

УДК 621.9

ТАТЬЯНЧЕНКО А.Г., профессор, доктор технических наук (ДонНТУ);
ЛАППО И.Н., инженер (ДонНТУ).

Современное состояние и перспективы развития математического моделирования тепловых процессов при обработке отверстий осевым инструментом

Проблема и ее связь с научными или практическими исследованиями

Важнейшей проблемой современного машиностроения является необходимость постоянного повышения точности механической обработки в связи с ростом требования к качеству машиностроительной продукции и обеспечения ее конкурентоспособности. Существенную долю среди операций механической обработки составляют операции обработки отверстий осевым инструментом - сверление, зенкерование, развертывание и другие. Для некоторых типов корпусных деталей операции обработки отверстий составляют до 70% операций механической обработки. Учитывая, что большинство отверстий являются посадочными поверхностями, точность их обработки во многом предопределяет работоспособность и надежность механизма в целом. Поэтому задача повышения качества машиностроительной продукции в значительной степени зависит от точности обработки отверстий. Однако, в настоящее время резервы повышения точности обработки отверстий, связанные с точностью инструмента и оборудования, в настоящий момент исчерпаны. Поэтому новые эффективные решения могут быть получены лишь на основе развития представления о характере развития и понимания физических закономерностей процесса резания при работе осевого инструмента.

В этом плане значительным резервом является предотвращение, компенсация и устранение негативного влияния

тепловых явлений, сопровождающих данный вид механической обработки. Практическая реализация этого направления связана, в первую очередь, с развитием методов математического моделирования сложных взаимосвязанных рабочих процессов при обработке отверстий осевым инструментом.

Постановка задачи

Предварительный анализ специальной литературы [1-8, 10, 17] показал, что при моделировании теплофизических процессов обработки отверстий осевым инструментом используются стандартные методы, не всегда адаптированные к условиям данного вида механической обработки. Поэтому в данной работе поставлена задача анализа и классификации современных методов моделирования теплофизических процессов при механической обработке резанием, выявления их преимуществ и недостатков применительно к условиям обработки отверстий и определение перспективных направлений в развитии математических моделей и методов моделирования рабочих процессов с учетом особенностей механической обработки отверстий осевым инструментом.

Анализ методов математического моделирования тепловых процессов механической обработки отверстий

Анализ специальной литературы показывает, что в последние годы большое внимание зарубежных и отечественных специалистов уделялось возможности

прогнозирования процессов резания для различных видов механической обработки (точения, сверления, шлифования и др.). В связи с этим обобщение и создание универсальной модели, которая позволила бы прогнозировать область режимов устойчивого процесса резания, является актуальной задачей.

Фундамент науки о точности обработки отверстий заложен советскими учеными А.И. Якушевым, А.П. Соколовским, В.С. Корсаковым, А.Н. Гавриловым, Э.М. Дечко и др. В работах данных авторов исследуются показатели точности отверстий, характер и степень влияния различных факторов на точность обработки отверстий, методы и пути устранения погрешностей обработки отверстий.

Среди работ, посвященных исследованию температурного состояния при обработке отверстий, известны работы [8-11].

Обстоятельные теоретические и экспериментальные исследования тепловых явлений при резании выполнены в работах [12-15], в которых впервые было рассмотрено негативное влияние высоких температур на точность обработки отверстий.

Анализ литературных источников показывает, что большая часть работ в этом научном направлении посвящена исследованию теплофизики процесса ортогонального резания инструментом типа плоского клина [15]. Однако на теоретическом материале и методах исследования, изложенных в данных работах, могут основываться и более сложные задачи, такие как обработка отверстий.

