

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Вятский государственный университет»

А. И. Агапов

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ПИЛЕНИЯ
НА ЛЕСОПИЛЬНЫХ РАМАХ**

Киров
2018

УДК 674.023.053:621.933.6

ББК 37.132.02-5

A233

*Печатается по рекомендации Научного совета
Вятского государственного университета*

Рецензенты:

С. Н. Рыкунин, профессор, доктор технических наук Мытищинского филиала МГТУ им. Н. Э. Баумана;

А. И. Скворцов, профессор, доктор технических наук ВятГУ

Агапов, А. И.

A233 Совершенствование процесса пиления на лесопильных рамах : [монография] / А. И. Агапов. – Киров : Научное изд-во ВятГУ, 2018 – 319 с.

ISBN 978-5-98228-146-3

В монографии рассмотрена проблема совершенствования процесса пиления древесины на лесопильных рамах и определены оптимальные математические модели для различных способов перемещения пил и заготовки.

УДК 674.023.053:621.933.6

ББК 37.132.02-5

ISBN 978-5-98228-146-3

© ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (ВятГУ), 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩЕПРИНЯТЫЕ ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	9
1. ОСНОВНЫЕ ПУТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПИЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ НА ЛЕСОПИЛЬНЫХ РАМАХ	
1.1. Особенности процесса пиления древесины рамными пилами	12
1.2. Совершенствование кинематики процесса пиления древесины рамными пилами.....	20
1.3. Возможные варианты синхронизации перемещений инструмента и заготовки и методические подходы к их решению	22
1.4. Вопросы совершенствования конструкции лесопильных рам	28
1.5. Основные выводы.....	34
2. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ПОДАЧИ	
2.1. Классификация главного движения.....	37
2.2. Классификация движений подачи	39
2.3. Основные выводы.....	44
3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПИЛ И РАВНОМЕРНОЙ СКОРОСТИ ПОДАЧИ	
3.1. Траектории движения зубьев пилы в пропиле	46
3.2. Величина потери рабочего хода.....	48
3.3. Подача на зуб	54
3.4. Путь скобления	61
3.5. Глубина вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода	65
3.6. Влияние основных факторов на кинематические показатели процесса пиления	74
3.7. Пиление древесины двухсторонними рамными пилами.....	87
3.8. Экспериментальные исследования перемещения распиливаемой заготовки и вальцов.....	98
3.9. Основные выводы.....	101

4. РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ПОДАЧИ И ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПИЛ

4.1. Перемещение заготовки за холостой ход.....	103
4.2. Перемещение заготовки за рабочий ход	108
4.3. Перемещение заготовки за рабочий и холостой ходы	113
4.4. Движение заготовки с циклом за ход и с переменной скоростью, не достигающей нулевого значения	117
4.5. Движение заготовки с циклом за оборот	118
4.6. Кулисно-дифференциальный механизм подачи	122
4.7. Кривошипно-кулисный механизм подачи с вращающейся кулисой	123
4.8. Механизм подачи с эллиптическими колесами	127
4.9. Механизм подачи с овальными колесами.....	131
4.10. Механизм подачи с эксцентричными круглыми колесами.....	136
4.11. Механизм подачи с шарнирами Гука	143
4.12. Основные выводы.....	152

5. РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРИ РАВНОМЕРНОЙ СКОРОСТИ ПОДАЧИ И КАЧАНИИ ПИЛ

5.1. Движение пил по эллиптической траектории	154
5.2. Движение пил по каплевидной траектории.....	162
5.3. Движение пил по незамкнутой криволинейной траектории.....	177
5.4. Основные выводы.....	182

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОВЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАСПИЛИВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПИЛ

6.1. Математическое описание модели движения заготовки.....	183
6.2. Упрощенные математические модели движения заготовки.....	191
6.3. Основные выводы.....	220

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОВЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПИЛ ПРИ РАВНОМЕРНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ

7.1. Математическое описание теоретической траектории движения пил	224
7.2. Определение математической модели идеальной траектории движения пил	233

7.3. Определение математической модели упрощённой траектории движения пил	241
7.4. Основные выводы.....	260
8. АНАЛИЗ СИНХРОНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЙ РЕЗАНИЯ И ПОДАЧИ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИЗМЕНЕНИИ СПОСОБОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПИЛ И ЗАГОТОВКИ	
8.1. Движение пильной рамки по замкнутой самопересекающейся кривой с двумя осями симметрии	262
8.2. Движение пильной рамки по замкнутой самопересекающейся кривой с одной осью симметрии.....	270
8.3. Движение пильной рамки за рабочий ход по кривой с двумя осями симметрии, а за холостой ход – по каплевидной траектории	286
8.4. Движение заготовки по синусному закону с циклом, равным продолжительности хода пильной рамки	292
8.5. Основные выводы.....	303
9. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ	305
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	311
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	312

