия от проследования вагонов черезстанцию без переработки;

$x_1, x_2, \ldots, x_{16}$ — величины (0 или 1), которые характеризуют наличие или отсутствие переработки вагонов или выделение струи в самостоятельное назначение (рис. 27). Для любого числа опорных станций:

$$\Sigma x_i = \frac{(\kappa-2)\,(\kappa-1)\,(\kappa+3)}{6};$$

κ — число опорных станций.

Для 10 опорных станций $\Sigma x_{10} = 156$, для 30 $\Sigma x_{30} = 4466$ и т. д. Для решения задачи симплекс-методом необходимо найти ограничения, налагаемые на переменные x_i, а именно:

$$\left.\begin{array}{l}
x_1 + x_2 + x_5 + x_8 \geqslant 1 \\
x_1 + x_3 + x_5 + x_{10} + x_{13} \geqslant 1 \\
x_1 + x_4 + x_{10} + x_{15} \geqslant 1 \\
x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geqslant 1 \\
x_1 + x_2 + x_3 + x_5 \geqslant 1 \\
x_1 + x_2 + x_4 + x_8 \geqslant 1 \\
x_1 + x_3 + x_4 + x_{10} \geqslant 1 \\
x_5 + x_6 + x_8 \geqslant 1 \\
x_5 + x_7 + x_{13} \geqslant 1 \\
x_5 + x_6 + x_7 \geqslant 1 \\
x_8 + x_9 = 1 \\
x_{10} + x_{11} + x_{13} \geqslant 1 \\
x_{10} + x_{12} + x_{15} \geqslant 1 \\
x_{10} + x_{11} + x_{12} \geqslant 1 \\
x_{13} + x_{14} = 1 \\
x_{15} + x_{16} = 1
\end{array}\right\} \qquad (53)$$

Аналогично можно получить ограничения для любого числа опорных станций. Введя дополнительные неизвестные величины, превращаем неравенства (53) в равенства (54):

$$\left.\begin{array}{l}
x_1 + x_2 + x_5 + x_8 - x_{17} = 1 \\
x_1 + x_3 + x_5 + x_{10} + x_{18} = x_{18} = 1 \\
x_1 + x_4 + x_{10} + x_{15} - x_{19} = 1 \\
x_1 + x_2 + x_3 + x_4 - x_{20} = 1 \\
x_1 + x_2 + x_3 + x_5 - x_{21} = 1 \\
x_1 + x_2 + x_4 + x_8 - x_{22} = 1 \\
x_1 + x_3 + x_4 + x_{10} - x_{23} = 1 \\
x_5 + x_6 + x_{13} + x_{25} = 1 \\
x_5 + x_6 + x_{13} - x_{25} = 1 \\
x_5 + x_6 + x_7 - x_{26} = 1 \\
x_8 + x_9 = 1 \\
x_{10} + x_{11} + x_{13} - x_{27} = 1 \\
x_{10} + x_{12} + x_{15} - x_{28} = 1 \\
x_{10} + x_{11} + x_{12} - x_{29} = 1 \\
x_{13} + x_{14} = 1 \\
x_{15} + x_{16} = 1
\end{array}\right\} \qquad (54)$$

Таблица 8

Опорный план формирования

	b	x_1	x_2	x_3	x_6	x_8	x_9	x_{10}	x_{12}	x_{13}	x_{16}	x_{26}	x_{22}	x_{29}
x_4	1	1	1	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—1	—
x_5	1	—	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—1	—	—
x_9	1	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
x_{11}	1	—	—	—	—	—	—	1	1	—	—	—	—	—
x_{14}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
x_{15}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—
x_{17}	0	—1	—1	—	1	1	—1	—	—	—	—	—1	—	—
x_{18}	0	—1	—	—1	1	1	—	—1	—	—1	—	—1	—	—
x_{19}	1	—	1	—	—	—	1	—1	—	—	1	—	—1	—
x_{20}	0	—	—	—1	—	—	1	—	—	—	—	—	—1	—
x_{21}	0	—1	—1	—1	1	1	—	—	—	—	—	—1	—	—
x_{24}	0	—	—	—	—	1	—1	—	—	—	—	—1	—	—
x_{25}	0	—	—	—	1	—	—	—	—	—1	—	—1	—	—
x_{27}	0	—	—	—	—	—	—	—	1	—1	—	—	—	—
x_{28}	0	—	—	—	—	—	—	—1	—1	—	1	—	—	—
x_{23}	0	—	1	—1	—	—	1	—1	—	—	—	—	1	—
c	1740	—650	10	—30	—100	100	—570	—610	—60	—580	—300	—700	—50	—9(

Таблица 9

Оптимальный план формирования

	b	x_1	x_{24}	x_3	x_6	x_{23}	x_8	x_{10}	x_{12}	x_{13}	x_{16}	x_{26}	x_{22}	x_2
x_4	1	1	—	1	—	—1	—	1	—	—	—	—	—	—
x_5	1	—	1	—	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—
x_9	1	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
x_{11}	1	—	—	—	—	—	—	1	1	—	—	—	—	—
x_{14}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
x_{15}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—
x_7	0	—	1	—	—	—	—1	—	—	—	—	—1	—	—
x_{18}	0	—1	—1	—1	1	—	1	—1	—	—1	—	—	—	—
x_{19}	1	—	—	1	—	—1	—	—	—	—	1	—	—	—
x_{20}	0	—	—	—1	—	—	1	—	—	—	—	—	—1	—
x_{21}	0	—1	—1	—	1	1	1	—1	—	—	—	—	—1	—
x_2	0	—	—	—1	—	1	1	—1	—	—	—	—	—1	—
x_{25}	0	—	—	—	1	—	—	—	—	—1	—	—1	—	—
x_{27}	0	—	—	—	—	—	—	—	1	—1	—	—	—	—1
x_{28}	0	—	—	—	—	—	—	—1	—1	—	1	—	—	—
x_{17}	0	—1	—1	—1	1	1	1	—1	—	—	—	—	—	—
c	1740	—650	—100	—20	—100	—10	—480	—600	—60	—580	—300	—600	—40	—9(

После симплекс-преобразования получаем опорный план (табл. 8), а после трех итераций — оптимальный план формирования поездов (табл. 9) с суммарной затратой 1740 вагоно-ч (рис. 28). В оптимальном плане каждая из величин x_4, x_5, x_9, x_{11}, x_{14}, x_{15} равна 1, а остальные искомые переменные — 0. Это соответствует выделению в самостоятельное назначение струй N_2 и N_6. Остальные струи вагонопотоков следуют с переработкой. Для разветвленных направлений ограничения находят аналогично, но предусматривая, что переменные искомые величины x_i для ответвлений нельзя объединить в одно неравенство с переменными величинами для главного хода.

Ограничения в числе станционных путей выражаются неравенствами, в левой части которых находятся суммы переменных, характеризующих собой все возможные выделения струй в самостоятельные назначения, а в правой части — число путей, которые могут быть использованы под накопление поездов. Например, если необходимо ввести ограничения по путям для первой станции в рассматриваемом примере, то это условие можно записать так:

$$x_1 + x_5 + x_8 \leqslant 2,$$

где 2 — число путей, которые могут быть выделены на первой станции для трех возможных назначений.

Ограничение по числу перерабатываемых вагонов на третьей станции можно записать так:

$$N_1 x_3 + N_2 x_7 + N_4 x_{11} + N_5 x_{14} \leqslant 230,$$

где 230 — максимальное число вагонов, которое может быть переработано на станции.

При одновременном расчете плана формирования отправительских маршрутов и сквозных поездов необходимо включить в неравенство (53) величины, характеризующие собой дополнительные вагоно-часы накопления отправительских маршрутов, замедления в продвижении вагонов по участку при немаршрутном отправлении с промежуточных станций до первой попутной технической станции и др.

В линейную форму (53) при одновременном расчете плана формирования одногруппных и групповых поездов дополнительно вводят расходы, связанные с накоплением и формированием групповых поездов и прицепных групп, а также с прицепкой и отцепкой их в пути следования. Введя дополнительные переменные, которыми характеризуется выгодность ($x = 1$) или невыгодность ($x = 0$) выделения групповых поездов, и наложив на них соответствующие ограничения, можно получить при расчете плана формирования симплекс-методом оптимальное решение этой задачи. Таким же путем рассчитывается план формирования при переломе весовых норм поездов на направлении. Использование ЭВМ резко сокращает время решения таких задач.

4. СОВМЕСТНЫЙ РАСЧЕТ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ С МЕСТ ПОГРУЗКИ И С СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

Исследования в области организации вагонопотоков включают сопоставление затрат и экономии вагоно-часов для отправительских маршрутов и сквозных поездов. В то же время отправительская маршрутизация и сквозные поезда — взаимосвязанные и дополняющие друг друга формы организации вагонопотоков. При организации отправительских и ступенчатых маршрутов во внимание следует принимать не только производительность и мощность грузовых пунктов, но и наличие сортировочных станций, оборудованных новейшими техническими средствами, позволяющими формировать поезда любого веса и не допускать завышенных простоев вагонов одноименных назначений как на грузовых, так и на сортировочных станциях. Надо также отметить, что экономически эффективные методы эксплуатации можно установить, если отдельные струи рассматривать как составляющие единого вагонопотока, элементы которого взаимодействуют между собой.

Наилучшего использования всех технических средств на направлении, по которому следует маршрут, можно добится только при совместном рассмотрении и одновременном определении целесообразности организации отправительских маршрутов и сквозных поездов. Чтобы найти полный эффект выбираемого варианта отправительской и технической маршрутизации, необходимо подсчитать общие затраты на организацию всех вагонопотоков на данном направлении, включающие расходы на накопление груза, маневровую работу, простои вагонов и поездов и на их переработку.

В зависимости от дальности следования и размеров вагонопотоков, развития и наличия технических средств и взаимного расположения сортировочных и грузовых станций сферы целесообразности отправительской маршрутизации и сквозных поездов могут быть различны. Интенсификация использования технических средств транспорта и промышленных предприятий — главный фактор, определяющий количество и место формирования маршрутов с мест погрузки и на сортировочных станциях. Производственные расчеты показывают, что существующий способ определения выгодности маршрутизации не всегда дает лучший по приведенным вагоно-часам вариант организации вагонопотоков. Известно, что более половины всех маршрутов с мест погрузки будут абсолютно выгодны, если определять эффективность видов маршрутизации существующими приемами. При уточненном же способе расчета многие маршруты, которые отгружают группами, будут невыгодны, так как вагоны их ожидают окончания погрузки других групп. В категории эффективных останутся маршруты рудные, угольные, наливные и другие, которые отгружают или целиком на одном фронте, или частями на нескольких подъездных путях, примыкающих к одной станции, где маневровые затраты на соединение ча-

стей состава небольшие. Решая вопрос об эффективности маршрутов, необходимо установить, что целесообразнее: простой вагонов на грузовых станциях в ожидании окончания грузовых операций с другими группами вагонов или передача их на сортировочную станцию для включения в процесс поездообразования. Определяют продолжительность выполнения операций и количество подач:

техническое оснащение, число точек погрузки, длину фронта погрузки-выгрузки, время установки и подачи вагонов;

удаление грузового пункта от места формирования маршрута;

регулярность подачи и уборки вагонов, число сборных поездов, расписание подачи и уборок вагонов и др.;

число маневровых локомотивов, работающих параллельно;

путевое развитие грузового пункта.

Совместное рассмотрение этих факторов позволяет установить расчетную величину и простой группы вагонов, а также простой под грузовыми операциями целого маршрута. Если предположить, что все виды маршрутизации рассматриваются совместно, то

$$B_{\text{общ}} = \kappa cm + \kappa_0 c_0 m_0 + \sum^{\Sigma N-\kappa} N_i \sum^{n-2} T_{\text{эк}\,j}, \qquad (55)$$

где $B_{\text{общ}}$ — общие затраты приведенных вагоно-часов на направлении при организации отправительских маршрутов и сквозных поездов;

$\sum N_i \sum T_{\text{эк}\,j}$ ($\Sigma N-\kappa$, $n-2$) — приведенные вагоно-часы, затраченные на переработку транзитных вагонов;

κcm — суточные затраты приведенных вагоно-часов на накопление сквозных поездов;

$\kappa_0 c_0 m_0$ — суточные затраты приведенных вагоно-часов на организацию отправительских маршрутов.

В приведенные вагоно-часы, показывающие экономическую целесообразность маршрутизации, входят затраты на организацию отправительских маршрутов и сквозных поездов. Для определения эффективности отправительских маршрутов в расчетах используют три параметра. *Начальный параметр* организации отправительских маршрутов $c_0^{\text{н}}$ определяется отношением затрат приведенных вагоно-часов на выполнение маневровых и грузовых операций на станциях погрузки и выгрузки к числу вагонов в составе:

$$c_0 = \frac{\Sigma B_{\text{м}}^{\text{п}} + \Sigma B_{\text{м}}^{\text{в}} + \Sigma B_{\text{гр}}^{\text{п}} + \Sigma B_{\text{гр}}^{\text{в}}}{m_0}, \qquad (56)$$

где $\Sigma B_{\text{м}}^{\text{п}}$, $\Sigma B_{\text{м}}^{\text{в}}$ — затраты приведенных вагоно-часов на выполнение маневровых и вспомогательных операций на станциях погрузки и выгрузки;

$\Sigma B_{\text{гр}}^{\text{п}}$, $\Sigma B_{\text{гр}}^{\text{в}}$ — затраты приведенных вагоно-часов, полученные при выполнении грузовых и дополнительных операций на станциях погрузки и выгрузки;

m_0 — состав маршрута в вагонах.

Следовательно, начальный параметр организации маршрутов не зависит от того, как грузятся или выгружаются вагоны: группами или целым составом. Он характеризует быстроту выполнения маневровых и грузовых операций. Для дальнейших расчетов время обработки группы вагонов, т. е выполнения с ними маневровых и грузовых операций, обозначим через $I_{\text{гр}}$ и назовем его периодом обработки группы. Тогда при погрузке сразу целого маршрута начальный параметр

$$c_0^{\text{нпм}} = \frac{n I_{\text{м}}^{\text{п}} m_0}{m_0}, \qquad (57)$$

а при выгрузке

$$c_0^{\text{нвм}} = \frac{n I_{\text{м}}^{\text{в}} m_0}{m_0}, \qquad (58)$$

где n — число маршрутов за сутки.

При погрузке маршрута несколькими группами вагонов начальный параметр можно выразить как

$$c_0^{\text{нп}_{\text{гр}}} = \frac{n \sum_{n_j=2}^{n_{\text{гр}}^{\text{п}}} I_{\text{гр}\,j}^{\text{п}} m_{\text{гр}}^{\text{п}}}{m_0}, \qquad (59)$$

где $n_{\text{гр}}$ — число групп в маршруте.

Соответственно, при выгрузке маршрута группами начальный параметр выражается величиной

$$c_0^{\text{нв}_{\text{гр}}} = \frac{\sum^{n_{\text{гр}}^{\text{в}}} I_{\text{гр}}^{\text{в}} m_{\text{гр}}^{\text{в}}}{m_0}. \qquad (60)$$

При погрузке и выгрузке маршрута группами эта величина выразится так:

$$c_0^{\text{н}_{\text{гр}}} = c_0^{\text{нп}_{\text{гр}}} + c_0^{\text{нв}_{\text{гр}}} = \frac{n\left[\sum_{i=2}^{n_{\text{гр}}^{\text{п}}} I_{\text{гр}_i}^{\text{п}} m_{\text{гр}}^{\text{п}} + \sum_{i=2}^{n_{\text{гр}}^{\text{в}}} I_{\text{гр}_i}^{\text{в}} m_{\text{гр}}^{\text{в}}\right]}{m_0}.$$

Иногда параметр обработки групп вагонов увеличивается от дополнительного простоя в ожидании подачи, так как она определяется свободностью маневрового локомотива, в то время как состав маршрута подает поездной локомотив и ожидания нет.

Общий параметр организации маршрутов c_0^{o} — отношение затраты общих вагоно-часов к величине состава маршрута:

$$c_0^{\text{оп}} = \frac{n\left[\sum_{i\geqslant 2}^{n_{\text{гр}}} I_{\text{гр}}^{\text{п}} m_{\text{гр}} + \sum_{i\geqslant 2}^{n_{\text{гр}}} I_{\text{гр}}^{\text{п}} \left(n_{\text{гр}}^{\text{п}} - n\right) 0{,}5 m_{\text{гр}}^{\text{п}}\right.}{m_0}. \qquad (61)$$

Для станции выгрузки маршрута группами

$$c_{\text{о}}^{\text{ов}} = \frac{n\left[\sum_{i\geqslant 2}^{n_{\text{гр}}} l_{\text{гр}}^{\text{в}} m_{\text{гр}} + \sum_{i\geqslant 2}^{n_{\text{гр}}} l_{\text{гр}}^{\text{в}} \left(n_{\text{гр}}^{\text{в}} - n\right) 0{,}5 m_{\text{гр}}^{\text{в}}\right]}{m_{\text{о}}}. \qquad (62)$$

Из уравнений (61), (62) видно, что если состав маршрута не делится на части, то вторые слагаемые превращаются в нуль, так как $n = n_{\text{гр}}$, и общий параметр равен начальному, т. е. вагоно-часы расходуются только на маневровые и грузовые операции. Если же для выполнения грузовых операций состав делится на части, то общий параметр растет и тем быстрее, чем больше частей и чем медленнее выполняются маневровые и грузовые операции. Начальный же параметр при увеличении числа частей остается неизменным, так как его величина зависит только от быстроты выполнения маневровых и грузовых операций. При этом, конечно, не учитывается время перерывов между обработками предыдущей и последующей групп вагонов.

Параметр организации маршрутов с мест погрузки $c_{\text{о}}$ — разность общего и начального параметров:

$$c_{\text{о}} = c_{\text{о}}^{\text{о}} - c_{\text{о}}^{\text{н}}. \qquad (63)$$

Он характеризует дополнительные затраты вагоно-часов на организацию маршрутов с мест погрузки. Если его величина незначительна, т. е. дополнительные вагоно-часы на станциях погрузки и выгрузки ничтожны, то маршруты организовывать целесообразно и наоборот. Из уравнения (63) видно, что в частном случае, если общий и начальный параметры равны между собой, то параметр организации маршрутов равен нулю. Это верно только в том случае, когда ожиданий выполнения грузовых операций нет, т. е. при выполнении маневровых и грузовых операций с целым составом, а также с крупными группами вагонов, из которых затем без дополнительных затрат вагоно-часов формируют отправительские маршруты. В отдельных случаях этот параметр может быть отрицательной величиной, обычно при больших ожиданиях подачи и уборки групп вагонов.

По затратам приведенных вагоно-часов все маршруты с мест погрузки можно разделить на две категории. К первой относятся маршруты, на организацию и выгрузку которых не требуется дополнительных затрат вагоно-часов в ожидании окончания грузовых и маневровых операций; ко второй — маршруты, на организацию и выгрузку которых требуется обязательно затрачивать дополнительные вагоно-часы в ожидании окончания грузовых и маневровых операций. К этой же категории относятся и маршруты, формируемые или назначаемые на заадресовочные базы-станции.

С маршрутами первой категории грузовые и маневровые операции выполняются одновременно с целым составом и, как правило, на одном или двух подъездных путях. При погрузке или выгрузке

такого маршрута на двух подъездных путях время грузовых операций исчисляется по наибольшим затратам, причем в этом случае требуется обязательное согласование их окончания, чтобы одна группа вагонов не ожидала другой. Формирование или расформирование таких маршрутов может выполняться как непосредственно на подъездных путях, так и на сортировочных станциях, расположенных в непосредственной близости к ним. Выбор места маневров зависит от местных условий и технического оснащения станций. Как видим, эта категория маршрутов с мест погрузки не зависит от наличия и мощности назначений сквозных поездов. Такие маршруты можно отнести к основным, и вопрос об их выделении решать до разработки плана формирования одногруппных сквозных поездов. Иначе говоря, маршруты с мест погрузки, которые организуются и выгружаются без затраты времени на ожидание окончания грузовых и маневровых операций, абсолютно выгодны.

Ожидание окончания грузовых и маневровых операций относится в равной степени к станциям погрузки и выгрузки. Например, если допустить, что при погрузке вагоны не ожидали окончания грузовых операций, а при выгрузке ожидали, то этот маршрут не будет относиться к основным. Или, если состав грузится или выгружается на двух подъездных путях, где затраты времени на грузовые и маневровые операции не равны, а технология подачи вагонов такова, что одна группа ожидает другую, маршрут также не будет относиться к основным. Кроме того, размеры суточного вагонопотока основных маршрутов должны обеспечить на одной из сортировочных станций — начальной или конечной — необходимую экономию вагоно-часов:

$$N_{\text{осн}} T_{\text{эк}}^{\text{нк}} - c_{\text{о}} m_{\text{о}} > 0, \qquad (64)$$

где $N_{\text{осн}}$ — вагонопоток основной струи;

$T_{\text{эк}}^{\text{нк}}$ — минимальная экономия на начальной или конечной станции по ходу движения маршрутов.

Соблюдение этого неравенства обеспечивает проследование основных маршрутов до станции назначения.

Вагоны маршрутов второй категории загружаются на одном или нескольких фронтах промышленных предприятий. При одинаковой продолжительности грузовых операций с частями состава дополнительные вагоно-часы возникают только тогда, когда число маневровых локомотивов меньше числа частей. Так как организация таких маршрутов вызывает простой вагонов под накоплением, необходимо установить целесообразные места для этого. Возможны два варианта: на подъездном пути или на технической станции. В первом случае из всех или части вагонов собственной погрузки организуют отправительские маршруты. Во втором случае вагоны собственной погрузки отдельными группами передают на техническую станцию для включения в сквозные поезда. Правильное установление места накопления вагонов обеспечивает наименьший про-

стой вагонов, а следовательно, и наиболее целесообразный уровень отправительской маршрутизации.

Такие отправительские маршруты, которые вызывают увеличение простоя вагонов, относятся к дополнительным. Их можно организовывать на одном или нескольких подъездных путях. При прослеживании через попутные станции каждый вагон таких маршрутов обеспечивает экономический эффект, но этот же вагон может дать экономический эффект и от прослеживания станций в составе сквозных поездов. Поэтому при организации и определении эффективности подобных отправительских маршрутов в каждом случае находят наибольший выигрыш вагоно-часов. В зависимости от мощности струи и размеров фронтов погрузки-выгрузки дополнительные отправительские маршруты могут удовлетворять нескольким условиям.

Условие самостоятельного выделения:

$$c_0 m_0 < N_м \, (T^н_{эк} + T^к_{эк}), \qquad (65)$$

где $c_0 m_0$ — дополнительные затраты вагоно-часов в сутки на обработку маршрута на станции погрузки и выгрузки;

$N_м$ — суточный вагонопоток;

$T^н_{эк}$, $T^к_{эк}$ — экономия на один вагон от прослеживания начальной и конечной станций в составе отправительского маршрута.

При соблюдении этого неравенства дополнительный маршрут, удовлетворяющий условию самостоятельного выделения, без каких-либо сравнений выделяют в самостоятельное назначение. При нарушении неравенства (65) вагонопоток собственной погрузки проверяют по другим условиям.

Условие возможного выделения маршрута:

$$c_0 m_0 < N_м \sum^{n} T_{эк\,j}, \qquad (66)$$

где $\sum^{n} T_{эк\,j}$ — сумма экономии на один вагон от прослеживания в транзитных поездах всех попутных станций, включая начальную и конечную.

Вагонопоток дополнительных отправительских маршрутов, удовлетворяющий условию возможного выделения, можно выделять либо в самостоятельное назначение, либо его вагоны объединять со сквозными поездами. Выбирают вариант, обеспечивающий наименьшие затраты вагоно-часов.

Условие обязательного объединения со сквозными поездами:

$$c_0 m_0 > N_м \sum^{n} T_{эк\,j}. \qquad (67)$$

Если для вагонопотока собственной погрузки это неравенство соблюдается, то он не претендует на самостоятельное выделение.

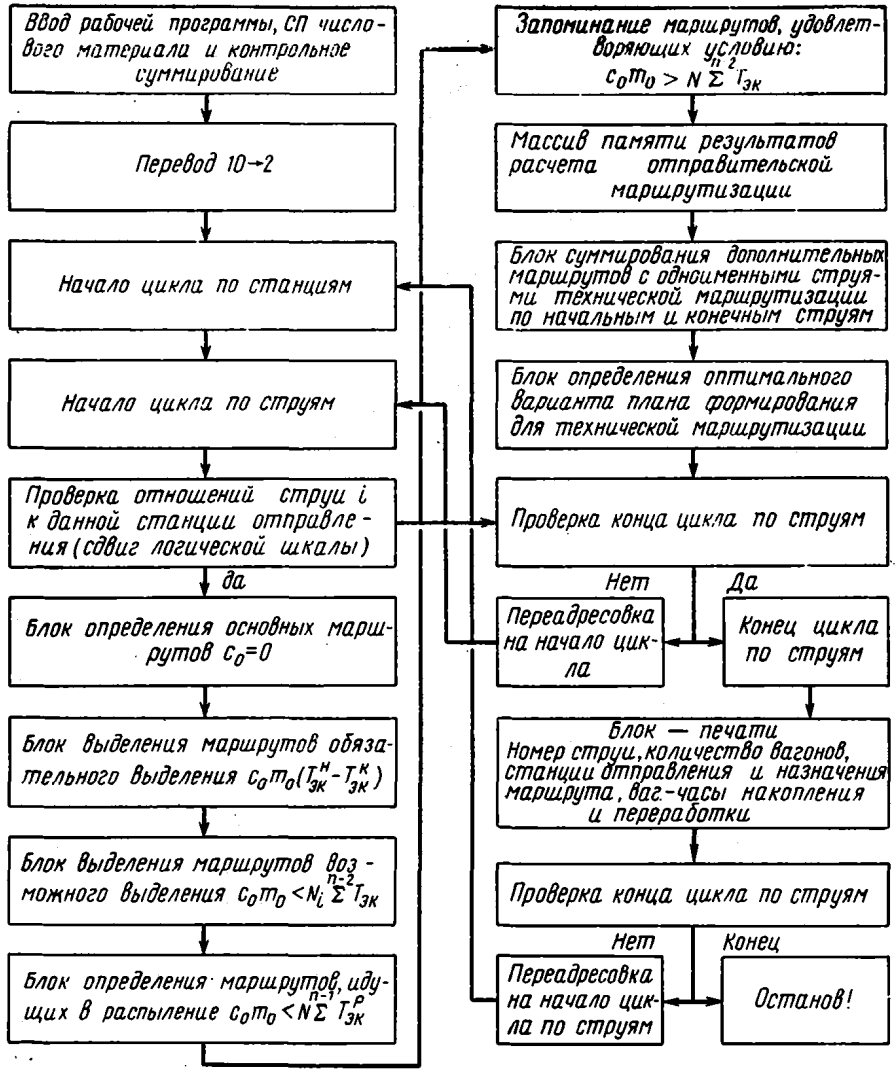

Рис. 29. Блок-схема программы совместного расчета плана формирования поездов

Из неравенства (67) также видно, что дополнительные вагоно-часы, затраченные на организацию отправительских маршрутов из данного вагонопотока, превышают экономию вагоно-часов на попутных станциях.

Условие назначения дополнительных маршрутов в распыление:

$$c_0 m_0 < N_м \sum^{n'} T^р_{эк\,j}, \qquad (68)$$

где n' — число станций, расположенных до станции распыления;

$\sum^{n'} T^р_{эк\,j}$ — экономия на один вагон на станциях, расположенных до станции распыления, на которых перерабатывались бы вагоны маршрута.

Для совместного расчета плана формирования грузовых поездов целесообразно на график вагонопотоков нанести все расчетные нормативы, размеры вагонопотоков собственной погрузки и сквозных поездов. В начале расчета классифицируют струи для отправительских маршрутов в определенной последовательности: основные; обязательно выделяемые; возможного выделения и в распыление. После проверки вагонопотоки, не претендующие на самостоятельное выделение, сразу включают в сквозные поезда. Основные и обязательно выделяемые отправительские маршруты входят в совместный оптимальный вариант. Затем классифицируют струи вагонопотоков для сквозных поездов в последовательности: основные; дополнительные; вспомогательные назначения и присоединяемые. Назначения, соответствующие основным струям вагонопотоков, намечают к самостоятельному выделению в оптимальном варианте, а для оставшихся струй вагонопотоков предварительно устанавливают варианты их проследования через попутные станции. Затем последовательно отменяют отправительские маршруты возможного выделения и включают их вагонопотоки в соответствующие назначения сквозных поездов. При изменении размеров струй вагонопотоков сквозных поездов варианты плана формирования пересчитывают. Отмена отправительских маршрутов начинается с наиболее коротких. Блок-схема расчета совместного плана приведена на рис. 29.

Глава 6 ПЛАН ФОРМИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОЕЗДОВ

1. ОРГАНИЗАЦИЯ ПОРОЖНИХ ВАГОНОПОТОКОВ

Своевременное обеспечение погрузки порожними вагонами во многом способствует успешному выполнению заданий по перевозке грузов народного хозяйства. Баланс порожних вагонов каждого рода подвижного состава: избыток, когда выгрузка преобладает над погрузкой, и недостаток, если погрузка превышает выгрузку, — определяется по междорожным таблицам-шахматкам груженых вагонопотоков. В службах движения дорог разрабатывают также схемы регулировки порожних вагонопотоков, используя нормы передачи порожних вагонов по стыковым междорожным пунктам, дорожные ведомости плановых груженых вагонопотоков, отчетные данные о вагонопотоках и грузовой работе.

Междорожную схему регулировки и дорожные схемы направления порожних вагонопотоков разрабатывают так, чтобы максимально сократить порожний пробег вагонов, ликвидировать встречный и излишний пробег однородного подвижного состава и использовать взаимозаменяемость подвижного состава. При наличии параллельных ходов для следования порожних вагонов вопрос о их направлении решается технико-экономическими расчетами. Обычно более выгодны технически оснащенные двухпутные линии. Тем не менее на выбор направления следования порожних вагонопотоков влияют вид тяги и тип локомотива, длина линии и профиль пути, степень насыщения графика поездами, число порожних вагонов и характер их движения, зарождения и погашения вагонопотоков (пункты и среднее время накопления), отношение времени выполнения начальных операций к времени следования, длина приемо-отправочных путей на станциях и др.

Стоимостное рассмотрение приведенных выше факторов позволяет установить наименьшие затраты порожних вагоно-часов и денежных средств, а следовательно, оптимальное направление пропуска порожних вагонов.

Наиболее сложно в организации порожнего вагонопотока определение продолжительности накопления порожних составов. Известно, что чем меньше вагонов в группе и больше состав и продолжительность грузовых операций, тем больше и время накопления состава. В общем случае простой порожних вагонов под накоплением на один состав можно выразить как

$$B_{н} = \left(\sum_{к_п} \bar{v}_i + \sum_{к_п} \bar{w}_i \right) m_{ц}, \qquad (69)$$

где $\bar{v}_i$ — продолжительность выполнения технологических операций на один вагон, ч;

$\bar{w}_i$ — продолжительность межоперационных перерывов на один вагон, ч;

$m_{п}$ — число вагонов в порожнем составе;

$к_{п}$ — число пунктов образования порожних вагонов.

Через средний интервал прибытия групп вагоно-часы простоя под накоплением порожних вагонов выражаются

$$B_{н} = 0{,}5\ I_{ср}\ (n_{гр} - 1)\ m_{ц} n_{п}, \qquad (70)$$

где $I_{ср}$ — средний интервал прибытия групп вагонов под выгрузку, ч;

$n_{гр}$ — число групп, из которых образуется порожний состав;

$n_{п}$ — число порожних составов, накапливаемых за сутки.

Формирование маршрутов из порожних вагонов отличается от организации груженых вагонопотоков тем, что их необходимо подбирать по роду подвижного состава. Этот подбор можно делать на станциях выгрузки массовых грузов, где почти не затрачивается времени на накопление составов, так как грузовые операции выполняются или с целым маршрутом или с большими группами вагонов параллельно на нескольких подъездных путях. После подформирования этих групп может быть составлен порожний маршрут.

Правильно сформированные порожние или комбинированные маршруты дают экономию вагоно-часов не только в пути следования на попутных технических станциях, но и на станциях назначения, т. е. погрузки. Особенно большой эффект могут обеспечить специализированные по роду вагонов и назначению порожние маршруты. После выполнения необходимых операций они могут быть поданы к фронту погрузки, что значительно сокращает простои при переработке и подаче под выгрузку. На станциях, где объем выгрузки незначителен, порожние вагоны в маршруты формируют редко, так как на накопление их требуется много времени.

План формирования порожних маршрутов для крупных пунктов выгрузки составляют аналогично плану отправительской или ступенчатой маршрутизации. Станции с небольшой выгрузкой передают порожние вагоны на технические станции. Однако не на всех технических станциях из вагонов, поступающих с нескольких выгрузочных станций, целесообразно формировать порожний маршрут. Иногда лучше организовать комбинированный маршрут из груженых и порожних вагонов так, чтобы обеспечить наименьшие затраты вагоно-часов как для груженых, так и для порожних вагонопотоков. Разница во времени от прибытия до подачи под погрузку при поступлении порожних вагонов с поездами, следующими в переработку, и со специализированными однородными маршрутами составляет дополнительную экономию вагоно-часов, получаемых при маршрутизации. Ориентировочно это $t_{назн} = 2 \div 3$ ч для поездов из порожних вагонов одного вида и $t_{назн} = 1$ ч для групповых и комбинированных поездов. Следовательно, необходимое условие маршрутизации порожних вагонопотоков:

$$N_{пор}\ (\Sigma T'_{эк} + t_{назн}) \geqslant c_{пор} m_{п}, \qquad (71)$$

где $N_{пор}$ — суточный размер струи порожнего вагонопотока;

$c_{пор}$ — параметр накопления порожних вагонов;

$T'_{эк}$ — общая приведенная экономия на один порожний вагон при пропуске вагонопотока без переработки на станции, ч.

Из формулы (71) видно, что порожние маршруты, для выполнения необходимого условия, могут проходить транзитом меньшее число станций, чем сквозные поезда.

При расчете плана маршрутизации необходимо различать следующие три случая зарождения и погашения порожних вагонопотоков: убывание, возрастание, изменение в пути следования. Первый случай наиболее благоприятен для маршрутизации. К расчету принимают суммарные вагонопотоки каждого рода подвижного состава. Целесообразность маршрутизации отдельных их струй выражается формулой

$$\Sigma N_{пор} \min t_{назн} \geqslant c_{п} m_{п}, \qquad (72)$$

где $\Sigma N_{пор}$ — общий суточный порожний вагонопоток;

$\min t_{назн}$ — наименьшая норма экономии на один вагон на станциях назначения.

Экономию от проследования без переработки попутных станций в этом случае не надо принимать во внимание, так как она будет и при формировании комбинированных составов или составов из разнородных порожних вагонов. Если при подстановке конкретных значений в неравенство (72) оно не будет удовлетворено, порожние вагоны данного рода целесообразно направлять в смешанных составах вместе с другими типами или в комбинированных поездах вместе с груженными. Такие поезда следуют преимущественно до ближайшей сортировочной станции. При отправлении маршрутов со станции формирования в расчет принимают наименьшее $t_{назн}$, так как пункты назначения порожних маршрутов устанавливаются или изменяются в оперативном порядке. Рассмотренные нами формулы еще не дают полного представления об эффективности маршрутизации. Учитывая однородность порожних вагонопотоков, выделение специализированных маршрутов должно удовлетворять абсолютному условию:

$$N_{одн} T_{эк}^{min} \geqslant c_{пор} m_{п} \text{ или } N_{одн}\ t_{назн} \geqslant c_{пор} m_{п}, \qquad (73)$$

где $N_{одн}$ — однородный суточный порожний вагонопоток,

При соблюдении этого неравенства маршрут является как бы основным. Если формирование его не оправдывается, то предусматривают отправление смешанных маршрутов из платформ, полувагонов и крытых вагонов. Если и это невыгодно, определяется целесообразность назначения комбинированных поездов. Порожние маршруты могут удовлетворять условиям выделения с одной станции (подъездного пути, грузового пункта) на одну станцию выгрузки; с нескольких станций на одну станцию; с одной станции на несколько станций; с нескольких станций на несколько подъездных путей или станций. Если порожние маршруты удовлетворяют первому условию, то их выделяют в самостоятельные назначения без каких-либо сопоставлений; если только одному из следующих условий, то перед специализацией определяют затраты на переработку на попутных станциях. Эффективность комбинированных групповых поездов устанавливают сравнением с вариантами раздельного формирования поездов из порожних и груженых вагонов. Рассмотрим порядок выделения порожних маршрутов на примере (рис. 30).

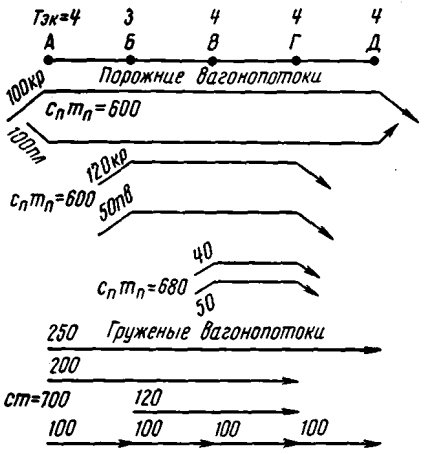

Рис. 30. Вариант организации порожних вагонопотоков (поворот стрелки означает поступление вагонов с подъездного пути или на подъездной путь)

На станции A за сутки образуется 100 порожних крытых и 100 порожних платформ (пл), на станции $Б$ соответственно 120 и 50, B — 40 и 50. Используя неравенство (69), проверяем целесообразность выделения 100 крытых вагонов, следующих со станции A с одного подъездного пути в один пункт погрузки: $100 \cdot 4 < 600$ вагоно-ч. Выделение маршрута, таким образом, нецелесообразно. Другого подвижного состава на этом подъездном пути нет, поэтому рассмотрим вагонопоток, зарождающийся на другом подъездном пути этой же станции — 100 платформ. $(N_{кр} + N_{пл})(T_{эк}^{нач} + T_{эк}^{кон}) = (100 + 100)(4 + 4) > 600$ вагоно-ч, такие маршруты выгодно выделять в самостоятельное назначение. Однако их следует проверить на целесообразность разделения и объединения с однородным подвижным составом, отправляемым с последующих станций на ту же станцию назначения. Для данного маршрута это делать не надо, так как, чтобы объединить с порожними вагонами, выходящими со станции B, их надо переработать на станциях A, $Б$ и B, что ничем не оправдывается. Если бы их перерабатывали только на двух станциях, проверка была бы необходима.

Далее проверяют порожние вагоны, отправляемые со станции $Б$: $120 \cdot 3 < 600$ вагоно-ч — однородный подвижной состав не выделяется в самостоятельное назначение. Так как $(120 + 50)\,3 = 510 < 600$ вагоно-ч, то и смешанный маршрут в отдельное назначение также не выделяется. Проверяем целесообразность включения этих вагонов в груженые маршруты: $170(4 + 4) > 600$ вагоно-ч. Для выбора окончательного варианта надо подсчитать общие

вагоно-часы как для порожних, так и для груженых поездов. В результате получим, что целесообразно отправлять комбинированные поезда.

Для порожних вагонов, выходящих со станции B, не удовлетворяется условие самостоятельного выделения: $(40 + 30)(4 + 4) < 680$ вагоно-ч. Их объединяют с груженными вагонами назначения B—$Д$.

2. ПЛАН ФОРМИРОВАНИЯ СКОРЫХ И УСКОРЕННЫХ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

Скорые грузовые (из вагонов-ледников и рефрижераторных секций) и ускоренные поезда предназначены в основном для маршрутной перевозки скоропортящихся грузов. Для них обычно предусматривают постоянные расписания, по которым отправляют ежедневно независимо от количества вагонов. Перед составлением плана формирования скорых и ускоренных грузовых поездов уточняют плановые грузопотоки (вагонопотоки) для этих поездов, направление следования скоропортящихся грузов, размещение и мощность пунктов обслуживания рефрижераторного подвижного состава и транзитных льдопунктов и анализируют выполненные вагонопотоки скоропортящихся грузов, перевозимых в специальном подвижном составе. План формирования скорых и ускоренных грузовых поездов составляют в такой последовательности:

устанавливают станции формирования поездов;

определяют вес поездов;

определяют пункты обслуживания рефрижераторного подвижного состава и пункты льдоснабжения вагонов-ледников;

устанавливают станции прицепки и отцепки вагонов-ледников.

При недостатке вагонов со скоропортящимися грузами поезда можно пополнять вагонами с другими грузами дальних назначений. Тогда вагоны-ледники, требующие льдоснабжения, и рефрижераторные вагоны в состав помещают одной группой.

В отдельных случаях для перевозки фруктов и овощей из районов массовой погрузки в крупные города организуют специальные маршруты, включающие рефрижераторный подвижной состав и вагоны-ледники. Живность на крупные мясокомбинаты также перевозят специальными поездами, которые отправляются по диспетчерскому графику. Они часто бывают сезонными.

3. ВНУТРИДОРОЖНЫЙ ПЛАН ФРОМИРОВАНИЯ ПОЕЗДОВ

Внутридорожный план формирования поездов предусматривает систему организации вагонопотоков в сквозные и местные поезда, обращающиеся на направлениях между сортировочными и участковыми станциями. ВНИИЖТ создана типовая методика автоматизированного расчета оптимальных вариантов внутридорожного плана формирования поездов. Она предусмат-

ривает как информационное обеспечение задачи, так и непосредственный расчет плана формирования местных поездов различных категорий для полигона дороги. Методика информационного обеспечения включает алгоритм получения груженых и порожних вагонопотоков и исключения групп вагонов, организуемых в отправительские маршруты, сквозные поезда сетевого значения и регулировочные маршруты из порожних вагонов. Методика расчета плана формирования поездов предусматривает поэтапную оценку вариантов назначения различных категорий местных поездов.

Анализом действующих планов формирования поездов выявляют целесообразность выделения на дороге сквозных назначений между сортировочными и участковыми станциями в дополнение к намеченным сетевым планом. Тем самым определяется I этап — расчет плана формирования сквозных одногруппных поездов для дороги в целом. Затем на II этапе с соответствующей корректировкой вагонопотоков в оптимальный план отбирают, безусловно, назначения всех сквозных поездов, проходящих транзитом через сортировочные станции, а также через конечные пункты районов местной работы. Оставшиеся назначения исследуют на возможность сохранения или включения их вагонопотоков в поезда других категорий в совокупности с местными груженными и порожними вагонопотоками в районах местной работы. После этого выявляют сочетания одногруппных и групповых поездов в районе местной работы. Сопоставлением суммарных приведенных затрат определяют лучший вариант для дальнейшего анализа.

Варианты назначения одногруппных и групповых поездов рассчитывают многократно. Это вызывается необходимостью последовательного включения в расчеты вариантов с назначениями вывозных и участково-сборных поездов. В целом расчет на II этапе включает пять самостоятельных циклов, соответствующих наиболее рациональному порядку перебора вариантов:

выделение заведомо эффективных назначений вывозных поездов при суточном размере вагонопотоков более 1,5 состава;

проверка целесообразности включения участкового вагонопотока в сборные поезда;

то же назначения сквозных одногруппных и групповых поездов и выбор наилучшего варианта из рассчитанных на всех этапах;

технико-экономическая оценка назначения на промежуточные станции вывозных поездов с размерами суточного вагонопотока менее 1,5 состава;

сравнение полученных решений с повторением расчетов при замене обычных сборных поездов сборно-участковыми.

Последовательным улучшением планов формирования, предусматривающих местные поезда различных категорий, определяют вариант с минимальными затратами приведенных вагоно-часов для района местной работы. Оптимальный план для дороги — комплекс оптимальных планов для отдельных районов, дополненный найденными на I этапе назначениями сквозных одногруппных поездов.

РАЗДЕЛ II УПРАВЛЕНИЕ ВАГОНОПОТОКАМИ

ОРГАНИЗАЦИЯ ВАГОНОПОТОКОВ НА СТАНЦИЯХ

УПРАВЛЕНИЕ ВАГОНОПОТОКАМИ НА ПОЛИГОНЕ

РАЗВИТИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

ОПТИМИЗАЦИЯ ВАГОНОПОТОКОВ НА СЕТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ СТАНЦИЙ

Глава 7 ОРГАНИЗАЦИЯ ВАГОНОПОТОКОВ НА СТАНЦИЯХ

1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В современных условиях возникают новые теоретические и практические проблемы, связанные с дальнейшим улучшением структуры управления транспортом, определением экономически эффективных режимов функционирования различных его подразделений.