В работах [1, 2] в основу аналитического метода определения режимов резания при обработке отверстий положен энергетический метод, опирающийся на совместное изучение термомеханических явлений и процессов изнашивания инструментов. Первопричиной возникновения в зоне резания тепловых явлений являются механические явления, в основе изучения которых лежит баланс механической

и тепловой энергий для одного зуба осевого лезвийного инструмента, представленного в виде:

$$P_z v = Q = Q_c + Q_{\dot{a}} + Q_{\dot{e}} + Q_{\alpha} \quad (1)$$

где P_z - главная (тангенциальная) составляющая силы резания для одного зуба инструмента, Н; v - скорость резания, м/с; Q - вся теплота в зоне резания, Дж/с; Q_c , $Q_{\dot{a}}$, $Q_{\dot{e}}$, Q_{α} - теплота, переходящая из зоны резания одним зубом соответственно в стружку, деталь, инструмент и окружающую среду, которые можно определить аналитически решением задач теории теплопроводности.

Для отражения термомеханической картины в зоне резания использовался энергетический критерий A , характеризующий тепловую активность стружки относительно всей выделяющейся в зоне резания теплоты и являющегося важной характеристикой процесса, поскольку включает в себя его интегральные параметры - тангенциальную составляющую P_z силы резания и температуру Θ :

$$A = \frac{a_1 b_1 \cdot c_p \cdot \Theta}{P_z} \quad (2)$$

где a_1 , b_1 - толщина и ширина среза, м; c_p - удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м³·К).

В связи с этим была рассмотрена гипотеза о возможном существовании тесной взаимосвязи между относительным линейным износом инструмента, интенсивностью изнашивания и критерием A . Таким образом, может быть реализована возможность оптимизации геометрии осевых инструментов в направлении минимизации осевой силы резания с обеспечением отвода теплоты со стружкой.

В работе [6] были сформулированы основные положения теоремы о расщеплении пространственного процесса теплопроводности на ортогональные (плоскую

и линейную) составляющие, что позволило получить функцию Грина для ограниченных тел с достаточно сложными условиями теплообмена на граничных поверхностях. Данный метод позволил установить принцип пространственно-временного соответствия, который может использоваться при различных случаях механической обработки, когда температура является функцией времени. В данной работе был сформулирован принцип местного влияния, который устанавливает, что температурное поле зависит существенно образом от характера распределения источника тепла лишь на расстояниях одного порядка с размерами области, занятой источником. В области, удаленной от источника, температурное поле практически не изменяется, если заменить распределенный источник тепла приложенным в центре его тяжести сосредоточенным источником равной мощности. При движущемся непрерывно действующем источнике тепла применяется принцип наложения: весь период действия источника разбивается на бесконечно малые элементы и рассматриваются отдельные элементарные воздействия источника на теплопроводящее тело. Эти элементарные тепловые воздействия прикладываются к поверхности тела в последовательные моменты времени в точках, расположенных по оси перемещения источника. Процессы распространения тепла от элементарных воздействий источника рассматриваются независимо друг от друга. Суммированием таких элементарных процессов получается уравнение процесса распространения тепла при непрерывном действии подвижного источника. Принцип наложения применим, если дифференциальные уравнения, описывающие процесс, линейны, то есть, если их коэффициенты не зависят от температуры.

Данные положения при исследовании теплофизических процессов механической обработки отверстий были использованы в работах [3], [4].

Работа [8] посвящена, в первую очередь, процессу теплообразования при неглубоком сверлении, в ней приведены данные по распределению потоков и стоков теплоты в детали, инструменте и стружке.

Однако в данных работах процесс возникновения источников тепла и распределения потоков и стоков теплоты не учитывает вторичного перераспределения потоков теплоты от влияния процесса трения скольжения по передней и задней поверхности режущего инструмента.

В работе [9] исследовано температурное состояние в зоне резания в условиях неустановившегося теплообмена при обработке отверстий осевым инструментом в декартовой системе координат. Решение задачи найдено на математической модели перераспределения первичных и вторичных тепловых потоков между деталью и осевым инструментом с учетом термоупругих деформаций в зоне резания. Полученные аналитические решения были подтверждены экспериментальными исследованиями, а также произведена проверка адекватности комплексной математической модели на основе численного моделирования.