Управление транспортом должно основываться на системном подходе, обеспечивающем прогрессивную организацию перевозочного процесса. Эти проблемы должна решить автоматизированная система управления железнодорожным транспортом (АСУЖТ), разрабатываемая на основе широкого применения экономико-математических методов и ЭВМ. Один из важных элементов АСУЖТ — управление вагонопотоками. Повышение требований к его уровню определяют:

постоянное усложнение организации перевозок и повышение степени взаимодействия технологических процессов на транспорте;

непрерывное повышение скоростей и возрастание мощности транспортных технических средств;

быстрое увеличение информационных потоков.

Управление вагонопотоками направлено на обеспечение оптимальности режимов функционирования транспортных подразделений, повышение оперативно-регулировочной деятельности дорог, снижение приведенных затрат на перевозочный процесс, использование глубинных резервов транспорта, т. е. улучшение согласованности и координации работы его соприкасающихся звеньев. Теория оптимального управления для стационарных условий дает эффективные методы математических расчетов. Определить же критерий оптимальности управления вагонопотоками в оперативных условиях их перемещения довольно трудно. Больше того, оценить функционирование транспортных подразделений одним критерием не всегда возможно, так как в процессе организации вагонопотоков необходимо учитывать важные, но часто противоречивые стороны производственной деятельности транспорта. Необходима разработка совокупности методов и математико-технологических моделей, обеспечивающих оптимальное управление вагонопотоками, необходимую координацию в работе элементов транспортной системы.

В связи с этим и предпринята попытка разработать элементы общей теории оптимизации управления вагонопотоками на сортировочных станциях и полигонах.

Выполняемые на станции операции с вагоном подразделяются на технические, технологическо-организационные, поездообразования. Общее время нахождения вагона на станции складывается из суммы продолжительностей их выполнения, а также межоперационных промежутков, когда вагоны простаивают в ожидании операций.

К техническим операциям относится обработка составов в парках приема и отправления. Время на выполнение этих операций — переменная величина, удовлетворительно описываемая законом распределения Эрланга. Продолжительность обработки составов в основном определяется количеством и техническим состоянием подвижного состава, методами обработки, числом и квалификацией бригад, выделенных для этой цели.

К технологическо-организационным операциям относятся расформирование и формирование составов. Передовые приемы труда и достаточно совершенное техническое оснащение станции позволяют выполнять многие элементы этих операций параллельно.

Продолжительность расформирования и формирования поездов подробно исследована. Поэтому здесь можно только отметить, что для каждой станции она—функция технического оснащения, величины составов и принятой технологии выполнения маневровых операций. Так как организация вагонопотоков не предусматривает изменения и перераспределения технических средств, то продолжительность маневровых операций в варианте организации вагонопотоков можно определять как функцию числа назначений и категорий формируемых поездов.

Наибольшую трудность представляет определение величины и количества межоперационных интервалов, которые меняются при различном соотношении перерабатываемого и транзитного вагонопотока. В общем случае они складываются из ожидания выполнения операций по приему, расформированию, формированию и отправлению и ожидания самого отправления со станции. Продолжительность межоперационных интервалов в различных вариантах организации вагонопотоков зависит от технической мощности фронтов выполнения операций и их загрузки, ритмичности работы железнодорожного направления, размеров и структуры грузо- и пассажиропотоков, соответствия пропускной и перерабатывающей способности предыдущих и последующих элементов станции. Следует иметь в виду и то, что продолжительность межоперационных интервалов могут увеличить недостаточное путевое развитие станции, неравномерность грузопотока по направлениям, нечеткая работа смежных служб.

Наиболее продолжителен процесс поездообразования. Простой вагонов под накоплением составляет примерно 50% общего времени

нахождения вагона на станции. Время этого простоя рассматривается как функция:

размеров и структуры вагонопотоков;

числа и величины назначений для каждой категории станций;

веса и числа вагонов в составе поезда.

Продолжительность операций, выполняемых с вагоном на станциях, определяют для каждой станции в зависимости от ее технического оснащения и объема переработки. Структуру вагонопотока на каждой станции во многом определяют местные условия и экономические особенности, а также местонахождение на сети дорог. Каждому варианту организации вагонопотоков соответствуют определенные условия проследования вагонами станций, а следовательно, и свои расчетные нормативы времени нахождения вагонов на них, которые характеризуют только конкретные условия объединения струй вагонопотоков. Эти нормативы можно рассчитать методами теории массового обслуживания.

2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ ВАГОНОВ НА СТАНЦИЮ

Из практики работы сортировочных станций известно, что, несмотря на наличие графика движения, ежесуточная специализация его ниток изменяется, и точное время появления каждого поезда предвидеть довольно трудно. Поэтому для характеристики прибывающего вагонопотока необходимо установить закон распределения моментов прибытия поездов или групп вагонов. Практический интерес при изучении входящего потока представляют два аспекта:

функция распределения длительности интервалов между моментами поступления требований;

распределение вероятностей поступления определенного числа требований в заданном промежутке времени.

При введении некоторых ограничений входящий поток на аппарат обслуживания можно описать с помощью функции

$$F(t) = P_k(t, a), \tag{74}$$

где t, a — промежуток времени;

k — число прибывающих поездов;

$P_k(t, a)$ — вероятность прибытия $k \geqslant 0$ поездов за промежуток (t, a).

Поток называется стационарным, если закон его распределения зависит от числа t_i, но не зависит от a. Следовательно, вероятностный режим потока с течением времени не меняется. Вероятность появления k заявок в интервале t зависит только от k и самого интервала t, a, т. е. $P_k(t, a)$, и не зависит от a. Под математическим описанием стационарности потока понимают прибытие k поездов с равной вероятностью в интервале (t_0, a) при любом $t > 0$ и целом

$k \geqslant 0$. Для дальнейших выводов обозначим эту вероятность $P_k(t)$. Если для прибывающего вагонопотока за конечный промежуток времени с вероятностью, равной единице, происходит лишь конечное число событий, то справедливо соотношение $\sum_{k=0}^{\infty} P_k(t) = 1$. Поэтому прибывающий вагонопоток на станцию можно считать с удовлетворительной степенью точности стационарным только в интервалах времени, достаточно удаленных от начального момента. Кроме того, прибывающий вагонопоток будет обладать свойствами ординарности, если практически невозможно совместить два и более событий в один и тот же момент времени:

$$\varphi(t) = 0(t) \text{ при } t \to 0 \text{ или } \frac{\varphi(t)}{t} \to 0 \text{ при } t \to 0,$$

где $$\varphi(t) = \sum_{\kappa=2}^{\infty} P_k(t),$$

Отсюда следует, что вероятность прибытия более одного поезда в интервале t_0, t стремится к нулю быстрее, чем период t_0. Ординарность абсолютно соблюдается только при числе подходов к сортировочной станции $n = 1$. При $n \geqslant 1$ ординарность может нарушаться, но это в определенных пределах не характерно.

Таким образом, поток прибытия поездов на станцию только при определенных условиях можно рассматривать как простейший, обладающий стационарностью, ординарностью и отсутствием последействия. Для изучения реальных закономерностей входящего потока на 30 станциях сети были проведены исследования, которые показали, что на закон распределения входящего потока значительно влияют интенсивность прибытия поездов, число и характеристика примыкающих к станциям участков, а также ежесуточное изменение специализации ниток графика. Для установления закона прибытия поездов на станции применялись следующие гипотетические распределения: биномиальное, гипергеометрическое, Пуассона, Эрланга. Как известно, при биномиальном распределении процесс описывают формулой

$$b(P, n) = P_n(x) = \binom{n}{x} P^x (1-P)^{n-x}, \tag{75}$$

$$P_n(0) = (1-P)^n.$$

При неограниченном увеличении числа испытаний n и одновременном уменьшении P получим формулу Пуассона

$$P_n(x) = \frac{e^{-\lambda}\lambda^x}{x!}. \tag{76}$$

Таким образом, при соответствующих параметрах биномиальный закон распределения входящего потока можно описать с достаточной степенью точности зависимостями других законов, и в

частности Пуассона. Это обстоятельство вполне оправдано теоретически и, казалось бы, что с уменьшением интенсивности прибытия поездов закон Пуассона все лучше будет описывать распределение интервалов между ними, как распределение с малыми вероятностями. Однако, как показала проверка, с уменьшением λ отношение $\left|\frac{\lambda}{\sigma}\right|^2 = l > 1$ возрастает, т. е. простейший поток переходит в эрланговский, причем l изменяется пропорционально уменьшению λ. При статистических испытаниях входящего поездопотока рассмотрено плановое и фактическое время прибытия поездов. Биномиальное распределение для станций с двумя и более подходами не рассматривалось, так как вероятность появления двух событий в одном интервале не равна нулю. Плотность вероятностей, описываемая законом Эрланга, для входящего потока имеет вид:

$$f_l(t) = \frac{(\lambda_1)^l}{(l-1)!}\, t^{l-1} e^{-\lambda t}, \qquad (77)$$

где λ_1 — средняя интенсивность пуассоновского потока событий.

Интенсивность потока Эрланга при этом

$$\lambda = \frac{\lambda_1}{l}. \qquad (78)$$

Если $l = 1$, формула (77) выражает пуассоновский поток с показательным распределением интервалов между событиями с плотностью

$$f_1(t) = \lambda_1 e^{-\lambda_1 t}. \qquad (79)$$

Следовательно, закон распределения вероятностей Эрланга более общий, чем закон Пуассона. Чтобы установить целесообразные области применения законов распределения, рассмотрим отношение стандартного отклонения к математическому ожиданию. Это отношение носит название коэффициента вариации интервалов v. Стандартное отклонение величины, распределенной по закону Эрланга, определяется $\sigma = \frac{\sqrt{l}}{\lambda}$, а математическое ожидание $M(t) = \frac{l}{\lambda}$; для величины, распределенной по показательному закону, соответственно $\sigma = \frac{1}{\lambda l}$ и $M(t) = \frac{1}{\lambda l}$. Таким образом, коэффициент вариации входящего потока для закона Эрланга

$$\vartheta = \frac{\sqrt{l}/\lambda}{l/\lambda} = \frac{1}{\sqrt{l}} < 1, \qquad (80)$$

а для показательного

$$\vartheta = \frac{1/\lambda l}{1/\lambda l} = 1. \qquad (81)$$

Соотношения величин l и λ для законов Эрланга и Пуассона приняты за исходные. Причем закон Эрланга при $k = 2, 3, \ldots, n$

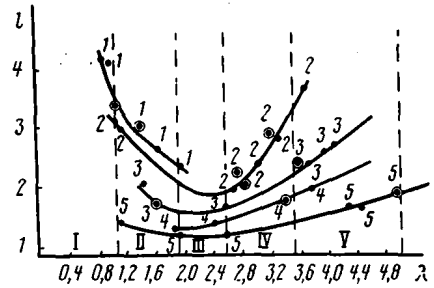

Рис. 31. Зависимость параметра l входящего поездопотока на сортировочные станции (системы) от числа подходов и суммарной интенсивности грузового движения:
I—V — категории станций;
1—5 — число подходов

и $l = 2, 3, \ldots, n$ учитывает степень последействия[1]; при $k = 1$ и $l = 1$ — процесс простейший без последействия, а при $k \to \infty$ и $l \to \infty$ промежутки времени между наступлением событий (прибытие поездов на станцию или моменты их обслуживания) — фиксированы, т. е. последействие событий полное. Как установлено в результате статистических наблюдений при малых $\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ (n — число прибывающих поездов), параметр l изменяется нелинейно относительно интенсивности прибытия (рис. 31) и в данном случае ни в коей мере не отражает степень последействия, так как при уменьшении интенсивности прибытия поездов последействие снижается. Поэтому, чтобы установить закон распределения вероятности прибытия поездов на станцию при различной интенсивности, достаточно рассмотреть только соотношение математического ожидания и дисперсии. Как показали исследования для станций с несколькими подходами, дисперсия вероятности прибытия поездов увеличивается быстрее при большой интенсивности. Этим и объясняется то, что с увеличением интенсивности входящего поездопотока l увеличивается. На рис. 31 категория станции определена в зависимости от интенсивности поездопотока: I категория — от 0,31 до 1,10 поезда в 1 ч; II — от 1,11 до 1,96; III — от 1,97 до 2,58; IV — от 2,59 до 3,50; V — более 3,5 поезда.

Анализ планового и исполненного графика движения для различных категорий станций показал, что, во-первых, опаздывает или опережает плановое время прибытия небольшое число поездов; во-вторых, из-за колебаний размеров вагонопотоков изменяется и ежесуточное прибытие поездов. Поэтому количество прокладываемых поездов и вероятность использования каждой плановой нитки в разные сутки различна. Однако ежесуточное изменение специализации ниток графика так же, как и небольшое число поездов, прибывающих ежесуточно на станцию с опережением времени или опозданием, не может существенно повлиять на закон распределения входящего поездопотока. Поэтому значения l для исполненного

[1] Для характеристики степени последействия здесь и далее приняты k — параметр Эрланга для закона распределения времени обслуживания; l — параметр Эрланга для закона распределения входящего потока.

и планового графика прибытия поездов для многих станций совпадают.

Следует отметить, что на характер изменения входящего поездопотока влияет, помимо общей интенсивности, количество подходов, примыкающих к станции, и интенсивность поездопотока на каждом из них. К основным причинам увеличения l при небольшом потоке надо отнести равномерность прокладки поездов как на плановом, так и на исполненном графике движения, чему и способствует небольшое использование пропускной способности участков. При значительной интенсивности движения поездов повышается равномерность их прокладки, так как отсутствует возможность свободного перемещения ниток графика. На нескольких подходах с различными размерами грузового движения и значительным количеством пассажирских поездов колебания в интервалах прибытия большие. Это обычно вызывает уменьшение l.

Неравномерность поступления требований существенно влияет на величину межоперационных промежутков времени. Для количественной оценки этого влияния достаточно знать величину коэффициента вариации входящего потока. Наиболее точно величину его можно найти анализом статистических данных. Однако из-за их отсутствия в рассматриваемых вариантах организации вагонопотоков необходимо аналитически рассчитывать вероятностные характеристики. Из-за большого числа факторов, определяющих вероятностную структуру потока, поступающего на станцию, для исследования используют метод статистического анализа. Сущность последнего состоит в том, что коэффициент вариации входящего потока в систему расформирования и транзитного потока в систему отправления определяется через известные характеристики графика движения поездов.

Предположим, что имеется объединенный график поступления поездов в сортировочную систему со всех примыкающих направлений. Пусть также размеры движения совпадают с числом ниток графика (резерва ниток нет) и известен показатель неравномерности прокладки грузовых поездов:

$$\vartheta_{гр} = \frac{1}{\overline{T}} \sqrt{\frac{1}{n_{гр}} \left[\sum_{k=1}^{n_{гр}} (T_k - \overline{T})^2 \right]}, \qquad (82)$$

где $n_{гр}$ — число ниток графика для пропуска грузовых поездов;
T_k, $\overline{T}$ — соответственно интервал между смежными нитками графика и его среднее значение.

С увеличением числа транзитных поездов, следующих по участкам, число ниток графика, которые могут быть использованы для пропуска поступающих в расформирование, уменьшается. Происходит разрежение исходного потока P — преобразование: каждая нитка с вероятностью $P = n_р/n_{гр}$ используется для пропуска разборочных, а с вероятностью $q = 1 - p$ для транзитных поездов.

Коэффициент вариации интервала между поездами, поступающими в расформирование при отсутствии резерва ниток,

$$\vartheta_{вх} = \sqrt{1 - P(1 - \vartheta_{гр}^2)}. \qquad (83)$$

При наличии резервных ниток в графике движения исходный поток подвергается двойному преобразованию: разрежается первоначально с вероятностью $P_1 = (n_р + n_{тр})/n_{гр}$, а затем с вероятностью $P_2 = n_р/(n_р + n_{тр})$. Поэтому коэффициент вариации интервала между поездами, поступающими в расформирование, равен

$$\vartheta_{вх.п} = \sqrt{1 - P_1 P_2 (1 - \vartheta_{гр}^2)}. \qquad (84)$$

Полагая далее, что $P_2 = \alpha_{пер}$ и $P_1 = 1 - \rho$, получим

$$\vartheta_{вх.п} = \sqrt{1 - \alpha_{пер}(1 - \rho)(1 - \vartheta_{гр}^2)}, \qquad (85)$$

где ρ — коэффициент резерва ниток графика;
$\alpha_{пер}$ — коэффициент переработки.

Коэффициент вариации интервала между поступлением транзитных поездов найден из выражения (85), в котором $\alpha_{пер}$ заменим коэффициентом транзитности $\alpha_{тр} = n_{тр}/(n_р + n_{тр})$:

$$\vartheta_{вх} = \sqrt{1 - \alpha_{тр}(1 - \rho)(1 - \vartheta_{гр}^2)}. \qquad (86)$$

Как видим, неравномерность входящих потоков в системы расформирования и отправления зависит от прокладки ниток в графике движения, резерва пропускной способности участков и коэффициентов транзитности и переработки. При этом поскольку $\alpha_{пер} + \alpha_{тр} = 1$, то $\vartheta_{вх.п}$ и $\vartheta_{вх.т}$ — величины зависимые. Следовательно, неравномерность поступления поездов в системы расформирования и отправления зависит также и от соотношения транзитного и перерабатываемого вагонопотоков на станции.

3. ОБСЛУЖИВАНИЕ ПОЕЗДОВ И ВАГОНОВ

Под системой обслуживания понимают как совокупность оборудования и персонала, так и организацию самого процесса. Заявка (поезд) поступает на некоторый пункт, который снабжен аппаратами обслуживания. Термин «аппарат» здесь применен в широком смысле, в частности, им может быть горка, вытяжной путь, бригада пункта технического обслуживания вагонов и др. В процессе обслуживания заявка занимает определенный аппарат. Продолжительность его занятия именуется временем обслуживания. Исходя из специфики работы сортировочных станций рассматривают системы обслуживания с ожиданием и смешанные. Под временем обслуживания прежде всего понимают характеристику функционирования каждого аппарата системы. Оно показывает продолжительность обслуживания одной заявки данным обслуживающим аппаратом.

Из-за различных причин время обслуживания меняется от одной заявки к другой. В первую очередь, это связано с тем, что поступающие требования не бывают полностью идентичными. Так, поезда, прибывающие в парк приема, а также собственного формирования и транзитные, отличаются количеством вагонов в составе, числом вагонов, требующих ремонта или отцепки, видом подвижного состава и др. Поэтому и время на их обработку непостоянно. Кроме того, состояние и возможности обслуживающих аппаратов также не могут быть неизменными.

Следовательно, в общем случае время обслуживания — переменная случайная величина — и может быть описано законом распределения. Если принять его равным $\frac{1}{\mu}$, то полной характеристикой будет закон распределения

$$F(t)=P\left\{\frac{1}{\mu}<t\right\}, \quad (t\geqslant 0). \tag{87}$$

В этом уравнении функция $F(t)$ определяет вероятность того, что время обслуживания $\frac{1}{\mu}$ будет меньше некоторого наперед заданного значения t. Так как время не может быть отрицательной величиной, то $F(t)=0$ при $t<0$. Иначе говоря, функция $F(t)$, как и всякая другая функция распределения, положительная монотонно возрастающая и не превышающая единицу. Значение функции распределения времени обслуживания как случайной величины весьма существенно, так как позволяет определить продолжительность нахождения заявки в системе обслуживания. Вид $F(t)$ можно установить только изучением функционирования обслуживающего аппарата.

Продолжительность обслуживания — результат функционирования определенных устройств или действия групп работников в процессе производства, поэтому коэффициенты вариации интервалов от одного обслуживания до другого находятся в пределах от 0,2 до 0,5. Распределение интервалов обычно симметричное или близкое к нему и либо нормальное, либо эрланговское с параметром $k=4$ и выше.

Важная составная часть системы управления вагонопотоками на станции — расчеты экономии (затрат) времени при проследовании транзитного вагона без переработки (с переработкой):

$$t_{\text{вк}}=\left(\sum_i t^{\text{пер}}_{\text{тех}_i}+\sum_i t^{\text{пер}}_{\text{доп}_i}\right)-\left(t^{\text{тр}}_{\text{тех}}+t^{\text{тр}}_{\text{доп}}\right), \tag{88}$$

где $\sum_i t^{\text{пер}}_{\text{тех}_i}$, $\sum_i t^{\text{пер}}_{\text{доп}_i}$ — среднее время простоя транзитного вагона с переработкой соответственно при выполнении технологических операций и в ожидании их выполнения;

$t^{\text{тр}}_{\text{тех}}$, $t^{\text{тр}}_{\text{доп}}$ — то же, без переработки.

Как видно из формулы (88), первая составная часть экономии слагается из суммы времени на производство технологических операций на всех этапах переработки вагона и зависит в основном от технического оснащения станции, объема переработки и принятой технологии работы. Теория массового обслуживания позволяет раскрыть характер взаимодействия станционных процессов и более объективно оценить величину межоперационных перерывов. Однако известные математические формулы, которые можно использовать для практических расчетов, справедливы только для пуассоновского потока требований. Но в работе сортировочных станций распределение интервалов между поступающими требованиями не всегда согласуется с показательным. Поэтому предложены приближенные зависимости для определения времени ожидания при произвольном или эрланговском распределении входящего потока. Анализ показывает, однако, что их или нельзя использовать в практических расчетах, или в определенных условиях они могут дать значительные отклонения от точных значений.

Рекомендации для определения среднего времени ожидания в многоканальной системе сводятся в основном к известным формулам Эрланга, которые справедливы только для пуассоновской системы, но зависимости не приведены к удобному для практических расчетов виду. Поэтому задача настоящей работы — на основе теоретических и экспериментальных исследований возможно полнее проанализировать влияние различных факторов на величину расчетной экономии времени и установить аналитические зависимости для определения ее элементов.

Среднее время ожидания в одноканальной системе. Наиболее просто исследовать одноканальную систему в моменты времени — моменты (точки) регенерации. Последние обладают тем свойством, что информация о поведении процесса до этого момента времени не влияет на прогноз дальнейшего его течения. Таким, например, является марковский процесс, для которого каждый момент времени служит точкой регенерации. Для произвольных входящего потока[1] и времени обслуживания единственно возможны точки регенерации — моменты времени, в которые одновременно поступает новое требование, а обслуженное покидает систему, или в которые поступающее требование находит систему свободной. Однако установить соотношение между точками регенерации для такой системы очень сложно. Наиболее просто это сделать для системы с пуассоновским входящим потоком и произвольным распределением времени обслуживания, для которой за точки регенерации можно принять моменты времени, когда требование покидает систему. Вследствие этого для определения времени ожидания в системе с произвольным

[1] Под произвольным в дальнейшем понимается входящий поток, у которого преобразование Лапласа плотности распределения интервалов между поступающими требованиями — рациональная функция.

входящим потоком использован прием, заключающийся в том, что первоначально рассматривают систему с входящим потоком, близким по характеристикам к простейшему. При исследовании ее используют теорию восстановления. Предположим, что среднее число требований в системах с пуассоновским n^* и произвольным n при $\vartheta_{вх} \to 1$ входящим потоком равно ($n^* \simeq n$). В первом случае

$$n^* = \frac{1 + M[r^2] + 2M[r] + [1 - M[r]][2M[r] - 1]}{2[1 - M[r]]}, \qquad (89)$$

где $M[r]$ — среднее число требований, поступивших за время обслуживания;

$M[r^2]$ — второй начальный момент числа требований r.

Среднее число требований

$$M[r] = \int_0^\infty H(t) f(t)\, dt, \qquad (90)$$

$f(t)$ — плотность распределения времени обслуживания;

$H(t)$ — ожидаемое число требований, поступивших в систему за время t. Для любого стационарного процесса величина $H(t)$ в интервале $(0, t)$ пропорциональна t:

$$H(t) = \frac{t}{I} = \lambda t, \qquad (91)$$

I — средний интервал между поступающими требованиями;

λ — средняя интенсивность поступления требований.

Учитывая формулу (91),

$$M[r] = \lambda t_{об} = \frac{\lambda}{\mu} = \psi, \qquad (92)$$

где $t_{об}$ — среднее время обслуживания;

μ — средняя интенсивность обслуживания;

ψ — коэффициент загрузки системы.

Второй начальный момент числа требований

$$M[r^2] = \int_0^\infty H(t^2) f(t)\, dt, \qquad (93)$$

где $H(t^2)$ — второй начальный момент числа требований, поступивших за время t:

$$H(t^2) = D(t) + H^2(t); \qquad (94)$$

$D(t)$ — дисперсия числа требований за время t; для стационарного процесса:

$$D(t) = \lambda t \vartheta_{вх}^2 + \left(\frac{1}{6} + 2\vartheta_{вх}^4 - 3\lambda^3 \alpha_3\right), \qquad (95)$$

$\vartheta_{вх}$ — коэффициент вариации входящего потока;

α_3 — третий центральный момент величины интервала:

$$\alpha_3 = \alpha_{3x} - 3\frac{\alpha_{2x}}{\lambda} + \frac{r}{\lambda^3}, \qquad (96)$$

α_{2x} — второй начальный момент величины интервала:

$$\alpha_{2x} = \frac{1}{\lambda^2}(1 + \vartheta_{вх}^2); \qquad (97)$$

α_{3x} — третий начальный момент величины интервала между поступающими требованиями. Его определим из условия:

$$f(x) = \frac{(\lambda l)^l x^{l-1} e^{-\lambda l x}}{(l-1)!}, \qquad (98)$$

l — параметр распределения Эрланга.

Тогда

$$\alpha_{3x} = \frac{(1+l)(2+l)}{\lambda^3 l^2} \qquad (99)$$

или

$$\alpha_{3x} = \frac{(1 + \vartheta_{вх}^2)(1 + 2\vartheta_{вх}^2)}{\lambda^3}, \qquad (100)$$

где $\vartheta_{вх}^2 = 1/l$.

Принимая во внимание формулы (93) и (95), получим

$$\alpha_3 = \frac{2\vartheta_{вх}^4}{\lambda^3},$$

с учетом чего

$$D(t) = \lambda t \vartheta_{вх}^2 + \frac{1}{6}(1 - \vartheta_{вх}^4) \qquad (101)$$

и второй начальный момент

$$H(t^2) = \lambda t \vartheta_{вх}^2 + \lambda^2 t^2 + \frac{1}{6}(1 - \vartheta_{вх}^4). \qquad (102)$$

После подстановки выражения (98) в формулу (89)

$$M[r^2] = \lambda \vartheta_{вх}^2 \int_0^\infty t f(t)\, dt + \lambda^2 \int_0^\infty t^2 f(t)\, dt +$$

$$+ \frac{1}{6}(1 - \vartheta_{вх}^4) \int_0^\infty f(t)\, dt. \qquad (103)$$

Первый интеграл в выражении (103) представляет собой среднее время обслуживания $t_{об}$, а второй — второй начальный момент времени обслуживания. Следовательно,

$$M[r^2] = \psi \vartheta_{вх}^2 + \psi(1 + \vartheta_{об}^2) + \frac{1}{6}(1 - \vartheta_{вх}^4), \qquad (104)$$

где $\vartheta_{об}$ — коэффициент вариации времени обслуживания.

При $\vartheta_{вх} \to 1$ третий член в выражении (104) достаточно мал и им можно пренебречь. Тогда

$$M[r^2] \simeq \psi\vartheta^2_{вх} + \psi^2(1 + \vartheta^2_{об}) \qquad (105)$$

и таким образом

$$n = \frac{\psi(1+\vartheta^2_{вх}) - \psi^2(1-\vartheta^2_{об})}{2(1-\psi)}. \qquad (106)$$

Чтобы найти среднее время ожидания в очереди, используем соотношение

$$n = \lambda\left(w + \frac{1}{\mu}\right), \qquad (107)$$

откуда

$$w = \frac{1}{\lambda}(n - \psi) \qquad (108)$$

или с учетом выражения (106)

$$w \simeq \frac{\psi}{2\mu(1-\psi)}\left(1 + \vartheta^2_{об} - \frac{1-\vartheta^2_{вх}}{\psi}\right). \qquad (109)$$

Для дальнейшего исследования представим выражение (109) следующим образом:

$$w = \frac{\psi}{2\mu(1-\psi)}(1-\beta), \qquad (110)$$

где

$$\beta = \frac{1 - \psi\vartheta^2_{об}(1-\vartheta^2_{вх})^{-1}}{\psi(1-\vartheta^2_{вх})^{-1}}. \qquad (111)$$

Предположим, что при любом значении $\vartheta_{вх}$

$$\beta = \frac{1 - \psi\vartheta^2_{об}(1-\vartheta^2_{вх})^{-1}}{1 + \psi A(1-\vartheta^2_{вх})^{-1}}, \qquad (112)$$

где A — некоторая произвольная величина.

Известно, что при $\vartheta_{вх} = \vartheta_{об} = 0$ $\beta = 1$ и $\vartheta_{вх} = \vartheta_{об} = 1$ $\beta = -1$. Эти граничные значения β соблюдаются при $A = \vartheta^x_{вх}$, где x — произвольное число. Как показала проверка, показатель степени x может быть в первом приближении принят равным 2, тогда

$$w \simeq \frac{\psi^2(\vartheta^2_{вх} + \vartheta^2_{об})}{2\mu(1-\psi)[1-(1-\psi)\vartheta^2_{вх}]}. \qquad (113)$$

Однако в этом случае среднее время ожидания, вычисленное по формуле (113), несколько занижено по сравнению с точными значениями. Это, очевидно, следствие некоторых допущений, сделанных

при выводе промежуточных результатов. Дальнейшее уточнение выражения (113) приводит к окончательной зависимости следующего вида:

$$w = \frac{\psi^2(\vartheta^2_{вх} + \vartheta^2_{об})}{2\mu(1-\psi)[1-(1-\psi)\vartheta_{вх}]}. \qquad (114)$$

На рис. 32, 33 показаны зависимости времени ожидания от различных параметров, входящих в формулу (113). Из них видно, что неравномерность входящего потока влияет на время ожидания в большей степени, чем неравномерность обслуживания, и это влияние проявляется наиболее значительно при высокой загрузке системы.

В отличие от рассмотренной системы массового обслуживания с упорядоченной очередью в практике работы сортировочных станций требования обслуживают в той или иной последовательности в зависимости от степени срочности. В этом случае все поступающие в систему требования разбивают на конечное число категорий, каждой из которых присваивают определенный индекс преимущества j ($j = 1, 2, \ldots, k$). Примером может служить система отправления, в которой транзитные поезда обслуживают в первую очередь, или система расформирования, когда составы с замыкающими группами обрабатывают и расформировывают в первую очередь. В системах с приоритетами требование большей срочности имеет, как правило, относительное преимущество, т. е. обслуживание с меньшим преимуществом не прерывается. Эффект относитель-

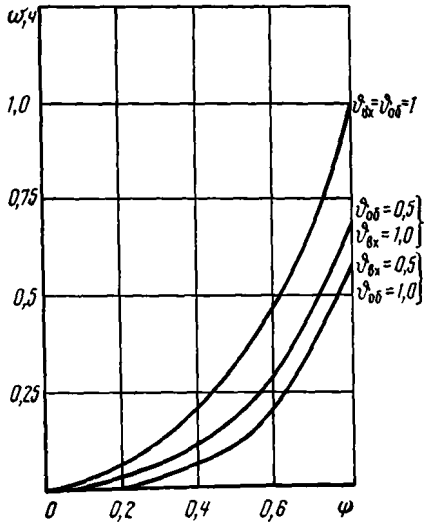

Рис. 32 Зависимости времени ожидания обслуживания от коэффициента загрузки обслуживающего устройства

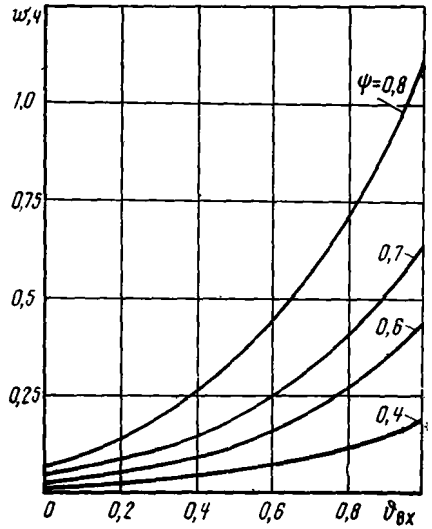

Рис 33 Зависимости времени ожидания обслуживания от неравномерности входящего потока

ного преимущества состоит в уменьшении времени ожидания требований с бóльшим преимуществом в ущерб требованиям с меньшими преимуществами. Это очень важно для оптимизации работы системы, когда стоимости простоя или длительности обслуживания требований различной категории не одинаковы. Среднее время ожидания требования с преимуществом j определяется из зависимости

$$w_j = \frac{t_0}{(1-\psi_{j-1})(1-\psi_j)}, \qquad (115)$$

где t_0 — средняя величина промежутка времени от момента поступления требования с преимуществом j до конца обслуживания требования, находящегося на аппарате;
ψ_j — коэффициент загрузки системы требованиями до категории j включительно;
ψ_{j-1} — коэффициент загрузки системы требованиями до категории $j-1$ включительно.

Постоянную величину t для данной системы можно определить из условия обслуживания требований в порядке поступления. В этом случае из формулы (115) при $j = 1$ следует, что

$$t_0 = w(1-\psi), \qquad (116)$$

где ψ — суммарная загрузка системы.

Используя равенство (113), получим

$$t_0 = \frac{\psi^2(\vartheta_{вх}^2 + \vartheta_{об}^2)}{2\mu[1-(1-\psi)\vartheta_{вх}]} \qquad (117)$$

и тогда

$$w_j = \frac{\psi^2(\vartheta_{вх}^2 + \vartheta_{об}^2)}{2\mu(1-\psi_{j-1})(1-\psi_j)[1-(1-\psi)\vartheta_{вх}]}, \qquad (118)$$

где μ — средневзвешенная интенсивность обслуживания по совокупности требований.

Средняя длительность ожидания в системе с преимуществами

$$\bar{w} = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{k} w_j k_j. \qquad (119)$$

Рассмотрим эффективность СМО с приоритетами на примере второй фазы системы отправления, когда транзитные поезда имеют преимущества в отправлении перед поездами своего формирования. Среднее время ожидания отправления транзитными поездами по формуле (118) при $j = 1$ равно

$$t_{ож}^{тр} = \frac{\psi_0^2(\vartheta_{вх}^2 + \vartheta_{об}^2)}{2\mu_0(1-\psi_{тр})[1-(1-\psi_0)\vartheta_{вх}]}, \qquad (120)$$

а поездами своего формирования при $j = 2$

$$t_{ож}^{сф} = \frac{\psi_0^2(\vartheta_{вх}^2 + \vartheta_{об}^2)}{2\mu_0(1-\psi_{тр})(1-\psi_0)[1-(1-\psi_0)\vartheta_{вх}]}, \qquad (121)$$

где $\vartheta_{об}$ — коэффициент вариации величины интервала между отправляющимися поездами;
$\psi_{тр}$ — загрузка системы транзитными поездами;
ψ_0 — суммарная загрузка системы;
μ_0 — средняя интенсивность отправления поездов:

$$\mu_0 = (\mu_{тр}\lambda_{тр} + \mu_{сф}\lambda_{сф})\frac{1}{\lambda_0}, \qquad (122)$$

$\mu_{тр}$, $\mu_{сф}$ — соответственно интенсивность отправления поездов транзитных и своего формирования;
$\lambda_{тр}$, $\lambda_{сф}$ — то же поступления поездов.

Среднее время ожидания отправления для всех поездов

$$t_{ож}^{от} = t_{ож}^{тр}\frac{\lambda_{тр}}{\lambda_0} + t_{ож}^{сф}\frac{\lambda_{сф}}{\lambda} = \frac{(1-\beta\psi_0)t_0}{(1-\psi_{тр})(1-\psi_0)} = \alpha t_{ож}^{от}, \qquad (123)$$

где $\lambda_0 = \lambda_{тр} + \lambda_{сф}$, $\psi_0 = \psi_{тр} + \psi_{сф}$ и $\beta = \lambda_{тр}/\lambda_0$.

Если $\alpha < 1$, то из формулы (123) следует, что $\bar{t}_{ож}^{от} < t_{ож}^{от}$ и, таким образом, средняя длительность ожидания при отправлении транзитных поездов с преимуществами меньше, чем в порядке поступления. Но $\alpha < 1$, когда интенсивность отправления транзитных поездов $\mu_{тр}$ больше, чем поездов своего формирования $\mu_{сф}$. При $\mu_{тр} = \mu_{сф}$ $\alpha = 1$ и поэтому $\bar{t}_{ож}^{от} = t_{ож}^{от}$. Следовательно, если продолжительность обслуживания в системе с преимуществами одна и та же для всех категорий, то средняя длительность ожидания не зависит от присвоенных требованиям преимуществ и равна среднему времени ожидания в системе с упорядоченной очередью.

Среднее время ожидания в многоканальной системе. В теории массового обслуживания нет достаточно простых зависимостей для определения числовых характеристик многоканальных систем из-за сложности исследования последних. Даже для простейшей многоканальной СМО с пуассоновским входящим потоком и показательным распределением длительности обслуживания существующие формулы трудно применить практически, не говоря уже о возможности оптимизации. Так, для простейшей многоканальной СМО с одинаковой интенсивностью обслуживания на каждом аппарате, пуассоновским входящим потоком и показательным распределением длительности обслуживания среднее время ожидания

$$w_s = \frac{1-F(0)}{s\mu(1-\psi)}, \qquad (124)$$

где s — количество обслуживающих аппаратов;
μ — интенсивность обслуживания одним аппаратом;
$\psi = \lambda/s\mu$ — суммарная загрузка системы;
$F(0)$ — вероятность нулевого ожидания.

Наибольшую трудность представляет определение величины $F(0)$. Обычно находят значение $1 - F(0)$.

$$P(w > 0) = 1 - F(0) = 1/(1 + \alpha), \tag{125}$$

где

$$\alpha = \frac{s!\,(1-\psi)}{s^s \psi^s} \sum_{n=0}^{s-1} \frac{s^n \psi^n}{n!}. \tag{126}$$

С учетом формулы (125) равенство (124) примет вид

$$w_s = \frac{\psi \alpha_s}{s\mu\,(1-\psi)}, \tag{127}$$

где

$$\alpha_s = \frac{1}{(1+\alpha)\,\psi}. \tag{128}$$

Сравнив формулы (125) и (126), получим

$$F(0) = 1 - \psi\alpha_s. \tag{129}$$

При $1 \leqslant s \leqslant 4$ равенство (126) можно аппроксимировать следующим выражением:

$$\alpha = \frac{1-\psi}{\psi}\left[1 + \frac{s-1}{s\psi}\left(1 + \frac{s-2}{s\psi}\right)\right]. \tag{130}$$

После подстановки выражения (130) в формулу (128) и преобразований получим

$$\alpha_s = \frac{s^2 \psi^2}{(s-1)(s-2) + \psi(2s + s\psi - 2)}. \tag{131}$$

На рис. 34, 35 показаны зависимости α_s, $F(0)$ от загрузки системы при различном количестве аппаратов. Полученные значения можно использовать в расчетах среднего времени ожидания и обслуживания в многоканальных системах по формуле (124).

Вероятность состояний системы с двумя обслуживающими аппаратами различной интенсивности μ_1 и μ_2 ($\mu_1 > \mu_2$), пуассоновским входящим потоком и показательным распределением длительности обслуживания, когда требование при отсутствии очереди выбирает быстродействующий аппарат, описывается уравнением

$$P_n = \psi^n p_0 \frac{(1+\alpha)\,[\alpha + (1+\alpha)\,\psi]}{\alpha\,(1+2\psi)}, \tag{132}$$

где $\alpha = \mu_2/\mu_1$ — отношение интенсивностей обслуживания;
$\psi = \lambda/(\mu_1 + \mu_2)$ — суммарная загрузка системы;
p_0 — вероятность свободности системы:

$$p_0 = \frac{1-\psi}{1 + \dfrac{\psi}{1+2\psi} \cdot \dfrac{1}{\alpha}\,[\alpha^2 + (1+\alpha^2)\,\psi]}. \tag{133}$$

Если интенсивности обслуживания μ_1 и μ_2 отличаются не более чем на 100%, то равенство (133) с хорошим приближением можно аппроксимировать выражением

$$p_0 \simeq (1 - \psi)/(1 + \psi). \tag{134}$$

Таким образом,

$$P_n = \psi^n \frac{(1-\psi)(1+\alpha)}{2(1+2\psi)(1+\psi)}\,[\alpha + (1+\alpha)\,\psi]. \tag{135}$$

Используя выражение (135), можно получить зависимости для определения среднего времени нахождения требования в системе

$$u = \frac{\psi}{\lambda(1-\psi^2)} \frac{(1+\alpha)\,[\alpha + (1+\alpha)\,\psi]}{\alpha\,(1+2\psi)}, \tag{136}$$

и в очереди

$$w = \frac{\psi^3}{\lambda(1-\psi^2)} \frac{(1+\alpha)\,[\alpha + (1+\alpha)\,\psi]}{\alpha\,(1+2\psi)}, \tag{137}$$

где λ — средняя интенсивность поступления требований.

Среднее время пребывания требования на обслуживании определится как разность между u и w:

$$t_{об} = \frac{\psi}{\lambda} \frac{(1+\alpha)\,[\alpha + (1+\alpha)\,\psi]}{\alpha\,(1+2\psi)}. \tag{138}$$

Отметим, что если интенсивности обслуживания аппаратов отличаются не более чем на 20—30%, то характеристики системы можно определить с достаточной степенью точности по зависимостям, справедливым для системы с одинаковыми аппаратами. При пуас-

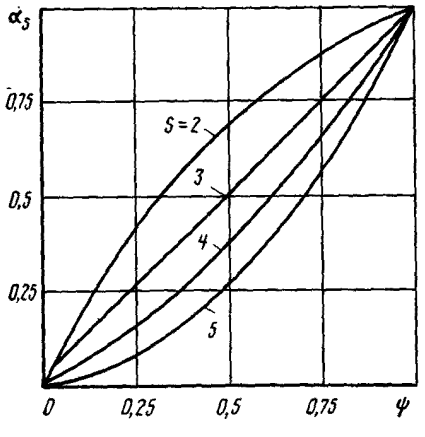

Рис. 34. Зависимости α_s от коэффициента загрузки системы

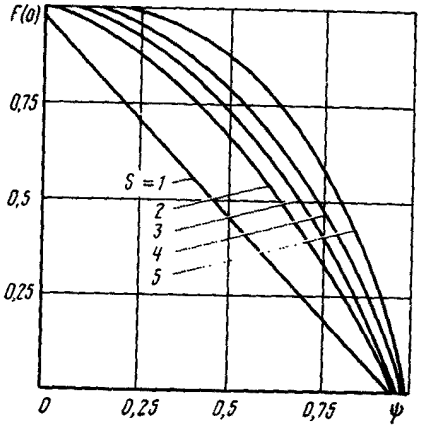

Рис. 35. Зависимость $F(0)$ от коэффициента загрузки системы

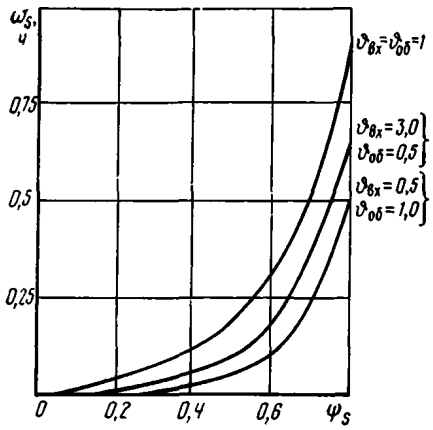

Рис. 36. Зависимости времени ожидания при $s=2$ от коэффициента загрузки системы

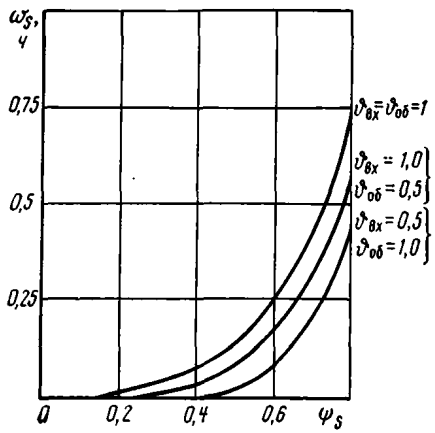

Рис. 37. Зависимости времени ожидания при $s=3$ и $\mu=1{,}33$ от коэффициента загрузки системы

соновском входящем потоке, как показали исследования, вероятность нулевого ожидания не зависит от параметра распределения времени обслуживания k. Следовательно, при увеличении k будет уменьшаться только длительность ожидания требований, у которых она отлична от нуля, $w_д$. Как видно из формулы (124), $w_д = 1/s\mu\,(1-\psi)$ и соответствует длительности ожидания в одноканальной системе с одним обслуживающим аппаратом с интенсивностью $\mu_0 = \mu s$. Учитывая это и известную формулу Поллачека — Хинчина, зависимость для определения среднего времени ожидания в простейшей многоканальной системе с пуассоновским входящим потоком и эрланговским распределением времени обслуживания следующая:

$$w_s = \frac{\psi\alpha_s\,(1+\vartheta_{об}^2)}{2s\mu\,(1-\psi)}. \qquad (139)$$

Анализ результатов моделирования СМО с эрланговским входящим потоком и временем обслуживания показывает, что для определения времени ожидания можно использовать выражение

$$w_s \simeq \frac{\psi^2\,\alpha_s\,(\vartheta_{вх}^2+\vartheta_{об}^2)}{2s\mu\,(1-\psi)\,[1-(1-\psi)\,\vartheta_{вх}^s}. \qquad (140)$$

Заметим, что при $s=1$ это выражение аналогично формуле (114). На рис. 36, 37 изображена зависимость времени ожидания от различных параметров, входящих в формулу (140). С увеличением загрузки системы и степени неравномерности входящего потока и обслуживания ожидание последнего нелинейно возрастает.