При механической обработке отверстий (например, разворачивании, протягивании) возникает осесимметричная теплофизическая задача, связанная с определением температурного поля в зоне резания, установлением законов распределения температур на контактных поверхностях инструмента, разработкой методов управления интенсивностью тепловых потоков в зоне резания.

Для описания температурных полей, возникающих под действием внешних и внутренних источников теплоты, используют дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, физический смысл которого заключается в том, что уравнение связывает пространственное распределение температуры с изменением ее по

времени. В декартовой системе координат дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho c} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_B}{c\rho} \quad (3)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м³; c – массовая теплоемкость, Дж/кг·°С; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С;

q_B – объемная плотность тепловыделения внутренних источников, Вт/м³; $\Theta = f(x, y, z, \tau)$ – температура твердого тела, имеющего координаты x, y, z в разные моменты времени τ .

Если нагрев осуществляется только внешними источниками теплоты, то $q_B = 0$ и уравнение упрощается. Дальнейшее упрощение можно получить, если положить, что коэффициент теплопроводности не зависит от температуры. В этом случае:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left[\left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) \right] \quad (4)$$

Уравнение (4) справедливо для тел любой формы, как при нагревании, так и при охлаждении в любой среде, и имеет бесконечное множество различных решений. Чтобы получить интересующее нас решение в каждом конкретном случае, необходимо выполнить полное математическое описание процесса теплообмена, то есть указать условия однозначности, в которых должны быть описаны: форма, размеры, теплофизические характеристики тел, в которых происходит процесс передачи теплоты; форма, размеры и распределение плотности тепловых потоков источников или стоков, действующих в рассматриваемом процессе; начальные условия, характеризующие распределение температуры тела до начала процесса; граничные условия, характеризующие тепловое взаимодействие тела с окружаю-

щей средой.

Общеизвестное фундаментальное решение дифференциального уравнения теплопроводности (4), называемое функцией источника, было получено Кельвином и имеет вид:

$$\Theta(x, y, z, t) = \frac{Q}{\lambda \cdot \sqrt{\omega} \cdot (4\pi\tau)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4\omega\tau}\right) \quad (5)$$

где

$$R = \sqrt{(x - x_u)^2 + (y - y_u)^2 + (z - z_u)^2}$$

– расстояние от места вспышки $I(x_u, y_u, z_u)$ до какой-либо точки тела $M(x, y, z)$; $Q = c\rho$ – количество теплоты, внесенной в тело источником, Дж; τ – время, прошедшее от момента теплового импульса [13].

Данное выражение описывает температурное поле, которое возникает в теле под действием мгновенного точечного источника, который не может иметь конфигурации, ограничения, закона распределения плотности по любой из осей, и в предположении, что источник неподвижный, действует весьма короткое время и при $R \rightarrow \infty$ температура $\Theta \rightarrow 0$.

Теплофизическую задачу, возникающую при обработке отверстий, удобнее всего рассматривать в цилиндрической системе координат, для которой применимы те же методы, что и для декартовой, используя при этом дифференциальное уравнение теплопроводности (4) в следующем виде:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м³; c – массовая теплоемкость, Дж/кг·°С; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С; $\Theta = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура твердого тела, имеющего координаты r, φ, z ($x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi, z = z$) в

разные моменты времени t .

Анализ специальной литературы показал, что существуют три группы методов решения тепловых задач: аналитические, численного и математического моделирования (табл.1). При решении задач практической теплофизики наибольшее распространение получил метод источников теплоты или иначе метод функций Грина.

На основе метода источников было получено фундаментальное решение уравнения теплопроводности для осесимметричных теплофизических задач.

Идея метода состоит в том, что если известен закон изменения температуры в неограниченном теле под действием теплоты, внесенной мгновенным точечным источником, то любой процесс распространения в теле теплоты можно представить как совокупность процессов выравнивания температуры от множества таких элементарных источников теплоты, распределенных как в пространстве, так и во времени. Решение задач теплопроводности этим методом сводится к правильному выбору источников теплоты и их распределению, а в основу метода положены два принципа: принцип конструирования решений и принцип отражения источников.