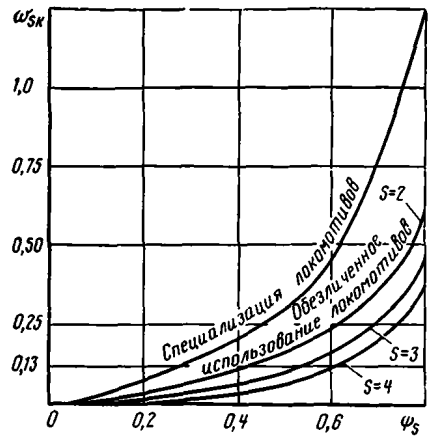

Рис. 38. Зависимость времени ожидания формирования от загрузки локомотивов

Среднее время ожидания требования с приоритетом j в простейшей многоканальной системе определяется зависимостью (114), как и в одноканальной системе. При этом

$$t_o = \frac{\psi^2\,\alpha_s(\vartheta_{вх}^2+\vartheta_{об}^2)}{2s\mu\,[1-(1-\psi)\,\vartheta_{вх}^2]}. \qquad (141)$$

В отличие от простейшей многоканальной, в которой очередное требование ожидает только освобождения аппарата, в неполнодоступной системе возникает дополнительный простой в ожидании освобождения канала обслуживания. Поэтому среднее время ожидания в ней слагается из двух элементов: среднего времени ожидания обслуживающего аппарата w_s и освобождения канала обслуживания $w_к$. Так как каждый канал представляет собой одноканальную систему, то среднее время ожидания $w_к$ при полной занятости определится из зависимости (114). Таким образом, учитывая выражения (114) и (140),

$$w_{sк} = \frac{\psi_s^2\,\alpha_s\,(\vartheta_{вх.s}^2+\vartheta_{об.s}^2)}{2s\mu_s\,(1-\psi_s)\,[1-(1-\psi_s)\,\vartheta_{вх.s}^2]} + \frac{\psi_к^2\,(\vartheta_{вх.к}^2+\vartheta_{об.к}^2)}{2\mu_к\,(1-\psi_к)\,[1-(1-\psi_к)\,\vartheta_{вх.к}]}, \qquad (142)$$

где $\mu_к$ — интенсивность обслуживания одним каналом при полной занятости;

ψ — коэффициент загрузки канала, $\psi_к = \lambda/M\mu_к$;

M — число рабочих каналов.

Выражение (142) при $\vartheta_{вх} = 1$ можно записать так:

$$w_{sк} = \frac{\lambda}{2}\left[\frac{\alpha_s\,t_{об.s}^2\,(1+\vartheta_{об.s}^2)}{s\,(s-\lambda t_{об.s})} + \frac{t_{об.к}^2\,(1+\vartheta_{об.к}^2)}{M-\lambda t_{об.к}}\right], \qquad (143)$$

где $t_{об.к}$, $t_{об.s}$ — соответственно среднее время обслуживания одним каналом и аппаратом;

λ — суммарная интенсивность поступления требований.

При $M \to \infty$ неполнодоступную систему можно рассматривать как простейшую.

При построении графика (рис. 38) принято: $0{,}6 \leqslant \psi_s \leqslant 0{,}8$; $2 \leqslant s \leqslant 4$; $\vartheta_{вх} = 1$; $\vartheta_{об} = 0{,}5$; $\mu_s = 2$; $\mu_к = 4$; $M = s$. В этом случае время ожидания формирования в зависимости от загрузки локомотивов заключено в следующих пределах: специали-

зация локомотивов, т. е. прикрепление их к определенным вытяжным путям, — 0,45—1,25 ч; обезличенное использование локомотивов—0,13—0,65 ч. При обезличенном использовании локомотивов время ожидания формирования уменьшается в 2—3 раза.

4. НАКОПЛЕНИЕ ВАГОНОВ В ПУНКТАХ ФОРМИРОВАНИЯ

Необходимость дальнейших исследований процесса накопления вагонов на сортировочных станциях вытекает из того, что затраты вагоно-часов на него составляют 30—50% общих затрат. Вместе с тем управление вагонопотоками на сети главным образом основывается на сравнении затрат вагоно-часов на накопление в пунктах формирования и переработку вагонопотоков в пути следования. Различные варианты организации вагонопотоков влияют на множество факторов, определяющих процесс накопления вагонов на сортировочных станциях. К их числу можно отнести: количество назначений, мощность вагонопотока, число вагонов в прибывающих группах, интервал прибытия групп, величину замыкающей группы, количество групп на накопление состава, степень неравномерности поступления групп и др. Сложность анализа работы сортировочного парка состоит в том, что стохастический характер процесса накопления постоянно регулируется направленной деятельностью людей, управляющих этим процессом. Передовые коллективы и новаторы транспорта вносят большой вклад в совершенствование организации накопления составов, активно воздействуя на процесс скоростной обработкой поездов с замыкающими группами, организованным подводом укрупненных групп к концу периода накопления, использованием вагонов собственной погрузки и календарным планированием ее, отправлением тяжеловесных и длинносоставных поездов и др. Но, несмотря на это, затраты вагоно-часов на накопление остаются значительными. Более того, анализ фактических значений параметра накопления на крупных сортировочных станциях показал, что за последние годы он, а следовательно, и затраты вагоно-часов на накопление увеличились.

Концентрация сортировочной работы значительно увеличила среднюю мощность назначений и величину поступающих групп. Казалось бы, затраты вагоно-часов и параметр накопления должны снизиться, так как согласно существующей теории они находятся в обратной зависимости друг от друга. Это дает основание полагать, что расчетные зависимости для определения вагоно-часов на накопление не в полной мере учитывают все факторы, воздействующие на процесс, и требуют дальнейшего уточнения. Различают две основные схемы процесса накопления в зависимости от характера поступления вагонов:

равными группами через одинаковые промежутки времени (простой процесс — ПП);

различными группами через неодинаковые промежутки времени (общий процесс — ОП).

Первая схема достаточно полно изучена, вторая же — наиболее характерная в практике работы сортировочных станций—исследована не полностью. Применение методов теории вероятностей к аналитическому описанию процесса накопления позволило вскрыть и изучить отдельные закономерности составообразования и учесть их влияние на затраты вагоно-часов. В частности, установлено, что величина замыкающей группы превышает среднюю величину группы, поступающей на путь накопления, даже при нерегулируемом процессе. Это приводит к уменьшению средней величины промежуточных групп и, таким образом, положительно влияет на затраты вагоно-часов на накопление. Однако причина увеличения замыкающей группы — неравномерность поступления групп — не нашла отражения в расчетных формулах. Вследствие чего оказалось, что предлагаемые расчетные зависимости противоречат общепринятой оценке последствий неравномерности, а именно: любой неравномерный процесс по сравнению с равномерным при одних и тех же предпосылках приводит к дополнительным затратам.

Мнение о том, что за продолжительный период неравномерность подхода групп по величине и во времени не влияет на затраты вагоно-часов на накопление и компенсируется равновероятными событиями, не имеет достаточных оснований. Неравномерность процесса накопления постоянна и ее влияние на затраты вагоно-часов нельзя уменьшить только оперативным воздействием. Это достаточно иллюстрирует пример влияния неравномерности поступления поездов в расформирование на длину очереди.

По характеру процесс накопления может быть прерывным (П), частично прерывным (Ч), непрерывным (Н). В первом случае составы накапливаются без остаточных групп и завершающая группа полностью включается в отправляемый состав. Особенность частично прерывного процесса та, что после части составов образуются переходящие остатки вагонов для накопления последующих составов.

Непрерывный процесс имеет большое теоретическое значение и может быть, когда вагоны остаются после завершения накопления каждого состава. Разновидности прерывного процесса накопления следующие:

составы накапливаются до нормы, удовлетворяющей условию полновесности или полносоставности поезда (схема П1);

составы накапливаются до определенного момента, по достижении которого поезд отправляется независимо от количества вагонов в нем (схема П2);

комбинированный случай — часть поездов одного и того же вагонопотока отправляют по расписанию, а другую — по скользящему графику с накоплением до определенной величины (схема П3).

Схема П1 характерна для вывозных, передаточных, а также порожних и некоторых участковых поездов, следующих без расписания, когда нет существенных ограничений на вес и длину состава; схема П2 — для сборных, а также вывозных и передаточных поездов, отправляемых строго по расписанию; схема П3 — для составов вывозных и передаточных поездов, формируемых из вагонопотока маломощных назначений, когда строгое соблюдение расписания отправления нецелесообразно.

Общее для всех схем то, что допускаются значительные колебания веса и длины составов.

Частично прерывный процесс также имеет разновидности:

составы накапливаются до определенной величины, удовлетворяющей условию полновесности или полносоставности поезда, не допускается колебание числа вагонов в составе (схема Ч1);

то же, но допускаются колебания составов поездов в определенных пределах (схема Ч2).

Схема Ч1 возможна при накоплении составов до определенной длины или веса, когда на них накладываются существенные ограничения; схема Ч2 типична при накоплении составов сквозных и участковых назначений, когда поезд может быть отправлен либо полновесным, либо полносоставным с незначительным превышением или занижением расчетной величины состава. Рассмотрим затраты вагоно-часов на накопление в каждой схеме.

Схема П1. Реальный процесс накопления характеризуется тем, что составы накапливаются из различных по величине групп m_i, прибывающих через неодинаковые промежутки времени τ_i. Последовательности m_i, τ_i ($i = 1, \ldots, j$) можно считать независимо распределенными случайными величинами с плотностями распределения соответственно $f(m)$, $f(\tau)$, так как вагоны для накопления составов поступают с различных пунктов, с разными интервалами, в различных поездах. При накоплении составов в данном случае остаточной группы нет, тогда промежуточные группы — $\{m_1, m_2, \ldots\}$ — независимые и одинаково распределенные случайные величины с плотностью распределения $f(m)$, за исключением замыкающей, плотность распределения которой $f(m_{зн})$ отлична от $f(m)$. У последовательности $\{\tau_1, \tau_2, \ldots\}$ одинаковая плотность распределения во всех схемах.

Так как m_i, τ_i — независимо распределенные случайные величины с одинаковой плотностью распределения, то и $\{b_1^* = m_1\tau_1,\ b_2^* = m_2\tau_2\}$ — также последовательность независимо распределенных случайных величин с одной и той же плотностью распределения $f(b^*)$. Следовательно, вагоно-часы накопления на состав можно рассматривать как сумму случайного числа элементо-вагоно-часов b_i^*, каждый из которых $b_i^* = m_i\tau_i$. Пусть состав поезда накапливается до некоторой расчетной нормы $m_{от}^{н}$ и случайная величина — число промежуточных групп на состав — приняла значение $\xi = k$ ($k = 1, 2, \ldots$). Вероятность этого равна P_k. Условное математическое ожидание вагоно-часов накопления на состав при $\xi = k$ определится равенством

$$M[B_k] = b_1 + b_2 + \ldots + b_k,$$

где
$$b_1 = b_1^*;$$
$$b_2 = b_1^* + b_2^*;$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$b_k = b_1^* + b_2^* + \ldots + b_k^*;$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$b_j = b_1^* + b_2^* + \ldots + b_j^*.$$

Так как $\{b_1^*, b_2^* \ldots\}$ — независимые и одинаково распределенные величины, то можно записать

$$b_j = \sum_{i=1}^{j} b_i^*$$

и тогда
$$M[B_k] = M\left[\sum_{j=1}^{k} b_j\right] = M\left[\sum_{j=1}^{k}\sum_{i=1}^{j} b_i^*\right]. \qquad (144)$$

Учитывая, что математическое ожидание произведения взаимно независимых случайных величин равно произведению их математических ожиданий, равенство (144) запишем как

$$M[b_k] = M\left[\sum_{j=1}^{k} M\sum_{i=1}^{j} b_i^*\right] = M\left[\sum_{j=1}^{k} j\bar{b}^*\right] =$$
$$= \bar{b}^* M\left[\sum_{j=1}^{k} j\right] = \bar{b}^*(1 + 2 + \ldots + k). \qquad (145)$$

Откуда формула для определения вагоно-часов накопления состава из $k + 1$ группы примет вид

$$M[B_k] = \bar{b}^* \frac{(1+k)\,k}{2},$$

где $\bar{b}^*$ — математическое ожидание элементо-вагоно-часов накопления.

Полное математическое ожидание вагоно-часов накопления на состав равно

$$B_c = \sum_{k=1}^{n} M[B_k]\,P_k = \frac{\bar{b}^*}{2}\sum_{k=1}^{n}(1+k)\,kP_k = \frac{\bar{b}^*}{2}\left(\sum_{k=1}^{n} kP_k + \sum_{k=1}^{n} k^2 P_k\right). \qquad (146)$$

Первая и вторая суммы в этом выражении представляют собой соответственно математическое ожидание числа промежуточных групп e_k и второй начальный момент α_{2k} числа групп. Учитывая, что $\alpha_{2k} = D_k + e_k^2$, выражение (146) примет вид

$$B_c = \bar{b}^*\left[\frac{e_k(1+e_k)}{2} + \frac{D_k}{2}\right] \qquad (147)$$

или
$$B_c = \bar{b}^*\left(S_в + \frac{D_k}{2}\right), \qquad (148)$$

где D_k — дисперсия числа групп;

$S_в$ — среднее число элементо-вагоно-часов на состав.

Как видно из равенства (148), влияние неравномерности поступления групп по величине и во времени на вагоно-часы накопления — функция такой числовой характеристики случайного числа групп на состав, как их дисперсия. При этом поскольку число промежуточных групп равно числу интервалов, дисперсия является их общей характеристикой, зависящей от распределения величины группы и интервала. Для определения дисперсии числа групп предположим, как и раньше, что $\xi = k$ ($k = 1, \ldots, n$). Пусть также средняя величина поступающей группы равна $m_{гр}$, а ее дисперсия $D(m_{гр})$. Так как $\{m_1, m_2, \ldots, m_k\}$ — независимые и одинаково распределенные величины, то случайное число вагонов, находящихся на пути накопления до момента прибытия замыкающей группы,

$$S_k = km_{гр}, \tag{149}$$

а дисперсия этого числа

$$D[S_k] = D[m_1] + D[m_2] + \ldots + D[m_k] = kD[m_{гр}]. \tag{150}$$

Согласно определению дисперсии

$$D_k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\bar{k} - k_i)^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\bar{S}_k}{m_{гр}} - \frac{S_i}{m_{гр}}\right)^2 \tag{151}$$

или

$$D_k = \frac{1}{m_{гр}^2} D[S_k]. \tag{152}$$

Следовательно,

$$D_k = k\frac{D[m_{гр}]}{m_{гр}^2} = k\vartheta_{гр}^2, \tag{153}$$

где $\vartheta_{гр}$ — коэффициент вариации величины группы.

Учитывая, что $k = e_k$, окончательно

$$D_k = \vartheta_{гр}^2 e_k. \tag{154}$$

Таким образом, с учетом формулы (154) получим

$$B_c = \frac{\bar{b}^* e_k}{2}(1 + e_k + \vartheta_{гр}^2). \tag{155}$$

Отметим, что при выводе зависимости (155) не использовано никакой информации о распределении величины группы или интервала, что важно в практических расчетах. При накоплении составов по схеме П1 среднее число промежуточных групп на состав определится из равенства

$$e_k = \frac{n_{пр} - n_{от}}{n_{от}} = \frac{m_{от}}{m_{гр}} - 1, \tag{156}$$

где $n_{пр}$ — общее количество групп вагонов, поступивших для накопления всех составов данного назначения;

$n_{от}$ — количество отправленных составов того же назначения;

$m_{от}$ — средняя величина отправляемого состава.

Средняя величина промежуточной группы

$$m_{пр} = \frac{\bar{S}_k}{e_k} = \frac{m_{от} - m_{зн}}{e_k}, \tag{157}$$

где $\bar{S}_k$ — среднее число вагонов, находящихся на пути накопления до момента поступления замыкающей группы;

$m_{зн}$ — средняя величина замыкающей группы.

Средняя величина элементо-вагоно-часов

$$\bar{b}^* = Im_{пр} = \frac{24m_{гр}}{N}\frac{m_{от} - m_{зн}}{e_k}, \tag{158}$$

где I — средняя величина интервала между поступлением групп вагонов;

N — средняя мощность рассматриваемого назначения.

С учетом полученных равенств (154—158) формулу для определения вагоно-часов накопления на состав запишем как

$$B_c = \frac{12}{N}(m_{от} - m_{зн})(m_{от} + \vartheta_{гр}^2 m_{гр}). \tag{159}$$

При накоплении составов до некоторой расчетной нормы $m_{от}^н$ среднюю величину замыкающей группы можно определить [5] из выражения

$$m_{зн} = m_{гр}(1 + \vartheta_{гр}^2). \tag{160}$$

Тогда зависимость (160) примет вид

$$B_c = \frac{12}{N}[m_{от} - m_{гр}(1 + \vartheta_{гр}^2)][m_{от} + \vartheta_{гр}^2 m_{гр}]. \tag{161}$$

С учетом формулы (161) вагоно-часы накопления всех составов данного назначения найдем из равенства

$$B_н = \frac{12[m_{от} - m_{гр}(1 + \vartheta_{гр}^2)][m_{от} + \vartheta_{гр}^2 m_{гр}]}{m_{от}}. \tag{162}$$

Используя выражение (162), определим основные показатели процесса накопления:

среднее время накопления

$$t_н = \frac{12[m_{от} - m_{гр}(1 + \vartheta_{гр})^2][m_{от} + \vartheta_{гр}^2 m_{гр}]}{Nm_{от}} \tag{163}$$

и параметр накопления

$$c = \frac{12[m_{от} - m_{гр}(1 + \vartheta_{гр}^2)][m_{от} + \vartheta_{гр}^2 m_{гр}]}{m_{от}^2}. \tag{164}$$

Таким образом, из зависимости (162) видно, что затраты вагоно-часов определяются не только величиной групп, как это принято считать, но и степенью неравномерности поступления последних.

Схемы П2 и П3. При накоплении составов до определенного момента времени величина замыкающей группы равна средней величине поступающих групп. Это следует из того, что определяет накопление составов по схеме П2 время отправления поезда, а не величина состава, как в схеме П1. Поэтому закон распределения замыкающей группы совпадает с законом распределения промежуточных групп. Так как $\{m_1, m_2, \ldots, m_{k+1}\}$ независимы и одинаково распределены, средняя величина элемента вагоно-часов равна

$$\bar{b}^* = \frac{24 m_{\text{гр}}^2}{N}. \qquad (165)$$

Среднее число промежуточных групп на состав найдем из соотношения

$$e_k = \frac{N}{n_{\text{от}}^{\text{н}} m_{\text{гр}}} - 1 = \frac{m_{\text{от}}^{\text{н}}}{m_{\text{гр}}} - 1, \qquad (166)$$

где $n_{\text{от}}^{\text{н}}$ — число ниток графика, предусмотренных для отправления поездов данного назначения;

$m_{\text{от}}^{\text{н}}$ — среднее число вагонов в составе при отправлении поездов строго по расписанию.

После подстановки значений (165), (166) в формулу (155) получим зависимость для определения вагоно-часов накопления одного состава

$$B_{\text{с}}^{\text{п2}} = \frac{12\left(m_{\text{от}}^{\text{н}} - m_{\text{гр}}\right)\left(m_{\text{от}}^{\text{н}} + m_{\text{гр}}\vartheta_{\text{гр}}^2\right)}{N} \qquad (167)$$

и всех составов данного назначения

$$B_{\text{н}}^{\text{п2}} = \frac{12\left(m_{\text{от}}^{\text{н}} - m_{\text{гр}}\right)\left(m_{\text{от}}^{\text{н}} + m_{\text{гр}}\vartheta_{\text{гр}}^2\right)}{m_{\text{от}}^{\text{н}}}. \qquad (168)$$

Полагая $m_{\text{от}}^{\text{н}} = N/h_{\text{от}}^{\text{н}}$, получим

$$B_{\text{н}}^{\text{п2}} = \frac{12\left(N - n_{\text{от}}^{\text{н}} m_{\text{гр}}\right)\left(N + n_{\text{от}}^{\text{н}} m_{\text{гр}}\vartheta_{\text{гр}}^2\right)}{N n_{\text{от}}^{\text{н}}}. \qquad (169)$$

Из выражения (169) определим основные показатели процесса накопления:

среднее время накопления

$$t_{\text{н}} = \frac{12\left(N - n_{\text{от}}^{\text{н}} m_{\text{гр}}\right)\left(N + n_{\text{от}}^{\text{н}} m_{\text{гр}}\vartheta_{\text{гр}}^2\right)}{N^2 n_{\text{от}}^{\text{н}}} \qquad (170)$$

и параметр накопления

$$c = \frac{12\left(N - n_{\text{от}}^{\text{н}} m_{\text{гр}}\right)\left(N + n_{\text{от}}^{\text{н}} m_{\text{гр}}\vartheta_{\text{гр}}^2\right)}{N^2}. \qquad (171)$$

Анализ зависимости (167) показывает, что вагоно-часы накопления состава уменьшаются с увеличением математического ожидания величин групп при любой степени неравномерности их поступления. При $\vartheta_{\text{гр}} = 0$ формула (167) приводится к виду, не отличающемуся от общеизвестных формул для определения затрат вагоно-часов накопления при равномерном поступлении групп. На практике не всегда поезда отправляют строго по расписанию. Отмена и назначение отдельных вывозных и передаточных поездов вызывается неравномерностью процесса накопления или какими-либо другими причинами, когда невозможно или нецелесообразно отправлять накопившуюся группу вагонов. В этом случае часть составов накапливается по схеме П2 (отправляются по расписанию), другая часть — по схеме П1 (отправляются по скользящему графику). Пусть известны фактическое число отправляемых поездов $n_{\text{от}}$ данного назначения и доля поездов, отправляемых по расписанию, $\alpha_{\text{р}}$, тогда

$$n_{\text{от}} = n_{\text{от}}^{\text{н}}\alpha_{\text{р}} + n_{\text{от}}^{\text{с}}. \qquad (172)$$

Откуда

$$n_{\text{от}}^{\text{с}} = n_{\text{от}} - n_{\text{от}}^{\text{н}}\alpha_{\text{р}} = n_{\text{от}}^{\text{н}}\left(\alpha_{\text{ф}} - \alpha_{\text{р}}\right), \qquad (173)$$

где $\alpha_{\text{ф}} = n_{\text{от}}/n_{\text{от}}^{\text{н}}$;

$n_{\text{от}}^{\text{с}}$ — количество поездов, отправляемых по скользящему графику.

Поскольку мощность вагонопотока неизменна, то

$$N = m_{\text{от}}^{\text{н}} n_{\text{от}}^{\text{н}}\alpha_{\text{р}} + m_{\text{от}}^{\text{с}} n_{\text{от}}^{\text{н}}\left(\alpha_{\text{ф}} - \alpha_{\text{р}}\right), \qquad (174)$$

откуда

$$m_{\text{от}}^{\text{с}} = \frac{N\left(1 - \alpha_{\text{р}}\right)}{n_{\text{от}}^{\text{н}}\left(\alpha_{\text{ф}} - \alpha_{\text{р}}\right)} = m_{\text{от}}^{\text{н}}\frac{\left(1 - \alpha_{\text{р}}\right)}{\left(\alpha_{\text{ф}} - \alpha_{\text{р}}\right)} \qquad (175)$$

и

$$\alpha_{\text{ф}} - \alpha_{\text{р}} = \frac{m_{\text{от}}^{\text{н}}}{m_{\text{от}}^{\text{с}}}\left(1 - \alpha_{\text{р}}\right), \qquad (176)$$

где $m_{\text{от}}^{\text{с}}$ — средняя величина состава поездов, отправляемых по скользящему графику.

Вагоно-часы накопления всех составов данного назначения

$$B_{\text{н}}^{\text{п3}} = B_{\text{с}}^{\text{п2}} n_{\text{от}}^{\text{н}}\alpha_{\text{р}} + B_{\text{с}}^{\text{п1}} n_{\text{от}}^{\text{н}}\left(\alpha_{\text{ф}} - \alpha_{\text{р}}\right) \qquad (177)$$

или с учетом формулы (176)

$$B_{\text{н}}^{\text{п3}} = n_{\text{от}}^{\text{н}}\left[B_{\text{с}}^{\text{п2}}\alpha_{\text{р}} + B_{\text{с}}^{\text{п1}}\left(1 - \alpha_{\text{р}}\right)\frac{m_{\text{от}}^{\text{н}}}{m_{\text{от}}^{\text{с}}}\right], \qquad (178)$$

где $B_{\text{с}}^{\text{п1}}, B_{\text{с}}^{\text{п2}}$ — соответственно вагоно-часы на накопление состава по схемам П1 и П2.

Принимая во внимание выражения (161) и (168), получим

$$B_{\text{н}}^{\text{пз}} = \frac{12\alpha_{\text{р}}\left(m_{\text{от}}^{\text{н}} - m_{\text{гр}}\right)\left(m_{\text{от}}^{\text{н}} + m_{\text{гр}}\vartheta_{\text{гр}}^2\right)}{m_{\text{от}}^{\text{н}}} +$$

$$+ \frac{12(1-\alpha_{\text{р}})\left[m_{\text{от}}^{\text{с}} - m_{\text{гр}}\left(1+\vartheta_{\text{гр}}^2\right)\right]\left[m_{\text{от}}^{\text{с}} + m_{\text{гр}}\vartheta_{\text{гр}}^2\right]}{m_{\text{от}}^{\text{с}}}, \quad (179)$$

где $m_{\text{от}}^{\text{н}} = N/n_{\text{от}}^{\text{н}}$ и $m_{\text{от}}^{\text{с}} = \frac{N(1-\alpha_{\text{р}})}{n_{\text{от}} - \alpha_{\text{р}} n_{\text{от}}^{\text{н}}}$. (180)

При $\alpha_{\text{ф}}$, близком к единице, $m_{\text{от}}^{\text{с}} \simeq m_{\text{от}}^{\text{с}}$ и зависимость (179) принимает вид

$$B_{\text{н}}^{\text{пз}} = 12m_{\text{от}}^{\text{н}}\left(1 + \frac{m_{\text{гр}}\vartheta_{\text{гр}}^2}{m_{\text{от}}^{\text{н}}}\right)\left[1 - \frac{m_{\text{гр}}}{m_{\text{от}}^{\text{н}}}(1+\vartheta_{\text{гр}}^2(1-\alpha_{\text{р}})\right]. \quad (181)$$

Если составы поездов, отправляющихся по скользящему графику, накапливаются до расчетной величины $m_{\text{от}}^{\text{н}}$, определяемой количеством ниток графика, то величину $m_{\text{от}}^{\text{с}}$ можно найти из выражения $m_{\text{от}} = m_{\text{от}}^{\text{н}} + 0{,}5m_{\text{гр}}(1+\vartheta_{\text{гр}}^2)$, а вагоно-часы накопления всех составов данного назначения

$$B_{\text{н}}^{\text{пз}} = \frac{12\alpha_{\text{р}}\left(m_{\text{от}}^{\text{н}} - m_{\text{гр}}\right)\left(m_{\text{от}}^{\text{н}} + m_{\text{гр}}\vartheta_{\text{гр}}^2\right)}{m_{\text{он}}^{\text{н}}} +$$

$$+ \frac{6(1-\alpha_{\text{р}})\left[2m_{\text{от}}^{\text{н}} - m_{\text{гр}}\left(1+\vartheta_{\text{гр}}^2\right)\right]\left[2m_{\text{от}}^{\text{н}} + m_{\text{гр}}\left(1+3\vartheta_{\text{гр}}^2\right)\right]}{2m_{\text{от}}^{\text{н}} + m_{\text{гр}}\left(1+\vartheta_{\text{гр}}^2\right)}. \quad (182)$$

Анализ зависимости (182) показывает, что при коэффициенте вариации величины группы, меньшем 0,9, для сокращения вагоно-часов накопления целесообразно отправлять поезда по графику. При более высокой степени неравномерности поступления групп ($\vartheta_{\text{гр}} > 0{,}9$) отправление составов без расписания дает незначительную экономию вагоно-часов накопления по сравнению со схемой П2. Однако в этом случае могут увеличиться вагоно-часы в ожидании отправления поездов, а также погрузочно-выгрузочных операций, так как отправление по схеме П1 повышает степень неравномерности поступления вагонов в погрузочно-выгрузочные пункты. К тому же отправление местных поездов без расписания, как правило, ухудшает использование вывозных локомотивов. Поэтому, очевидно, отправление поездов по графику во многих случаях наиболее эффективно.

Схема Ч1. При частично-прерывном процессе накопления составов элементы вагоно-часов $\{b_1^{**}, b_2^*, \ldots\}$ — независимые случайные величины, но плотность распределения первого элемента b^{**} от-

лична от остальных. Это вызвано тем, что в общем случае законы распределения остаточной $m_{\text{о}}$ и промежуточных групп не совпадают. В остальном же процесс накопления не отличается от схемы П1. Пусть так же, как и в схеме П1, накопление состава происходит до расчетной величины $m_{\text{от}}^{\text{н}}$ и γ — число промежуточных групп на состав, с учетом остаточной, приняло значение $\gamma = k$ ($k = 1, 2, \ldots, n$). Вероятность этого равна P_k. Тогда условное математическое ожидание вагоно-часов на накопление состава

$$M[B_k] = \underset{k}{m_{\text{о}}\tau_1} + \underset{k}{m_{\text{о}}\tau_2} + \ldots + m\tau_k + m_2\tau_2 + m_2\tau_3 + \ldots +$$

$$+ m_k\tau_k = m_{\text{о}}\sum_{i=1}\tau_i + m_2\sum_{i=1}\tau_i + \ldots + m_k\tau_k = m_{\text{о}}kI + m_2(k-1)I +$$

$$+ \ldots + m_kI = I[(m_{\text{пр}} + 2m_{\text{пр}} + \ldots + (k-1)m_{\text{пр}} + \gamma m_{\text{пр}}k]. \quad (183)$$

Откуда

$$M[B_k] = Im_{\text{пр}}\left[\frac{k(k-1)}{2} + \gamma k\right], \quad (184)$$

где $\gamma = m_{\text{о}}/m_{\text{пр}}$ — отношение остаточной группы к промежуточной.

Полное математическое ожидание вагоно-часов накопления на состав

$$B_{\text{с}} = Im_{\text{пр}}\sum_{k=1}^{n}\left[\frac{k(k-1)}{2} + \gamma k\right]P_k =$$

$$= \frac{Im_{\text{пр}}}{2}\left(\sum_{k=1}^{n}k^2P_k - \sum_{k=1}^{n}kP_k + 2\gamma\sum_{k=1}^{n}kP_k\right). \quad (185)$$

Следовательно,

$$B_{\text{с}} = \frac{Im_{\text{пр}}}{2}(e_k^{*2} + D_k^* - e_k^* + 2\gamma e_k^*).$$

Принимая во внимание выражение (154), получим

$$B_{\text{с}} = \frac{Im_{\text{пр}}}{2}e_k^*(e_k^* - 1 + 2\gamma + \vartheta_{\text{гр}}^2), \quad (186)$$

где e_k^* — среднее число промежуточных групп с учетом остаточной.

При неизменном интервале между поступлением групп, как и в схеме П1, остаточная группа принимает значения $0 \leqslant m_{\text{о}} \leqslant m_{\text{зн}}$. Если $m_{\text{о}} < m_{\text{пр}}$, то $e_k^* > e_k$; если $m_{\text{о}} > m_{\text{пр}}$, то $e_k^* < e_k$ и если $m_{\text{о}} = m_{\text{пр}}$, то $e_k^* = e_k$. В общем случае

$$e_k^* = e_k - \left(\frac{m_{\text{о}}}{m_{\text{пр}}} - 1\right) = e_k - (\gamma - 1), \quad \gamma > 0 \quad (187)$$

и тогда

$$B_{\text{с}} = \frac{Im_{\text{пр}}}{2}(e_k - \gamma + 1)(e_k + \gamma + \vartheta_{\text{гр}}^2), \quad (188)$$

где e_k — среднее число промежуточных групп на состав в прерывном процессе накопления.

При накоплении составов до установленной нормы и отправлении поездов строго в соответствии с ней (схема Ч1) условная плотность распределения завершающей и остаточной групп вагонов согласуется с законом распределения равномерной плотности. Тогда величина завершающей и остаточной групп определяется из выражения

$$m_{зг} = m_o = 0{,}5m_{гр}(1 + \vartheta^2_{гр}). \quad (189)$$

Средняя величина промежуточной группы определится из соотношения

$$m_{пр} = \frac{m^н_{от} - (m_o + m_{зг})}{e^*_k - 1}. \quad (190)$$

Так как $\gamma = m_o/m_{гр}$, то

$$\gamma = \frac{m_o(e^*_k - 1)}{m^н_{от} - (m_o + m_{зг})}. \quad (191)$$

Из формулы (187) следует, что $e^*_k - 1 = e_k - \gamma$, тогда

$$\gamma = \frac{m_o(e_k - \gamma)}{m^н_{от} - m_o - m_{зг}};$$

откуда

$$\gamma = e_k \frac{m_o}{m^н_{от} - m_{зг}}. \quad (192)$$

С учетом формулы (189)

$$e_k = \frac{m^н_{от}}{m_{гр}} - 0{,}5(1 - \vartheta^2_{гр}). \quad (193)$$

Принимая во внимание значение $m^н_{от}$ и формулу (193), получим

$$\gamma = (1 + \vartheta^2_{гр})/2\varphi, \quad (194)$$

где

$$\varphi = \frac{2m^н_{от} - m_{гр}(1 + \vartheta^2_{гр})}{2m^н_{от} - m_{гр}(1 - \vartheta^2_{гр})}. \quad (195)$$

Величину промежуточной группы определим из выражения

$$m_{пр} = m_{гр}\varphi. \quad (196)$$

Последнее равенство справедливо и для схем П1 и Ч2, так как при накоплении составов до установленной нормы закон распределения замыкающей группы не зависит от характера процесса накопления. После подстановки выражения (193) в формулу (194) при $I = 24m_{гр}/N$ получим

$$B_c = \frac{12\varphi}{N}\left[m_{гр} + \frac{m^н_{от} - m_{гр}(1 + \vartheta^2_{гр})}{\varphi}\right]\left[m_{гр}\vartheta^2_{гр} + \frac{m^н_{от}}{\varphi}\right]. \quad (197)$$

Затраты вагоно-часов накопления на состав при $\vartheta_{гр} > 0$ возрастают с увеличением математического ожидания прибывающей группы до максимального значения, а затем уменьшаются. При равномерном же поступлении групп ($\vartheta_{гр} = 0$) вагоно-часы накопления не зависят от их величин и постоянны. Отметим, что накопление составов по схеме Ч1 — по существу непрерывный процесс, который почти не встречается на практике. По затратам же вагоно-часов на накопление эта схема предельная.

Схема Ч2. По затратам вагоно-часов она занимает промежуточное положение между схемами Ч1 и П1 и наиболее распространена при накоплении сквозных и участковых поездов. Отправление поездов либо полновесными, либо полносоставными, а также тяжеловесных и длинносоставных позволяет оперативно воздействовать на процесс накопления для сокращения затрат вагоно-часов. Вследствие того что замыкающая группа в среднем больше группы, необходимой для завершения накопления состава, удовлетворяющего какому-либо из условий, работники станции в каждом конкретном случае решают вопрос о том, сколько вагонов из нее можно включить в данный состав. Поэтому, как показывает анализ фактических данных, среднее число вагонов в отправляемых поездах, как правило, превышает минимальную расчетную величину состава. Пусть средний состав отправляемого поезда $m_{от}$ больше расчетной нормы $m^н_{от}$ на величину Δ. Тогда

$$\Delta = m_{от} - m^н_{от} = m_o - m^*_o, \quad (198)$$

где m^*_o — средняя величина остаточной группы при накоплении составов по схеме Ч2;

m_o — то же по схеме Ч1.

Из формулы (198) следует, что

$$m^*_o = m_o - (m_{от} - m^*_{от}) = m_o - m^н_{от}(\beta - 1), \quad (199)$$

где $\beta = \frac{m_{от}}{m^н_{от}}$ — отношение средней величины отправляемого состава к расчетной.

Соответственно величина группы, завершающей процесс накопления, увеличивается на Δ и равна

$$m^*_{зг} = m_{зг} + \Delta = m_{зг} + m^н_{от}(\beta - 1). \quad (200)$$

Максимальное значение β в прерывном процессе накопления с учетом $m_{от}$

$$\beta_{max} = 1 + \frac{m_{гр}(1 + \vartheta^2_{гр})}{2m^н_{от}}. \quad (201)$$

Следовательно, при накоплении составов по схеме Ч2 значение β заключено в пределах $1 < \beta < \beta_{max}$ ($\beta = 1$ и $\beta = \beta_{max}$ соответствуют схемам Ч1 и П1). Таким образом, β в общем случае характеризует прерывность процесса накопления. Чем больше β, тем больше вероятность перерывов в накоплении.

Принимая во внимание формулы (199) и (197), имеем

$$\gamma = \frac{m_0 - m_{от}^{н}(\beta - 1)}{m_{гр}\varphi}$$

или с учетом формулы (196)

$$\gamma = \frac{1+\vartheta_{гр}^2}{2\varphi}\left[1 - \frac{2m_{от}^{н}(\beta-1)}{m_{гр}(1+\vartheta_{гр}^2)}\right]. \qquad (202)$$

Заметив, что

$$\frac{2m_{от}^{н}}{m_{гр}(1+\vartheta_{гр}^2)} = \frac{1}{\beta_{max}-1},$$

получим

$$\gamma = \frac{1+\vartheta_{гр}^2}{2\varphi}\,\frac{\beta_{max}-\beta}{\beta_{max}-1}, \quad \gamma > 0. \qquad (203)$$

После подстановки формулы (193) в выражение (188) найдем вагоно-часы накопления на состав

$$B_c = \frac{12\varphi}{N}\left[m_{гр} + \frac{m_{от}^{н}\beta - m_{гр}(1+\vartheta_{гр}^2)}{\varphi}\right]\times\left[m_{гр}\vartheta_{гр}^2 + \frac{m_{от}^{н}(2-\beta)}{\varphi}\right]. \qquad (204)$$

Вагоно-часы накопления всех составов данного назначения получим из зависимости

$$B_{н} = \frac{12\varphi}{\beta m_{от}^{н}}\left[m_{гр} + \frac{\beta m_{от}^{н} - m_{гр}(1+\vartheta_{гр}^2)}{\varphi}\right]\times\left[m_{гр}\vartheta_{гр}^2 + \frac{m_{от}^{н}(2-\beta)}{\varphi}\right]. \qquad (205)$$

Используя формулу (205), найдем параметр накопления

$$c = \frac{12\varphi}{(\beta m_{от}^{н})^2}\left[m_{гр} + \frac{\beta m_{от}^{н} - m_{гр}(1+\vartheta_{гр}^2)}{\varphi}\right]\times$$

$$\times\left[m_{гр}\vartheta_{гр}^2 + \frac{m_{от}^{н}(2-\beta)}{\varphi}\right]. \qquad (206)$$

Зависимость (204) сложна и затруднительна для анализа при любой степени неравномерности поступления групп. Однако при значениях β, определяемых по формуле (201) при $0{,}75 \leqslant \vartheta_{гр} \leqslant 1$, приближенно

$$\gamma = \frac{1}{2}(1 + \vartheta_{гр}^2). \qquad (207)$$

Принимая это во внимание, получим следующую зависимость для определения затрат вагоно-часов на накопление одного состава:

$$B_c = \frac{12m_{от}^{н}}{N}(m_{от}^{н} + 2m_{гр}\vartheta_{гр}^2)\,\frac{2m_{от}^{н} - m_{гр}(1+\vartheta_{гр}^2)}{2m_{от}^{н} - m_{гр}(1-\vartheta_{гр}^2)} \qquad (208)$$

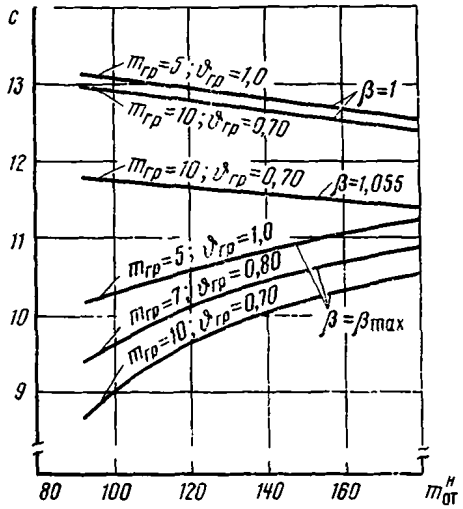

Рис. 39. Зависимость параметра накопления от величины отправляемого состава

и всех составов данного назначения

$$B_{н} = \frac{12}{\beta}\left(m_{от}^{н} + 2m_{гр}\vartheta_{гр}^2\right)\frac{2m_{от}^{н} - m_{гр}(1+\vartheta_{гр}^2)}{2m_{от}^{н} - m_{гр}(1-\vartheta_{гр}^2)}. \qquad (209)$$

Сравнивая формулы (162) и (208), замечаем, что при $\vartheta_{гр} = 1$ выражения тождественны. Это дает основание полагать, что при $\vartheta_{гр} \to 1$ затраты вагоно-часов на накопление состава в прерывном и частично-прерывном процессах близки друг другу. При сравнении схем П1 и Ч2 получено, что вагоно-часы накопления на состав в прерывном процессе несколько меньше, чем в частично-прерывном. Расчетами установлено, что эта разница при $2 \leqslant m_{пр} \leqslant 10$ и $40 \leqslant m_{от}^{н} \leqslant 60$, $0{,}5 \leqslant \vartheta_{гр} \leqslant 1$ и $1 \leqslant \beta \leqslant 1{,}1$ не превышает 1,2%. Следовательно, вагоно-часы накопления на состав в прерывном и частично-прерывном процессах примерно равны. Исходя из типизации расчетных зависимостей параметр накопления сквозных и участковых поездов с достаточной степенью точности можно определить из выражения

$$c = \frac{3\left[2m_{от}^{н} - m_{гр}(1+\vartheta_{гр}^2)\right]\left[2m_{от}^{н} + m_{гр}(1+3\vartheta_{гр}^2)\right]}{m_{от}^{2}}. \qquad (210)$$

Как видно из рис. 39, параметр накопления с увеличением $m_{от}^{н}$ уменьшается при частично-прерывном и увеличивается при прерывном процессе накопления. С увеличением коэффициента вариации величины группы, напротив, параметр накопления увеличивается при частично-прерывном и незначительно уменьшается при прерывном процессе накопления.

5. ПЕРЕХОДНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

Технологические операции на сортировочных станциях выполняются при условии взаимодействия станционных процессов между собой и с графиком движения поездов на прилегающих участках. Оперативная обстановка на станции характеризу-

ется периодическими изменениями установившихся соотношений мощности входящего вагонопотока и интенсивности выполнения технологических операций на различных этапах. Нарушение сбалансированного соответствия между поступлением и обработкой вагонов и составов вызывает переход подсистем сортировочной станции из одних состояний в другие в процессе восстановления устойчивого взаимодействия.

Условия взаимодействия станционных процессов между собой и с графиком движения поездов на участках разработаны в период, когда основные сортировочные станции сети перерабатывали относительно небольшие размеры вагонопотоков, и предусматривают соотношения технологических параметров и мощности устройств, которые должны обеспечивать обработку вагонов и составов с минимальными межоперационными простоями. Однако только с помощью этих условий без дополнительного аппарата нельзя описать явления перехода оперативной обстановки на станции из одних состояний в другие. Высокая загрузка станционных устройств, характерная для большинства сортировочных станций сети, в сочетании с неравномерностью вагонопотоков, а значит и выполнением с ними отдельных технологических операций увеличивает влияние обратных связей между элементами станции. При нарушении условий взаимодействия устанавливаются переходные режимы работы. Чтобы учесть прямые и обратные связи при выборе способов освоения поступающего в переработку вагонопотока, необходимо аналитически с помощью математических моделей описать переходные процессы, выяснить условия наиболее рационального перехода к состоянию благоприятного устойчивого равновесия.

В данной работе предпринята попытка развить один из наиболее существенных вопросов теории взаимодействия — математическое описание закономерностей функционирования переходных процессов на сортировочной станции и прогнозирование изменений основных технических и технологических параметров, при которых будет осуществлен переход к благоприятному режиму, характеризующемуся минимальными эксплуатационными расходами на освоение вагонопотока. Переходы из одних состояний в другие и обратно в процессе работы подсистем расформирования (фаза погашения поездопотока) и формирования — отправления (фаза зарождения поездопотока) зависят от соотношений интенсивности потока, поступающего на вход каждой системы, и его обслуживания. Каждое состояние характеризуется определенной вероятностью. Зная состояние системы в начальный момент, можно определить вероятностные характеристики ее в последующие периоды времени, описать процессы перехода в промежуточные и конечные состояния входящего потока и его обслуживания.

Как известно, подсистема расформирования — двухфазная система массового обслуживания. Источник требований, поступающих в первую фазу, — прилегающие к станции участки; обслуживающие аппараты — комплексные бригады, готовящие прибывшие поезда к расформированию. В связи с тем, что на загруженных сортировочных станциях введен многогрупповой осмотр составов, первая фаза подсистемы расформирования — многолинейная. Вторая фаза в зависимости от числа параллельно работающих путей роспуска одно- или двухлинейная. Поток требований в обеих фазах накапливается на путях парка приема. При заполнении их (занятии всего парка) возможна задержка поездов на подходе к станции и на других участках. Очередь перед первой фазой неограничена, перед второй ее лимитирует наличное число путей в парке приема.

Для решения нашей задачи подсистему расформирования можно рассматривать как разомкнутую систему массового обслуживания с одним прибором (горкой), учитывая все преобразования потока поездов (составов) в процессе обслуживания в первой и второй фазах (объединение потоков, поступающих с примыкающих участков, разделение объединенного потока на ряд потоков, поступающих на обслуживающие аппараты первой фазы, и трансформация в результате подготовки поездов к расформированию, объединение потоков, выходящих из первой фазы, и трансформация их в процессе роспуска составов с горки). Параллельная работа двух путей роспуска (параллельный роспуск) требует отдельного рассмотрения.

Подсистема формирования — отправления представляет собой комплекс параллельно действующих однолинейных систем массового обслуживания (источники требований и накопители — маневровые районы сортировочного парка, пути; обслуживающий аппарат — локомотив вытяжного пути, возможность взаимопомощи других маневровых районов) и двухфазной системы, в первой фазе которой, как правило многолинейной, обслуживающие аппараты — комплексные бригады, готовящие поезда к отправлению; во второй, однолинейной (отправление поездов), накопитель — пути парка отправления, а при их заполнении — сортировочные пути. В этой подсистеме происходят следующие преобразования потока: разрежение (распыление) по назначениям плана формирования и моментам поступления групп вагонов на каждое из них, формирование потоков отдельных назначений, объединение индивидуальных потоков в групповые, транформация в подсистеме формирования, объединение выходящих из нее потоков после трансформации и на входе в подсистему отправления с потоком транзитных поездов, распределение (разделение) по обслуживающим аппаратам подсистемы отправления, трансформация и объединение, трансформация во второй фазе подсистемы отправления, а перед этим (если примыкающих направлений несколько) — разрежение.

Переработка поездопотоков и на фазе погашения, и на фазе зарождения определяется как внутристанционными процессами, так и работой направления, на котором находится станция. Вероятное состояние той или иной ее подсистемы в данный момент времени определяется непосредственно предшествовавшим ему состоянием

и соотношением интенсивности входящего потока и его обслуживания. Отсюда следует, что совокупности состояний представляют собой цепи Маркова. Вектор их состояний удовлетворяет уравнениям:

$$P'_n(i+1) = \sum_n P_n(i)\, P_{nn'};\ n' = 0, 1, 2, 3, 4 \ldots$$

или в матричной форме:

$$P\ (i+1) = P\ (i)\Gamma;$$
$$P\ (i) = P\ (i-1)\Gamma = P\ (0)\Gamma^i,$$

где Γ — стохастическая матрица, называемая матрицей перехода, образована из элементов $P_{nn'}$, удовлетворяющих условиям:

$0 \leqslant P_{nn'} \leqslant 1$ для всех n и n'

и $\sum\limits_{n'} P_{nn'} = 1$ для всех n.

Наличие в матрице элемента, не равного нулю, указывает на то, что переход из одного состояния в другое возможен. Множество возможных переходов целесообразно представить графом-схемой, в котором вершины соответствуют состояниям системы, а ориентированные дуги — переходам. С помощью графа можно, приняв за E_n состояние подсистемы при одном сочетании технических и технологических параметров, описать процессы перехода в состояние с другим их сочетанием. Рассмотрим процессы перехода на примере работы подсистемы сортировочной станции с различными возможными сочетаниями интенсивности входящего потока и его обслуживания. Стохастическая матрица (матрица вероятностей перехода) для какой-либо системы массового обслуживания имеет вид

$$\Gamma = \begin{pmatrix} P_{11}, & P_{12}, & P_{13}, & \ldots, & P_{1n} \\ P_{21}, & P_{22}, & P_{23}, & \ldots, & P_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{n1}, & P_{n2}, & P_{n3}, & \ldots, & P_{nn} \end{pmatrix}.$$

Элементы ее P_{ij} — вероятности нахождения системы в каком-либо состоянии в зависимости от соотношения интенсивности обслуживания потока требований и его плотности, а также от предыдущего состояния системы. Сумма вероятностей состояний в каждый момент времени равна 1. Составим графы перехода подсистем сортировочной станции из состояний в состояния.

Подсистема расформирования (рис. 40 и 41). Принимая в качестве ограничивающего элемента сортировочную горку (число групп технических осмотрщиков в парке прибытия ни в коем случае не должно лимитировать роспуск), установим, что подсистема находится в состоянии устойчивого взаимодействия процессов приема поездов, обработки составов на путях парка прибытия и роспуска

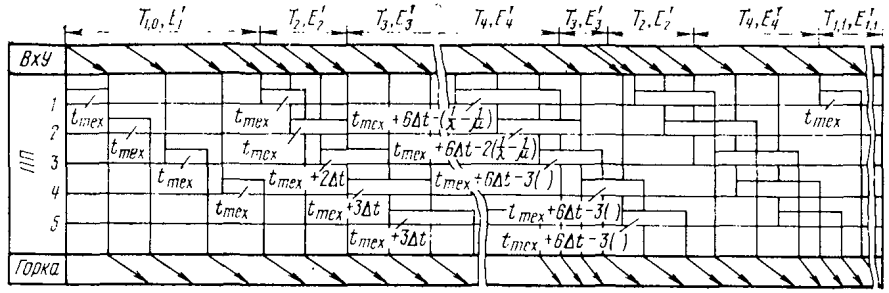

Рис. 40. Графическое изображение работы подсистемы расформирования

с горки $E'_{1,0}$, и даже сможет в течение некоторого времени помогать другим подсистемам, если интенсивность поступающего на станцию потока поездов λ'_1 не превышает интенсивности обслуживания составов на горке μ' (технологические нормы времени нахождения составов на путях парка прибытия выполняются). Это взаимодействие нарушается, когда интенсивность входящего потока повышается до значения, превышающего интенсивность обслуживания, $\lambda'_2 > \mu'$.

Подсистема переходит из состояния $E'_{1,0}$ в состояние E'_2, причем не в течение какого-либо более или менее длительного промежутка времени, а мгновенно. При уменьшении плотности входящего потока до величины $\lambda'_3 = \lambda'_1$ подсистема перейдет из состояния E'_2 в состояние E'_3, при котором увеличенные против технологической нормы простои составов в парке прибытия (при работе в состоянии E'_2) останутся на одном уровне.

Регулировочные мероприятия, когда повышается интенсивность обслуживания потока на горке (форсирование процесса роспуска) до значения μ'_1, большего μ', или уменьшается плотность входящего потока поездов до величины λ'_4, меньшей λ'_1, переводят подсистему из состояния E'_3 в состояние E'_4. При этом простои составов на путях постепенно уменьшаются до технологической нормы, взаимодействие процессов полностью восстанавливается и подсистема возвращается в состояние устойчивого ритмичного взаимодействия $E'_{1,1}$. Возможны и обратные переходы подсистемы расформирования из состояния E'_3 в состояние E'_2 и из состояния E'_4 в состояние E'_3.

Непосредственно из состояний E'_2 и E'_4 соответственно в состояния $E'_{1,0}$, $E'_{1,4}$ и E'_2 подсистема перейти не может: сначала она должна функционировать в течение некоторого времени в состоянии E'_4 (E'_3 и E'_4) или $E'_{1,1}$.

Графическая модель работы подсистемы расформирования позволяет определить соотношения параметров ее состояний. Так, если в состоянии $E'_{1,0}$ система находится в течение периода $T_{1,0}$, который можно найти по данным прогноза движения поездов на прилегающих к станции участках (или плана ввода поездов на станцию),

то к станции будет подведено $x \leqslant \mu' T_{1,0}$ поездов. В период сгущенного подвода поездов, величину которого также можно определить на основе информации о подходе их, подсистема работает в состоянии E_2', к станции прибывает $x \geqslant \mu' T_2 + 1$ поездов. Если при этом не будут приняты регулировочные меры, то в парке прибытия дополнительный простой каждого вновь поступившего поезда увеличится на величину $\frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}$ и стабилизируется на максимальном значении, при котором начнутся задержки поездов у входного сигнала и на подходах. Из теории взаимодействия станционных процессов следует, что при принятой технологии обработки составов в парке прибытия и расформирования на горке задержки поездов на подходе начнутся, если к станции будет подведена пачка поездов

$$x > \frac{\frac{1}{\mu'}(П+1) - T_{зп} - \frac{1}{\lambda_2'}}{\left(\frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}\right)},$$

где $П$ — число путей в парке прибытия;

$T_{зп}$ — время занятия пути приемом, обработкой и роспуском поезда.

В парке прибытия должно быть не меньше чем $T_{зп}\mu'$ путей для приема поездов при устойчивом взаимодействии процессов в состоянии $E_{1,0}'$ и дополнительно $(N_2 - 1)\left(\frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}\right)\mu'$ путей для сгущенной пачки. После преобразования неравенства получим

$$x > \frac{\lambda_2'(П+1) - T_{зп}\mu'\lambda_2' - \mu'}{\lambda_2' - \mu'}.$$

Зная параметры $T_{зп}$ и μ', можно по наличной величине $П$ для разных значений $\lambda_2' > \lambda_1'$ определить максимальное число поездов в парке и по плану подвода поездов — величину периода T_2. Находясь в состоянии E_3', подсистема расформирования примет в течение периода T_3 поступления потока с плотностью $\lambda_3' = \mu' x = \mu' T_3$ поездов. Новое сгущение потока поездов (увеличение плотности) вызовет переход в состояние E_2', разрежение же потока $\lambda_4' < \lambda_1'$ (работа в состоянии E_4') — в состояние $E_{1,1}'$. Для перехода из состояния E_4' в состояние устойчивого взаимодействия $E_{1,1}'$ необходимо либо интенсифицировать работу горки, либо принимать разреженный поток поездов в течение периода T_{4min}. При меньшем

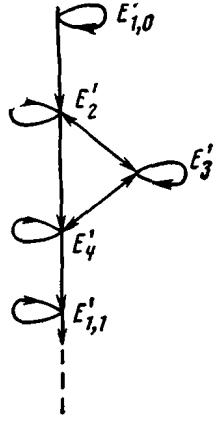

Рис. 41. Граф перехода подсистемы расформирования из одного состояния в другое

значении этого периода подсистема перейдет обратно в состояние E_3', а из него и в E_2', если последнее предшествовало E_4'. Значение периода находят из условия, что при работе подсистемы в состоянии E_4' дополнительный простой составов в парке прибытия, равный $(N_2 - 1)\left(\frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}\right)$, будет уменьшен до минимальной величины $\frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}$, но не сократится полностью. При форсировании работы горки простой каждого поезда сокращается на величину $\frac{1}{\lambda_2'} - \frac{1}{\mu_1'}$, а за весь период T_4 на $\Delta t = (N_4^{расф} - 1)\left(\frac{1}{\lambda_2'} - \frac{1}{\mu'}\right)4$, т. е.

$$(N_2 - 1)\left(\frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}\right) - (N_4^{расф} - 1)\left(\frac{1}{\lambda_2'} - \frac{1}{\mu_1'}\right) = \frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}.$$

Поскольку $N_2 = \lambda_1' T_2$ и $N_4^{расф} = \mu_1' T_4$ поездов, то

$$(\lambda_2' T_2 - 1)\left(\frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}\right) - (\mu_1' T_4 - 1)\left(\frac{1}{\lambda_2'} - \frac{1}{\mu_1'}\right) = \frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'},$$

откуда

$$T_4 = \frac{T_2\left(\frac{\lambda_2'}{\mu_1} - 1\right) - \frac{2}{\mu'} + \frac{3}{\lambda_2'} - \frac{1}{\mu_1'}}{\frac{\mu_1'}{\lambda_1'} - 1}.$$

Тогда

$$x_{(E_4' \to E_3')} \leqslant \mu_1' \frac{T_2\left(\frac{\lambda_2'}{\mu_1} - 1\right) - \frac{2}{\mu'} + \frac{3}{\lambda_2'} - \frac{1}{\mu_1'}}{\frac{\mu'}{\lambda_2'} - 1} - 1.$$

При разреженном прибытии поездов и ритмичной работе горки простой каждого состава в парке прибытия будет сокращаться на величину $\frac{1}{\lambda_4'} - \frac{1}{\mu'}$, а за весь период на $(N_4^{расф} - 1)\left(\frac{1}{\lambda_4'} - \frac{1}{\mu'}\right)4$. Тогда, как и в предыдущем случае,

$$(N_2 - 1)\left(\frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}\right) - (N_4^{расф} - 1)\left(\frac{1}{\lambda_4'} - \frac{1}{\mu'}\right) = \frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}.$$

Так как $N_2 = \lambda_2 T_2$ и $N_4^{расф} = \mu' T_4$, то

$$(\lambda_1' T_2 - 1)\left(\frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'}\right) - (\mu' T_4 - 1)\left(\frac{1}{\lambda_4'} - \frac{1}{\mu'}\right) = \frac{1}{\mu'} - \frac{1}{\lambda_2'},$$

или

$$T_2\left(\frac{\lambda_2'}{\mu'} - 1\right) = T_4\left(\frac{\mu'}{\lambda_4'} - 1\right) + \frac{3}{\mu'} - \frac{2}{\lambda_2'} - \frac{1}{\lambda_4'}.$$

Откуда $$T_4 = \frac{T_2\left(\frac{\lambda_2'}{\mu'} - 1\right) - \frac{3}{\mu'} + \frac{2}{\lambda_2'} + \frac{1}{\lambda_3'}}{\frac{\lambda_2'}{\mu'} - 1}.$$

Матрица переходов в данном случае будет состоять из пяти строк и пяти столбцов (по числу состояний). По совокупности вероятностей состояний в предыдущий момент можно определить вероятность ввода подсистемы сортировочной станции в любое интересующее нас состояние.

Подсистема формирования—отправления. Рассмотрим закономерности переходных процессов в подсистеме при различных соотношениях интенсивностей поступления поездов в парк отправления λ_i'' и отправления их на прилегающие участки μ_i''. Входящий поток — составы, накопленные в сортировочном парке, формируемые и переставляемые в парк отправления, а также отправляемые со станции поезда (с учетом транзитных). При всем многообразии процессов, проходящих в подсистеме, решающее влияние на них оказывает соотношение величин λ_i'' и μ_i''. Именно оно определяет необходимый темп работы вытяжных путей формирования, загрузку путей отправления и технической конторы, необходимость в интенсификации процесса отправления поездов и др. Очевидно, в данном случае ограничивающий элемент подсистемы — пропускная способность выходного участка. От ее величины зависят ритмичность перестановки составов в парк отправления (при своевременной обработке составов) и все другие процессы в сортировочной системе.

Из графика (рис. 42) видно, что подсистема формирования—отправления находится в состоянии $E''_{1,0}$ устойчивого взаимодействия процессов окончания формирования составов, перестановки их в парк отправления, обработки в нем и отправления на прилегающие участки, если интенсивность поступления их в парк отправления (на станциях, где нет специализированных приемо-отправочных парков вместе с транзитными поездами) λ_1'' меньше или равна интенсивности отправления со станции μ''. Технологические нормы

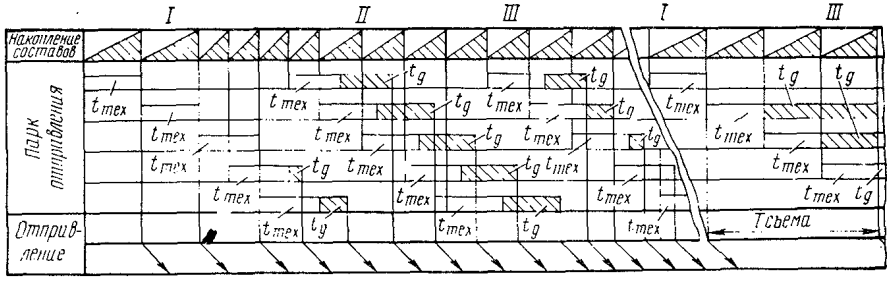

Рис. 42. Графическое изображение работы подсистемы формирования — отправления

времени нахождения поездов на путях парка отправления выполняются, но возможны незначительные простои в ожидании нитки графика.

Если интенсивность поступления поездов в парк отправления λ_2'' начинает превышать интенсивность их отправления или, что бывает на практике чаще, при той же интенсивности поступления темп отправления составов снижается из-за пропуска пассажирских и транзитных поездов, а также из-за ряда других причин ($\lambda_2'' > \mu_2''$), то подсистема переходит в состояние E_2'', характеризующееся ростом простоев готовых составов на путях отправления, а затем и в сортировочном парке в ожидании перестановки в парк отправления (что может привести к блокировке сортировочного парка и всей станции в целом). При восстановлении соответствия между интенсивностью потока сформированных составов λ_3'' и интенсивностью отправления поездов μ_3'' рост дополнительных простоев в парке отправления прекращается и подсистема переходит в состояние E_3'', с равенством интенсивностей входящего потока составов и его обслуживания (в данном случае отправления поездов) при одном и том же уровне дополнительных простоев, возникших при работе в состоянии E_2''. Сокращение интервала между отправляемыми поездами или уменьшение интенсивности окончания формирования приводят к ликвидации дополнительных простоев в парке отправления и восстановлению технологического взаимодействия процессов. При этом $\lambda_4'' < \mu_4''$ ($\mu_4'' \geqslant \mu_3''$). Подсистема находится в состоянии E_4'' до тех пор, пока не будут устранены дополнительные простои и не установится устойчивое равновесное состояние $E''_{1,1}$, аналогичное состоянию $E''_{1,0}$.

Наряду с этим возможен переход подсистемы из состояния $E''_{1,0}$ сразу в состояние E_3'' (например, при перерыве в отправлении грузовых поездов из-за пропуска пачки пассажирских), из состояния E_2'' в E_4'' или в $E''_{1,1}$, если одновременно с повышением темпа формирования составов принимают меры к ускорению их обработки и отправления, а также из состояния E_3'' в E_2''. Обратные переходы из состояний E_2'' и E_3'' сразу в состояние $E''_{1,1}$ невозможны. При недостаточном времени работы T_4 для полной ликвидации дополнительных простоев подсистема может перейти обратно в состояние E_2'' или E_3'' из состояния E_4'' (рис. 43).

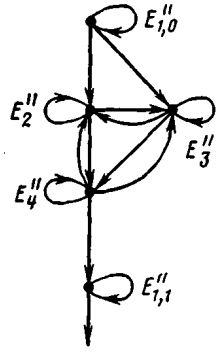

Рис. 43. Граф перехода подсистемы формирования-отправления из одного состояния в другое

Так же как и в подсистеме расформирования, на основе графической модели работы в подсистеме формирования—отправления определяются соотношения между параметрами, детерминирующими ее состояния. Интенсивность отправления поездов μ'' находят по графику движения поездов с учетом регулировочных мероприятий,

проводимых для сокращения интервалов между ними. Следовательно, ее величина в каждый, отдельно взятый момент времени, как правило, известна. Это позволяет установить, как будет обеспечен вывоз поездов со станции при изменении обстановки в сортировочном парке (ускорении накопления и перестановки составов в парк отправления), и заблаговременно предусмотреть интенсификацию процесса отправления. Состояния подсистемы и их продолжительность определяют анализом поступления на станцию (а точнее — роспуска с горки) замыкающих групп вагонов, учитывая предполагаемое время окончания накопления и перестановки составов, обработки на путях отправления и расписания отправления поездов. При работе подсистемы формирования—отправления в состоянии $E''_{1,0}$ в течение периода $T_{1,0}$ в парк отправления будет переставлено $x \leqslant \mu'' T_{1,0}$ составов. При сгущении накопления составов и интенсификации этого процесса в парк отправления потребуется переставлять $x \geqslant \mu'' T_2 + 1$ составов, при этом простой каждого из них, начиная со второго, переставляемого с сокращенным интервалом по сравнению с предыдущим, увеличивается на $\frac{1}{\mu''} - \frac{1}{\lambda''_2}$. Это происходит до тех пор, пока не будут заняты все пути парка отправления, и составы начнут простаивать на сортировочных путях. Очевидно, что задержка в перестановке составов в парк отправления из-за отсутствия свободных путей возникнет, если число составов, подготовляемых к этой операции с интервалом I_0, меньшим интервала отправления $I_{от}$, превысит величину

$$x = \frac{\frac{1}{\mu''}(П_0 + 1) - T_{зпо} - \frac{1}{\lambda''_2}}{\frac{1}{\mu''} - \frac{1}{\lambda''_2}},$$

где $П_0$ — число путей в парке отправления;
$T_{зпо}$ — время занятия пути.

После преобразований получим

$$x = \frac{\lambda''_2 (П_0 + 1) - T_{зпо} \lambda''_2 \mu'' - \mu''}{\lambda''_2 - \mu''}.$$

По величине $П_0$ для разных значений $\lambda''_2 > \lambda''_1$ находят максимальное число поездов, которое можно переставить в парк отправления с минимальными интервалами. Период T_2 определяют следующим образом: по плану работы станции или телеграммам-натурным листам и данным о подходе поездов устанавливают время прибытия замыкающих групп вагонов и планируют маневровую работу — окончание накопления составов; определяют, сколько поездов можно будет сформировать и переставить в парк отправления при сгущенном накоплении. Период сгущенного завершения накопления (окончания формирования) составов $T_2 = (N_{сп} - 1)\frac{1}{\mu'_{2з}}$,

где $\mu'_{2з}$ — средняя интенсивность роспуска замыкающих групп вагонов с горки. В течение этого времени подсистема работает в состоянии E''_2. Необходимо учитывать и расписание отправления поездов со станции. Если сгустить отправление можно, то период T_2 будет ограничен временем отправления первого из пачки поездов.

При работе в состоянии E''_3 с интенсивностью входящего потока λ''_3, равной интенсивности его отправления μ''_3, в парк отправления переставляется и из него отправляется $x = \mu'' T_3$ поездов. Сгущение входящего потока составов приводит к переходу в состояние E''_2, разрежение же его или сокращение интервала отправления — к переходу в состояние E''_4. Работа подсистемы в течение периода T_4 более, чем $T_{4\,min}$, обеспечивает ввод ее в равновесное устойчивое состояние $E''_{1,1}$. Как и для подсистемы расформирования, величина $T_{4\,min}$ определяется следующими соображениями. При работе в состоянии E''_4 дополнительный простой составов, равный $(N_{in} - 1)\left(\frac{1}{\mu''} - \frac{1}{\lambda''_2}\right)$, сокращается до минимальной величины $\frac{1}{\mu''} - \frac{1}{\lambda''_2}$ за счет ускорения отправления поездов на величину $(N^{отпр}_{iг} - 1)\left(\frac{1}{\lambda''_2} - \frac{1}{\mu''_1}\right)$

$$(N_{сп} - 1)\left(\frac{1}{\mu''} - \frac{1}{\lambda''_2}\right) - (N^{отпр}_{ог} - 1)\left(\frac{1}{\lambda''_2} - \frac{1}{\mu''_1}\right) = \frac{1}{\mu''} - \frac{1}{\lambda''_2}.$$

$$N_{ог} = \lambda''_2 T_2;\ N^{отпр}_{ог} = \mu_1 T_4.$$

Отсюда $$T_{4\,min} = \frac{T_2\left(\frac{\lambda''_2}{\mu''} - 1\right) - \frac{2}{\mu''} + \frac{3}{\lambda''_2} - \frac{1}{\mu''_1}}{\frac{\mu''_1}{\lambda''_2} - 1}.$$

При снижении темпа окончания накопления по сравнению со средним (технологическим) простой составов на путях прибытия за весь период T_4 уменьшается на $(N_{отпр} - 1)\left(\frac{1}{\lambda''_4} - \frac{1}{\mu''}\right)$.

Следовательно,

$$(N_{сп} - 1)\left(\frac{1}{\mu''} - \frac{1}{\lambda''_2}\right) - (N_{отпр} - 1)\left(\frac{1}{\lambda''_4} - \frac{1}{\mu''}\right) = \frac{1}{\mu''} - \frac{1}{\lambda''_2};$$

$$N_{сп} = \lambda''_2 T_2;\ N_{отпр} = \mu'' T_4;$$

$$T_{4\,min} = \frac{T_2\left(\frac{\lambda''_2}{\mu''} - 1\right) - \frac{3}{\mu''} + \frac{2}{\lambda''_2} + \frac{1}{\lambda''_4}}{\frac{\mu''}{\lambda_4} - 1}.$$

На переходный режим существенно влияют случайные факторы. Вместе с тем, на него накладывается и регулирующая деятельность диспетчерского аппарата (станционного и маневрового диспетчера и др.), направленная на оптимизацию условий переработки вагонов. И эта деятельность, основанная на заблаговременной информации о прибытии поездов и планировании составообразования со своевременной интенсификацией станционных процессов, может уменьшить число и продолжительность переходных режимов.

6. ОБЩЕЕ ВРЕМЯ НАХОЖДЕНИЯ ВАГОНОВ НА СТАНЦИИ

Одна из важнейших проблем в системе организации вагонопотоков — научное нормирование времени нахождения вагона на станции, так как этот показатель в значительной степени характеризует качество производственного процесса, протекающего на станции. Правильный выбор этого показателя позволяет сократить чрезмерный простой вагонов на сортировочных станциях и высвободить их для перевозки народнохозяйственных грузов, а также избежать чрезмерного его занижения, допускаемого при волевом решении.

Нормирование продолжительности нахождения вагона на станции — задача оптимального управления вагонопотоками на станции, т. е. частная задача системы организации вагонопотоков на сети дорог. Наилучшее решение ее то, которое позволило бы рассматривать станцию как единую неразрывную систему, а не простую композицию ее отдельных звеньев. Но при такой постановке вопроса приходится, к сожалению, констатировать, что получить результаты в окончательной форме даже для весьма простых по структуре систем технологически трудно. Что касается сортировочной станции со сложнейшими связями между элементами как внутри ее, так и с прилегающими участками, представляющей собой многофазную, многоканальную смешанную систему массового обслуживания с приоритетом, то вряд ли можно получить сколько-нибудь приемлемые аналитические результаты, не прибегая к известному упрощению и составлению математической модели, поддающейся аналитическому решению. Поэтому, определяя время нахождения вагона на станции, последнюю представляют в виде трех подсистем: парк приема, сортировочный парк, парк отправления. Общее же время нахождения вагонов на станции также делится на элементы:

под технологическими и технологическо-организационными операциями;

накопление;

в ожидании выполнения технологических и технологическо-организационных операций;

в ожидании отправления со станции.

Таблица 10

Примеры расчета общего времени нахождения вагона на станциях

№ кривой на рис. 44	$t_{пп}$, ч	$t_{нак}$, ч	$t^{ф}_{ож}$, ч	$t^{отпр}_{ож}$, ч	$t_{по}$, ч	Σt, ч	N сут, вагонов/сутки	Показатели технического оснащения и эксплуатационных условий работы станций	№ кривой на рис. 44			
									1	*2*	*3*	*4*
1	1,1	3,0	0,6	0,3	0,5	5,5	1050	Тип сортировочного устройства — горка	Немеханизированная	Механизированная		Автоматизированная
	1,2	2,3	0,7	0,4	0,5	5,1	1325					
	1,3	2,1	0,8	0,5	0,5	5,2	1500					
	1,4	1,9	0,8	0,7	0,5	5,3	1700					
	1,6	1,7	1,4	0,8	0,5	6,0	2000	$\kappa_н$	6	10	15	17
2	0,9	2,9	0,8	0,1	0,5	5,2	1500	$m^{пр}_{с}$, вагонов	38	45	50	50
	0,9	2,6	0,9	0,2	0,5	5,1	1750					
	1,0	2,1	1,3	0,2	0,5	5,1	2000					
	0,9	2,0	1,8	0,1	0,5	5,3	2400	Количество маневровых районов	1	1	1	2
	1,3	1,8	2,5	0,3	0,5	6,4	2800					
3	1,2	2,8	1,2	0,1	0,5	5,8	3000	Техническое время на формирование, ч	0,33	0,33	0,23	0,23
	1,4	2,2	1,5	0,2	0,5	5,8	3600					
	2,2	1,9	2,0	0,4	0,5	7,0	4300					
4	1,1	3,1	0,4	0,5	0,5	5,6	2800	$N_{пас}$	9	6	6	3
	1,1	2,9	0,5	0,1	0,5	5,1	3600					
	1,2	2,3	1,0	0,1	0,5	5,1	4250	Способы связи по движению поездов на прилегающих участках	Полуавтоматическая блокировка		Автоблокировка	
	1,9	2,0	0,6	0,2	0,5	5,2	4800					
	2,4	1,9	0,7	0,4	0,5	5,9	5000					
	2,3	1,8	1,3	0,6	0,5	6,6	5500					
	2,7	1,7	1,5	1,0	0,5	7,4	6000	I_{min}, ч	0,27	0,20	0,16	0,16

Такая группировка операций, выполняемых с вагоном, позволяет определить общее время нахождения вагона на станции по формуле

$$T_{их} = \sum_{S} \bar{v}_i + \sum_{S} \bar{w}_i + \frac{\kappa_н c m_{от}}{N_н} + \bar{t}^{отпр}_{ож}, \qquad (211)$$

где $i = 1, 2, \ldots, S$;

S — упорядоченное множество обслуживающих приборов на станции;

v_i — среднее технологическое время на обработку состава обслуживающим прибором i;

$\kappa_н$ — число назначений плана формирования;

c — параметр накопления;

$\bar{t}^{отпр}_{ож}$ — средневзвешенная величина ожидания поездом отправления на участок;

$N_ц$ — вагонопоток, поступающий для накопления поездов.

К первой группе относятся операции обработки составов в парках приема, отправления и сортировочном. Продолжительность их не зависит от размеров вагонопотоков и поэтому для каждой категории станций определяется техническим оснащением, квалификацией и количеством работников, а также схемой, структурой и характеристикой вагонопотока. Поэтому в различных вариантах организации вагонопотоков затраты вагоно-часов на операции, относящиеся к первой группе, изменяются незначительно. Простой вагонов под накоплением для каждой станции рассчитывают при изменении количества поездных назначений в вариантах, а также при колебании составных частей процесса поездообразования. Этот элемент, как и все последующие составные части времени нахождения вагона на станции, — функция размеров и структуры перерабатываемого вагонопотока. Продолжительность ожидания выполнения операций и отправления со станции как для транзитного, так и для перерабатываемого вагонопотока зависит в первую очередь от размеров вагонопотока, проходящего данный технический объект, а также мощности и производительности аппаратов обслуживания. Большое значение для определения продолжительности нахождения вагона на том или ином объекте имеет характеристика входящего потока и времени обслуживания. Так как входящий поток и время обслуживания в широком диапазоне от случайных до регулярных характеризуются законом Эрланга, в расчетах принимают именно этот поток. Продолжительность нахождения вагона исследована для разных категорий станций с разной технической вооруженностью, что также подтвердило некоторую степень связи элементов обработки вагонопотока. Как видно из табл. 10 и рис. 44, можно установить для каждой станции наиболее экономичное время нахождения вагона на ней.

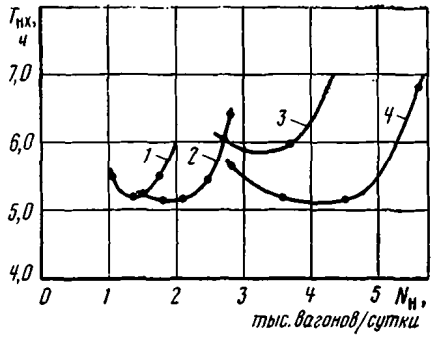

Рис. 44. Общее время нахождения на станции

7. ОБЩАЯ ПРИВЕДЕННАЯ ЭКОНОМИЯ ВРЕМЕНИ НАХОЖДЕНИЯ ВАГОНОВ НА СТАНЦИЯХ ПРИ ПРОПУСКЕ ВАГОНОПОТОКА БЕЗ ПЕРЕРАБОТКИ

Основной критерий при выборе оптимального плана формирования поездов — приведенные затраты, связанные с организацией вагонопотоков. Их можно определить как прямыми расчетами, так и с помощью нормативов. Способ расчета затрат в ос-

Затраты, связанные с временем нахождения вагонов на станции, рассчитывают с помощью нормы экономии времени. Затраты второй группы слагаются из расходов на содержание контингента работников служб движения, грузовой, сигнализации и связи и вагонной. В общем случае они изменяются дискретно в зависимости от объема переработки. Однако разрывы непрерывности функции затрат могут быть достаточно часты на различных стадиях и абсолютная величина затрат в точках разрыва, как правило, невелика. Это объясняется тем, что от объема переработки изменяется контингент разных профессий, имеющих различные нормы выработки и характер деятельности, и зависимость этих расходов от величины вагонопотока в практических расчетах может быть принята непрерывной. Исключение составляют расходы на содержание работников, входящих в бригады (группы) технического обслуживания вагонов. Увеличение числа бригад или групп приводит к разрывам в функции затрат. Поэтому расходы на их содержание исключают из рассматриваемой группы затрат и рассчитывают самостоятельно, как дискретно изменяющиеся от размера вагонопотока. Расходы на осмотр составов в техническом отношении определяются числом групп, занятых обработкой вагонов, и расходами на содержание одной группы. Состав группы устанавливается в соответствии с технологическим процессом работы пунктов технического обслуживания вагонов.

Для определения фонда заработной платы и численности штата, зависящего от вариантов организации вагонопотоков, наиболее приемлем метод непосредственного расчета, поскольку конкретные условия работы станции влияют на потребность в контингенте и уровень расходов на его содержание. Сущность его состоит в том, что предварительно на каждой станции выявляют контингент работников отдельных профессий, который изменяется от размера вагонопотока дополнительной переработки. Затем рассчитывают контингент для вагонопотока обязательной переработки и наибольший, соответствующий варианту с полным использованием перерабатывающей способности станции. Разность в потребности штата — переменная величина в вариантах организации вагонопотоков. Удельные расходы на содержание станционного и технического штата, отнесенные на один дополнительно перерабатываемый вагон, определяются из выражения

$$e_к = \frac{E^м_ш - E^о_ш}{N_м - N_от},$$

где $N_м$, $N_{от}$ — соответственно размеры минимального и наибольшего вагонопотоков переработки;

$E^м_ш$, $E^о_ш$ — соответственно расходы на содержание контингента.

Потребность в контингенте работников станции на заданный объем переработки определяется в основном количеством обслуживаемых объектов и нормами рабочей силы на объект, нормами выра-

ботки в единицу времени в соответствии с действующими указаниями по планированию штата и местными особенностями. Расчеты должны вестись на основе прогрессивных норм, с учетом использования новой техники, передовых методов и приемов труда и совершенной технологии. Например, контингент работников службы сигнализации и связи, занятый обслуживанием устройств на горке, при изменении объема переработки с 2,5 тыс. до 5 тыс. вагонов увеличивается примерно на 20—30%. Это объясняется тем, что штат работников, несущих сменное дежурство, составляет значительную величину в общем контингенте и мало зависит от объема переработки. Однако по существующей методике к расчету принимают увеличение штата на 100%.

Третья группа затрат — расходы на содержание маневровых локомотивов с локомотивными и составительскими бригадами и энергетическая часть затрат. Первые изменяются дискретно от вагонопотока и определяются числом маневровых локомотивов; энергетическая часть — по линейной зависимости от объема переработки и прямо пропорциональна расходу топлива. В состав эксплуатационных затрат четвертой группы входят расходы на материалы по службам движения, сигнализации и связи; электроэнергию, ремонт вагонных замедлителей, компрессорных установок, стрелочных приводов и других устройств. Изменяются они прямо пропорционально от объема переработки и характеризуются линейной зависимостью. Как известно, наиболее приемлем способ определения их — по расходным ставкам на один вагон:

$$e_{н} = \zeta_{эп}(e_{эп} + e_{рк}) + e_{рс} + e_{м},$$

где $\zeta_{эп}$ — расход электроэнергии на торможение вагона, пополнение тормозной сети, доставку документов, кВт·ч/вагон;
$e_{эп}$ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии;
$e_{рк}$ — расходная ставка на ремонт компрессорных установок, тормозной и пневматической сети;
$e_{рс}$ — то же, на ремонт вагонных замедлителей, стрелочных приводов и других устройств;
$e_{м}$ — то же, на текущее содержание устройств и материалы.

При расчете электроэнергии по фактическим данным из общего расхода ее следует исключить затраты на очистку сжатым воздухом от снега замедлителей, стрелок и на питание других объектов. Определяя расходную ставку на ремонт компрессорных установок, из общих расходов исключают затраты на окраску емкостей воздухосборников, ремонт градирен. Расходы на ремонт тормозных средств зависят от типа и числа замедлителей, объема переработки, количества тормозных позиций, а также от нормы расходов на ремонт одного замедлителя. Определяя расходную ставку на ремонт вагонных замедлителей, стрелочных приводов и других устройств, необходимо иметь в виду положение о планово-предупредительном ремонте оборудования и транспортных средств на железнодорожном транспорте и нормы расходов на него. В расходную ставку на мате-

новном предопределяется методом выбора оптимального варианта организации вагонопотоков, а также некоторыми практическими соображениями. В теории организации вагонопотоков сложилось так, что приведенные затраты определяют вторым способом, т. е. с помощью расчетных нормативов. Требование, которое предъявляется к нормативам то, что затраты, вычисленные с их помощью, должны быть одинаковыми с прямыми расчетами.

Процесс переработки вагонов на станциях тщательно исследуется с целью установить экономически целесообразные соотношения между показателями работы и параметрами технической оснащенности станций. Делается это с применением математических методов и ЭВМ. Однако результаты исследований еще не нашли отражения в методах определения расчетных нормативов. Рассмотрим возможности совершенствования этих методов. Важно правильно найти переменную часть приведенных затрат, зависящих непосредственно от того, как в данном варианте распределяется между станциями сортировочная работа с дальними вагонопотоками. Эту часть приведенных затрат можно представить как разность затрат, связанных с переработкой, временем нахождения и пропуском вагонопотоков в рассматриваемом $E_{р}$ и сквозном $E_{с}$ вариантах. Тогда приведенная экономия[1] времени при пропуске вагонопотока без переработки на станции $T_{эк}$ — это затраты, отнесенные на один дополнительно перерабатываемый вагон $N_{доп}$ и приведенные к стоимости 1 вагоно-ч $e_{вч}$, — выразится следующим образом:

$$T_{эк} = \frac{E_{р} - E_{с}}{N_{доп}\, e_{вч}} = \frac{E}{N_{доп}\, e_{вч}}.$$

Под вагонопотоком с дополнительной переработкой понимают разность объемов переработки на станции в рассматриваемом и сквозном вариантах. Затраты, зависящие от характера и степени изменения вагонопотока, можно сгруппировать в совокупности:

$$E = E_{вп} + E_{вн} + E_{вд},$$

где $E_{вп}$ — затраты, связанные с временем нахождения вагонов на станции;
$E_{вн}$, $E_{вд}$ — соответственно непрерывно и дискретно изменяющиеся затраты, связанные с переработкой и пропуском вагонов по станции.

Следовательно, приведенная экономия времени

$$T_{эк} = t^{р}_{эк} + r_{вн} + r_{вд},$$

где $t^{р}_{эк}$ — расчетная норма экономии времени на один вагон при пропуске вагонопотока без переработки через станцию;
$r_{вн}$, $r_{вд}$ — эквиваленты переработки вагонов, учитывающие непрерывно и дискретно изменяющиеся затраты.

[1] Без учета экономии от сокращения простоя поездных локомотивов и времени работы бригад.

Расчетную норму экономии времени в общем случае можно представить из двух слагаемых:

$$t_{эк}^{р} = t_{эк} + t_{эк}^{д}.$$

Первое соответствует разности простоя транзитных вагонов с переработкой, исключая время накопления, и без переработки в рассматриваемом варианте организации вагонопотоков. Второе представляет собой дополнительную экономию времени при пропуске вагонопотока без переработки за счет сокращения простоя, обязательного при переработке в системах расформирования и формирования, а также возможного уменьшения времени нахождения вагонов в системе отправления.

Определяя эквивалент переработки вагонов, следует различать его для двух групп сортировочных станций. К *первой* относятся станции с большим размером обязательно перерабатываемого вагонопотока, на которых дополнительный объем сортировочной работы предполагается освоить благодаря резервам перерабатывающей способности. На таких станциях не предусматриваются мероприятия, требующие единовременных затрат. Следовательно, дискретно изменяющаяся часть затрат, как правило, равна нулю и приведенная экономия времени определится из соотношения:

$$t_{эк} = t_{эк}^{р} + r_{вн}.$$

Значение $T_{эк}$ для станций первой группы определяется главным ооразом величиной расчетной нормы экономии $t_{эк}^{р}$. Выбирая оптимальный вариант распределения сортировочной работы между станциями, достаточно учитывать только те расходы, которые в действительности меняются при варьировании объема переработки от минимально возможного (обязательного) до наибольшего, определяемого полным использованием перерабатывающей способности. Из расчетов исключают расходы, которые не меняются в границах изменения вагонопотока, т. е. неизменны. Постоянная часть эксплуатационных расходов на сортировочных станциях в значительной мере предопределяется размером вагонопотока, обязательно перерабатываемого, схемой путевого развития и расположением парков, степенью механизации и автоматизации станционных процессов, технологией работы и рядом других факторов. Эту часть расходов обусловливает необходимость осуществления перевозочного процесса.

Исследования показывают, что для анализа и расчетов общие эксплуатационные расходы, зависящие от вариантов организации вагонопотоков, по способу определения, абсолютной величине, характеру и связи с вагонопотоком целесообразно сгруппировать в следующие шесть групп: связанные с временем нахождения вагонов на станции; на содержание станционного и технического штата; на маневровую работу; пропорциональные объему перерабатываемого вагонопотока; на пропуск транзитных поездов и прочие.

риалы в основном включают расходы по службам движения, сигнализации и связи. При определении ее по отчетным данным следует относить к зависящим 90—95% расходов.