То есть, общее температурное поле, возникающее под действием источника сложной формы, можно получить методом суперпозиции полей, возникающих под действием каждого из мгновенных точечных источников.

Используя принцип наложения температурных полей от элементарных источников теплоты с помощью интегрирования в пространстве и во времени, можно определить температурное поле источника любой формы, произвольным образом расположенного в пространстве и действующего в течение любого промежутка времени.

Вопросу исследования теплофизических процессов при механической обработке отверстий, в том числе глубоких,

посвящен ряд работ российских ученых, среди которых можно выделить работы [3], [4], [5]. В данных работах представлено обоснование применения метода источников для описания осесимметричного температурного поля в теле, ограниченном изнутри цилиндрическим отверстием, при действии локального источника теплоты. Теплофизические процессы в ограниченном теле рассматривались как часть процесса, происходящего в неограниченном теле, с введением фиктивных (отраженных) источников теплоты.

Соотношение для расчета температурного поля в неограниченном теле с мгновенным источником мощностью q_1 в виде окружности радиусом r_1 , действующего в плоскости $z_1 = 0$ в момент времени $t = 0$, в работе [3] представлено в виде:

$$\Theta(r, z, t) = \frac{Q}{8c\rho\sqrt{(\pi\omega t)^3}} * \exp\left(-\frac{r^2 + r_1^2 + (z - z_1)^2}{4\omega t}\right) I_0\left(\frac{r \cdot r_1}{2\omega t}\right), \quad (7)$$

где $Q = 2\pi r_1 q$; $I_0\left(\frac{r \cdot r_1}{2\omega t}\right)$ – функция

Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента; $c\rho$ – объемная теплоемкость; ω – коэффициент теплопроводности.

Таблиця 1

Методы решения дифференциального уравнения теплопроводности

| 1 | Преимущества | Недостатки |
|--|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| 1. Аналитические методы: | | |
| 1.1. Метод Фурье | Возможность получения аналитического решения в неоднородных средах | Неэффективен для задач с внутренними источниками тепла, технически неудобен для двух- и трехмерных задач. Неприменим для неоднородного уравнения теплопроводности и неоднородных граничных условий. Используется для тел простой формы |
| 1.2. Метод интегральных преобразований | Дает стандартную методику, применяемую ко всем задачам одинаковым образом; применим ко всем граничным условиям и не зависит от последних, что устраняет необходимость разработки новой теории для каждого типа граничных условий. | Применим только к краевым задачам для тел полуограниченной протяженности. Трудности при решении многомерных задач и, когда начальные условия заданы в виде функции пространственных координат |
| 1.3. Метод источников | Позволяет описывать тепловые явления в различных системах. Позволяет учитывать геометрию, но не сложную. Можно сравнительно просто написать интеграл, удовлетворяющий дифференциальному уравнению теплопроводности и условиям однозначности | Неустановившиеся процессы сложно моделировать |
| 2. Численные методы: | | |
| 2.1. Метод конечных разностей | Повторяемость простых операций | Физические параметры тела принимаются постоянными |
| 2.2. Метод конечных элементов | Возможность разбиения твердого тела на элементы различной конфигурации. Возможность сравнения условий моделирования и естественного рабочего процесса | Сложность получения априорных оценок. Является приближенным методом, в котором численные погрешности прогнозирования существенно влияют на результат прогнозирования |
| 3. Методы математического моделирования: | | |
| 3.1. Физическое моделирование (метод подобия) | Дает общий метод непосредственного преобразования выражений, содержащих дифференциальные операторы, к простейшим алгебраическим выражениям | Для нахождения критериев подобия следует проводить специальный анализ |
| 3.2. Математическое моделирование (метод электротепловой аналогии) | Возможность моделирования стационарных процессов; имитации переноса теплоты движущимися источниками | Сложности при рассмотрении нестационарных или трехмерных задач теплопроводности – усложняется конструкция модели |