Переменные расходы пятой группы — на пропуск транзитных вагонов без переработки — в значительной мере определяются наличием или отсутствием перелома весовых норм поездов. Если перелома норм нет, доля переменных затрат незначительна и они, главным образом, образуются при отвлечении маневровых локомотивов от основной сортировочной работы для отцепки вагонов с коммерческим и техническим браком. В результате увеличивается общая загрузка маневровых средств и соответственно возникают дополнительные затраты, связанные с увеличением времени нахождения транзитных вагонов с переработкой.

К прочим относятся затраты, связанные с задержками поездов из-за неприема станцией, с повторной сортировкой вагонов и переработкой углового потока, и другие., не учитываемые в предыдущих группах расходов. Следует отметить, что затраты, связанные с задержками поездов из-за неприема станцией, при определенных условиях могут составить значительную величину. Тогда их следует учитывать в расчетах. Таким образом, эквивалент переработки вагонов, учитывающий непрерывно изменяющиеся затраты, определится из выражения

$$r_{вн} = \frac{1}{e_{вч}}(e_{к} + e_{э} + e_{н} + e_{п} - e_{т}),$$

где $e_{п}$ — расходная ставка затрат, учитывающая прочие затраты на переработку вагонов;

$e_{т}$ — расходная ставка на пропуск транзитных вагонов без переработки.

Ко *второй* группе относятся станции с относительно небольшим обязательно перерабатываемым вагонопотоком по сравнению с перерабатывающей способностью. Размер дополнительного вагонопотока переработки на них в различных вариантах может меняться в значительных пределах. Основное условие для установления величины приведенной экономии времени в каждом варианте для этих станций — такое соотношение элементов $t_{эк}^{р}$ и $r_{вд}$, при котором обеспечивается минимум суммарных приведенных затрат, связанных с временем нахождения вагонов и их переработкой. Для этого при любом размере дополнительного вагонопотока необходимо вычислить минимальную разность затрат

$$\min E = E_{р} - E_{с}.$$

Чтобы найти $\min E$, достаточно записать целевую функцию, позволяющую минимизировать затраты в вариантах изменением значений управляемых переменных: числа горочных и подгорочных локомотивов, групп или бригад, обрабатывающих составы, коэффициента параллельности роспуска и др. Вид этой функции для каждой конкретной станции определяется ее технической оснащен-

ностью, технологией работы, мероприятиями, проводимыми для освоения вагонопотока дополнительной переработки. Вычисление минимального приращения затрат $\min E$ на заданный размер вагонопотока дополнительной переработки — в общем случае задача целочисленного программирования. Но практически можно оптимизировать процесс переработки вагонов в каждой системе обслуживания, учитывая взаимодействие между ними. При локальном рассмотрении систем определение $\min E$ на первом этапе сводится к установлению предельной величины вагонопотока, при котором целесообразно изменять значения переменных в каждой системе и таким образом находить границы зон, в пределах которых значения переменных постоянны. Затем методом направленного перебора корректируют границы зон, учитывая взаимосвязи в работе систем. Для иллюстрации выразим суточные приведенные затраты, связанные с временем нахождения и переработкой вагонов в системах расформирования и формирования, в которых для освоения прироста вагонопотока переработки предполагается увеличить число горочных и подгорочных локомотивов, а также групп технического обслуживания составов:

$$E_{\text{р}} = \lambda e_{\text{сс}} \left[\frac{t_{\text{ос}}}{z} + \frac{\lambda^2 t_{\text{ос}}^2 (\vartheta_{\text{вх I}}^2 + \vartheta_{\text{об I}}^2)}{2z(z-\lambda t_{\text{ос}})[z-(z-\lambda t_{\text{ос}})\vartheta_{\text{вх I}}]} + \right.$$

$$+ \frac{t}{\sqrt[3]{S_{\text{г}}^2}} + \left. \frac{\lambda^2 t_{\text{г}}^3 (\vartheta_{\text{вх II}}^2 + \vartheta_{\text{об II}}^2)}{2(1-\lambda t_{\text{г}})[1-(1-\lambda t_{\text{г}})\vartheta_{\text{вх II}}]} \right] + z e_{cz} +$$

$$+ S_{\text{г}} e_{\text{смг}} + S_{\text{в}} e_{\text{смв}} + \frac{\lambda^2 e_{\text{сс}}}{2} \left[\frac{\alpha_s t_{\text{ф}}^2 (1 + \vartheta_{\text{об III}}^2)}{S_{\text{в}} (S_{\text{в}} - \lambda t_{\text{ф}})} + \frac{t_{\text{в}}^2 (1 + \vartheta_{\text{об III}}^2)}{M_{\text{в}} - \lambda t_{\text{ф}}} + \right.$$

$$\left. + \frac{2t_{\text{оф}}}{\lambda} \right] + 24\lambda \left\{ \frac{\lambda^{m+1} t_{\text{г}}^3 (\vartheta_{\text{вх III}}^2 + \vartheta_{\text{об II}}^2) e_{\text{вр}}}{2(1-\lambda t_{\text{г}})[1-(1-\lambda t_{\text{г}})\vartheta_{\text{вх II}}]} + \right.$$

$$\left. + e_{\text{зд}} \left[\frac{(\lambda t_{\text{г}})^2 (\vartheta_{\text{вх II}}^2 + \vartheta_{\text{об II}}^2)}{(\lambda t_{\text{г}})^2 (\vartheta_{\text{вх II}}^2 + \vartheta_{\text{об II}}^2) + 2(1-\lambda t_{\text{г}})} \cdot \frac{1}{[1-(1-\lambda t_{\text{г}})\vartheta_{\text{вх II}}]} \right] \right\},$$

где λ — интенсивность поступления поездов в расформирование;

$e_{\text{сс}}$ — приведенная стоимость простоя одного состава в течение суток;

$t_{\text{ос}}$ — среднее время обработки состава поезда одной группой технического обслуживания;

z — количество групп в бригаде технического обслуживания вагонов;

$t_{\text{гп}}$ — среднее время, затрачиваемое горочным локомотивом на обслуживание одного состава;

$t_{\text{г}}$ — среднее значение горочного интервала;

$S_{\text{г}}$, $S_{\text{в}}$ — соответственно количество горочных и подгорочных локомотивов;

$t_{\text{ф}}$ — среднее время, затрачиваемое локомотивом парка формирования на обслуживание одного состава;

α_s — расчетный коэффициент, характеризующий долю поездов, проходящих систему формирования без задержек;

$t_{\text{в}}$ — среднее время обслуживания состава на вытяжном пути формирования;

$M_{\text{в}}$ — количество вытяжных путей формирования;

$e_{\text{смг}}$, $e_{\text{смв}}$ — соответственно суточные приведенные затраты на содержание горочных и подгорочных локомотивов;

e_{cz} — суточные затраты на содержание одной группы бригад технического обслуживания вагонов;

$e_{\text{вр}}$ — приведенная стоимость, учитывающая временные затраты, связанные с задержками поездов и поездных локомотивов из-за неприема станцией;

$e_{\text{зд}}$ — приведенная стоимость, учитывающая затраты, связанные с остановками и сбоями в движении на участках из-за задержек поездов на подходах;

m — расчетное число путей в парке приема, численно равное разности между общим и необходимым для выполнения технологических операций с составами;

$\vartheta_{\text{вх}\,i}$, $\vartheta_{\text{об}\,i}$ — соответственно коэффициенты вариации входящего потока и времени обслуживания.

Выражение справедливо для следующих исходных предпосылок: парки на станции расположены последовательно, на горке два пути надвига и роспуска, составы распускают последовательно, в парке приема их обрабатывает одна бригада технического обслуживания вагонов, подгорочные локомотивы не специализированы по маневровым районам.

Анализом установлено, что зависимость приведенной экономии времени от размера дополнительной переработки достаточно сложная и в общем случае функция может иметь несколько относительных экстремумов. Их число определяется количеством мероприятий, проводимых для сокращения времени нахождения вагонов на станциях. Каждый элемент приведенной экономии времени, взятый в отдельности, значительно изменяется в вариантах. Однако общая экономия в достаточно широком диапазоне изменения дополнительного вагонопотока переработки практически остается постоянной. Так, при изменении потока с 1500 до 2400 вагонов $T_{\text{эк}}$ сохраняется на уровне 5,08 приведенных вагоно-часов на вагон, затем скачкообразно возрастает до 5,40 и практически не изменяется при росте вагонопотока дополнительной переработки с 2450 до 3500 вагонов. Это объясняется тем, что характеры изменения расчетной нормы экономии времени и эквивалента переработки вагонов от объема перерабатываемого вагонопотока противоположны и между ними в каждом варианте устанавливается рациональное соотношение, соответствующее минимуму суммарных приведенных затрат, связанных как со временем нахождения, так и с переработкой вагонов.

Важно отметить, что на станциях, где поток переработки 4,2—4,8 тыс. вагонов, приведенная экономия времени может оказаться меньше, чем на станциях с объемом работы в 5—6 тыс. вагонов.

8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ

Четкую и бесперебойную работу сортировочной станции обеспечивает выполнение основных положений технологического процесса и рациональное взаимодействие в работе парков и сортировочных устройств между собой и с прилегающими участками. Теория взаимодействия станционных процессов устанавливает зависимости между основными технологическими параметрами парков и элементов станции, их взаимосвязь с графиком движения поездов. Взаимозависимость между элементами станции выражается в том, что изменение какого-либо параметра одного элемента ведет к изменению параметров других, иногда многих элементов. Взаимодействие между элементами станции может быть прямым и обратным. При прямом взаимодействии изменение состояния предшествующих элементов вызывает изменение состояний последующих, а при обратном — изменение состояния последующего элемента (или совокупности элементов) влечет за собой изменение состояния одного или нескольких предшествующих элементов. Одна из главных причин возникновения обратной связи — неравномерность станционных процессов, наиболее ощутимо она проявляется при высоких загрузках элементов станции. Обратная связь отрицательно влияет на весь технологический процесс работы станции. Так, если при увеличении темпа поступления поездов не обеспечивается своевременный вывод составов в парк отправления и вывоз на участки, то пути сортировочного парка заполняются накопленными составами. Это создает значительные трудности в работе горки вплоть до задержки роспуска. При этом, как следствие, возникают дополнительные (вызванные обратным влиянием) простои составов в ожидании расформирования и даже задержки поездов из-за неприема станцией на подходах.

Результат влияния обратных связей — снижение полезной пропускной и перерабатывающей способности элементов станции, а следовательно, и всей станции в целом, а также увеличение межоперационных простоев вагонов, локомотивов и поездов. Прямые и обратные связи требуют рассматривать каждый элемент не только как самостоятельную систему, для которой определяются условия устойчивого функционирования, но и как часть другой, сложной системы — сортировочной станции. В последнем случае устанавливаются условия, которым должен удовлетворять данный элемент, чтобы режим работы станции был устойчивым. В соответствии с этим условия взаимодействия могут быть необходимыми и достаточными. Необходимые условия обусловливают предельно допустимую загрузку каждого элемента станции (парка приема, сортировочной горки, системы формирования и парка отправления), а достаточные — минимально необходимый резерв относительной пропускной способности этих элементов, при которой работа станции будет устойчивой.

Система расформирования. Необходимые условия взаимодействия в работе систем, участвующих в процессах прибытия, осмотра и расформирования поездов, формулируются как соотношения, обеспечивающие стационарный режим работы каждой из систем. Согласно положениям теории массового обслуживания условие стационарного режима работы однофазных систем следующее: коэффициент загрузки должен быть меньше единицы. Для системы технического обслуживания составов в парке приема условие стационарности

$$\frac{n_{\text{р}}\,\bar{t}^{\text{пп}}_{\text{бр}}}{24Б} < 1, \tag{212}$$

где $n_{\text{р}}$ — среднесуточное число поездов, поступающих на станцию в переработку;

$\bar{t}^{\text{пп}}_{\text{бр}}$ — средняя продолжительность технического осмотра одного состава в парке приема, ч;

$Б$ — число одновременно работающих бригад технического обслуживания.

Условие (212) можно записать в несколько ином виде

$$\frac{n_{\text{р}}}{24} < \frac{Б}{\bar{t}^{\text{пп}}_{\text{бр}}}. \tag{213}$$

Части этого выражения характеризуют собой среднечасовой темп: левая — прибытия поездов в переработку, а правая—обслуживания составов бригадами ПТО. Таким образом, необходимое условие взаимодействия процессов прибытия на станцию и технического осмотра поездов формулируется следующим образом: средний темп прибытия поездов должен быть меньше темпа их обработки.

Условие стационарности для систем расформирования

$$\frac{n_{\text{р}}\,t_{\text{г}}}{24} < 1 \tag{214}$$

или

$$\frac{n_{\text{р}}}{24} < \frac{1}{t_{\text{г}}}, \tag{215}$$

где $t_{\text{г}}$ — расчетный горочный интервал (среднее время занятия горки расформированием с учетом технологических перерывов в ее работе в связи с экипировкой локомотивов, осмотром и ремонтом горочной техники, сменой бригад и др.), ч.

Условие формулируется следующим образом: средний темп поступления поездов на горку должен быть меньше возможного среднего темпа расформирования. Однако из-за неравномерности поступления поездов в переработку и продолжительности подготовки их к расформированию и расформирования в отдельные периоды суток

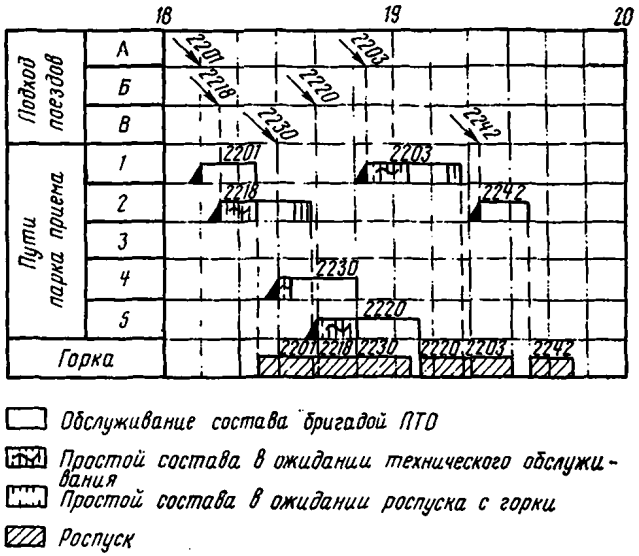

Рис. 45. Прибытие и простои поездов в парке приема

возникают очереди из составов, ожидающих начала технического обслуживания или расформирования (рис. 45). Следует отметить, что простои в ожидании обработки поездов в парке приема становятся незначительными, если средний темп этой обработки превышает средний темп расформирования

$$\frac{Б}{\bar{t}^{\text{пп}}_{\text{бр}}} > \frac{1}{t_{\text{г}}}. \qquad (216)$$

Условие (216)—также необходимое для обеспечения нормального режима работы систем расформирования и технического обслуживания. Процесс расформирования поездов тесно связан и с последующими процессами обработки составов на станции (формированием и отправлением). Конкретная форма влияния таких последующих процессов на расформирование составов: повторная сортировка, когда вагоны из-за занятости путей сортировочного парка составами, ожидающими формирования или вывода в парк отправления, направляют на неспециализированные пути, в результате—дополнительная маневровая работа на горке, а иногда и ее простой до освобождения сортировочных путей. В том и другом случаях возникают потери относительной пропускной способности горки, выражающиеся в уменьшении предельно допустимой ее загрузки роспуском основного вагонопотока,

$$\frac{n_{\text{р}}\, t_{\text{р}}}{24} \leqslant 1 - \psi_{\text{доп}}, \qquad (217)$$

где $\psi_{\text{доп}}$ — относительные потери пропускной способности сортировочной горки из-за загрузки ее роспуском вагонопотока повторной сортировки.

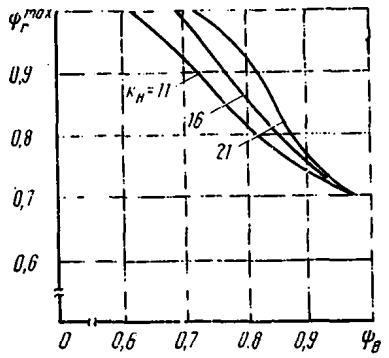

Рис. 46. Зависимость допустимых загрузок горки от загрузки вытяжных путей формирования

Когда загрузка горки превышает величину, установленную условием (217), станция выходит из стационарного состояния. Число составов в очереди бесконечно возрастает, а поезда выстраиваются в ней на подходах. Таким образом, лишь при наличии резерва относительной пропускной способности, превышающего потери, вызванные влиянием на горку всех последующих элементов, возможна устойчивая работа станции. Это и есть достаточное условие взаимодействия элементов системы расформирования. На рис. 46 видно, что с увеличением коэффициента загрузки вытяжных путей формирования резерв горки должен быть больше, причем с уменьшением числа поездных назначений его величина возрастает. Исследования, выполненные на кафедре «Эксплуатация железных дорог» МИИТ, показали, что, во-первых, величина резерва относительной пропускной способности горки для обеспечения устойчивой работы станции составляет $\rho_{\text{г}} = 0{,}1 \div 0{,}2$; во-вторых, наибольшее влияние на его величину оказывает уровень загрузки вытяжных путей формирования и меньшее — уровень загрузки путей парка отправления. Величина резерва $\rho_{\text{г}}$ возрастает по мере увеличения загрузки вытяжных путей и путей парка отправления и особенно быстро при загрузке элементов станций, равной 0,7 и выше.

Система формирования. Мощность системы формирования должна обеспечить бесперебойное формирование поездов и перестановку их в парк отправления, не допуская излишних простоев составов в ожидании операций. Согласно теории массового обслуживания необходимое условие взаимодействия процессов накопления вагонов и формирование поездов

$$\frac{T_{\text{ф}}}{I_{\text{н}}\, M_{\text{ф}}} < 1, \qquad (218)$$

где $M_{\text{ф}}$ — число одновременно работающих на вытяжных путях маневровых локомотивов;

$T_{\text{ф}}$ — среднее время обработки состава локомотивом вытяжного пути, включая средневзвешенную величину продолжительности окончания формирования составов поездов различных категорий, вывод их в отправочный парк и возвращение локомотива в маневровый район, ч;

$I_{\text{н}}$ — средний интервал накопления составов в сортировочном парке.

Выразив выражение (218) в виде

$$\frac{M_\Phi}{T_\Phi} > \frac{1}{I_н}, \qquad (219)$$

сформулируем необходимое условие взаимодействия следующим образом: для устойчивой работы системы формирования необходимо, чтобы средний темп формирования поездов превышал средний темп накопления составов в сортировочном парке. Условие (219) обязательно, так как в противном случае сортировочный парк заполнится завершившими накопление составами. Это остановит роспуск с горки, парк приема заполнится составами, ожидающими роспуска, что вызовет задержки в приеме поездов. Но на работу системы формирования влияют системы отправления и расформирования: первая, так как при занятости путей парка отправления поездами, ожидающими отправления, задерживается вывод сформированных составов; вторая, так как с увеличением загрузки системы расформирования возрастает число накапливаемых составов и требуется бóльший резерв для устойчивой ее работы. Резерв мощности должен быть таким, чтобы максимально допустимая ее загрузка при формировании поездов не превышала величину

$$\frac{T_\Phi}{I_н M} \leqslant 1 - \varphi_{р-о}, \qquad (220)$$

где $\psi_{р-о}$ — относительные потери мощности системы формирования из-за влияния систем отправления и расформирования — резерв системы формирования. Расчеты показали, что его значение $\rho_\Phi = \psi_{р-о} = 0{,}06 \div 0{,}14$.

Выражение (220) — достаточное условие устойчивого взаимодействия элементов системы формирования.

Система отправления. Система отправления, как и расформирования, двухфазная. В результате блокировки работы первой фазы (технического обслуживания) действиями второй (отправления поездов на участки), выражающейся в невозможности вывода составов в парк отправления из-за занятости его путей поездами, ожидающими отправления, максимальный коэффициент использования первой фазы должен быть меньше единицы. Необходимое условие устойчивой работы фазы отправления поездов

$$\frac{n_{от}\,\bar{I}_{от}}{24} < 1, \qquad (221)$$

где $n_{от}$ — количество поездов, отправляющихся со станции за сутки;

$\bar{I}_{от}$ — средний интервал отправления поездов со станции.

Соотношение (221) означает, что возможный средний темп отправления поездов со станции должен быть больше среднего темпа поступления составов в парк отправления. В противном случае нарушается устойчивая работа парка отправления, его пути заполняются поездами, ожидающими отправления, а это вызывает прекра-

щение работы системы формирования и т. п. Технологический процесс обработки поездов в парке отправления должен быть построен так, чтобы они не задерживались сверх установленного срока. Простои составов становятся незначительными, если средняя продолжительность их осмотра меньше среднего интервала отправления

$$\bar{t}^{по}_{об} < \bar{I}_{от}. \qquad (222)$$

Умножив правую и левую части этого неравенства на среднюю интенсивность поступления поездов в систему отправления, получим

$$\psi_{об} < \psi_о, \qquad (223)$$

где $\psi_о$, $\psi_{об}$ — коэффициент загрузки соответственно фазы отправления и фазы технического обслуживания.

Таким образом, для обеспечения нормального режима работы системы отправления необходимо, чтобы загрузка бригад, готовящих составы к отправлению, не превышала загрузки участков отправления. Условие (223) можно представить в виде

$$\frac{\bar{t}^{по}_{об}}{24 Б_{по}} < \bar{I}_о, \qquad (224)$$

где $Б_{по}$ — необходимое число бригад для технического и коммерческого осмотра в парке отправления.

Достаточное условие устойчивого взаимодействия элементов системы отправления определяется максимальным значением коэффициента загрузки, при котором в сортировочном парке возникает очередь составов, нарушающая устойчивую работу горки из-за выхода из стационарного состояния системы расформирования. Влияние системы отправления на предшествующие элементы станции погашается емкостью путей сортировочного и отправочного парков. Значит, максимально допустимое значение коэффициента загрузки пропускной способности этой системы достаточно велико. Разница между единицей и этим максимально допустимым коэффициентом называется резервом относительной пропускной способности системы отправления, который колеблется в пределах 0,05—0,20.

Качество выполнения всех операций, предусмотренных технологическим процессом, может быть оценено такими показателями, как равномерность и ритмичность производственного процесса станции; непрерывность и поточность переработки вагонов на ней. Равномерность обработки поездов (групп вагонов) означает такую организацию работы, при которой длительность одноименных операций строго соответствует технологическим нормам. Равномерность поступления поездов (групп вагонов) в обработку на станции и отправления их на участок предусматривает такой характер движения, при котором поезда прибывают, отправляются или проходят станцию строго равномерно, через определенные промежутки времени. Для оценки равномерности процессов на станции следует считать

относительные отклонения его от равномерного, принимая только ту их долю, которая вызывает наиболее неблагоприятные последствия в работе системы. Показатель равномерности поступления требований (поездов, групп вагонов) в систему обслуживания

$$k_{\text{пп}} = \frac{\bar{I} - \bar{I}_{\min}}{\bar{I}}, \qquad (225)$$

где $\bar{I}$ — среднее значение интервала поступления требований в систему;

$\bar{I}_{\min}$ — среднее значение интервалов поступления требований в систему, не превышающих $\bar{I}$.

Показатель равномерности обработки требований в системе обслуживания

$$k_{\text{по}} = \frac{\bar{t}^{\max}_{\text{обсл}} - \bar{t}_{\text{обсл}}}{\bar{t}_{\text{обсл}}}, \qquad (226)$$

где $\bar{t}_{\text{обсл}}$ — среднее время обработки требований в системе;

$\bar{t}^{\max}_{\text{обсл}}$ — среднее значение длительности обработки требований, превышающих величину $\bar{t}_{\text{обсл}}$.

Ритмичность — гарантия слаженности и непрерывности производства. Производственный ритм станции — конкретная форма согласованности взаимосвязанных элементов процесса, непрерывности и бесперебойности его течения во времени. Количественно степень ритмичности в работе системы можно характеризовать отношением количества интервалов прибытия и обслуживания, для которых соблюдается условие

$$I \geqslant t_{\text{обсл}}, \qquad (227)$$

где I — величина интервала поступления требований в систему;

$t_{\text{обсл}}$ — интервал обработки требований,

к их общему числу интервалов. Если условие (227) соблюдается для всех требований, поступивших после периода свободности системы, то возникновение межоперационных перерывов исключается, и тем самым достигается полная непрерывность дальнейшего хода процесса. Признак ритмичной работы при наличии очереди в системе — выполнение условия (227) для тех требований, которые поступают в момент, непосредственно следующий за началом обслуживания. Процесс будет в одинаковой степени ритмичен как в случае $I = t_{\text{обсл}}$, так и в случае $I > t_{\text{обсл}}$. Обозначим число интервалов, для которых $I < t_{\text{обсл}}$, через $n_{\text{н}}$, а для которых $I \geqslant t_{\text{обсл}}$, через $n_{\text{р}}$. Тогда степень ритмичности процесса можно определить с помощью коэффициента

$$k_{\text{р}} = \frac{n_{\text{р}}}{n_{\text{р}} + n_{\text{н}}}. \qquad (228)$$

Величина его не может быть меньше 0,5; при полной ритмичности процесса $k_{\text{р}} = 1$.

Непрерывность в работе станции — один из основных принципов ее технологического процесса, предусматривающий отсутствие перерывов между окончанием одной группы операций и началом следующей. Количественной оценкой фактической непрерывности станционных процессов служит соотношение между технологическим временем выполнения операций в системах расформирования, формирования и отправления и его фактическим выполнением. Оно носит название коэффициента фактической непрерывности

$$k_{\text{нф}} = \frac{\Sigma T_{\text{тех}\,i}}{\Sigma T_{\text{тех}\,i} + \Sigma W_i^{\Phi}}, \qquad (229)$$

где $\Sigma T_{\text{тех}\,i}$ — суммарное технологическое время простоя вагонов в системе обслуживания;

ΣW_i^{Φ} — суммарное фактическое время ожидания выполнения операций в системе обслуживания.

Фактически коэффициент непрерывности определяет долю времени на технологические операции в общем простое вагона в той или иной системе обслуживания и изменяется в пределах $0 < k_{\text{нф}} \leqslant 1$. Случай, когда $k_{\text{нф}} = 1$, соответствует абсолютно непрерывному процессу и имеет место при отсутствии межоперационных простоев в системе.

Под поточностью в обработке поездов и вагонов на станции понимают такой порядок выполнения и чередования операций с ними, который исключает или сводит к минимуму их повторность и возвратные пробеги вагонов. Рассматривая поточность как показатель уровня взаимодействия процессов, следует учитывать часть повторно перерабатываемого вагонопотока главным образом из-за неудовлетворительной работы каких-либо элементов станции. Для количественной оценки нарушения поточности, возникающего из-за дополнительной переработки, служит коэффициент повторности сортировки вагонов на горке

$$k_{\text{п}} = 1 + \frac{N_{\text{доп}}}{N_{\text{с}}}, \qquad (230)$$

где $N_{\text{доп}}$ — среднесуточные размеры дополнительной переработки вагонов;

$N_{\text{с}}$ — среднесуточные размеры вагонопотока, поступающего на станцию в переработку.

Глава 8 УПРАВЛЕНИЕ ВАГОНОПОТОКАМИ НА ПОЛИГОНЕ

1. ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВАГОНОПОТОКАМИ

Современная система управления вагонопотоками должна обеспечить правильное сочетание форм их организации — отправительской маршрутизации и сквозных поездов, а также наиболее эффективное распределение работы между станциями, концентрацию переработки вагонов на меньшем их числе. Для этого требуется не только качественно, но и количественно оценивать каждый возможный вариант организации вагонопотоков, т. е. объективно соизмерять затраты и ожидаемый эффект как в текущих условиях, так и на перспективу. В дальнейшем все более важное значение для разрешения технологических проблем транспорта будет приобретать перспективная система организации вагонопотоков, обеспечивающая эффективное размещение и потребную производственную мощность основных станций сети. Для решения этой задачи необходимо прежде всего разработать математическую модель продвижения вагонопотоков как совокупность уравнений и неравенств, отражающих взаимодействие и взаимосвязи переменных факторов и постоянных элементов системы. Построение и использование подобных математических моделей осуществляют в такой последовательности: аналитическое описание системы; исследование различных режимов функционирования модели; принятие решения.

Следует также иметь в виду, что транспорт и его предприятия — классический пример большой сложной системы с многообразными связями между отдельными элементами, что требует широкого применения ЭВМ, аналитических и численных методов решения задач. На кафедре «Эксплуатация железных дорог» МИИТ предпринята попытка создать и теоретически обосновать систему управления вагонопотоками на железнодорожном транспорте. Разработка технологической взаимосвязи отдельных элементов в ней современными математическими методами и на ЭВМ направлена на установление оптимального режима функционирования составляющих звеньев единого транспортного конвейера.

Управление вагонопотоками предусматривает достижение оптимальных приведенных суммарных временных и стоимостных затрат на обработку вагонов на станциях установлением наиболее экономичной величины перерабатываемого вагонопотока на каждом объекте. Расчетный вагонопоток определяют в зависимости от технического оснащения всех расположенных на полигоне станций. На первом этапе расчетов загрузки станций переработкой вагонов классифицируют струи вагонопотоков, что позволяет сразу определить целесообразность выделения их в самостоятельные назначения или объединения. По этой классификации вагонопотоки подразделяются на струи:

обязательного выделения;

варьируемого вагонопотока;

не претендующие на самостоятельное выделение.

К струям обязательного выделения относится вагонопоток: отправительских, абсолютно выгодных маршрутов; следующий на ближайшую сортировочную станцию, а также основных струй (крупных), переработка которых на попутных станциях не оправдана. Количество основных струй вагонопотоков определяется как размерами вагонопотоков, так и загрузкой станций. Расчетная величина вагонопотока основной струи определяется перерабатывающей способностью сортировочного пути той станции, на которой предусматривается формирование поездов из ее вагонов. Если вагонопоток основной струи превышает перерабатывающую способность одного сортировочного пути, то можно это назначение разукрупнить или выделить для него дополнительный путь. Взаимосвязь между размерами струй варьируемого вагонопотока, расположением станций на полигоне сети и загрузкой технических средств выражается следующими множествами;

$$A = \bigcup_{i=1}^{\kappa_в} A' + \bigcup_{i=1}^{\kappa_в} A'', \qquad (231)$$

где A' — элемент множества основных струй и струй вагонопотока на ближайшую сортировочную станцию;

$\kappa_в$ — общее число струй вагонопотоков на прямолинейном направлении;

$$\kappa_в = \frac{(n-2)(n-1)}{2} + n - 1; \qquad (232)$$

n — число станций на направлении;

A'' — элемент множества варьируемых струй вагонопотоков:

$$A'' = \bigcup_{i=1}^{\kappa_в} N_{эф} + \bigcup_{i=1}^{n-1} N_{пр}, \qquad (233)$$

$N_{эф}$ — элемент подмножества эффективных назначений (струй) возможного выделения вагонопотоков;

$N_{пр}$ — элемент подмножества струй вагонопотоков, не претендующих на самостоятельное выделение.

Подмножества элементов, т. е. назначения варьируемого вагонопотока, вполне упорядочены по времени нахождения вагона на станциях: первый элемент соответствует назначению с минимальным, последний — с наибольшим временем. При выборе лучшей

системы организации вагонопотоков исходят из того, что каждому варианту при имеющихся технических средствах соответствуют вполне определенные условия проследования вагонами станций полигона. Однако изменение процесса поездообразования на одной станции влечет за собой перераспределение объема и вида работы на последующих. Время нахождения вагонов на том или ином объекте изменяется в зависимости от количества вагонов, специализации струй вагонопотоков. Поэтому и расчетный норматив, учитывающий время нахождения вагонов на станциях при различной их загрузке, в процессе просчета вариантов не является постоянным, наперед заданным, а относится к классу зависимых, постоянно изменяющихся величин.

Важнейший норматив в расчетах организации вагонопотоков — стоимость переработки вагона на станции (расходы служб движения, локомотивной, грузовой, вагонной, пути и СЦБ и связи в зависимости от технических средств и объема переработки). С учетом его время нахождения вагонов на станциях в различных вариантах распределения сортировочной работы можно также представить как множество

$$T_{\text{нх}} = \overset{k_{\text{опт}}}{\underset{i=n}{U}} t_{\text{нх}} + \overset{n}{\underset{i=3}{U}} \frac{c_{\text{п}}^{f(N)}}{e_{\text{вч}}}, \qquad (234)$$

где $T_{\text{нх}}$ — условное время нахождения вагонов на всех станциях полигона;

$t_{\text{нх}}$ — элемент множества $T_{\text{нх}}$, представляющий собой время нахождения вагона на одной станции;

$\frac{c_{\text{п}}^{f(N)}}{e_{\text{вч}}}$ — элемент множества $T_{\text{нх}}$, равный приведенной стоимости переработки вагона.

Разбивка всех возможных вариантов на подмножества с элементами, соответствующими одинаковым расходам на переработку вагонов, позволяет многие заведомо неконкурентоспособные отбросить, тем самым сократить объем расчетов, выполняемых методом динамического программирования. Учитываемые при этом факторы:

количество и техническое оснащение сортировочных станций;

схема полигона;

число сортировочных путей, выделенных для накопления варьируемого вагонопотока;

количество вагонов в составе поезда;

размеры и структура вагонопотоков.

2. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВАГОНОПОТОКАМИ

Управление вагонопотоками на полигоне должно обеспечить высокоэффективное использование всех технических средств и подвижного состава, рациональное распределение сортировочной работы между сортировочными, участковыми и грузовыми станциями. Оптимальное распределение сортировочной работы—

задача экономико-математическая. Ее можно решить, комплексно используя экономический анализ и математические методы. Введем следующие определения:

под *системой* понимают совокупность грузовых и сортировочных станций и технических средств железнодорожного полигона и корреспондирующий вагонопоток;

состояние системы — любой вариант организации вагонопотоков, который может быть реализован при заданных ограничениях;

управление (*управляющее воздействие*) — размеры варьируемого вагонопотока и число назначений на станциях полигона;

неуправляемые постоянные параметры — путевое развитие, количество и мощность технических средств, норма веса поездов, число вагонов в составе;

цель оптимального управления — выбор для каждой станции полигона форм организации вагонопотока и числа назначений, при которых целевая функция обращается в минимум.

В связи с тем что оптимальное распределение сортировочной работы — задача по функциональным зависимостям нелинейная, ее можно сформулировать как задачу распределения, а по типу исходных данных как смешанную (дискретные величины — число назначений, непрерывные величины — вагонопотоки). Следовательно, для решения можно воспользоваться методом динамического программирования. Отметим также, что приведенные минимальные затраты на станциях полигона обладают аддитивностью, т. е. минимальные затраты вагоно-часов в варианте равны сумме минимальных затрат вагоно-часов на станциях. В данной задаче одним и тем же значениям управляющих воздействий соответствует одно или несколько состояний системы, т. е. отображение множества управляющих воздействий на множество состояний системы не однозначно. В общем виде целевая функция имеет вид

$$E = u\,(x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_{n-1}), \qquad (235)$$

где E — критерий оптимальности;

u — управляющее воздействие;

n — число станций на полигоне.

Необходимо выбрать такие значения управляющих воздействий, которые обращают функцию (235) в минимум при ограничениях:

$$\left.\begin{aligned} &n_{oi} + n_{\text{д}i} \leqslant n_{\text{ну}i}, \quad i = 1, 2, \ldots, p-1; \\ &\kappa_i \leqslant n_{\text{сп}i}, \qquad\quad i = 1, 2, \ldots, p-1; \\ &n_{\text{ну}i} \leqslant n_{\text{сп}i} \leqslant n_{\text{по}i}, \ i = 1, 2, \ldots, p-1, \end{aligned}\right\}$$

где $n_{\text{о}}$ — вагонопоток обязательной переработки;

$n_{\text{ну}}$ — перерабатывающая способность сортировочных устройств;

$n_{\text{по}}$ — пропускная способность парка отправления;

$n_{\text{сп}}$ — перерабатывающая способность сортировочного парка;

$n_{\text{д}}$ — дополнительная переработка вагонов на станции;

κ — количество назначений на станции.

В общем виде приведенные затраты, связанные с количеством перерабатываемого вагонопотока и числом назначений, можно записать как

$$E_i = g_i (N_{дi},\ \kappa_i), \tag{236}$$

следовательно, выбор оптимального варианта распределения сортировочной работы сводится к минимизации функции двух переменных

$$R(N_{д1}, N_{д2}, N_{д3}, \ldots, N_{дp-1}, \kappa_1, \kappa_2, \ldots \kappa_{n-1}) = \\ = \min \sum_{i=1}^{p-1} g_i (N_{дi}, \kappa_1). \tag{237}$$

Ограничения, сформулированные ранее, можно представить в терминологии, принятой в динамическом программировании,

$$\left.\begin{array}{l} \sum\limits_{i=2}^{p-1} N_{дi} = \sum\limits_{i=2}^{p-1} N_{нуi} - \sum\limits_{i=2}^{p-1} N_{oi} = N_д^c N_{дi} \geqslant 0; \\ N_{oi} + N_{дi} \leqslant N_{нуi}; \\ N_{нуi} \leqslant N_{сni} \leqslant N_{noi}; \\ \kappa_i \leqslant n_{сni}; \\ \sum\limits_{i=1}^{p-1} \kappa_i = \kappa. \end{array}\right\} \tag{238}$$

Численное решение $N_{дi}$, κ_i основывается, как известно, на вычислении последовательной функции двух переменных

$$f_N (N_д,\ \kappa) = \min R (N_{д1},\ N_{д2},\ \ldots,\ N_{дp-1},\ \kappa_1,\ \kappa_2,\ \ldots,\ \kappa_{p-1}) \tag{239}$$

в области значений, отвечающих ограничениям (238). Отсутствие строгой математической зависимости между $N_д$ и κ не позволяет воспользоваться уравнениями (236) и (239) для непосредственного отыскания оптимального варианта. Как было отмечено выше, на первом этапе при определении абсолютно выгодных назначений задача сводится к одномерному процессу, т. е. к отысканию

$$\min \sum_{i=1}^{p-1} g_i (N_{дi})$$

или

$$R(N_{д1}, N_{д2}, \ldots, N_{дp-1}) = \min \sum_{i=1}^{p-1} g_i (N_{дi}) \tag{240}$$

в области значений, задаваемой соотношением

$$N_{д1} + N_{д2} + \ldots + N_{дp-1} = N_д^c \tag{241}$$

при $N_{дi} \geqslant 0$.

Вычисление функционального соотношения

$$f_N (N_д) = \min [g_N (N_д) + f_{N-1}(N_д - N_{дN}), \tag{242}$$

$$0 \leqslant N_{дN} \leqslant N_д^c,$$

для $N = 2, 3, \ldots, p-1$ сводится к определению таких значений $N_{д2}, N_{д3}, \ldots, N_{дp-1}$, которые могут быть практически получены при уменьшении числа назначений с учетом их структуры и мощности. Причем $f_1 (N_д)$ определяется соотношением $f_1 (N_{д1}) = g_1 (N_{д1})$, $N_{д1} = 0$. Для любой рассматриваемой станции, начиная с $i + 1$ до $p - 1$, $N_{дi}$ принимает значения в интервале $(0, N_{нуi} - N_{oi})$, соответственно которым необходимо вычислить множество $f_N (N_д)$. Значение $N_{до}$ определяется из условия

$$N_{до} = N_{нуi} - N_{oi}. \tag{243}$$

Все значения $N_д$ в интервале $(0, N_{до})$ заменяются дискретным множеством с шагом, равным минимальному значению мощности вагонопотока в исходном состоянии. Для каждой станции определяется значение

$$R_i = \frac{N_{нуi} - N_{oi}}{N_{\min}}. \tag{244}$$

Тогда основное функциональное уравнение (237) заменится аппроксимирующим выражением

$$f_N (N_д) = \min [g_N (N_{\min} R_{сnN}) + f_{N-1} (N_д - N_{\min} n_{сnN})]. \tag{245}$$

Таким образом, расчеты — распределение сортировочной работы между станциями — становятся многошаговыми и проводятся последовательно, причем каждый раз оптимизируется управление только на одном шаге. Для распределения дополнительной переработки большое значение имеет начальная загрузка сортировочного устройства

$$\psi = \frac{N_{oi}}{N_{нгi}}. \tag{246}$$

Обычно вначале рассматривают станции с минимальной начальной загрузкой так, чтобы выровнять загрузку сортировочных устройств на различных составообразующих станциях. Уравнение (246) решают методом последовательных приближений. Начальное приближение $\Sigma N_{до}$ выбирают так, чтобы оно заведомо было больше оптимального значения. Затем устанавливают общие затраты для $\Sigma N_{до}$ и находят начальные приближения $N_{д2}, N_{д3}, \ldots, N_{дp-1}$, для которых и определяют число назначений в сквозном варианте так, чтобы соблюсти ограничения $N_{дi+1} \leqslant N_{до,i+1}\, \kappa_i \leqslant z_i$ при условии, что

$$\sum_{i=1}^{p-1} \kappa_i = \min; \quad \sum_{i=2}^{p-1} N_{дi} = \min, \tag{247}$$

где z_i — число назначений на станции i в сквозном варианте.

В общем виде уравнение, с помощью которого находят оптимальный вариант распределения сортировочной работы, имеет вид

$$W = c_{вч}\left\{\sum_{i=2}^{p-1}[(N_{oi}+N_{дi})\left(\sum_{i} t^{пер}_{техi}+\sum_{i} t^{пер}_{доп\,i}\right)+\right.$$

$$+\sum_{i=2}^{p-1}[(N_{скi}-N_{дi})\left(t^{тр}_{техi}+t^{тр}_{доп}\right)+\sum_{i=1}^{p-1}(N_{эрi}+N_{дi})\,t_{нi}\Big\}+$$

$$+\sum_{i=2}^{p-1}(N_{oi}+N_{дi})\,c_{перi}+\sum_{i=1}^{p-1}E_{изi}, \qquad (248)$$

где $c_{вч}$ — среднесетевая стоимость 1 вагоно-ч;

$c_{пер}$ — стоимость переработки вагона на станции, за исключением затрат, связанных с временем нахождения вагона под накоплением;

$E_{из}$ — затраты, мало зависящие от объема переработки;

$\Sigma t^{пер}_{тех}$ — время на выполнение технических операций для транзитных вагонов с переработкой;

$t^{тр}_{тех}$ — то же без переработки;

$\Sigma t^{пер}_{доп}$ — время дополнительных простоев вагонов, поступивших в переработку;

$t^{тр}_{доп}$ — простой транзитных вагонов без переработки в ожидании отправления;

$t_{н\,i}$ — среднее время накопления.

Используя это уравнение, можно также определить оптимальный вариант плана формирования грузовых поездов на перспективные вагонопотоки и прогрессивные расчетные нормативы. Для этого проанализированы действующие расчетные нормативы и определены перспективные их значения для каждой группы станций. Уточнены также и параметры накопления с учетом характера процесса накопления вагонов на станции. Предлагаемое методическое направление в решении этой задачи предусматривает целенаправленный отбор вариантов распределения сортировочной работы по минимальным затратам приведенных вагоно-часов. Лучшие варианты распределения сортировочной работы используют для определения этапности в развитии и размещении сортировочных станций.

3. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВАГОНОПОТОКАМИ

Вариант системы организации вагонопотоков оценивают двумя показателями: технико-экономическим и затратами вагоно-часов. К сожалению, сферы применения каждого из них не определены. Следует отметить, что технико-экономические оценки надо использовать во всех методах расчета. Это положение нашло отражение в расчетах плана формирования — отыскании наиболее выгодного варианта по затратам приведенных вагоно-часов, т. е. по расходам. Введение в расчеты плана формирования стоимости затрат маневровых средств на переработку вагонов при оценке стоимости 1 вагоно-ч уточняет технико-экономическую оценку вариантов.

Однако наиболее важно, чтобы оптимальный вариант плана формирования учитывал уровень загрузки и интенсивность использования технических средств станций и перегонов. Эти факторы учитываются далеко не в полной мере.

При оценке показателей плана формирования не учитывают также размеры переработки участкового вагонопотока, что затрудняет проверку соответствия общих размеров перерабатываемого вагонопотока пропускной и перерабатывающей способности станций. Отсутствие такой проверки достаточно часто приводит к несоответствию фактической перерабатывающей способности станций числу вагонов, которые требуется перерабатывать на них в вариантах плана формирования.