В соответствии с принципом местного влияния [6] температурное поле, возникающее при обработке отверстий, рассматривалось как сумма двух полей: местного, действующего в области источника, и общего, действующего вдали от источника. Местное поле определяло температуру тела непосредственно в области действия источника тепла, а общее определяло повышение температуры местного поля за счет накопления тепла в обрабатываемой детали. Теплопередача в окружающую среду и в инструмент не учитывалась, так как условия теплообмена были скорректированы соответствующими коэффициентами. Влияние СОЖ на температуру в зоне резания учитывалось через снижение осевой составляющей силы резания на 30-35%.

После преобразования решения, осуществив переход от кольцевого источника теплоты к нормально-тороидальному источнику, исходя из принципа пространственно-временного соответствия, было получено ряд решений: для расчета местного поля в области действия локального источника; для расчета общего температурного поля за счет аккумуляции теплоты в теле; для расчета стока теплоты от каждого кольцевого источника.

Таким образом, анализ специальной литературы показал, что при моделировании теплофизических процессов обработки отверстий осевым инструментом используются стандартные методы, не всегда адаптированные к условиям данного вида механической обработки.

Выводы и направление дальнейших исследований

1. Современные методы математического моделирования теплофизических процессов при механической обработке резанием являются универсальными методами, ориентированными на моделирование установившихся стационарных про-

цессов. При этом они, как правило, не учитывают теплопередачу в окружающую среду и инструмент, используя для корректировки условий теплообмена соответствующие коэффициенты, не учитывают особенности тепловыделения при врезании и выходе инструмента.

2. В настоящее время при моделировании теплофизическим процессом механической обработке используется ряд научных положений, таких как принцип местного влияния, принцип пространственно-временного соответствия, справедливость применения которых к конкретным условиям обработки требует дополнительных экспериментальных исследований и замеров.

3. Современные методы численного моделирования позволяют получать адекватные результаты при моделировании теплофизических процессов механической обработки для систем и процессов со сложными граничными и начальными условиями, но достоверность полученных при этом результатов в значительной степени зависит от размеров конечных элементов конечно-элементных моделей. Однако уменьшение размеров конечных элементов приводит к существенному увеличению трудоемкости вычисления. Существенное снижение объема вычислений применительно к обработке отверстий осевым инструментом может быть получено за счет перехода к цилиндрической системе координат и замене объемной задачи плоской.

4. Наиболее перспективными направлениями развития методов математического моделирования теплофизических процессов при механической обработке отверстий осевым инструментом является адаптация метода источников применительно к цилиндрической системе координат, развитие математического аппарата для моделирования неустановившихся теплофизических процессов при врезании, выходе осевого инструмента, а также в условиях теплообмена с СОЖ, создание

математических моделей теплофизических процессов при обработке отверстий комбинированным осевым инструментом.

Библиографический список

1. Баранов А.В. Обеспечение высокоэффективной обработки отверстий // Вестник машиностроения. – 2008. - №7. – с. 42-45.

2. Баранов А.В. Оптимизация лезвийной обработки отверстий на основе энергетических критериев // Вестник машиностроения. – 2011. - №3. – с. 47-50.

3. Барац Я.И., Милованова Л.Р. Тепловые явления при обработке отверстий //СТИН. – 2008. - №4. – с. 22-26.

4. Барац Я.И., Милованова Л.Р. Осесимметричные тепловые задачи, возникающие в процессах обработки отверстий //Физика и химия обработки материалов. – 2008. - №1 – с.64-70.

5. Барац Я.И., Маслякова И.А., Барац Ф.Я. Математические модели технологической теплофизики и физических процессов. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2002. – 89 с.

6. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951. – 297 с.

7. Костюкович С.С., Дечко Э.М., Долгов В.И. Точность обработки глубоких отверстий. – Минск: Вышэйш. школа, 1978. – 144с.