Как отмечалось ранее, большими неточностями страдают и основные расчетные нормативы плана формирования поездов. Параметр накопления и расчетная экономия от пропуска вагонопотока через станции без переработки постоянны во всех вариантах, что приводит к ошибкам при определении общих затрат приведенных вагоно-часов. Основные показатели плана формирования: суммарные вагоно-часы накопления, суммарные приведенные вагоно-часы переработки, общие приведенные вагоно-часы, число перерабатываемых вагонов, пробег вагона без переработки — противоречивы.

Так, при минимальных простоях вагонов под накоплением количество вагоно-часов переработки и число перерабатываемых вагонов максимальные, а число транзитных вагонов минимальное. И, наоборот, при наибольшем количестве вагоно-часов накопления перечисленные показатели уменьшаются или возрастают в противоположном направлении. Это затрудняет решение вопроса об оптимизации показателей плана формирования.

Еще один недостаток существующих показателей плана формирования поездов — соотнесение их на разные измерители. Так, затраты вагоно-часов подсчитывают за сутки, а пробег — на один вагон. Не нашел отражения в показателях и уровень концентрации вагонопотоков на крупнейших сортировочных станциях. В результате использовать существующие показатели для комплексной оценки системы организации вагонопотоков затруднительно.

Оптимальный вариант системы управления вагонопотоками соответствует минимальной стоимости переработки и перемещения вагона. Поэтому показатели должны оценивать качество использования грузового вагона. Оптимальному управлению вагонопотоками соответствуют: минимальные расходы на перевозку в части, зависящей от организации вагонопотоков, при оптимальном времени

нахождения вагонов на станциях и перегонах. В общем виде денежные затраты на переработку и перемещение одного вагона выражаются как

$$e_{в} = \frac{\sum^{n} N_{ст}\, e_{пер} + \sum^{n-1} N_{уч}\, e_{уч} + \sum^{n} (N_{ст}\, t_{нх} + N_{уч}\, t_{уч})\, e_{вч}}{\sum^{N} N_{i\,общ}}, \tag{249}$$

где $t_{нх}$ — время нахождения вагона на станции;

$N_{ст}$, $N_{уч}$ — вагонопоток, проходящий соответственно через станцию или участок (сумма транзитного и перерабатываемого);

$e_{пер}$, $e_{уч}$, $e_{вч}$ — стоимость соответственно переработки вагона на станции, перемещения по участку и 1 вагоно-ч;

$e_{в}$ — стоимость 1 вагоно-ч переработки и перемещения одного вагона по железнодорожному полигону.

Если расходы на переработку и перемещение вагонов по железнодорожному полигону определяются при заданной и неизменной пропускной и перерабатывающей способности станций и участков, оптимизация варианта заключается в том, чтобы найти наиболее целесообразный уровень загрузки технических средств полигона. Однако нельзя забывать и о том, что минимальные суммарные расходы на обработку и перемещение вагонов соответствуют наиболее полному использованию технических средств полигона. Иначе говоря, при прочих равных условиях получение минимальных расходов связано с максимальной концентрацией переработки вагонопотоков на крупнейших сортировочных станциях сети с наиболее полным заполнением пропускной способности наиболее развитых в техническом отношении двухпутных участков. Для прямолинейных направлений, имеющих примерно одинаковое техническое оснащение, вместо общих денежных затрат целесообразно устанавливать в качестве показателя системы организации вагонопотоков только время нахождения вагонов на всех станциях — средневзвешенную величину для вагонов с переработкой и без переработки:

$$T_{нх} = \frac{1}{24} \frac{\Sigma N_{пер}\, t_{пер} + \Sigma N_{тр}\, t_{тр}}{\Sigma N_{пер} + \Sigma N_{тр}}, \tag{250}$$

где $T_{нх}$ — время нахождения вагона на всех станциях;

$t_{пер}$, $t_{тр}$ — время нахождения вагона с переработкой и без переработки на одной станции;

$N_{пер}$, $N_{тр}$ — число вагонов, проходящих станцию с переработкой и транзитом.

Для прямолинейного направления показатель системы организации вагонопотоков — время нахождения вагона на станциях — соответствует оптимальному управлению, так как при этом все вагоны находятся на направлении наименьшее время и, следовательно, наиболее быстро перемещаются по нему. Целесообразны и другие вспомогательные показатели, характеризующие пробеги вагонов и загрузку основных сортировочных станций, а именно:

пробег вагона без переработки

$$l_{s/n} = \frac{\Sigma ns}{\Sigma n^{ф}_{отпр}}, \tag{251}$$

где Σns — общие вагоно-километры пробега вагонов на расчетном полигоне за определенный период (например, в среднем в сутки);

$n^{ф}_{отпр}$ — количество отправляемых с расчетных станций вагонов за определенный период;

показатель концентрации сортировочной работы, характеризующий загрузку всех сортировочных станций полигона,

$$\kappa = \frac{\Sigma n_{пер}}{\Sigma n_{отпр}}, \tag{252}$$

где $\Sigma n_{пер}$ — количество фактически переработанных вагонов на всех станциях;

$\Sigma n_{отпр}$ — число отправленных вагонов со всех расчетных станций.

Для сравнения вариантов плана формирования, действующих в разное время с различными размерами вагонопотоков, целесообразны показатели: удельное время нахождения вагонов на станциях, отнесенное к размерам работы (погрузка плюс прием груженых) направления или полигона сети $U_{р}$ и к 100 км пробега,

$$T^{уд}_{ну} = \frac{1}{24} \frac{\Sigma N_{пер}\, t_{пер} + \Sigma N_{тр}\, t_{тр}}{U_{р}} \tag{253}$$

и

$$T^{уд}_{пр} = \frac{4{,}17\,(\Sigma N_{пер}\, t_{пер} + \Sigma N_{тр}\, t_{тр})}{\Sigma ns}. \tag{254}$$

Удельное время нахождения вагона на станции, отнесенное к 100 км пробега, позволяет при сравнении показателей не учитывать влияние рейса на показатели использования вагона. К вспомогательным показателям следует отнести также:

число перерабатываемых и транзитных вагонов на каждой станции;

соответствие числа перерабатываемых вагонов мощности технических средств и степень интенсивности ее использования.

Глава 9 РАЗВИТИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Несмотря на очевидную эффективность концентрации переработки вагонов на крупных сортировочных станциях, она все еще распределена между большим числом станций. Это объясняется многими обстоятельствами: исторически сложившимися условиями размещения сортировочных станций, несоответствием мощности технической оснащенности станций перерабатываемому вагонопотоку и др. Техническое оснащение сортировочных станций, не согласованное с ростом вагонопотока в перспективе, приводит к несоответствию их перерабатывающей способности требуемому объему работы на них и, как следствие, к значительным межоперационным простоям при обработке подвижного состава.

Время нахождения вагона на станции завышается и вследствие несоответствия производственных мощностей последовательно расположенных технических элементов станций. Наиболее заметно это в подсистеме парк приема — горка, что приводит не только к большим простоям подвижного состава в парке приема и на подходах, но в ряде случаев и к недоиспользованию наиболее дорогого элемента станции — сортировочной горки. Поэтому определение перспектив развития сортировочных станций и этапного технического их оснащения — одна из важнейших задач эксплуатационной науки.

Размеры капитальных вложений на развитие сортировочных станций в значительной степени зависят от принятой системы организации вагонопотоков. Если ориентироваться на увеличение числа формируемых поездов дальних назначений, повышение транзитности, сокращение переработки вагонов с увеличением времени нахождения их под накоплением, то необходимо развивать сортировочные парки со значительно увеличенным количеством сортировочных путей. При этом можно будет в меньшей степени увеличивать суммарную мощность горочных устройств, поскольку возрастут общие размеры транзитного вагонопотока, следующего без переработки. Если не ориентироваться на сокращение простоя вагонов под накоплением, то потребуется увеличить перерабатывающую способность горок, уменьшив затраты на развитие сортировочных парков, укладку дополнительных путей, так как при такой системе организации вагонопотоков сокращается количество дальних назначений, увеличиваются вагонопотоки, следующие с переработкой.

Комплексное этапное техническое оснащение сортировочных станций и участков предусматривает разработку совершенной системы организации вагонопотоков, основанной на оптимизации как времени нахождения вагонов на станциях, так и затрат на их развитие. Анализ фактического положения на сети позволил разработать рекомендации по этапному развитию и экономическому наращиванию мощности сортировочных станций. Установлено, что наибольшее значение для организации вагонопотоков имеет определение потребной мощности сортировочных комплектов станций. В данной работе на примере именно этой подсистемы описаны основные принципы методики этапного развития сортировочных станций. Используя их, можно рассматривать развитие и других технических элементов. Особое внимание надо обращать на согласованное развитие этих элементов и учет всех расходов, зависящих от технического оснащения и вариантов организации вагонопотоков. В общем виде оптимальный вариант этапного развития сортировочной станции определяют оптимизацией функционала

$$E^{\text{ст}}_{\text{общ}} = E^{f_1}_{\text{пп}-\text{г}}(\lambda_i, x_i, \Psi_i, l_i, \Э_i, A_i) + E^{f_2}_{\text{сп}-\text{пф}}(\lambda_j, x_j, \Psi_j, \kappa_{\text{п}j}, l_j, \Э_j, A_j) + E^{f_3}_{\text{г.о}}(\lambda_\gamma, x_\gamma, \Psi_\gamma, l_\gamma, \Э_\gamma, A_\gamma), \quad (255)$$

где E — частичные функционалы расходов на подсистемы парк приема — горка, сортировочный парк — парк формирования, парк отправления;

λ — интенсивность входящего потока;

ψ — коэффициент загрузки подсистемы;

x — количество дополнительных путей (приемных, сортировочных, вытяжных и отправочных);

l — длина путей;

$\Э$ — годовые эксплуатационные расходы на содержание и эксплуатацию подсистемы;

A — дополнительные расходы на строительство или усиление технических элементов подсистемы;

$\kappa_{\text{п}}$ — количество поездных назначений.

Из функционала находят зависимости затрат на определенное мероприятие по усилению мощности станции. С этой целью получают уравнения в частных производных по всем составляющим и затем решают их совместно. Но классическими методами решить подобные уравнения трудно, так как составляющие их элементы — ряд нелинейных функций. В таких условиях можно использовать метод динамического программирования. Для определения оптимального варианта усиления мощности элементов технического развития сортировочных станций принимают следующие исходные данные:

расчетный вагонопоток и его рост в перспективе;

затраты на строительство вновь укладываемых путей (приемо-отправочных, сортировочных, вытяжных) и эксплуатацию как имеющихся, так и вновь укладываемых;

затраты на переустройство и оборудование сортировочной горки,

расходы на маневровую работу (расформирование и формирование поездов), включая содержание маневровых локомотивов;

расходы на выполнение и ожидание технологических операций;

расходы на содержание поездов из-за неприема станцией;

расходы и амортизационные отчисления на устройства, входящие в различные мероприятия по усилению перерабатывающей и пропускной способности станций;

расходы на содержание бригад, занимающихся осмотром и ремонтом вагонов.

Для разветвленных направлений целесообразно сравнение вариантов усиления пропускной способности на параллельных ходах, включая и развитие параллельно расположенных сортировочных станций. Эффективность того или иного мероприятия во многом зависит от правильно установленных размеров расчетного вагонопотока и его роста в перспективе. Анализ работы станций, включенных в расчеты общесетевого плана формирования, позволил установить характер изменения вагонопотоков — в среднем по экспоненте.

Расходы на внедрение новых технических средств, их эксплуатацию и амортизационные отчисления в расчетах приняты согласно исследованиям Гипротранстэи МПС и ВНИИЖТ [12]. Принято, что мероприятия по механизации и автоматизации сортировочных горок окупаются за срок до 10 лет, что позволило до решения общего функционала наметить наиболее приемлемые мероприятия для развития горок. Установлено, что с увеличением количества путей в сортировочном парке расходы на переустройство горки при одном и том же вагонопотоке возрастают при незначительном изменении сроков окупаемости. Это положение существенно влияет на этапность усиления подсистемы парк приема — горка, а также на выбор исходной и конечной мощности подсистемы.

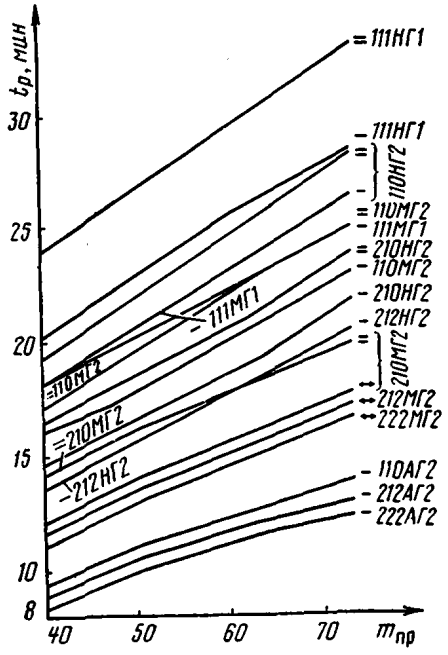

Рис. 47. Время занятия горки как функция от $m_с$, расположения парков, количества путей:

— последовательное, = параллельное расположение парков прибытия и сортировочного;

НГ, МГ, АГ — соответственно немеханизированная, механизированная и автоматизированная сортировочная горка

К расчетным элементам оптимального функционирования подсистемы парк приема — горка относятся зависимости между временем занятия горки роспуском составов $t_р$ и мощностью технических средств (рис. 47) (техническое оснащение подсистемы представлено кодами. Например, 110 НГ2 означает, что один путь надвига, один спускной, обходного пути нет, горка немеханизированная, на ней работает два локомотива). Характер этих зависимостей проанализирован отдельно для немеханизированных, механизированных и автоматизированных горок в связи с взаимным расположением парка приема и горки, числом вагонов в составе, числом путей надвига и обгона, наличием и мощностью маневровых локомотивов. Определено также влияние величины составов $m_{пр}$ на продолжительность их расформирования $t_р$ на горках с разной технической оснащенностью. С увеличением $m_{пр}$ время расформирования на автоматизированной горке возрастает значительно медленнее, чем на немеханизированной или механизированной.

2. МЕТОДИКА УСИЛЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОРТИРОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА

В течение перспективного срока планирования можно последовательно осуществить несколько мероприятий. Их совокупность образует схему усиления пропускной и перерабатывающей способности станции. В каждой из этих схем могут быть различные сочетания мероприятий и сроки их проведения. Необходимо выбрать схему усиления перерабатывающей способности комплекта, т.е. определить такой набор мероприятий и сроки их осуществления, чтобы сумма приведенных затрат была минимальной. Найденная таким образом последовательность мероприятий — оптимальная схема этапного развития перерабатывающей способности сортировочного комплекта. Методика решения этой задачи сводится к следующему.

Разрабатывают возможные в эксплуатационном и строительном отношении модели (этапы) технического оснащения и путевого развития горки. Каждой модели соответствует вполне определенная перерабатывающая способность горки. Таким образом, существующий сортировочный комплект находится как бы в n технических состояниях (этапах развития). Каждое сочетание этапов развития логически анализируется на возможность перехода из одного состояния в другое с более совершенным техническим оснащением. В качестве ограничений принимаются:

перерабатывающая способность последующего этапа (модели) больше, чем предыдущего;

техническое развитие последующей модели не ниже предыдущей.

Так, недопустим переход от этапа развития горки с развитой горловиной (два пути надвига и роспуска) к слабо развитой горловине (один путь надвига и роспуска), а также от горки, оборудованной АРС, АЗСР и ТГЛ, к горке, не оборудованной этими устройствами. Расположив модели в порядке возрастания перерабатываю-

щей способности, получим линейный граф, связывающий возможные состояния сортировочной горки. Граф этот ориентированный, т. е. дугам, соединяющим узлы (очереди развития), задана определенная ориентация (направление), и в нем нет замкнутых путей (циклов). Один из его узлов соответствует модели с техническим оснащением, путевым развитием и числом горочных локомотивов той горки, которую необходимо развивать в течение рассматриваемого планируемого периода T.

Исходя из потребной в перспективе перерабатывающей способности сортировочного комплекта, намечают на графе узел, соответствующий модели, обеспечивающей ее к концу срока планирования. Этим узлом может быть как конечный, так и любой из промежуточных (или даже несколько промежуточных). Таким образом, из общего линейного графа можно выделить расчетный граф, связывающий модели, соответствующую техническому развитию данной горки и одну или несколько намеченных исходя из потребной в перспективе перерабатывающей способности (рис. 48). Особенности расчетного графа следующие.

1. Вершины графа — сроки ввода каждой очереди, т. е. перехода из одной очереди развития комплекта в другую. Определяя сроки функционирования каждой очереди, следует исходить из того, чтобы горка имела необходимые резервы перерабатывающей способности, что позволит обеспечить устойчивую ее работу при неравномерном прибытии поездов в наиболее неблагоприятных ситуациях.

2. В выбранной схеме мероприятия рассматривают только в определенном порядке: $0 \leqslant t_i \leqslant t_j \leqslant t_k$ и т. д., где i_i, t_j, t_k — сроки эксплуатации комплекта при очередном мероприятии.

3. Дугам графа присваивают характеристики, представляющие суммарные приведенные затраты, связанные с переработкой вагонов, усилением комплекта на данном этапе и содержанием технических устройств,

$$E_{ij} = \frac{K_{ij} + E_{ij}^{\text{доп}}}{(1+E_{\text{нп}})^{t_{\text{м}j}-t_0}} + \sum_{t=t_{\text{п}j}-t_0+1}^{t_{\text{к}j}-t_0} \frac{E_{ij}^{\text{мр}}(t)+E_{ij}^{\text{вр}}(t)}{(1+E_{\text{нп}})^t} + \\ + \Э_{\text{сод}j} \sum_{t=t_{\text{п}j}-t_0+1}^{t_{\text{к}j}-t_0} \frac{1}{(1+E_{\text{нп}})^t}, \qquad (256)$$

где K_{ij} — единовременные капитальные затраты на этапе j развития комплекта;

$t_{\text{п}j}$ — начальный год этапа γ;

$t_{\text{к}j}$ — конечный год этапа γ;

$\Э_{\text{сод}j}$, $E_{ij}^{\text{мр}}(t)$, $E_{ij}^{\text{вр}}(t)$ — приведенные эксплуатационные расходы соответственно на содержание технических устройств, выполнение маневровой работы и расходы, связанные с простоем подвижного состава на этапе j;

$E_{ij}^{\text{доп}}$ — дополнительные эксплуатационные расходы в связи с выполнением работ на действующих путях.

4. Вершинам графа присваивают потенциалы, представляющие суммарные приведенные затраты, связанные с развитием и эксплуатацией комплекта на предыдущих этапах и усилением на данном этапе:

$$E_j = \Sigma E_{oi} + \left[\frac{K_{ij} + E_{ij}^{\text{доп}}}{(1+E_{\text{нп}})^{t_{\text{п}j}-t_0}} + \right. \\ \left. + \sum_{t=t_{\text{п}j}-t_0+1}^{t_{\text{к}j}-t_0} \frac{E_{ij}^{\text{мр}}(t)+E_{ij}^{\text{вр}}(t)}{(1+E_{\text{нп}})^t} + \Э_{\text{сод}j} \sum_{t=t_{\text{м}j}-t_0+1}^{t_{\text{к}j}-t_0} \frac{1}{(1+E_{\text{нп}})^t} \right], \qquad (257)$$

где ΣE_{0i} — суммарные приведенные затраты, связанные с развитием и эксплуатацией комплекта на предыдущих этапах.

Каждая вершина графа (кроме конечной) задается не однозначно, а некоторой областью значений — сроков ввода мероприятий. Это объясняется тем, что оптимальный срок зависит от величины капитальных вложений на данном этапе и экономии эксплуатационных расходов в результате осуществления данных мероприятий, а обе эти величины переменные. Расчетный граф включает множество схем развития комплекта, каждой из них соответствует непрерывная цепочка дуг, характеризующая суммарные приведенные строительно-эксплуатационные затраты на усиление комплекта в течение перспективного периода времени с учетом коэффициента отдаления. Эти затраты — критерий оптимальности (целевая функция):

$$E_{\text{пр}s} = \sum_{1}^{n_s} \left[\frac{K_{ij,s} + E_{ij,s}^{\text{доп}}}{(1+E_{\text{нп}})^{t_{\text{п}j,s}-t_0}} + \right. \\ \left. + \sum_{t=t_{\text{п}j,s}-t_0+1}^{t_{\text{к}j,s}-t_0} \frac{E_{ij,s}^{\text{мр}}(t)+E_{ij,s}^{\text{вр}}(t)}{(1+E_{\text{нп}})} + \Э_{\text{сод}\,j,\,s} \sum_{t=t_{\text{п}j,s}-t_0+1}^{t_{\text{к}j,s}-t_0} \frac{1}{(1+E_{\text{но}})^t} \right], \qquad (258)$$

где s — номер (индекс) схемы этапного усиления рассматриваемого комплекта;

n_s — число этапов в данной схеме.

Метод динамического программирования, в основе которого лежит разбивка задачи большой размерности на последовательность шагов, на каждом из которых оптимизируется задача меньшей размерности, позволяет избежать подсчета приведенных строительных и эксплуатационных затрат для всех очередей развития комплекта. Задача сводится к следующему виду:

управляемые переменные, с помощью которых можно изменять состояние системы и характеристики ее функционирования, и соответствующие ограничения группируют по шагам, и многошаговый процесс решения исследуется в определенной последовательности;

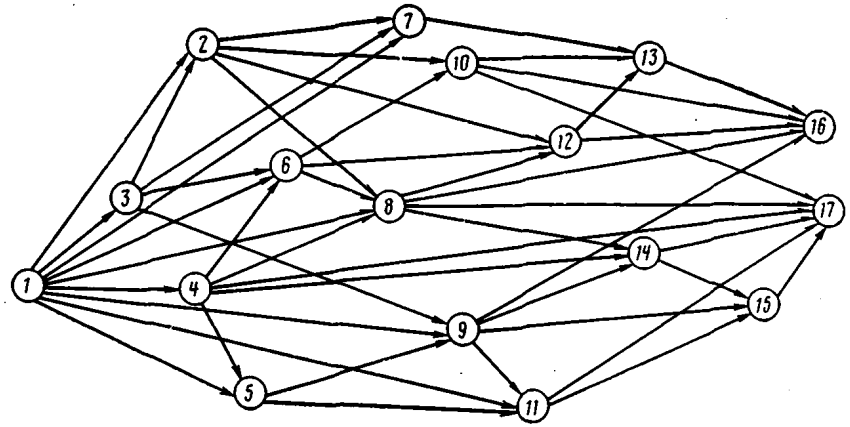

Рис. 48. Расчетный граф, связывающий возможные состояния развития сортировочного комплекта

единственная информация о предыдущих шагах, которая используется для выбора оптимальных значений переменных на рассматриваемом шаге, заключена в так называемой переменной состояния;

решение, принимаемое при заданном текущем состоянии системы, влияет на состояние на последующем шаге;

оптимальность текущего решения оценивается с учетом прогнозируемого экономического эффекта для рассматриваемого шага и всех последующих шагов.

Управляемые переменные, а также переменные состояния и шага принимают только целочисленные значения. Процесс принятия решений — конечное число шагов. На результаты и переходы от одного состояния (этапы развития) в другое не влияют случайные факторы. Таким образом, можно определить оптимальные этапы усиления рассматриваемого комплекта, используя алгоритм нахождения кратчайшего маршрута на ориентированной ациклической сети (расчетном графе).

Обозначим символами s — некоторое состояние комплекта и s_n — множество всех возможных состояний его на шаге n. Эти состояния определяются переменными, характеризующими техническое оснащение и путевое развитие сортировочной горки с оптимальным сочетанием параметров рассматриваемого комплекта. Примем, что α_n — это решение, выбранное на шаге n, а $D_n(s)$ — все допустимые значения α_n при условии, что комплект находится в состоянии s. Наконец, пусть функция $E_n(s, \alpha_n)$ означает непосредственный экономический эффект, достигаемый в результате выбора решения α_n при заданном состоянии s, а $T_n(s\alpha_n)$ — преобразованное состояние сортировочного комплекта на шаге $n-1$. Обратившись к расчетному графу (см. рис. 48), каждому возможному значению s и n сопоставим узел с параметрами $[s, n]$, а каждому значению α_n в $D_n(s)$ поставим в соответствие дугу из узла $[s, n]$ в узел $[T_n(s, \alpha_n), n-1]$ с приве-

денными суммарными затратами на развитие и эксплуатацию комплекта $E_n(s, \alpha_n)$. Тогда реккурентное соотношение динамического программирования — каноническая форма записи задачи, будет иметь вид

$$f_n(s) = \min_{\alpha_n \in D_n(s)} \{E_n(s, \alpha_n) + f_{n-1}[T_n(s, \alpha_n)]\} \qquad (259)$$

при любом s в s_n.

Это означает, что надо вычислить все возможные значения приведенных затрат на реконструкцию и эксплуатацию комплекта, отвечающие различным стратегиям, суммируя затраты на очередном этапе и соответствующие оптимальной стратегии на всех последующих этапах. Суммы следует сравнить между собой и выбрать такое условное оптимальное решение [оптимальный выбор состояния $I_n(s, \alpha_n)$], при котором значение ее минимально.

Важная особенность реккурентного соотношения динамического программирования: для принятия оптимального решения на шаге n не требуется находить значения управляемых переменных, обусловливающих эффект $f_{n-1}[T_n(s, \alpha_n)]$. Это означает, что на каждом шаге оптимизация проводится лишь по ограниченному числу управляемых переменных и в последующих вычислениях используются только значения целевой функции. Вычислительный процесс распадается на две стадии: предварительную и окончательную. На предварительной определяется для каждого шага условно оптимальное решение [оптимальный выбор состояния $T_n(s, \alpha_n)$], зависящее от состояния s, достигнутого в результате предыдущих шагов, и условный экономический эффект на всех оставшихся шагах, начиная с данного, также зависящий от состояния s. На окончательной стадии находится для каждого шага окончательное (безусловное) оптимальное решение. Предварительная (условная) оптимизация производится по шагам в обратном порядке от последнего шага к первому; окончательная (безусловная) — также по шагам, но в естественном порядке от первого шага к последнему.

Принцип вычислительного процесса для определения оптимальных этапов развития станции следующий: оптимальная стратегия такова, что каков бы ни был путь достижения некоторого состояния, последующие решения должны принадлежать оптимальной стратегии для части пути, начинающейся с этого состояния.

Реккурентное соотношение (259) — теоретический метод индуктивного получения последовательности $\{f_n(s)\}$, если $f_1(s)$ известна. Состояние s рассматриваемого комплекта на последнем шаге определено. Поэтому значениям $f_1(s)$, обозначающим минимальные приведенные затраты на последнем шаге, соответствуют дуги, связывающие конечный узел графа со всеми возможными промежуточными узлами, из которых можно попасть в него в один шаг. Теперь можно, одно за другим, построить цепочку условных оптимальных решений. Действительно, зная $f_1(s)$, можно из соотношения (259) найти значения $f_2(s)$ и соответствующих условных оптимальных решений $\alpha_2(s)$, затем $f_3(s)$ и $\alpha_3(s)$ и т. д., вплоть до последнего от конца (первого)

шага $f_n(s)$ и $\alpha_n(s)$. Функция $f_n(s)$ — минимальное значение целевой функции определяет минимальные приведенные затраты, связанные с развитием и эксплуатацией комплекта в течение планируемого периода T. Таким образом, предварительная оптимизация закончена— найдено минимальное значение целевой функции и условное оптимальное решение для каждого шага.

Вторая стадия — нахождение безусловного (окончательного) оптимального решения. Всю последовательность шагов проходим еще раз, но теперь уже от начала к концу. На первом шаге принимается определенное ранее условное оптимальное решение $\alpha_n^*(s)$, в результате чего комплект переходит в новое состояние $[T_n(s, \alpha_n), n-1]$. В процессе оптимизации от конца к началу найдены условные оптимальные решения, выбранные на втором шаге, для любого результата первого шага. Взяв из них то, которое приводит комплект в состояние $[T_n(s, \alpha_n), n-1]$, получим оптимальное решение на втором шаге $\alpha_{n-1}^*(s)$ и так до тех пор, пока не найдем оптимальное решение на последнем шаге $\alpha_1^*(s)$ и конечное состояние рассматриваемого комплекта. В результате этих вычислительных операций находим возможные минимальные приведенные затраты на усиление комплекта в течение планируемого периода времени и совокупность оптимальных способов управления состоянием его перерабатывающей способности на каждом из шагов.

Вид реккурентного соотношения динамического программирования (259) достаточно прост, поэтому составить программу решения задачи на ЭВМ не трудно. Но ввиду того, что алгоритм отыскания кратчайшего пути на ациклической ориентированной сети пригоден лишь для сети со строго определенным числом шагов, предварительно следует выбрать и сгруппировать из общего числа возможных вариантов варианты с одинаковым числом шагов. Затем в каждой группе вариантов, пользуясь алгоритмом, найти оптимальный вариант; и, наконец, после сравнения их (оптимальных внутри каждой группы с одинаковым числом шагов) — оптимальный вариант этапного развития сортировочного комплекта. Если два или более вариантов различаются приведенными затратами незначительно, то выбирают тот из них, в котором количество этапов развития наименьшее. Такой подход к выбору этапности развития станций позволяет рассмотреть все известные мероприятия по повышению их перерабатывающей способности с любой степенью детализации решений.

3. СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ ПРИ РАЗВИТИИ СОРТИРОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА

Анализом ряда проектов реконструкции односторонних и двусторонних сортировочных станций выявлена стоимость основных сооружений и единицы работы, выраженной в обычно принимаемых измерителях. Рассмотрены проекты и сметы строительства новых сортировочных станций, а также механизации и автоматизации сортировочных горок. Строительная стоимость реконструкции станции в различных топографических и геологических условиях определяется по объемам работ (с учетом материалов) и стоимости их на измеритель (1 м³ земляных работ, 1 км укладки пути, 1 комплект стрелочного перевода и др.). Последняя определяется по сборникам единых районных единичных расценок (ЕРЕР), прейскурантам районных расценок (ПРЦ) и другим нормативным документам с учетом коэффициентов пересчета в новые цены(материалы Гипротрансстроя). Через 1—2 года после окончания строительства к стоимости земляных работ, определенной по расценкам, добавляют затраты на передислокацию мехколонн, которые равны 2% основных затрат на строительство и на их обустройство — 10%. Таким образом, затраты на передислокацию и обустройство мехколонн увеличивают основные строительные затраты на 12%.

Строительно-монтажные работы при реконструкции станций требуют предоставления «окон» или кратковременного прекращения движения и закрытия некоторых районов станции. И предоставление «окон» и тем более временное прекращение движения на реконструируемом участке вызывают определенные затруднения в эксплуатационной деятельности станции и ведут к дополнительным затратам, обусловленным увеличением простоя поездов и вагонов. Анализ технологии работы сортировочного комплекта при предоставлении «окон» для строительных и монтажных работ позволяет выявить следующие виды этих дополнительных затрат:

задержка поездов из-за неприема станцией на подходах;

увеличение времени нахождения вагонов на станции;

снижение темпа расформирования составов;

срывы поездов с графика вследствие позднего формирования, вызванного нарушением подвода поездов из-за «окна». Этот вид затрат не нормируется, так как определить их сложно. Однако такие дополнительные затраты существенно влияют на выбор оптимальной очередности ввода различных мероприятий для усиления перерабатывающей способности рассматриваемого комплекса. Оказывается, что экономически целесообразно приблизить начало реконструктивных работ даже при относительно невысоких загрузках станционных устройств.

По разработанной в МИИТе модели определены дополнительные эксплуатационные расходы от закрытия отдельных элементов сортировочного комплекта на некоторое время. При этом рассматривалось, как влияют на время нахождения вагона на станции и количество задержанных из-за неприема поездов закрытие на период «окна» одного пути в парке приема; прекращение роспуска составов с горки; выключение одного из пучков сортировочного парка; закрытие одного из вытяжных путей формирования. В табл.11 и 12 представлены рассчитанные на ЭВМ абсолютные и относительные величины изменения показателей работы станции, обусловливающих дополнительные расходы в зависимости от продолжительности «окна».

Таблица 11

Влияние на величину эксплуатационных показателей работы сортировочной станции предоставления «окон» для выполнения строительных и монтажных работ на элементах сортировочного комплекта

(односторонняя сортировочная станция с последовательным расположением парков, горка механизированная, 3 горочных локомотива, 2 пути надвига и 1 роспуска, объездного пути нет; $N_{пер}$=6250 ваг.; число путей в парке приема 10, в сортировочном — 32, в парке отправления—13; число вытяжных путей — 4, число маневровых локомотивов — 4)

Операция	Продолжительность «окна», ч	Показатели, обусловливающие дополнительные эксплуатационные расходы								
		$p_{зд}$, %	$n_{зд}$	$\overline{W}_{пп}$, мин	$t_{тз}$, мин	$t_{сф}$, мин	$t_{по}$, мин	$t_{нак}$, ч	$t^{мк}_{ст}$, ч	$m_{доп}$
Закрытие одного из пучков в сортировочном парке	0	0,4	0,5	0,1	54,8	33,2	73,2	3,18	5,86	46
	2	3,9	3,9	0,6	59,5	34,8	73,3	3,18	5,98	115
	3	5,7	5,9	1,0	60,0	35,4	73,4	3,19	6,00	240
	4	7,4	7,6	2,2	62,4	36,0	73,4	3,21	6,07	411
Закрытие половины путей в сортировочном парке	2	9,4	9,6	3,3	63,0	33,2	77,7	3,19	6,08	315
	3	19,3	19,8	7,2	71,5	37,5	81,2	3,21	6,39	480
	4	29,9	30,8	11,1	80,6	44,9	85,7	3,24	6,76	725
Прекращение роспуска составов с горки	2	19,5	18,9	7,6	80,0	37,0	77,3	3,18	6,41	75
	3	40,2	41,4	18,7	90,3	40,0	83,2	3,18	6,74	174
	4	65,2	67,1	46,7	108,8	43,7	87,9	3,19	7,19	270
Закрытие одного из вытяжных путей формирования	2	6,1	6,3	1,2	59,8	39,4	73,5	3,18	6,06	63
	3	9,5	9,6	2,4	62,3	41,0	74,6	3,18	6,13	124
	4	13,6	14,0	3,8	65,4	42,0	75,6	3,18	6,23	177
Закрытие одного из путей в парке приема	2	2,4	2,5	0,2	54,9	34,6	74,0	3,18	5,90	67
	3	5,8	6,0	1,5	56,3	35,7	74,6	3,18	5,96	73
	4	11,4	11,6	6,6	58,2	36,7	75,2	3,18	6,03	80
Закрытие путей одной секции парка приема	2	5,0	5,2	0,8	59,9	37,3	78,3	3,18	6,10	72
	3	10,7	11,0	4,2	66,7	37,4	79,0	3,18	6,23	76
	4	17,6	18,1	8,1	75,3	37,6	79,7	3,18	6,41	81
Закрытие одного из путей надвига	2	3,7	3,8	0,3	59,6	33,3	75,3	3,18	5,99	68
	3	6,5	6,7	1,1	62,2	33,3	76,0	3,18	6,12	76
	4	8,3	8,6	1,6	65,2	33,3	76,7	3,18	6,18	80

Расчетами, выполненными методом статистического моделирования, получены: количество задержанных на подходах к станции поездов $p_{зд}$ в % и $n_{зд}$ в абсолютных числах; средняя продолжительность задержки одного поезда, время нахождения вагонов $t_{пп}$ в парке прибытия, $t_{сф}$ — от окончания накопления до окончания формирования; $t_{по}$ — в парке отправления, $t_{нак}$ — под накоплением, $t_{ст}$ — в целом на станции; дополнительная (повторная) переработка вагонов на горке — $m_{доп}$. Установлено, что закрытие на период «окна» элементов сортировочного комплекта в основном влияет на

Таблица 12

Влияние на величину эксплуатационных показателей работы станции предоставления «окон» для выполнения строительных и монтажных работ на элементах сортировочного комплекта

(односторонняя сортировочная станция с последовательным расположением парков, горка механизированная, 3 горочных локомотива, 2 пути надвига и 1 роспуска, обходного пути нет. $N_{пер}$=5900 ваг. В парке приема 9 путей, в сортировочном — 24, в парке отправления — 11, вытяжек формирования — 3, маневровых локомотивов — 3; число групп ПТО — 5)

Операция	Продолжительность «окна», ч	Показатели, обусловливающие дополнительные эксплуатационные расходы								
		$p_{зд}$, %	$n_{зд}$	$\overline{W}_{п-п}$, мин	$t_{пп}$, мин	$t_{сф}$, мин	$t_{по}$, мин	$t_{нак}$, ч	$t^{мх}_{ст}$, ч	$m_{доп}$
Закрытие одного пучка в сортировочном парке	0	0,8	0,9	0,1	63,0	30,0	46,0	2,19	4,53	0
	2	6,7	6,8	1,4	65,1	31,0	46,0	2,19	4,58	6
	3	10,8	10,9	2,7	67,2	31,6	46,1	2,21	4,61	12
	4	17,3	17,5	4,5	70,1	33,0	46,2	2,23	4,67	23
Закрытие половины путей в сортировочном парке	2	8,7	8,8	2,1	70,1	33,2	49,6	2,2	4,75	13
	3	20,7	20,9	7,4	78,4	35,9	54,1	2,21	5,03	20
	4	32,1	32,3	10,2	88,9	41,1	58,6	2,24	5,38	301
Прекращение роспуска составов с горки	2	19,9	20,1	8,7	78,1	32,8	50,1	2,19	4,87	47
	3	43,8	44,0	23,6	94,3	36,1	55,6	2,19	5,29	121
	4	64,6	64,9	54,2	114,1	40,2	60,3	2,2	5,78	192
Закрытие одного из вытяжных путей формирования	2	7,1	7,1	1,9	69,1	32,6	46,9	2,19	4,70	69
	3	12,1	12,2	2,9	72,2	35,3	47,4	2,19	4,81	132
	4	19,5	19,6	4,8	74,3	38,9	48,1	2,19	4,92	201
Закрытие одного из путей в парке приема	2	2,1	2,1	0,2	63,6	30,4	46,8	2,19	4,55	0
	3	5,6	5,7	1,6	64,9	30,6	48,6	2,19	4,63	0
	4	11,1	11,1	3,9	66,8	30,6	50,1	2,19	4,72	0
Закрытие путей одной секции в парке приема	2	5,3	5,3	1,0	69,1	30,7	47,6	2,19	4,66	0
	3	11,0	11,1	4,3	76,8	30,8	50,3	2,19	4,83	0
	4	18,0	18,1	8,1	84,6	30,9	52,6	2,19	4,96	0
Закрытие одного из путей надвига	2	3,8	3,8	0,3	65,8	30,0	46,4	2,19	4,55	0
	3	7,6	7,6	1,1	69,1	30,1	47,1	2,19	4,61	0
	4	8,9	9,0	1,6	72,9	30,2	48,4	2,19	4,70	0

простой вагона в парке приема и в системе формирования. Простой вагона под накоплением неизменен. Дополнительные расходы при предоставлении одного «окна» можно определить умножением величины изменения соответствующего измерителя на его стоимость. Таким образом, дополнительные расходы, связанные с увеличением времени нахождения вагона на станции при закрытии элемента i, находятся по формуле

$$E^{\text{вр}}_{\text{доп}_i} = n_{\text{р}} e_{\text{п-з}} m_{\text{с}} \Delta t_{\text{их}_i}, \qquad (260)$$

где $\Delta t_{\text{их}_i}$ — абсолютный прирост времени нахождения вагона на станции.

Дополнительные эксплуатационные расходы, связанные с задержками из-за неприема станцией,

$$E_{\text{зд}_i} = n_{\text{р}} \Delta P_{\text{зд}_i} e_{\text{о}} + n_{\text{р}} \Delta t_{\text{з}_i} e_{\text{пч}}, \qquad (261)$$

где $\Delta P_{\text{зд}_i}$ — увеличение вероятности задержки одного поезда из-за неприема вследствие закрытия элемента i на период «окна»;

$\Delta t_{\text{з}_i}$ — увеличение простоя одного поезда из-за неприема;

$e_{\text{пч}}$ — стоимость 1 ч простоя грузового поезда, руб.;

$e_{\text{о}}$ — стоимость остановки одного грузового поезда, руб.

Затраты, вызываемые увеличением дополнительной переработки, равны

$$\Delta E_{\text{пер}_i} = \Delta N_{\text{пер}_i} e_{\text{с}}, \qquad (262)$$

где $e_{\text{с}}$ — стоимость повторной переработки одного вагона, руб.;

$\Delta N_{\text{пер}_i}$ — количество повторно сортируемых вагонов из-за закрытия элемента i.

На основании имеющихся данных (продолжительности выполнения реконструктивных мероприятий) определяют необходимое число «окон» для работы на каждом из элементов станции и дополнительные эксплуатационные расходы, которые при переходе от одной очереди развития сортировочного комплекта к другой рассчитывают по формуле

$$E_{\text{доп}} = \sum_{i}^{m} n_{\text{ок}_i} \left(E^{\text{вр}}_{\text{доп}_i} + E_{\text{зд}_i} + \Delta E_{\text{пер}_i} \right), \qquad (263)$$

где m — число элементов станции, закрываемых на период строительных и монтажных работ;

$n_{\text{ок}_i}$ — потребное число «окон» для работы на элементе i.

Для выбора оптимальной очередности этапного развития сортировочного комплекта следует учитывать различающиеся по вариантам простой подвижного состава и затраты на маневровую работу и содержание постоянных устройств. Эксплуатационные расходы определяются умножением соответствующей их нормы на величину показателя. Для расчета эксплуатационных расходов в вариантах проектных решений следует, как правило, использовать одну из

трех основных систем расходных норм — единичных, групповых и укрупненных. «Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, узлов и станций» рекомендуют определять эксплуатационные расходы, кроме местных, на стадии технического проекта преимущественно по групповым нормам. В системе групповых норм взаимосвязанные расходы объединены в группы и отнесены на единицу однородной работы или один объект с типичными условиями. Это позволяет использовать данную систему для вариантов, различающихся числом, расположением или технической характеристикой различных устройств. При сравнении вариантов эксплуатационные расходы подсчитывают по следующим группам: простой подвижного состава, маневровая работа, содержание постоянных устройств, включая общестанционные расходы. Так как величина эксплуатационных расходов зависит от среднесуточных размеров работы, то следует:

для расчета расходов на простой подвижного состава и энергетической части их на маневровую работу принимать размеры движения за сутки среднегодовой интенсивности работы;

расходы на содержание маневровых локомотивов в рабочем состоянии принимать в зависимости от их числа, предусмотренного проектом;

расходы на содержание постоянных устройств определять в зависимости от их типа и технической характеристики, предусмотренных проектом, на размеры работы средних суток максимального месяца; если норма расходов зависит от размеров движения, то ее принимают по размерам движения в сутки среднегодовой интенсивности работы.

Рассмотрим более подробно методику расчетов с использованием групповых норм.

Расходы на простой подвижного состава. При сравнении вариантов развития сортировочного комплекта станции расходы на простой подвижного состава в системе групповых норм определяются по нормам на 1 поездо-ч, 1 составо-ч и 1 локомотиво-ч. При этом следует учитывать простой подвижного состава в парке приема в процессе технического обслуживания вагонов и ожидания технологических операций, а также нахождение на маневрах с учетом простоя маневровых составов из-за враждебности маршрутов и занятости маневровых локомотивов. Время нахождения локомотивов на маневрах не учитывается, так как соответствующие расходы входят в стоимость маневровой работы, затраты же, пропорциональные времени нахождения вагонов на маневрах, в стоимость маневровой работы не включены и поэтому учитываются отдельно.

Расходы на маневровую работу. В системе групповых норм расходы на маневровую работу определяют по двум нормам: на сутки содержания маневрового локомотива, т. е. расходы, связанные с нахождением маневрового локомотива на станции, и на 1 ч маневровой работы, т.е. расходы, непосредственно связанные с объемом выполняемой работы, именуемые энергетической частью расходов по

маневровой работе. Расходы эти определяют суммированием затрат в отдельных маневровых районах (на горке и вытяжных путях), в каждом из которых работает несколько локомотивов. Полная стоимость маневровой работы, выполняемой за сутки, в одном маневровом районе равна

$$E^{м.р}_{сут} = S_м c^{м.л}_{сод} + T_м c_{мч}, \quad (264)$$

где $S_м$ — число маневровых локомотивов в районе;

$c^{м.л}_{сод}$ — норма расходов на содержание одного локомотива в течение суток;

$T_м$ — время выполнения работы в маневровом районе, не включая простоя локомотива или горки при ремонте устройств, отсутствии работы, экипировке и смене бригад, ч;

$c_{мч}$ — расходная норма на 1 ч маневровой работы (энергетическая часть расходов).