8. Юлковский П.А., Крючков Н.К., Шевель А.П. Повышение качества спиральных сверл. – Челябинск: Южноуральское книжное издательство, 1970. – 112с.

9. Татьянченко А.Г. Теоретические основы прогнозирования термоупругих деформаций осевого инструмента и детали и их влияние на точность обработки отверстий. Автореф. дис. докт. техн. наук./ Д.. ДонНТУ, 2006. – 36 с.

10. Силин С.С. Метод подобия при

резании металлов. – М.: Машиностроение, 1979. –152с.

11. Мальшко И.А. Исследование влияния конструктивных элементов разверток на точность обработки отверстий: Автореф. дис. канд.техн.наук :05.03.01/Донецк. политехн. ин-т. – Донецк, 1979. – 25 с.

12. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов - М.: Машиностроение,1981. – 279 с.

13. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

14. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

15. Якимов А.В. и др. Теплофизика механической обработки: Учеб. пособие/А.В.Якимов, П.Т.Слободяник, А.В.Усов. - К.: Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.

16. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Издательство «Наука», 1964.- 488 с.

17. Якухин В.Г., Пономарев А.В., Максимов А.Д. Влияние тепловых явлений на процессы механической обработки // СТИН. – 2009. - №8. – с. 29-35.

Аннотации:

Рассмотрены и классифицированы современные методы математического моделирования теплофизических процессов, возникающих при обработке отверстий осевым инструментом. На основе анализа существующих методов выявлены перспективные направления их дальнейшего развития с учетом особенностей развития рабочих процессов для данного вида механической обработки.

Ключевые слова: тепловые процессы, математическое моделирование, механическая обработка отверстий осевым инструментом, установленные и не установленные тепловые процессы, граничные условия, цилиндрическая система координат, функции Бесселя, комбинированный

осевой инструмент.

Modern state and prospects of development of mathematical design of thermal processes at treatment of opening the axial instrument. Tatyanchenko A.G., Lappo I.N.

The modern methods of mathematical design of thermophysical processes, arising up at treatment of hole opening an axial instrument are considered and classified. On the basis of analysis of existent methods perspective directions of their further development are educed taking into account the features of development of working processes for this type of tooling.

Keywords: thermal processes, mathematical design, hole opening, set and unset thermal processes, border terms, cylindrical system of coordinates, functions of Bessel, combined axial instrument.

Сучасний стан та перспективи розвитку математичного моделювання теплових процесів при обробці отворів осьовим інструментом / Татяниченко О.Г., Лаппо І.М.

Розглянуті та класифіковані сучасні методи математичного моделювання теплофізичних процесів, що виникають при обробці отворів осьовим інструментом. На підставі аналізу існуючих методів виявлені перспективні напрямки їх подальшого розвитку з урахуванням особливостей розвитку робочих процесів для даного виду механічної обробки.

Ключові слова: теплові процеси, математичне моделювання, механічна обробка отворів осьовим інструментом, сталі та несталі теплові процеси, граничні умови, циліндрична система координат, функції Бесселя, комбінований осьовий інструмент.

УДК 622.822 : 622.271

ОМАРОВ А.Д., д.т.н., проф., ректор (Казахский университет путей сообщения)
САРЖАНОВ Т.С., д.т.н., профессор (Казахский университет путей сообщения)
МУСАЕВА Г.С., д.т.н., профессор (Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева)

Накопление остаточных деформаций в балластном слое и земляном полотне

Введение

В Послании президента Республики Казахстан Н.А. Назарбаева принята развернутая программа, направленная на коренную перестройку всего хозяйственного механизма, ускорение социально-экономического развития страны, всемерную интенсификацию и повышение эффективности производства на базе научно-технического прогресса и значительное место отведено дальнейшему ком-

плексному развитию железнодорожного транспорта, который является важным звеном современного промышленного производства [1-3].

Постановка научного задания

В связи с ростом объемов перевозок на сети железных дорог Республики Казахстан актуальным становится увеличение скоростей и массы грузовых поездов. Это требует проведения организационно-