В расходной норме на 1 ч маневровой работы учитываются только простои локомотива, связанные с технологией его работы (ожидание освобождения горки при работе двух локомотивов, время на перемену направления движения при перестановке и т.п.). Число часов работы $T_м$ рассчитывают исходя из количества операций (составов) и времени на одну операцию (состав). Последнее (переработку одного состава) устанавливают, используя нормы и методы расчета сортировочных станций, действующие технологические процессы, а также на основе прогрессивных практических и проектных данных для аналогичных условий. Годовые расходы на выполнение маневровой работы на вытяжных путях определены по формуле

$$E^{м.р}_{выт} = 365\left[S_в c^{мл}_{сод} + \left(n_ф t^{хв}_{офs} - T^{г}_{оф}\right) c^{хв}_{нч} + t_в n_ф c^{пер}_{нч}\right], \quad (265)$$

где $c^{мл}_{сод}$ — норма расходов на содержание маневрового локомотива в течение суток с учетом капитальных вложений в маневровые локомотивы.

В сравниваемых вариантах различны техническое оснащение сортировочной горки и число работающих локомотивов. Поэтому расходы на маневровую работу на горке следует определять, учитывая влияние ее производительности на время работы $T_м$, а также стоимость содержания горочного локомотива $c^{гл}_{сод}$. Годовые расходы на выполнение маневровой работы на горке

$$E^{м.р}_{г} = 365[S_г c^{г.л}_{сод} + (n_р T^{с}_{р} + T^{г}_{оф}) c^{г}_{мч}], \quad (266)$$

где $S_г$ — число горочных локомотивов;

$T^{с}_{р}$ — время на расформирование одного состава (полный цикл операций);

$c^{г}_{мч}$ — норма расходов на 1 ч маневровой работы на горке (табл. 13).

Таблица 13

Расходная ставка на 1 ч маневровой работы при последовательном расположении парков приема и сортировки и весе маневрового состава $Q_{бр}$ = 3000 т, руб.

Тип локомотива	Горка								
	немеханизированная		механизированная, роспуск[1]				автоматизированная, роспуск		
			последовательный		параллельный		последовательный	параллельный	
	1 локомотив	2 локомотива	2 локомотива	3 локомотива	3 локомотива	4 локомотива	3 локомотива	3 локомотива	4 локомотива
ТЭМ1	3,36	4,59	5,80 / 5,97	6,18 / 6,36	7,61 / 7,84	8,07 / 8,32	7,16	8,64	8,8[illegible]
ТЭ3 (одна секция)	3,82	5,21	6,55 / 6,75	6,98 / 7,19	8,59 / 8,85	9,12 / 9,39	8,11	9,79	10,0[illegible]
ТЭ2 (одна секция)	3,46	4,72	5,95 / 6,13	6,34 / 6,53	7,81 / 8,04	8,28 / 8,53	7,36	8,89	9,1[illegible]
ТЭМ3	3,55	4,86	6,10 / 6,28	6,50 / 6,70	8,00 / 8,24	8,49 / 8,75	7,55	9,11	9,3[illegible]
ВЛ22М	2,94	3,99	5,09 / 5,24	5,42 / 5,58	6,68 / 6,88	7,09 / 7,30	6,36	7,68	7,89
Э	3,18	4,36	5,50 / 5,67	5,86 / 6,04	7,22 / 7,43	7,66 / 7,89	—	—	—

[1] Числитель — при равномерной скорости роспуска; знаменатель — при переменной.

Содержание постоянных устройств и контингента работников В эксплуатационных расходах учтены следующие годовые расходы, связанные с содержанием:

путей парка приема, сортировочных, вытяжных и прочих путей комплекса (включая земляное полотно, искусственные сооружения, а также затраты на борьбу со снегом и водой;

стрелочных переводов (кроме горочных);

сортировочных горок и стрелочных переводов горочной горловины;

постов централизации, пневматической почты, пунктов технического обслуживания вагонов,

штата станции.

Расходы эти независимо от размеров работы находят умножением соответствующей нормы на величину показателя для рассматрива-

мой очереди развития. При этом в нормы расходов на содержание главных и станционных путей, стрелочных переводов включают амортизационные отчисления. Во все остальные нормы амортизация не включена и ее рассчитывают в зависимости от строительной стоимости устройств, различающихся в вариантах. Расходы на содержание стрелочных переводов горки (головы сортировочного парка) учитывают в нормах расходов на содержание горок.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

Основа современной системы организации вагонопотоков на сети дорог СССР — концентрация сортировочной работы т.е. сосредоточение переработки вагонов на крупных, хорошо оснащенных станциях, снимающая значительную часть работы с участковых и освобождающая районные и местные сортировочные станции от переработки дальних вагонопотоков. По размерам максимальной переработки проверяется, есть ли на станции резервы перерабатывающей способности. Если есть, на нее можно перенести часть сортировочной работы с других станций и в первую очередь с тех, увеличение или освоение переработки на которых сопряжено с крупными капитальными вложениями. Необходимо также для каждой станции установить объем обязательной (минимальной) переработки груженых вагонов. Он складывается из не охваченных отправительскими маршрутами вагонопотоков, которые либо зарождаются, либо погашаются на самой станции и на участках, близлежащих к ней. Обязательно перерабатываются и груженые вагоны, которые поступают на нее в отправительских маршрутах в распыление, а также порожние, освобождающиеся на ней или на участках ее зоны.

Получив размеры обязательной переработки, устанавливают минимальные перерабатывающую способность сортировочных устройств и путевое развитие приемо-отправочных парков. Однако этим не ограничивается минимум потребных работ для развития всех сортировочных станций на полигоне. Может получиться, что объем обязательной переработки для какой-либо действующей сортировочной станции превысит технические возможности ее усиления. Тогда возникнет необходимость строительства в зоне между нею и одной из соседних новой сортировочной станции. При этом следует учитывать возможность сокращения обязательной переработки на смежных сортировочных станциях и, конечно, на той, для которой этот показатель превышал реальные технические возможности. Минимальное потребное развитие сортировочных парков определяется минимальным количеством назначений поездов:

дальних сквозных, которые обеспечены собственным, зарождающимся в зоне данной станции вагонопотоком, удовлетворяющим условиям выделения в самостоятельное назначение;

сборных, участковых, передаточных и вывозных;

скорых и ускоренных грузовых, назначаемых в связи с технологическими особенностями транспортировки грузов или срочностью их доставки.

В разных вариантах распределения сортировочной работы (при постоянной величине общего вагонооборота) количество перерабатываемых вагонов и число назначений формируемых поездов (сверх минимального) различны. А техническое оснащение и путевое развитие станций прямо зависят от размеров работы. Поэтому основные критерии выбора перспективного плана распределения сортировочной работы и размещения станций — эксплуатационные расходы на содержание станций, простой вагонов и их переработку и капитальные вложения в развитие станций и подвижной состав. Схемы размещения и развития сортировочных станций оценивают, определяя сравнительную экономическую эффективность капитальных вложений в зависимости от срока окупаемости или по минимуму приведенных затрат.

Анализ показывает, что простои вагонов против норм завышены почти на всех станциях из-за того, что они работают не в оптимальном режиме. Недостаточность развития технических средств нарушает непрерывность станционного процесса. Дальнейший рост грузооборота на железных дорогах вызовет увеличение сортировочной работы, а следовательно, и загрузку технических средств станций. Для обеспечения непрерывности транспортной технологии необходимо, чтобы темпы увеличения перерабатывающей способности станций опережали темпы роста переработки вагонов на них.

Важная часть оптимизации размещения и развития сортировочных станций — установление основных пунктов переработки вагонов, а следовательно, и определение расположения и оснащения основных станций. Следовательно, чтобы решить вопрос о развитии и размещении станций, необходимо провести предварительные проработки возможных вариантов сортировочной работы, выявить принципы и направления концентрации технических средств, определить роль каждой станции, ее вес в транспортной технологии. Расчет развития и размещения сортировочных станций примерно можно разбить на следующие этапы:

анализ существующей организации и распределения сортировочной работы между основными сортировочными станциями: их современные технические параметры и показатели; особенности взаимного расположения и факторы, влияющие на развитие станций; техническое развитие погрузочно-выгрузочных пунктов;

установление перспективных общих вагонопотоков на пятилетние периоды (на основе анализа данных о развитии пунктов производства и потребления в стране, связей с зарубежными странами);

подразделение общих вагонопотоков по видам маршрутизации; установление мест и порядка организации и продвижения отправительских маршрутов и маршрутных групп; определение пунктов зарождения и погашения порожних вагонопотоков, порядка их про-

движения по участку; установление объема местной работы и форм ее организации; подразделение общего объема переработки для каждой станции на обязательную и дополнительную; выявление эффективных направлений вагонопотоков;

отбор расчетных сортировочных станций для предварительной схемы их размещения; анализ проектных решений их переустройства и развития отобранных станций; выявление ограничений в развитии отдельных станций, корректировка возможного вагонопотока переработки;

выбор эффективных схем этапного развития станций с учетом их типа, местных условий и характеристики вагонопотока; установление критериальной функции приведенных затрат на развитие станций; определение ограничений и расчетного максимально возможного вагонопотока;

оптимизация распределения сортировочной работы между выбранными станциями по затратам физических и приведенных вагоно-часов или коэффициента переработки; сравнение расчетного объема переработки с максимально возможным с учетом резерва и взаимодействия элементов станции; определение числа назначений поездов среднесуточного вагонопотока;

составление плана технического развития сортировочных станций; установление характера изменения расходов на него и приведенных затрат, определяемых временем нахождения вагона на станции, общей критериальной функции приведенных затрат на техническое развитие и эксплуатацию станций, ее оптимизация;

составление окончательной схемы развития сортировочных станций;

расчет технико-экономических показателей общей схемы размещения сортировочных станций; разработка рекомендаций для комплексного технического развития станций и участков.

Рассмотрим отдельно некоторые из перечисленных вопросов. Перспективные размеры расчетного вагонопотока определяют с учетом срока строительства станций; расчетный период составляет не менее чем 15—20 лет, т. е. 3—4 пятилетних периода. Устанавливают размеры вагонопотоков отдельно для отправительской маршрутизации, местных и порожних и дальних сквозных струй. Каждый вид и размеры перевозок технико-экономически обосновываются. Так, для отправительской маршрутизации необходимо проанализировать перспективы развития пунктов погрузки и выгрузки, возможности формирования маршрутных групп, групповых отправительских маршрутов и другие более совершенные формы организации вагонопотоков с мест погрузки. В отдельных случаях необходимо комплексно рассчитать эффективность организации отправительских маршрутов совместно с технической маршрутизацией. Для местных вагонопотоков важно экономически обосновать разделение сферы тяготения автомобильного и железнодорожного транспорта. Следовательно, общий расчетный вагонопоток подразделяется по видам перевозок технико-экономическими расчетами и для каждого вида

устанавливается экономически целесообразная сфера применения. Затраты на организацию вагонопотоков подсчитывают по формуле

$$E = [\kappa_o c_o m_o + \kappa cm \div \Sigma N \Sigma T_{ж} e_{вч}, \qquad (267)$$

где $\kappa_o c_o m_o$ — вагоно-часы на организацию и выгрузку отправительских маршрутов; κ_o — число назначений, c_o — параметр организации, m_o — число вагонов в маршруте;

κcm — вагоно-часы накопления сквозных и участковых поездов;

$\Sigma N \Sigma T_{ж}$ — вагоно-часы переработки на всех попутных составообразующих станциях;

$e_{вч}$ — среднесетевая стоимость 1 вагоно-ч, руб.

Вариант, обеспечивающий минимальные затраты, считается оптимальным. Начальным этапом организации порожних вагонопотоков служит анализ их корреспонденции, выявление новых направлений следования и корректировка пунктов зарождения и погашения. Эта задача решается методами линейного программирования и поэтому нет необходимости останавливаться на ней подробно. Таким образом, имея расчетные вагонопотоки («шахматку» на пятилетние периоды), приступают к распределению сортировочной работы между сортировочными станциями сети. В основу методики должны быть положены принципы:

равновозможное участие сортировочных станций в расчетах;

возможность освоения перспективного объема переработки на всех станциях независимо от существующего технического оснащения;

объединенные расчеты для всех станций, в которых каждая из них представляет элемент общей системы.

Этим принципам удовлетворяют приемы распределения сортировочной работы методом динамического программирования с перспективными расчетными нормативами, предложенные Р. Райковым. Для всех станций сети при заданном распределении сортировочной работы годовые приведенные затраты равны

$$\Sigma_{общ} = 365 e_{вч} \sum_{n} N_i T_{ж_i} + \sum_{s'} A_j \Lambda_j + \sum_{n} Э_{г_i}, \qquad (268)$$

где N_i — среднесуточное число вагонов, проходящих станцию i;

$T_{ж_i}$ — среднее время нахождения вагона на станции i;

$e_{вч}$ — расходная ставка среднесетевой стоимости 1 вагоно-ч;

n — число сортировочных станций;

Λ_j — капитальные затраты на реконструкцию и переустройство элементов станции;

Δ_j — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

s' — число элементов станции, подлежащих переустройству или реконструкции;

$Э_{г_i}$ — годовые эксплуатационные затраты на содержание станций после реконструкции.

Формула (268) не предусматривает учета разновременности капитальных вложений. При необходимости целесообразная этапность с промежуточными сроками, соответствующими вводу в эксплуатацию отдельных объектов, определяется дополнительными расчетами.

Из-за сложности и многовариантности расчеты оптимального распределения сортировочной работы на сети предлагается делать по укрупненным параметрам для каждого типа станций, т.е. предварительно установить последовательность их развития в зависимости от объема переработки. Это вызвано тем, что практически трудно одновременно определить для большого числа вариантов размеры потребных капитальных вложений в развитие всех станций сети.

Путевое развитие и мощность сортировочных устройств на станциях в варианте распределения сортировочной работы необходимо тщательно проанализировать и откорректировать, учитывая реальные условия. Во внимание следует принять возможности разгрузки станций, где большое время нахождения вагона; предложения по сокращению капитальных вложений и др. После отбора нескольких конкурентоспособных вариантов дается технико-экономическая оценка каждого из них, определяется эффективность данной схемы развития станций, устанавливаются основные количественные и качественные показатели. Чтобы варианты были сопоставимыми, в них должно быть одинаковое количество участвующих в перевозках вагонов и все показатели рассчитаны с одинаковой точностью по единым нормам, едиными методами. Эксплуатационные и технико-экономические показатели размещения и развития составообразующих станций можно разделить на следующие группы, характеризующие: уровень организации вагонопотоков; техническую оснащенность станций и ее использование; качество использования подвижного состава; общие расходы и экономическую эффективность варианта. К первой группе показателей относятся: суммарный вагонопоток и коэффициент переработки по станциям и сети; количество поездных назначений; средняя мощность одного назначения; число станций, проходимых вагоном за время оборота; ко второй — общее число составообразующих станций; количество сортировочных устройств разных категорий, их общая перерабатывающая способность; количество путей (в парках приема, отправления, сортировочном); коэффициент использования сортировочных устройств; число маневровых локомотивов; число путей в сортировочном парке на одно назначение; съем вагонов с одного сортировочного пути, путей парка приема и отправления. К третьей — общее время нахождения вагона на станциях (и в среднем для одной станции), общие потери, вызываемые неприемом поездов станциями; коэффициент загрузки маневровых локомотивов. Четвертая группа показателей— приведенные затраты на реконструкцию и эксплуатацию всех составообразующих станций.

Эффективность выбираемой схемы на расчетный период можно оценить сроком окупаемости капитальных вложений по известным формулам.

Глава 10 ОПТИМИЗАЦИЯ ВАГОНОПОТОКОВ НА СЕТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ СТАНЦИЙ

1. ОПТИМАЛЬНЫЙ ВАРИАНТ ОРГАНИЗАЦИИ ВАГОНОПОТОКОВ ДЛЯ ЗАДАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАНЦИЙ

Организация вагонопотоков и развитие станций на сети дорог в перспективе — крупномасштабная задача. К тому же ввиду сложной конфигурации сети, большого числа выделенных для расчета узлов и ограниченных возможностей даже самых современных вычислительных машин решить ее с необходимой для практических целей точностью пока вряд ли возможно. Вследствие этого предлагается методический прием деления сети на расчетные полигоны с последующей оптимизацией процессов на них.

Оптимальный вариант организации вагонопотоков и развития станций на направлении, полигоне, железнодорожной сети можно найти и реализовать исходя из единого критерия оптимальности, характеризующего в конечном итоге эффективность достижения цели. Показатели же, принимаемые в качестве критериев оптимальности для современных и перспективных условий распределения сортировочной работы, не одинаковы. Для сравнительной оценки вариантов приняты две группы показателей: первая — эксплуатационные расходы, складывающиеся из общих затрат на содержание станций, пропуск и переработку вагонов; вторая — строительные расходы, капитальные вложения в развитие станций и парк маневровых локомотивов, зависящий от объема сортировочной работы. Однако от варианта организации вагонопотоков и развития станций зависят оборот и парк вагонов и соответственно расходы на приобретение последнего. Сокращение вагонного парка позволит уменьшить или отдалить очередные капитальные вложения и расходы на содержание вагонов, связанные с ростом грузооборота в перспективе. Эти затраты также необходимо учитывать во второй группе расходов. Критерием оптимальности для решения данной задачи служит минимум суммарных приведенных народнохозяйственных затрат.

Поскольку для каждого варианта развития сортировочных станций существует свой оптимальный вариант организации вагонопотоков, то сначала поставим задачу выбрать оптимальный вариант распределения сортировочной работы для фиксированного технического состояния станций. Физическая система — совокупность станций на полигоне — с изменением дополнительных размеров переработки и числа назначений меняет свое состояние. Управление процессом заключается в распределении указанных величин таким

образом, чтобы состояние системы стало оптимальным, при котором критериальная функция достигает минимума. Таким образом, выбор оптимального состояния системы для фиксированного технического оснащения и путевого развития станций — это задача об оптимальном управлении. Под управляющими воздействиями будем понимать число назначений сквозных поездов и размеры дополнительной переработки вагонов на станциях полигона, а под состоянием системы — любой вариант организации вагонопотоков. Введем обозначения:

s — число станций на рассматриваемом полигоне;

r — количество граничных станций на полигоне:

$$r = r_1 + r_2;$$

r_1, r_2 — то же, на которых формируются сквозные поезда соответственно в нечетном и четном направлениях;

I — множество индексов i, определяющих номер станции на полигоне, $i \in I$;

L — множество индексов l', определяющих номер участка, соединяющего соседние сортировочные станции;

R — множество индексов i, определяющих номер граничных станций полигона. Естественно, что $R \subset I$;

$n_{\text{пер}_i}$ — размеры дополнительной переработки вагонов на станции i:

$n_{\text{пер}_i} = 0$, если $i = 1, 2, \ldots, r$, т.е. $i \notin R$;

$n_{\text{пер}_i} \geqslant 0$, если $i = r+1, r+2, \ldots, s$, т.е. $i \in R$, но $i \in I$;

$R_{\text{н}_i}$ — количество назначений сквозных поездов, формируемых на станции i. Если рассматривать вагонопотоки только одного направления, то

$R_{\text{н}_i} = 0$, $i = 1, 2, \ldots, r_1$ — для четного направления;

$R_{\text{н}_i} = 0$, $i = r_1+1, r_1+2, \ldots, r$ — для нечетного.

При совместном рассмотрении вагонопотоков обоих направлений $R_{\text{н}_i} \neq 0$ для любых $i \in I$, так как каждая граничная станция формирует сквозные поезда в одном направлении следования вагонопотоков. Значения управляющих воздействий $R_{\text{н}_i}$ и $n_{\text{пер}_i}$ для нее изменяются в некоторой области двумерного пространства, если $i = r+1, r+2, \ldots, s$ или в пределах множества $R_{\text{н}_i}$ для $i \in R$. Обозначим через

$$U_i = (n_{\text{пер}_i}, R_{\text{н}_i}), \quad i = 1, 2, 3, \ldots, s \tag{269}$$

вектор значений управляющих воздействий для станции i и рассмотрим совокупность управлений на s станциях:

$$U = (U_1, U_2, U_3, \ldots, U_s), \tag{270}$$

где вектор управляющих воздействий

$$u_\mu = \{n_{\text{пер}_i}, R_{\text{н}_i}\} \tag{271}$$

изменяется в области $(2s - r)$-мерного пространства, так как индекс μ определяется последовательностью изменения индекса i по обеим компонентам вектора $\{n_{\text{пер}_i}, R_{\text{н}_i}\}$.

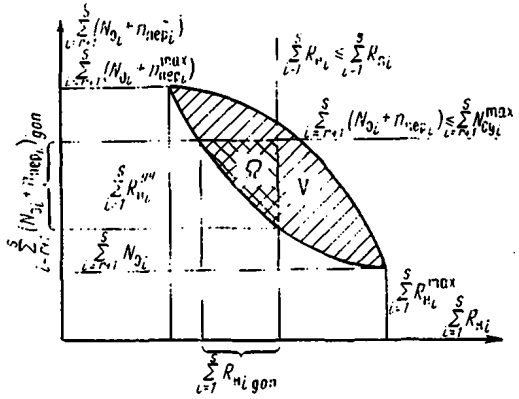

Рис. 49. Область возможных состояний системы (фазовое пространство)

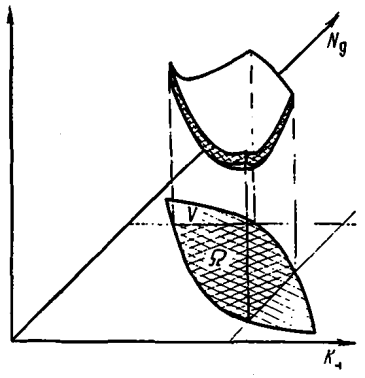

Рис. 50. Общий вид критериальной функции

Очевидно, что любое состояние системы зависит от управляющих воздействий во всей совокупности станций. Тогда область возможных состояний системы (фазовое пространство) V (рис. 49) определяется фазовыми координатами, а именно суммарными размерами дополнительной переработки и числом назначений сквозных поездов на всей совокупности станций:

$$N_{\text{д}} = \sum_{i=r+1}^{s} n_{\text{пер}_i}; \tag{272}$$

$$K_{\text{н}} = \sum_{i=1}^{s} R_{\text{н}_i}, \tag{273}$$

где $n_{\text{пер}_i}$ и $R_{\text{н}_i}$ пробегают все значения области $(2s - p)$-мерного пространства.

Однако следует отметить, что одним и тем же значениям $N_{\text{д}}$ и $K_{\text{н}}$ соответствует одно или несколько состояний системы, так как управляющие воздействия могут быть различны для одних и тех же фазовых координат, т. е. в общем случае отображение множества управлений системой на множество ее состояний неоднозначно, что существенно усложняет задачу. Общий вид такой критериальной функции приведен на рис. 50. Обозначим критерий оптимальности — суммарные приведенные затраты, связанные с организацией вагонопотоков, через W'. Тогда в зависимости от совокупности управлений $U_1, U_2, U_3, \ldots, U_s$

$$W' = W'(U) = W'(U_1, U_2, U_3, \ldots, U_s). \tag{274}$$

Необходимо из множества возможных управлений U найти такое $u \in U$, при котором критерий оптимальности W' достигнет наивыгоднейшего значения, т. е. которое обращает функцию (274) в

минимум. Иначе говоря, необходимо найти минимальное значение $W'(U)$ при всех возможных управлениях U:

$$W'_{\min} = \min_{U} \{W(U)\}. \quad (275)$$

Тогда управление u из множества u_μ, $\mu = 1, 2, \ldots, 2s - r$, при котором значение критерия минимально, будет оптимальным, а соответствующий ему вариант распределения сортировочной работы тоже оптимальным. С ростом вагонопотока увеличиваются размеры не только общей, но и обязательной переработки, которые устанавливаются еще до распределения сортировочной работы с дальними вагонопотоками. Размеры дополнительной (сверх минимума) переработки на станциях, дополнительные (сверх минимума) транзитные вагонопотоки без переработки и дополнительное количество (сверх обязательного) назначений дальних сквозных поездов различны. Эти величины определяют не только вариант организации вагонопотоков, но и развитие сортировочных станций, необходимое для освоения планируемого прироста дальних вагонопотоков.

2. ОПТИМАЛЬНЫЙ ВАРИАНТ ОРГАНИЗАЦИИ ВАГОНОПОТОКОВ И РАЗВИТИЯ СТАНЦИЙ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ)

Обозначим через x_i вариант развития станции i сверх минимально необходимого уровня технической оснащенности для освоения обязательных вагонопотоков. Совокупность таких вариантов образует множество θ_i, которое включает все логически возможные мероприятия по развитию станции i, т. е. $x_i = 1_i, 2_i, \ldots, m_i$. Каждый вариант x_i характеризуют параметры, которые устанавливаются исходя из рациональных условий для переработки вагонов, а именно: тип горки M_{xi} — механизированная с устройствами АРС, АЗСР и ТГЛ, Λ_{x_i} — автоматизированная; число горочных локомотивов — $S^{\text{г}}_{x_i}$; путей надвига $П^{\text{н}}_{x_i}$, роспуска $П^{\text{р}}_{x_i}$, обходных $П^{0}_{x_i}$, в парке приема $П^{\text{пп}}_{x_i}$; коэффициент параллельного роспуска составов $k^{\text{пп}}_{x_i}$ (при параллельном роспуске); схема взаимного расположения парков станции $S^{\text{пс}}_{x_i}$; петлевой подход к парку приема $H^{\text{пт}}_{x_i}$. Остальные параметры, изменяющиеся при одном и том же уровне (модели) развития сортировочных устройств: число групп z_{x_i} и бригад $Б_{x_i}$ технических осмотрщиков, маневровых локомотивов S_{x_i} и вытяжных путей формирования $П^{\Phi}_{x_i}$; коэффициент распределения работы осаживания и окончания формирования составов со стороны горки и вытяжных путей $\alpha^{r}_{\text{оф}x_i}$.

Обозначим через a_{x_i} капитальные вложения в варианте x_i на станции i ($x_i = 1_i, 2_i, \ldots, m_i$). Множество этих вариантов 0_i поставим

в однозначное соответствие множеству размеров капитальных вложений A_i при переходе от начального (минимально потребного) технического состояния станции i в техническое состояние x_i. Тогда каждому варианту развития $x_i \in \theta_i$ будут определены затраты $a_{x_i} \in \Lambda_i$. Множество возможных вариантов развития θ и соответствующие им размеры капиталовложений A для всех станций полигона определятся как:

$$\theta = \bigcup_{i=1}^{s} \theta_i; \quad (276)$$

$$A = \bigcup_{i=1}^{s} A_i. \quad (277)$$

Общее же число вариантов, которое необходимо пересмотреть, составит величину

$$M = \sum_{i=1}^{s} m_i. \quad (278)$$

Обозначим через y вариант развития совокупности станций, который характеризуется комбинацией вариантов x_i. Пусть последовательность вариантов y образует множество Y, где номер компоненты пробегает значения 1, 2, ..., l, тогда общее количество возможных вариантов развития совокупности станций полигона определяется как

$$l = \prod_{i=1}^{s} m_i. \quad (279)$$

При этом для каждого варианта $y \in Y$ нужно перебрать множество вариантов распределения сортировочной работы

$$U_y = (U_{x_1}, U_{x_2}, U_{x_3}, \ldots, U_{x_s}), \quad (280)$$

и критерий оптимальности зависит от совокупности управлений на s станциях

$$W_y = W_y(U_y) = W_y(U_{x_1}, U_{x_2}, \ldots, U_{x_s}), \quad (281)$$

где $x_1, x_2, \ldots, x_s$ — комбинации вариантов развития станций, которые и соответствуют заданному y. При этом управление на каждой станции U_{x_i} при заданном y (фиксированном x_i) определяется выбором управляющих воздействий

$$U_{x_i} = (n_{\text{пер}x_i}, R_{\text{пр}x_i}). \quad (282)$$

Выбор оптимального варианта распределения сортировочной работы для y варианта развития совокупности станций определяется минимальным значением критерия

$$W_{y\min} = \min_{U_y} \{W_y(U_y)\}. \quad (283)$$

Отыскание минимума W_y при заданном y (при фиксированных x_i, $i = 1, 2, 3, \ldots, s$) аналогично уже поставленной задаче (275). Однако, чтобы выбрать наилучший вариант, связанный как с организацией вагонопотоков, так и с развитием станций, необходимо в критерий оптимальности включить и затраты на выбор y варианта. Введем критерий оптимальности W — суммарные приведенные затраты, связанные с эксплуатационными расходами на простой, переработку и пропуск вагонов, содержание станций и капитальными вложениями в развитие станций и подвижной состав:

$$W = W(W_y) = W(W_1, W_2, W_3, \ldots, W_l). \qquad (284)$$

Он зависит от совокупности управлений W_y для всех y, а выбор оптимального варианта распределения сортировочной работы и развития станций определяется той комбинацией вариантов x_i, т.е. таким $y \in Y$, для которой критериальная функция примет наименьшее значение

$$W_{\min} = \min_{W_y} \{W(W_y)\}. \qquad (285)$$

Задача (285) — комбинаторно-оптимизационная. Комбинаторный характер ее обусловлен необходимостью выбора y варианта развития станций и оптимального управления u для каждого варианта. Решение же такой задачи связано с перебором всех возможных вариантов. В этом и заключается ее сложность. Кроме того, область значений критериальной функции ограничена путевым и техническим развитием станций, что лишает возможности идти как угодно далеко, например, по пути уменьшения затрат, связанных с переработкой вагонов. Это проявляется в ограниченности путевого развития сортировочных парков станций и т. д. На состояние системы, которое зависит только от распределения сортировочной работы, никаких существенных ограничений не накладывается, т.е. практически допускается любой вариант объединения струй вагонопотоков. Однако учитывается необходимость технического развития объектов, по которым распределяется сортировочная работа, на состояние системы (фазовые координаты) накладывается ряд ограничений и прежде всего на объем капитальных вложений, выделенных в расчетный период для развития станций. Необходимо учитывать и ограничения, накладываемые на управляющие воздействия, например невозможность дальнейшего развития сортировочного парка на какой-либо сортировочной станции (отсутствие свободных площадок, топографические условия и др.), что наложит ограничение на величину $R_{\text{н}i}$.

Таким образом, определение оптимального варианта распределения сортировочной работы и развития станций сводится к выбору таких управлений, которые удовлетворяют ограничениям, накладываемым на фазовые координаты и управляющие воздействия. С учетом ограничений область допустимых значений управляющих переменных сужается до $\Omega \subset V$ (рис. 49). Только множество Y уже имеет

большое количество вариантов развития станций y, да еще для каждого из них придется пересматривать еще большее множество возможных вариантов распределения сортировочной работы, чтобы выбрать наилучший для каждого y. Очевидно, общее количество вариантов, которое необходимо пересмотреть, и с учетом наложенных ограничений настолько велико, что решить эту сложную комбинаторную задачу вряд ли можно даже с применением самой современной вычислительной техники. Поэтому необходимо преобразовать задачу.

Если изолировать оптимизацию организации вагонопотоков от определения для выбранных вариантов размеров капитальных вложений на развитие станций или ограничить количество вариантов развития станций, просматриваемых в процессе расчета, то можно оказаться далеко от глобального оптимума, поскольку в этом случае разрываются связи между двумя взаимозависимыми частями задачи. Очевидно, что следует разработать новые приемы решения поставленной задачи. Как известно, на необходимость технического оснащения сортировочных комплектов станции существенно влияет величина перерабатываемого вагонопотока. Однако количество назначений сквозных поездов и размеры дополнительной переработки на станциях не являются независимыми переменными. В то же время между ними нельзя установить строгую функциональную зависимость, так как совокупность объемов дополнительной переработки имеет некоторую степень свободы относительно совокупности числа назначений сквозных поездов и наоборот. Рассматривая отдельно каждую станцию, можно исключить влияние числа назначений на размеры дополнительной переработки. Затраты же на переработку вагонов в условиях оптимального функционирования станций практически не зависят от числа назначений. Учитывая это, можно поставить в однозначное соответствие размерам переработки уровень технической оснащенности станций в каждом варианте, а числу выделенных на ней назначений — количество сортировочных путей, определив величины эксплуатационных расходов и затраты на переход к соответствующему уровню технической оснащенности и путевого развития.

Поставив в однозначное соответствие управляющим переменным уровень путевого развития и технической оснащенности, мы приняли число назначений и размеры дополнительной переработки сквозных поездов за независимые переменные для отдельной станции. Чтобы учесть связь между ними, необходимо установить в совокупности станций взаимное соответствие этих величин исходя из структуры и мощности вагонопотоков и маршрутов их следования на рассматриваемом полигоне. Решить задачу в таком виде уже можно, так как устранена комбинаторика и одновременно уменьшена ее размерность. Кроме того, задача стала чисто оптимизационной. Нетрудно увидеть, что мы вернулись к первоначальной постановке задачи, но к качественно иному ее содержанию. И прежде всего критерий оптимальности определяется теперь затратами, не только свя-

занными с распределением сортировочной работы, но и с развитием станций и приобретением подвижного состава. Кроме того, на состояния системы могут накладываться ограничения и по объему капитальных вложений. Чтобы окончательно сформулировать задачу, введем обозначения:

$N_{\text{су}_i}$ — перерабатывающая способность сортировочных устройств станции i;

$N^{\max}_{\text{су}_i}$ — перерабатывающая способность сортировочных устройств станции i, достигших наивысшего уровня технического развития;

$R_{\text{п}_i}$ — максимально возможное число путей в сортировочном парке станции i для накопления одногрупных сквозных поездов;

$N_{\text{пф}_i}$ — перерабатывающая способность парка формирования станции i;

$N_{\text{по}_i}$ — то же парка отправления;

$A_{u\mu}$ — суммарные капитальные вложения в каждом варианте развития совокупности станций;

$A_{\text{ф}}$ — фактический объем капитальных вложений на развитие станций за расчетный период.

Требуется найти такие значения управляющих воздействий $u_\mu = \{n_{\text{пер}_i}, R_{\text{п}_i}\}$, $u_\mu \in U$, при которых критерий оптимальности — суммарные приведенные эксплуатационные расходы и капитальные вложения в развитие станций и подвижной состав — достигает наивыгоднейшего значения, т. е. такое управление $u \in U$, которое обращает критериальную функцию $W = W(U_1, U_2, U_3, \ldots, U_s)$ в минимум

$$W_{\min} = \min_U \{W(U)\}, \tag{286}$$

при следующих ограничениях:

$$N_{\text{о}_i} + n_{\text{пер}_i} \leqslant N^{\max}_{\text{су}_i}; \tag{287}$$

$$R_{\text{п}_i} \leqslant R_{\text{п}_i}; \tag{288}$$

$$N_{\text{су}_i} \leqslant N_{\text{пф}_i} \leqslant N_{\text{по}_i}, \quad i = 1, 2, 3, \ldots s; \tag{289}$$

$$\sum_{i=r+1}^{s} (N_{\text{о}_i} + n_{\text{пер}_i}) \leqslant \sum_{i=r+1}^{s} N^{\max}_{\text{су}_i}; \tag{290}$$

$$\sum_{i=1}^{s} R_{\text{п}_i} \leqslant \sum_{i=1}^{s} R_{\text{п}_i}; \tag{291}$$

$$A_{u_\mu} \leqslant A_{\text{ф}}, \ \mu = 1, 2, 3, \ldots, 2s - r. \tag{292}$$

Поскольку мы поставили в однозначное соответствие размерам переработки и числу назначений технический уровень оснащенности станции и путевое развитие сортировочного парка, то ограниче-

ние (287) указывает не только на то, что величина переработки вагонов не должна превышать максимально возможную для данной станции перерабатывающую способность сортировочных устройств, но и на то, что развитие сортировочных устройств не беспредельно, а допускается лишь до максимально возможного уровня для данной станции, соответствующего последним достижениям техники и с учетом местных условий; а ограничение (288) не только на то, что количество сквозных назначений не превышает числа сортировочных путей, выделенных для этих целей, но и на ограниченность в развитии сортировочного парка данной станции. Ограничение (289) говорит о том, что станция должна функционировать в оптимальном режиме при любом уровне ее развития, в том числе при размерах переработки, равных $N^{\max}_{\text{су}}$, при этом техническое оснащение отдельных ее комплектов должно быть приведено в соответствие с их перерабатывающей способностью. Ограничения (290) — (292), накладываемые на фазовые переменные, представляют собой соответственно область допустимых: значений суммарных размеров переработки, не превышающих суммарной перерабатывающей способности, и максимально возможных уровней развития сортировочных устройств совокупности станций (290); значений суммарного количества сквозных назначений, не превышающего числа сортировочных путей, и максимально возможного путевого развития сортировочных парков (291); вариантов развития совокупности станций по объему капитальных вложений, выделенных на их развитие за расчетный период (292).

Задачу оптимального управления можно решить различными методами. Однако классические методы нахождения экстремума нелинейной функции многих переменных, какой являются суммарные приведенные эксплуатационные и строительные расходы, ввиду большого числа параметров здесь неприменимы. Среди других методов оптимизации особое место занимает метод динамического программирования. Именно он наиболее удачно приспособлен для учета индивидуальных особенностей данного процесса управления. Во-первых, функция затрат, связанная с переработкой вагонов на станциях, не обладает особой структурой, которая может быть использована для облегчения процедуры поиска. Это объясняется тем, что с ростом размеров переработки некоторые затраты на станции изменяются не непрерывно, а скачкообразно (имеют точки разрыва). Кроме того, такая функция может иметь и локальные экстремумы.

Во-вторых, — это самый общий метод решения задач с целочисленными значениями переменных, которыми являются размеры вагонопотоков и количество назначений. Кроме того, поиск оптимального варианта, который сводится к распределению размеров дополнительной переработки и числа сквозных назначений, можно представить как процесс многошагового принятия решений, а это особенность именно метода динамического программирования. К тому же, выбрав исходное (начальное) состояние системы и принимая решения шаг за шагом, последовательно оптимизируя на каждом шаге снача-

ла распределение размеров дополнительной переработки, а затем число сквозных назначений на станциях полигона (направления) в области, определенной фазовыми координатами, мы найдем ее экстремальное состояние.

Следует также отметить, что одно из главных достоинств этого метода — приспособленность к использованию современной вычислительной техники. При исследовании распределения сортировочной работы между станциями с учетом их развития в перспективе этот метод и современная вычислительная техника позволят наблюдать поведение системы и при изменяющихся параметрах. Поэтому в качестве метода оптимизации принят метод динамического программирования.

Выбрав метод оптимизации, правомерно поставить задачу оптимального распределения сортировочной работы между станциями с учетом их развития, сформулированную ранее как задача об оптимальном управлении, в терминологии, принятой в динамическом программировании. Следуя ранее принятым обозначениям, суммарные приведенные затраты, связанные с размером перерабатываемого вагонопотока и числом назначений на каждой станции, можно записать так:

$$E_{\text{ст}_i} = g_i\left(n_{\text{пер}_i},\ R_{\text{н}_i}\right). \tag{293}$$

Для совокупности станций целевая функция будет

$$W = \sum_{i=1}^{s} E_{\text{ст}_i} + E_{\text{пс}_\mu}, \tag{294}$$

где $E_{\text{пс}_\mu}$ — приведенные затраты, связанные с величиной парка подвижного состава; зависят от варианта организации вагонопотоков и развития станций:

$$E_{\text{пс}_\mu} = \varphi\left(u_\mu\right); \tag{295}$$

$E_{\text{ст}_i}$ и $E_{\text{пс}_\mu}$ — суммарные приведенные затраты, соответственно эксплуатационные расходы на содержание станций, переработку, пропуск и простой вагонов и капитальные вложения в развитие объектов станций и на приобретение подвижного состава и его содержание:

$$E_{\text{ст}_i} = \frac{1}{365}\left(Э_{\text{ст}_i} + E_{\text{н}}\, A_{\text{ст}_i}\right),\ i = 1, 2, 3, \ldots, s, \tag{296}$$

$$E_{\text{пс}_\mu} = \frac{1}{365}\left(Э_{\text{пс}_\mu} + E_{\text{н}}\, A_{\text{пс}_\mu}\right),\ \mu = 1, 2, \ldots, 2s - r; \tag{297}$$

$E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Выбор оптимального варианта распределения сортировочной работы между станциями с учетом их развития сводится к ми-

нимизации функции двумерного пространства переменных $n_{\text{пер}\ r+i}$, $R_{\text{н}_j}$.

$$F\left(n_{\text{пер}_{r+1}}, n_{\text{пер}_{r+2}}, \ldots, n_{\text{пер}_s};\ R_{\text{н}_1}, R_{\text{н}_2}, \ldots, R_{\text{н}_s}\right) = \min\left[\sum_{i=1}^{s} g_i\left(n_{\text{пер}_i},\ R_{\text{н}_i}\right) + \varphi\left(u_\mu\right)\right] \tag{298}$$

в области, определенной соотношениями:

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{i=r+1}^{s} n_{\text{пер}_i} = N_{\text{д}},\ n_{\text{пер}_i} \geqslant 0; \\ &\sum_{i=1}^{s} R_{\text{н}_i} = K_{\text{н}},\ R_{\text{н}_i} \geqslant 0, \end{aligned}\right\} \tag{299}$$

с ограничениями на фазовые переменные

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{i=r+1}^{s}\left(N_{\text{о}_i} + n_{\text{пер}_i}\right) \leqslant \sum_{i=r+1}^{s} N_{\text{су}_i}^{\max}; \\ &\sum_{i=1}^{s} R_{\text{н}_i} \leqslant \sum_{i=1}^{s} R_{\text{п}_i}, \end{aligned}\right\} \tag{300}$$

на управляющие переменные

$$\left.\begin{aligned} &N_{\text{о}_i} + n_{\text{пер}_i} \leqslant N_{\text{су}_i}^{\max}; \\ &R_{\text{н}_i} \leqslant R_{\text{п}_i},\ i = r+1,\ r+2,\ \ldots,\ s, \end{aligned}\right\} \tag{301}$$

а также на объем капитальных вложений в развитие станций

$$A_{u\mu} \leqslant A_{\text{ф}},\ \mu = 1, 2, 3, \ldots, 2s - r \tag{302}$$

при фиксированных значениях параметров системы

$$\left.\begin{aligned} &N_{ij},\ l_{ij},\ s,\ m_{\text{с}_{ij}},\ l_{\text{по}_i},\ Q_{\text{с}_{ij}}; \\ &N_{\text{о}_i},\ N_{\text{тро}_i},\ R_{\text{но}_i},\ N_{\text{осу}_i},\ N_{\text{осп}_i},\ N_{\text{опо}_i} \end{aligned}\right\}$$

и переменных, зависящих от уровня путевого развития и технической оснащенности станции,

$$\left.\begin{aligned} &z_{x_i},\ Б_{x_i},\ S_{x_i}^{\text{г}},\ S_{x_i}^{\text{ф}},\ П_{x_i}^{\text{н}},\ П_{x_i}^{\text{р}},\ П_{x_i}^{\text{о}}; \\ &П_{x_i}^{\text{пп}},\ П_{x_i}^{\text{пт}},\ П_{x_i}^{\text{ф}},\ S_{x_i}^{\text{пс}},\ K_{x_i}^{\text{пп}},\ x_{\text{оф}\,x_i}^{\text{г}}. \end{aligned}\right\}$$

Решение этой задачи основано на вычислении последовательностей функций двух переменных

$$f_N\left(N_{\text{д}}, K_{\text{н}}\right) = \min_{\left\{n_{\text{пер}_i},\ R_{\text{н}_i}\right\}} F_N\left(n_{\text{пер}_{r+1}}, n_{\text{пер}_{r+2}}, \ldots, n_{\text{пер}_s};\right.$$
$$\left. R_{\text{н}_1}, R_{\text{н}_2}, \ldots, R_{\text{н}_s}\right). \tag{303}$$

где минимум берется по области значений $n_{\text{пер}_i}$, $R_{\text{п}_i}$, определяемой условиями (299) и $N = 1, 2, \ldots, s$. Однако отсутствие строгой математической зависимости между $N_{\text{д}}$ и $K_{\text{п}}$ и некоторая степень свободы изменения этих величин относительно друг друга не позволяют воспользоваться уравнением (303) для отыскания оптимального варианта. Задача становится разрешимой, если сначала распределить размеры дополнительной переработки по станциям, исключив влияние количества назначений на затраты на переработку вагонов, а затем выбрать наивыгоднейшее число назначений, учитывая структуру, мощность и путь следования исходных струй. Таким образом, задача разбивается на два этапа. Первый — оптимальное распределение переработки вагонов между станциями полигона для заданной величины $N_{\text{д}}$; второй — выбор наивыгоднейшего числа назначений на станциях полигона для заданной величины $N_{\text{д}}$ и оптимального ее распределения (оптимальной политики), т.е. вектора $\{n_{\text{пер}_i}\}$.

Однако при выборе наивыгоднейшего числа назначений нет необходимости просматривать все возможные варианты струй и их объединения и подсчитывать полные затраты. Очевидно, что наивыгоднейшим по $K_{\text{п}}$ для заданных $N_{\text{д}}$ и $\{n_{\text{пер}_i}\}$ будет вариант или группа вариантов с наименьшим числом назначений или близкий к нему. Решив задачу для одного значения $N_{\text{д}}$, перейдем к другому, двигаясь по левой граничной области Ω (см. рис. 49—51), пока не найдем минимум. При этом надо двигаться по одной из граничных кривых гиперплоскости Ω' области Ω. Таким образом, сначала из множества допустимых управлений Ω выбираем одно из возможных множеств Ω', приводящее к окрестности глобального оптимума, получая приближенное решение поставленной задачи. При этом мы находим оптимальное распределение переработки, соответствующее начальному состоянию системы $N_{\text{д}_0}$, и затем выбираем вариант с наименьшим числом назначений. Далее переходим к новому состоянию $N_{\text{д}_1}$. Но окончательное решение может быть и не в граничной области. Тогда продолжается приближение к глобальному оптимуму. Коррекцию произведем по конечному состоянию. Таким образом, мы пришли к задаче синтеза (рис. 52).

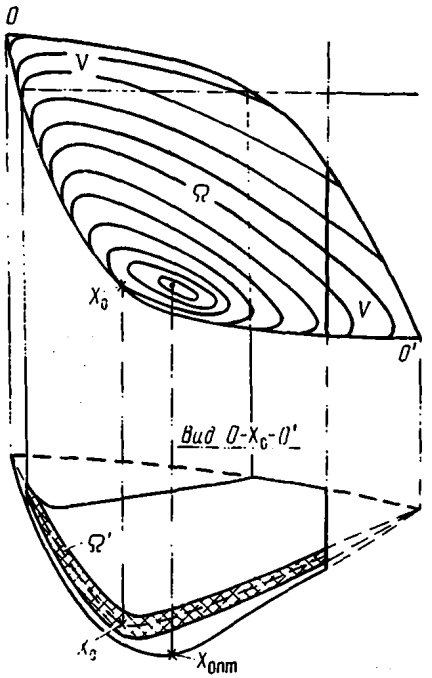

Рис. 51. Линии уровня и вид критериальной функции

Задача эта состоит в таком перераспределении величин $n_{\text{пер}_i}$ и $R_{\text{п}_i}$, начиная с состояния, достигнутого на первом программном управлении (на первом этапе решения), которое приближает с заданной точностью к конечной цели. Но так как данный процесс детерминированный, постановки задач синтеза и оптимального управления формально совпадают и поэтому для первой можно использовать тот же функционал, что и при первом программном управлении. Различие заключается лишь в том, что в задаче синтеза величины $N_{\text{д}}$ и $K_{\text{п}}$ — произвольные в некоторой окрестности. Использование динамического программирования в задачах синтеза с ограниченным управлением неэффективно. Поэтому воспользуемся другими более эффективными методами уточнения решения. Функция, определяющая затраты по совокупности станций в зависимости от объема переработки, имеет вогнутый вид. Это объясняется тем, что с ростом размеров переработки на станциях полигона увеличиваются затраты на их развитие и содержание, но при этом уменьшаются количество назначений дальних поездов и соответственно затраты на строительство и содержание сортировочных путей и расходы, связанные с сокращением времени простоя под накоплением, т. е. с ростом одних затрат другие уменьшаются, а кривая суммарных приведенных затрат имеет вогнутый вид. Следовательно, чтобы найти минимум затрат по фазовой переменной $N_{\text{д}}$, можно использовать метод золотого сечения, значительно сокращающий время счета.

Для оптимального распределения переработки по станциям при заданном $N_{\text{д}}$ также можно воспользоваться одним из методов последовательного приближения — приближения в пространстве политик (поведений функции), который сократит время машинного счета оптимального вектора $u = \{n_{\text{пер}_i}\}$.

Для второго программного управления, т. е. на втором этапе решения задачи, когда процесс распределения (303) двумерный, чтобы сократить время расчетов, следует сочетать методы последовательных приближений в пространстве политик и динамического программирования, используя с некоторыми изменениями алгоритм первого программного управления. Таким образом, выбор оптимального варианта распределения сортировочной работы между станциями с учетом их развития становится задачей метапрограммирования и прежде всего задачей синтеза, состоящей из двух программных управлений. Первое разбито на два этапа. На одном (первом) распределяются размеры переработки на станциях полигона методом функциональных уравнений динамического программирования. На другом в процессе поиска наименьшего количества назначений при заданном распределении перерабатываемого вагонопотока для промежуточного решения используется метод золотого сечения по фазовой координате $N_{\text{д}}$.

Следовательно, на первом этапе задача сводится к одномерному процессу распределения размеров дополнительной пере-

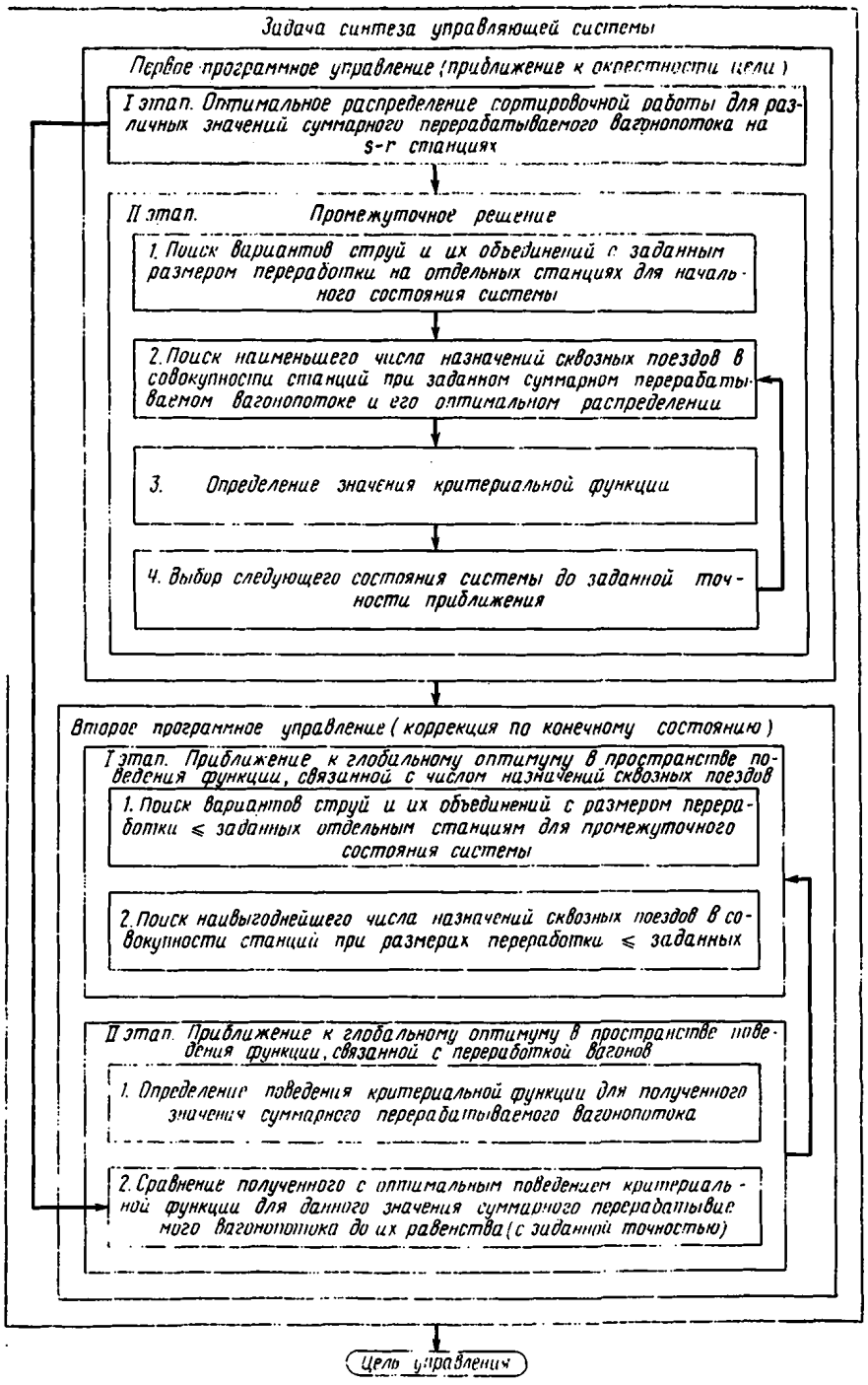

Рис. 52. Стратегия поиска цели управления

работки, т. е. к вычислению таких значений $n_{\text{пер}_{r+1}}, n_{\text{пер}_{r+2}}, \ldots, n_{\text{пер}_s}$, которые можно получить, учитывая изменения числа назначений, исходя из структуры и мощности исходных струй и которые удовлетворят условиям (299)—(300),

$$f_N(N_д) = \min_{\{n_{\text{пер}_i}\}} R_N\left(n_{\text{пер}_{r+1}}, n_{\text{пер}_{r+2}}, \ldots, n_{\text{пер}_s}\right). \qquad (304)$$

Основное функциональное соотношение в этом случае имеет вид

$$f_N(N_д) = \min_{0 \leqslant N_{д_N} \leqslant N_д} \left[g_N(N_{д_N}) + f_{N-1}(N_д - N_{д_N}) + \right.$$

$$\left. + \varphi_N(u_\mu)\right] \qquad (305)$$

для $N = r+1, r+2, \ldots, s$. Причем $f_N(N_д)$ при $N_д = 0$ для любых N определяется соотношением

$$f_N(0) = W_0, \qquad (306)$$

где W_0 — суммарные приведенные затраты в сквозном варианте организации вагонопотоков — начальное состояние системы.

Для $N = r+1$

$$f_{r+1}(N_д) = g_{r+1}(N_д) + \varphi_{r+1}(u_\mu), \qquad (307)$$

а для $N \geqslant r+2$ — реккурентное соотношение (304). Таким образом, $n_{\text{пер}_i}$ для любой станции, начиная с $r+1$ до s, принимает значения в интервале $(0, N_{\text{су}_i}^{\max} - N_{0_i})$, соответственно которым необходимо вычислить множество значений $f_N(N_д)$. Выбор же оптимального варианта связан с решением уравнения

$$W = W(U_1, U_2, U_3, \ldots, U_s) = \min. \qquad (308)$$

Следовательно, в результате решения комплексной задачи распределения сортировочной работы между станциями и их развития будет определено прежде всего техническое оснащение и путевое развитие на расчетный период, а кроме того, обоснованы оптимальная загрузка сортировочных станций и оптимальное соотношение транзитных и перерабатываемых вагонопотоков, т. е. коэффициенты загрузки станций и транзитности вагонопотока, а также развитие сортировочных парков станций. Следует, однако, отметить, что расчетные узлы на полигоне выбираются экспертным путем. Но может возникнуть необходимость дополнительно рассмотреть узлы, не выбранные первоначально для расчета по различным причинам (невозможность развития или ограниченность его у ранее выделенных и др.). По предложенной методике оптимальный вариант распределения сортировочной работы и развития станций можно найти для различного числа узлов, приняв этот параметр системы в качестве переменной величины. При этом еще до расчета вариантов для каждого $N_{д_N}$ можно установить по ограничениям (300) и (301), сущест-

вует ли решение задачи для данного количества отобранных узлов. Если решения нет для всех $N_{д_N}$ в области $0 \leqslant N_{д_N} \leqslant N_д$, то можно изменить число отобранных узлов, разработав вагонопотоки для данного их количества.

Кроме оптимального варианта, методика позволяет при необходимости определить и несколько близких к нему. Если в качестве переменного параметра принять величину N_{ij} или l_{ij}, то можно исследовать поведение системы в зависимости от мощности вагонопотоков или маршрутов их следования, т.е. использовать разработанный алгоритм в качестве составной части программы оптимизации грузопотока и технического развития линий и станций полигона с учетом распределения сортировочной работы между ними.

До сих пор мы рассматривали решение задачи с ограничением в объемах капитальных вложений. Но если это ограничение снять, то можно определить действительно оптимальный (в отличие от оптимально допустимого) вариант распределения сортировочной работы и развития станций. Никакой сложности это не представит.

3. МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА

Получив для каждого заданного $N_д$ оптимальное управление по $u = \{n_{пер_i}\}$, переходим к поиску наименьшего числа назначений дальних поездов на полигоне при заданных размерах переработки на каждой станции. Исходим из следующих предпосылок.

Заданы:

вагонопотоки N_{ij} и маршруты их следования l_{ij},

i — номер станции отправления (зарождения) потока; j — номер станции его прибытия (погашения);

размеры переработки $n_{пер_i}$ на каждой станции с $i = r \div 1$ до s.

Введем обозначения:

N — номер рассматриваемой станции переработки, $N = r \div 1$, $r \div 2, .., s$. Очевидно, на станции, у которой $i = N$, сквозными будут струи вагонопотока одного направления со станциями отправления $i < N$ и назначения $j > N$, а также зарождающиеся на станциях с $i > N$ и следующие назначением на станции $j < N$ вагонопотока противоположного направления;

R_N — количество сквозных струй, проходящих через станцию N;

ρ_N — число объединяемых струй для переработки на станции N;

d_{ρ_N} — количество возможных вариантов струй с ρ_N объединением;

D_N — множество возможных вариантов струй и их объединений, перерабатываемых на станции N.

Очевидно, чтобы выбрать варианты струй и их объединений с вагонопотоком, равным $n_{пер_N}$, понадобится пересмотреть все множество D_N, для чего необходимо последовательно просмотреть варианты струй с ρ_N объединением, где $\rho_N = 1,2, ..., R_N$. Количество возможных вариантов для каждого ρ_N

$$d_{\rho_N} = \frac{R_N!}{(R_N \rho_N)!\, \rho_N!}, \tag{309}$$

а сумма элементов множества D_N

$$q_N = \sum_{\rho_N = 1}^{R_N} d_{\rho_N} = 2^{R_N} - 1. \tag{310}$$

В совокупности станций общее количество возможных вариантов объединения струй вагонопотоков растет пропорционально произведению числа возможных вариантов на каждой станции. Для прямолинейного направления его определяют из зависимости

$$Q = \prod_{N=r\div 1}^{s} q_N. \tag{311}$$

Обозначим через L_{ρ_N} множество возможных вариантов объединения струй вагонопотоков, проходящих через станцию N для ρ_N объединения. Очевидно, что количество элементов этого множества равно d_{ρ_N}. Так, количество возможных вариантов, которое необходимо проверить, чтобы выбрать струи с заданным $n_{пер_N}$, равно $d_{1N} = R_N$. Количество вариантов просмотра при попарном объединении струй равно d_{2_N}. Численное значение этой величины определяется из формулы (309). При этом каждый из d_{1N} или d_{2N} вариант — элемент множества соответственно L_{1N} или L_{2N}. Следовательно, множество D_N разобьется на подмножества L_{1N}, L_{2N}, L_{3N}, ..., L_{RN}:

$$D_N = UL_{\rho_N}. \tag{312}$$

Объединения струй вагонопотоков для выбора вариантов с суммарной переработкой $n_{пер_N}$ просматриваются в определенной последовательности, начиная с L_{1N} до N_{R_N} в порядке возрастания ρ_N. В реальных же условиях, когда через каждую сортировочную станцию проходит до 30—40 струй в одном и столько же в обратном направлении, общее количество просматриваемых вариантов огромно. Только на одной станции число возможных вариантов струй и их объединений равно 2^{60}—2^{80}. Следовательно, и выбрать вариант объединения струй вагонопотоков с заданной величиной переработки, просматривая все возможные, нереально. Поэтому необходимо разработать новые методы и приемы расчета, значительно сокращающие количество просматриваемых вариантов.

Рассмотрим сначала на каждой станции объединение исходных струй с вагонопотоком, равным $n_{\text{пер}N}$, воспользовавшись следующим приемом. Обозначим через G_N множество найденных вариантов объединения струи с заданной величиной $n_{\text{пер}N}$ на станции N, очевидно, $G_N \subset D_N$.

Просмотрев множество L_{1N}, в искомое количество вариантов в первую очередь включаем струи с вагонопотоком, равным $n_{\text{пер}N}$. Если таких струй нет, то множество G_N остается пока пустым. Струи, вошедшие в множество G_N, из дальнейшего рассмотрения исключаются, так как их поток уже равен $n_{\text{пер}N}$ и любое другое присоединение превысит этот размер переработки. Струи с вагонопотоком, бо́льшим $n_{\text{пер}N}$, также исключаем из дальнейшего просмотра, поскольку присоединение к нему любого другого количества струй еще больше увеличит его.

Струи, у которых вагонопоток меньше $n_{\text{пер}N}$, попарно объединяем и переносим в следующее подмножество — $L'_{2N} \subset N_{2N}$, отличающееся от множества L_{2N} размером. Таким образом, множество L_{2N} может быть уже неполным, так как, рассматривая попарное объединение струй, исключаются варианты с вагонопотоком, бо́льшим или равным $n_{\text{пер}N}$.

Для просмотра каждого последующего множества $L_{\rho_{N+1}}$ используют от предыдущего множества L_{ρ_N} информацию о вариантах струй с ρ_N объединением, не подлежащих рассмотрению при образовании вариантов с ρ_{N+1} объединением, до тех пор, пока не дойдут до подмножества $L'_{R_N} \subset L_{R_N}$ или пока следующее подмножество не будет простым, т.е. $L'_{\rho_N} = \varnothing$. Теперь уже нет необходимости просматривать последующие аналогичные множества, так как в любом варианте с бо́льшим количеством объединяемых струй величина вагонопотока будет заведомо большей, чем $n_{\text{пер}N}$. При этом по мере возрастания размеров полных множеств L_{ρ_N} от $\rho_N = 1$ до $\rho_N = \frac{R_N}{2}$ размеры подмножеств L'_{ρ_N} по сравнению с полным множеством L_{ρ_N} уменьшаются не только до середины, но и до последнего множества L_{R_N} или до тех пор, пока очередное подмножество не будет $L'_{\rho_N} = \varnothing$.

Однако с возрастанием $n_{\text{пер}_N}$ до максимально возможной переработки на данной станции $n^{\max}_{\text{пер}N}$, которая определяется не максимально допустимым уровнем развития сортировочных устройств, а суммой всех сквозных струй вагонопотоков, количество просматриваемых вариантов возрастает, приближаясь к q_N или $G_N = D_N$. Следовательно, необходимо трансформировать метод поиска вариантов объединения струй, сокращая количество просматриваемых. Расположим струи, проходящие через станцию N, в порядке возрастания вагонопотоков и из этих последовательностей образуем массив $M_{\text{пер}_{NRr}}$,

где N — номер станции переработки;

R — размер струй вагонопотоков;

$$R = \frac{N_{ij}}{\Delta};$$

N_{ij} — сквозная для данной станции струя вагонопотока;

Δ — минимальное значение мощности вагонопотока исходного состояния, определяется на первом этапе решения задачи оптимального управления;

r — номер варианта для струй вагонопотоков, разность между которыми не превышает Δ.

Величина R, как индекса, должна быть целым числом. Однако R, некратные Δ, имеют дробное значение, которое необходимо округлять в бо́льшую сторону до ближайшего целого числа. Например, при $\Delta = 20$ для вагонопотоков с размером, меньшим 20 вагонов, $R = 1$, исключая потоки с $N_{ij} = 0$, для которых $R = 0$. Но поскольку R — всего лишь средство хранения информации в матричной форме о проходящих через станцию исходных вагонопотоках, то под ним могут быть струи, различающиеся мощностью в пределах Δ. Для размещения таких струй в матрице $M_{\text{пер}NRr}$ используется индекс r, который пробегает значения 0, 1, 2, ..., R_N. Если с данным R в матрице размещено одно значение мощности исходной струи, то индекс r примет значение 0. Если с R будет несколько струй, отличающихся вагонопотоками в пределах Δ, то исходным назначениям присваивается индекс r, отличный от 0, в порядке возрастания мощностей, начиная с 1. Так, исходным струям мощностью 10, 15, 15, 18, 20 вагонов будут присвоены соответственно следующие значения R и r для заданного значения N : 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5. Индекс r принимает максимальное значение R_N, если мощности всех сквозных для данной станции струй различаются в пределах одного значения Δ. Тогда матрица $M_{\text{пер}NRr}$ — единичная. И наконец, в матрице $M_{\text{пер}NRr}$ размещаем значение 0 для тех R и r, которые не обеспечены вагонопотоком.

Теперь при выборе варианта (вариантов) струй с заданной величиной $n_{\text{пер}N}$ будет произведен всего лишь один просмотр. Для этого определим сначала искомую величину $R_{\text{ис}} = \frac{n_{\text{пер}N}}{\Delta}$ и не просматриваем все множество $L_{1N} \subset D_N$, а проверяем наличие в матрице $M_{\text{пер}NRr}$ вагонопотока с таким же R, как $R_{\text{ис}}$. Если в матрице с $R = R_{\text{ис}}$ стоит 0 (вагонопотока с данным R нет), значит, нет ни одного варианта объединения струи с заданной $n_{\text{пер}N}$ из одиночных исходных назначений. Если же в матрице значение N_{ij} отлично от 0, то включаем эту струю в множество G_N и продолжаем просмотр индекса r до тех пор, пока не дойдем до такого его значения, для которого в матрице

$M_{\text{пер}NRr}$ стоит значение 0. При этом все струи с потоком, отличным от 0, также включаем в множество G_N. Все исходные струи с $R \geqslant R_{\text{нс}}$ исключаем из дальнейшего рассмотрения. Из струй с $R < R_{\text{нс}}$ образуем множество L'_{1N}. Для этого к рассмотрению попарного объединения принимаем только те струи, которые остались после просмотра множества L_{1N}, т.е. струи множества $L'_{1N} \subset L_{1N}$. Первоначальную же матрицу $M_{\text{пер}NRr}$ сохраняем в памяти машины для последующих просмотров одиночных струй, присоединяемых к ρ_N объединению.

Таким образом, просмотрев множество L_{1N}, определяем варианты (если они есть) одиночных струй с заданной величиной перерабатываемого вагонопотока $n_{\text{пер}N}$ и заносим их (образуем) в множество G_N. Исходные назначения с мощностью, большей $n_{\text{пер}N}$, исключаем из дальнейшего рассмотрения. Из струй вагонопотоков с меньшими по размеру $n_{\text{пер}N}$ образуем множество L'_{1N}. При этом сделан всего лишь один просмотр множества L_{1N}. Из элементов множества L'_{1N} можно образовать множество L'_{2N}. Но как мы убедились ранее, составление и просмотр множеств $L'_{\rho N}$ — очень трудоемкий процесс. Вместо него просмотрим в матрице одиночные исходные струи, которые можно присоединить к ρ_N объединению $l_{1N} \in L'_{1N}$. Для каждого такого элемента определяем, какой должен быть размер присоединяемой к ρ_N объединению струи. Величину ее найдем из следующего выражения:

$$R_{\text{нс}} = \frac{n_{\text{пер}N} - N_{\text{сум}}}{\Delta}, \tag{313}$$

где $N_{\text{сум}}$ — действительная величина мощности вагонопотока очередного просматриваемого элемента множества $L_{\rho N+1}$.

Проверяем, есть ли в матрице $M_{\text{пер}_{NRr}}$ струя с $R = R_{\text{нс}}$. Если есть ($r > 1$), то ее присоединяем к элементу $l_{\rho N}$ с мощностью вагонопотока $N_{\text{сум}}$, включаем его в множество G_N и исключаем из дальнейшего рассмотрения.

Суммарный вагонопоток этого варианта объединения струй определяется по формуле

$$N_{\text{сум}} = N_{NR_{\text{нс}}r} + N_{\text{сум}}. \tag{314}$$

Он всегда меньше значения $n_{\text{пер}N}$ на величину

$$\varepsilon = \Delta - 1. \tag{315}$$

Это объясняется тем, что $R_{\text{нс}}$ — большее целое число, кратное Δ, определяется по действительным значениям мощности струй потоков, причем $n_{\text{пер}N}$ кратно Δ. С учетом формулы (315) по $R_{\text{нс}}$ в матрице

$M_{\text{пер}NRr}$ выбираются струи, отличающиеся от кратного значения в меньшую сторону в пределах ε, т.е. всегда будет выполняться равенство

$$N'_{\text{сум}} + N_{NR_{\text{нс}}r} = n_{\text{пер}N} \pm \varepsilon. \tag{316}$$

Таким образом всегда будем определять вариант объединения струй в пределах $n_{\text{пер}N}$ с отклонением $\varepsilon < \Delta$. Это очень важно, так как заданная величина $n_{\text{пер}N}$ на первом этапе оптимального распределения переработки по станциям определялась с шагом Δ. Если не учитывать этот факт, то при выборе варианта объединения струй суммарная мощность его вагонопотоков могла бы отличаться от $n_{\text{пер}N}$ больше, чем на Δ, а это значит, что она уже не соответствовала бы заданному значению $n_{\text{пер}N}$.

Включив такие варианты в множество G_N, в том случае, если в матрице $M_{\text{пер}NRr}$ не окажется присоединяемой струи с $R = R_{\text{нс}}$, переходим к образованию множества $L''_{\rho N}$. Все струи с $R \geqslant R_{\text{нс}}$ исключаем из дальнейшего рассмотрения, а из струй с $R < R_{\text{нс}}$ образуем множество $L'_{\rho N} \subset L_{\rho N}$. Множество $L'_{\rho N}$ образуется присоединением к каждому элементу предшествующего $L'_{\rho N-1}$ одиночных струй с $R < R_{\text{нс}}$. Для выбора искомых вариантов из одиночных исходных струй сделан один просмотр. Совокупность выбранных при этом струй и есть множество $L''_{\rho N} = L''_{1N}$. Струи с $R < R_{\text{нс}}$ перешли в следующее множество $L'_{\rho N+1}$. А искомые варианты с попарным объединением струй найдены не просмотром всех возможных вариантов, т. е. не всего множества L'_{2N}, а одиночной струи $R = R_{\text{нс}}$ в матрице $M_{\text{пер}NRr}$. При этом определяли наличие исходных струй с $R < R_{\text{нс}}$ и включали это попарное объединение в множество L'_{3N}: брали первый элемент $l'_{2N} \in L'_{2N}$, $l'_{2N} = 1$, присоединяли к нему одиночные исходные струи с $R < R_{\text{нс}}$ и заносили их в множество L'_{3N}. Затем аналогично определяли присоединяемые исходные струи с $R < R_{\text{нс}}$, ко второму элементу $l'_{2N} = 2$ и пополняли множество L'_{3N} и т. д., пока не пересмотрели все элементы $l'_{2N} \in L'_{2N}$. В результате будет образовано новое множество $L_{\rho N+1}$ и пополнено множество G_N. Просмотр множеств $L'_{\rho N} \subset L_{\rho N}$ продолжается до тех пор, пока последующее множество $L'_{\rho N+1}$ не окажется пустым или не дойдут до множества $L'_{RN} \subset L_{RN}$.

Таким образом, для выбора вариантов струй и их объединений с вагонопотоком $n_{\text{пер}N}$ используется матрица $M_{\text{пер}NRr}$ и матрица для хранения элементов множеств $L'_{\rho N}$, $L'_{\rho N+1}$, которая все время меняется при переходе от множества ρ_{N+1} к ρ_{N+2}. Количество просматриваемых вариантов q_N множества D_N при таком методе поиска вариантов объединения струй с заданной величиной $n_{\text{пер}N+\varepsilon}$ будет значительно сокращено.

Получив множество G_N для N от $r+1$ до s, переходят к поиску наименьшего количества назначений дальних поездов на рассматриваемом полигоне при заданном суммарном перерабатываемом потоке и его оптимальном распределении. При этом можно получить один или группу вариантов. Если будет найден один единственный вариант, то цель достигнута и можно переходить к следующему значению $N_д$. Если определится группа вариантов, то из них необходимо выбрать один, при котором достигается минимум критериальной функции. Для этого надо найти затраты, связанные с количеством назначений, в каждом варианте и тот, в котором они минимальны, принять в качестве решения.

Но прежде чем включить такие варианты в рассмотрение, необходимо проверить их по ограничениям. Варианты, которые не удовлетворяют хотя бы одному из них, исключают из рассмотрения, так как их невозможно практически реализовать. Если ни один из вариантов не будет удовлетворять этим ограничениям, то переходим к варианту с бо́льшим числом назначений, но удовлетворяющему эти ограничения. Если же ни один из вариантов организации вагонопотока в сквозные поезда не будет удовлетворять ограничениям, то это означает, что величина $N_д$ не находится в области допустимого управления Ω (см. рис. 49). В этом случае надо перейти к новому значению $N_д$ в направлении, противоположном первоначальному поиску, по данной фазовой координате.

Если же поиск по фазовой координате $N_д$ не увенчался успехом (не обнаружилось ни одного допустимого варианта организации вагонопотоков в сквозные поезда), то множество $\Omega = \varnothing$. В этом случае следует увеличить число сортировочных станций на полигоне, т. е. соорудить новую. Местоположение ее выбирают так, чтобы возможно сократить обязательную переработку на смежных станциях. Затем разрабатывают исходные вагонопотоки для этой станции и решают задачу первого этапа первоначального программного управления.

После достижения промежуточной цели в результате первого программного управления переходим к получению более точного решения. Для этого используем методику поиска вариантов объединения исходных назначений с заданным перерабатываемым вагонопотоком.

Но прежде чем преобразовать ее — привести к виду, пригодному для использования во втором программном управлении, — необходимо разработать стратегию приближения от промежуточной цели к глобальному оптимуму. Опишем в общих чертах процесс такого приближения. Решив задачу первого программного управления, получаем некоторое значение суммарного перерабатываемого вагонопотока, его оптимальное распределение и наименьшее количество назначений сквозных поездов на станциях полигона. Эти параметры и будут первым начальным приближением $N^0_д$ и $K^0_н$, которым соответствуют векторы управляющих переменных $\{n^0_{перN}\}$ и

$\{R^0_{нN}\}$ — приближение в пространстве поведений функции. Очевидно, окончательное решение находится вблизи значений $N^0_д$ и $K^0_н$ и при других управлениях $\{n_{перN}\}$ и $\{R_{нN}\}$. Приближение для двумерного управляемого процесса производится последовательно, сначала по одной фазовой переменной, затем по другой до устойчивого поведения функции. Поскольку величина $N^0_д = \{n^0_п\}$ получена процедурой оптимизации затрат, связанных с переработкой вагонов на сортировочных станциях, а $K^0_н = \{R^0_{нN}\}$ определялась не в результате оптимизации соответствующих затрат, а как минимальное значение при оптимальных параметрах $N^0_д = \{n^0_{перN}\}$, то за начальное приближение фазовых управлений выбираем фазовую координату $N^0_д$ с вектором оптимального управления $u^0 = \{n^0_{перN}\}$. Затем определим оптимальное управление $u_1\{R_{нN}\}$, для чего находим значения $R_{н_1}$, $R_{н_2}$, $R_{н_3}$, ..., $R_{н_s}$, удовлетворяющие неравенствам:

$$n_{перN} \leqslant n^0_{перN}; \tag{317}$$

$$R_{нN} \leqslant R^{ск}_{нN} \tag{318}$$

при условии, что

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{N=r+1}^{s} n_{перN} = \min; \\ &\sum_{N=1}^{s} R_{нN} = \min \end{aligned}\right\} \tag{319}$$

и с учетом ограничений

$$\left.\begin{aligned} &n_{перN} \leqslant n^{max}_{перN}; \\ &R_{нN} \leqslant R_{нN}, \end{aligned}\right\} \tag{320}$$

где $R^{ск}_{нN}$ — число назначений на станции N в сквозном варианте организации вагонопотоков.

Таким образом находим первое приближение по оптимальному поведению $u^1_1 = \{R^1_{нN}\}$ фазовой переменной $K^1_н$ при уменьшении размеров переработки от первоначального приближения $N^0_д = \{n^0_{перN}\}$. Далее переходим к приближению по другой фазовой переменной $N_д$ исходя из начального приближения по $K'_н = \{R'_{нN}\}$. Для этого определяем размер переработки $N^*_д = \{n^{1*}_{перN}\}$, который получился при уменьшении от $N^0_д$ в результате первого приближения по $K_н$ к значению $K^1_н = \{R^1_{нN}\}$. Для заданного значения $N^{1*}_д$ находим вектор оптимального управления $u^1 = \{n^1_{перN}\}$, т. е. переходим к приближению по $N_д$. Если вектора $\{n^{1*}_{перN}\}$ и $\{n^1_{перN}\}$ совпадают по всем компонентам с заданной точностью $\varepsilon = \Delta = 1$, то распределе-

ние как по $N_д = \{n_{\text{пер}N}\}$, так и по $K_н = \{R_{нN}\}$ устойчивое. А это указывает на то, что уравнение

$$R\left(n_{\text{пер}r+1}, n_{\text{пер}r+2}, \ldots, n_{\text{пер}s}; R_{н_1}, R_{н_2}, \ldots, R_{н_s}\right) = \min \sum_{i=1}^{s} g_i \qquad (321)$$

решено с заданной точностью и это приведет к конечной цели управления.

Теперь вернемся к выбору вариантов объединения струй на отдельной станции переработки. При первом программном управлении использовался прием поиска присоединяемой одиночной струи к какому-либо их объединению через матрицу $\{M_{\text{пер}NRr}\}$. При этом выбиралась струя только с определенным размером переработки. Однако согласно стратегии второго программного управления теперь понадобится просматривать варианты объединений струй с размерами переработки, равными или меньшими заданных. Для использования уже имеющейся методики поиска вариантов струй и их объединений с заданной величиной $n_{\text{пер}N}$ в нее необходимо внести следующие изменения.

Для выбора вариантов из одиночных исходных струй с величиной переработки $\leqslant n_{\text{пер}N}$ после определения величины $R_{\text{ис}}$ из матрицы $M_{\text{пер}NRr}$ в множество G_N включают все исходные назначения с $R \leqslant R_{\text{ис}}$. Исходные струи с $R > R_{\text{ис}}$ исключают из дальнейшего рассмотрения. Струи с $R < R_{\text{ис}}$ образуют множество $L'_{\rho N}$, как и при первом программном управлении. Далее к каждому элементу $l'_{\rho N} \in L'_{\rho N}$ определяют через матрицу $M_{\text{пер}NRr}$ присоединяемые струи с $R \leqslant R_{\text{ис}}$ и включают их в множество G_N. Струи с $R < R_{\text{ис}}$ включают в следующее множество $L'_{\rho N+1}$, а с $R > R_{\text{ис}}$ исключают из возможных вариантов с большим числом объединяемых исходных назначений. Аналогично просматривают множества $L'_{\rho N+2}$, $L_{\rho N+3}$, ..., L'_{R_N} и т. д. до тех пор, пока не получат множество L'_{R_N} или последующее просматриваемое $L_{\rho_{N+n+1}}$ не окажется пустым.

После того как определено множество G_N для всех N от $r+1$ до s, переходят к поиску вариантов организации вагонопотоков в сквозные поезда для размеров переработки, равных заданным или меньших, используя методику поиска наименьшего количества назначений дальних поездов для заданного полигона с одним лишь изменением, которое заключается в том, что при просмотре допустимых вариантов каждый раз находят критериальную функцию и запоминают варианты не с наименьшим, а с наивыгоднейшим числом назначений.

Изменение методики поиска первого программного управления не представляет никакой сложности для современного высокоуровневого языка программирования *PL/I*, операционной системы ОС и вычислительных машин единой системы типа ЕС-1033.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулиничев В. М. Метод непосредственного расчета плана формирования грузовых поездов. — Ж.-д. трансп. № 11, 1958. с.31—47.

2. Акулиничев В. М. Новый метод расчета плана формирования поездов. — Тр. МИИТ, 1959, вып. 113, с.76—102.

3. Акулиничев В. М. О методике расчета эффективности отправительской маршрутизации. — Тр. МИИТ, 1961, вып. 137, с. 96—117.

4. Акулиничев В. М. Система организации вагонопотоков на железнодорожном транспорте. М., Транспорт, 1969. 120 с. (Тр. МИИТ, Вып. 306).

5. Акулиничев В. М., Кирьянова, О С., Боровой Н. Е. Организация вагонопотоков и маршрутизация перевозок. М., Транспорт, 1970, 319 с.

6. Акулиничев В. М. Основные направления в размещении и развитии сортировочных станций на сети железных дорог. — Тр. МИИТ, 1970, вып. 333, с.3—65.

7. Акулиничев В. М., Бодюл В. И., Казюлин Г. Е. Определение межоперационных простоев вагонов на сортировочных станциях. — Тр. МИИТ, 1974, вып. 379, с. 3—33.

8. Акулиничев В. М., Александров В. И., Корешков А. И. Определение дополнительных эксплуатационных расходов при выполнении реконструктивных работ на эксплуатируемых путях сортировочной станции. — Тр. МИИТ, 1976, вып. 537.

9. Балалаев С. В. Актуальные вопросы размещения сортировочных станций. — Ж.-д., трансп., 1965, № 11, с. 33—37.

10. Бернгард К. А., Межова Р. В., Шульько В. П. Проблемы размещения и развития сортировочных станций. — Ж.-д. трансп. 1968, № 12, с.17—23.

11. Бернгард К. А. Групповые поезда. М., Трансжелдориздат, 1953, 167 с. (Тр. ЦНИИ МПС, Вып. 76).

12. Бернгард К. А., Литова Р. В., Шульько В. П. Размещение сортировочных станций (теория и методика расчетов). М., Транспорт, 1972. 160 с. (Тр. ЦНИИ МПС, Вып. 458).

13. Бернгард К. А. Техническая маршрутизация железнодорожных перевозок. М., Трансжелдориздат, 1956. 243 с. (Тр. ЦНИИ МПС, Вып. 119).

14. Васильев И. И. Графики и расчеты по организации железнодорожных перевозок. М., Трансжелдориздат, 1941. 576 с.

15. Васильев И. И. Гордеенко П. Я. Организация движения на железнодорожном транспорте. М., Трансжелдориздат, 1948. 452 с.

16. Дуваляи С. В. Методы и алгоритмы решения задач планирования и учета на железнодорожном транспорте. М., Транспорт, 1969. 256 с. (Тр. ЦНИИ МПС, Вып. 401).

17. Казюлин Г. Е. Затраты вагоно-часов на накопление составов сквозных и участковых поездов. — Тр. МИИТ, 1975, вып. 458, с. 49—72.

18. Казюлин Г. Е. Выбор оптимального варианта организации вагонопотоков методом динамического программирования. — Тр. МИИТ, 1971, вып. 362, с.18—35.
19. Корешков А. П. Выбор оптимальной очередности усиления технического оснащения сортировочного комплекса на односторонней сортировочной станции. — Тр. МИИТ, 1975, вып. 465, с. 16—19.
20. Ларионов В. С. Новый метод разработки плана формирования поездов. — Ж.-д. трансп., 1947, № 10, с.64—73.
21. Одинцов Л. В. Организация движения на железнодорожном транспорте. М., 1963. 152 с. В надзаг.: ВЗИИТ.
22. Осипов В. Т. Отправительская маршрутизация на железнодорожном транспорте. М., Трансжелдориздат, 1958. 486 с.
23. Петров А. П. План формирования поездов. М., Трансжелдориздат, 1950. 483 с.
24. Повороженко В. В. Распределение сортировочной работы и размещение сортировочных станций на перспективу. — Техника ж. д. 1947, № 9, с. 33—43.
25. Попов А. И. Расчет плана формирования одногруппных и групповых поездов методом направленного перебора вариантов. — Тр. МИИТ, 1966, вып. 229, с. 5—68.
26. Составление плана формирования поездов на электронных машинах / Под общ. ред. А. П. Петрова. М., Транспорт, 1962. 234 с.
27. Соколов П. С. Экономика сортировочных станций и организация вагонопотоков. М., Трансжелдориздат, 1960. 284 с.
28. Стопичев. С. Г. Совместный расчет плана формирования отправительских и технических маршрутов на ЭЦВМ. Тр. ХабИИЖТ, 1965, вып.22, с. 39—43.
29. Стопичев С. Г., Хуан Куан-Д. А. Применение автоматических вычислительных машин для расчета плана формирования поездов.— Тр. ЛИИЖТ, 1960, вып. 170, с. 109—139.
30. Тулупов Л. П. Расчет плана формирования поездов с помощью вспомогательных таблиц. — Тр. МИИТ, 1953, вып. 79, с. 150—165.
31. Тихомиров И. Г. Основы технологии работы участковых и сортировочных станций. М., Транспорт, 1973. 271 с.
32. Угрюмов Л. К. Совершенствование методов расчета плана формирования. — Ж.-д. трансп., 1953, № 6, с.58—66.
33. Червяков В. И. Комплексное решение задачи развития и распределения сортировочной работы между станциями. — Тр. МИИТ, 1978, вып. 592, с. 61—84.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора 5

Раздел I . . . . . .
СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ВАГОНОПОТОКОВ

Глава 1. **Задачи и принципы**

1. Общие положения 7
2. Классификация грузовых поездов 8
3. Исходные положения для разработки плана формирования поездов 10
4. Разработка плана формирования поездов 14
5. Направление вагонопотоков 18
6. Дисциплина выполнения плана формирования 19

Глава 2. **Основные расчетные нормативы**

1. Общие положения 21
2. Методика определения нормативов для плана формирования одногруппных поездов 24
3. Анализ расчетных нормативов плана формирования грузовых поездов 33

Глава 3. **Определение затрат и экономии вагоно-часов в плане формирования**

1. Общие положения 38
2. Расчетная норма 40
3. Приведенная экономия времени 45

Глава 4. **Методы расчета плана формирования одногруппных грузовых поездов**

1. Метод аналитических сопоставлений струй вагонопотоков . . . 49
2. Метод абсолютных расчетов 56
3. Метод определения группы лучших вариантов 58
4. Метод совмещенных аналитических сопоставлений 62
5. Непосредственный расчет плана формирования 66

Глава 5. **Расчет плана формирования поездов на ЭВМ**

1. Общие положения 74
2. Алгоритмы расчета плана формирования одногруппных поездов 75
3. Расчет плана формирования поездов методами линейного программирования 83
4. Совместный расчет плана формирования маршрутов с мест погрузки и с сортировочных станций. 88

Глава 6. **План формирования специальных поездов**

1. Организация порожних вагонопотоков 96
2. План формирования скорых и ускоренных грузовых поездов . . 100
3. Внутридорожный план формирования поездов 100

Раздел II

УПРАВЛЕНИЕ ВАГОНОПОТОКАМИ

Глава 7. **Организация вагонопотоков на станциях**

1. Постановка вопроса и основные положения 103
2. Закономерности поступления вагонов на станцию 105
3. Обслуживание поездов и вагонов 110
4. Накопление вагонов в пунктах формирования 123
5. Переходный режим работы сортировочных станций 136
6. Общее время нахождения вагонов на станции 147
7. Общая приведенная экономия времени нахождения вагонов на станциях при пропуске вагонопотока без переработки 149
8. Взаимодействие основных элементов сортировочной станции 157

Глава 8. **Управление вагонопотоками на полигоне**

1. Принципы оптимизации управления вагонопотоками 165
2. Система управления вагонопотоками. 167
3. Основные показатели системы управления вагонопотоками . . . 171

Глава 9. **Развитие и размещение сортировочных станций**

1. Основные положения и исходные данные 175
2. Методика усиления пропускной и перерабатывающей способности сортировочного комплекта 178
3. Строительные и эксплуатационные затраты при развитии сортировочного комплекта 183
4. Оптимизация размещения сортировочных станций 191

Глава 10. **Оптимизация вагонопотоков на сети и технического оснащения станций**

1. Оптимальный вариант организации вагонопотоков для заданного технического состояния станций 196
2. Оптимальный вариант организации вагонопотоков и развития станций (Постановка задачи) 199
3. Методика выбора оптимального варианта 211

Список литературы 220