ОБЩЕПРИНЯТЫЕ ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ВМТ – верхняя мертвая точка (верхнее крайнее положение пил и пильной рамки)

НМТ – нижняя мертвая точка (нижнее крайнее положение пил и пильной рамки)

S_o – посылка, перемещение заготовки за один оборот кривошипно-шатунного механизма, мм

S_{op} – рисковая (фактическая) посылка, мм

$S_{ок}$ – конструктивная посылка на вальцах, мм

$S_{оц}$ – посылка на циферблате, мм

C_c – величина скольжения заготовки (бруса) в вальцах

R – радиус кривошипа привода механизма резания (половина хода пил), мм;

t – шаг зубьев пилы, мм;

H – ход пильной рамки, мм;

$L_{ш}$ – длина шатуна, мм;

λ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна, $\lambda = R/L_{ш}$;

φ – угол наклона пилы, рад;

$S_{оу}$ – абсолютная величина наклона пилы на величине хода пилы, мм;

ξ – относительная величина уклона пилы, $\xi = S_{оу}/S_o$;

ξ_k – конструктивный относительный уклон пилы, $\xi_k = S_{оу}/S_{ок}$;

α – угол поворота кривошипа, рад;

$\alpha_{ск}$ – угол поворота кривошипа, при котором заканчивается скобление зубьями пилы дна пропила, рад;

α_o – угол опережения начала перемещения заготовки, рад;

α_z – угол запаздывания начала подачи заготовки, рад;

$\alpha_{S_z max}$ – угол поворота кривошипа, при котором подача на зуб принимает первое максимальное значение, рад;

$\alpha_{S_z min}$ – угол поворота кривошипа, при котором подача на зуб принимает минимальное значение, рад;

$\alpha_{\delta max}$ – угол поворота кривошипа, при котором наблюдается максимальная глубина вдавливания зубьев пилы в древесину, рад;

ω – угловая скорость вращения коленчатого вала, рад/с;

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹;

y – перемещение пил (пильной рамки) по вертикали, мм;

y_n – величина потери рабочего хода, мм;

a_n – относительная величина потери рабочего хода, $a_n = y_n/H$;
 $y_{ск}$ – путь скобления зубьями пилы дна пропила, мм;
 x – траектория зуба пилы в пропиле (перемещение зуба пилы относительно распиливаемой заготовки), мм;
 x_p – траектория зуба пилы в пропиле во время рабочего хода, мм;
 x_x – траектория зуба пилы в пропиле во время холостого хода, мм;
 x_1, x_2 – траектория относительного движения соответственно первого и второго соседних зубьев пилы в пропиле, мм;
 x_g – перемещение вальца или распиливаемой заготовки (заготовки или бруса), мм;
 x_k – перемещение пил по горизонтали, мм;
 x'_k, x''_k – скорость и ускорение пил по горизонтали, м/с и м/с²;
 ϑ – скорость движения пил по вертикали, м/с;
 ϑ_s – скорость движения распиливаемой заготовки, м/мин;
 ϑ''_s – ускорение распиливаемой заготовки, м/с²;
 $\vartheta_{s\ min}$ – минимальное значение скорости движения распиливаемой заготовки (заготовки, бруса), м/мин;
 $\vartheta_{s\ max}$ – максимальное значение скорости движения распиливаемой заготовки, м/мин;
 S_z – текущее (мгновенное) значение подачи на зуб (толщина срезаемого слоя древесины зубом пилы), мм;
 $S_{z\ ср}$ – среднее значение подачи на зуб, мм;
 $S_{z\ max}$ – максимальная толщина срезаемого слоя древесины зубом пилы, мм;
 $S_{z\ min}$ – минимальная толщина срезаемого слоя древесины зубом пилы, мм;
 δ – текущее (мгновенное) значение глубины вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода, мм;
 δ_{max} – максимальное значение глубины вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода, мм;
 h – высота пропила, мм;
 χ – отношение высоты пропила к ходу пильной рамки, $\chi = h/H$;
 z – число зубьев, находящихся в пропиле, шт;
 i – передаточное отношение механизма;
 i_n – число пил в поставе, шт;
 r – радиус дополнительного кривошипа механизм резания для качания пил, мм;
 A – амплитуда качания пил, мм;

A_o – относительная амплитуда качания пил;

B – ширина пропила, мм;

b – величина смещения узловой точки траектории движения пил от ВМТ, мм;

L_o – расстояние от оси коленчатого вала до ВМТ нижних ползунов пильной рамки, мм;

e – величина смещения узловой точки качания пил от середины хода пил, мм;

T – толщина доски, мм.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс пиления древесины рамными пилами вполне может конкурировать с другими способами продольного деления древесины не только в настоящее время, но и в ближайшей перспективе. Это объясняется более полным удовлетворением технологических, производственных, экономических и социальных требований по сравнению с другими способами продольного пиления древесины. Прежде всего, пиление древесины на лесопильных рамах наилучшим образом соответствует основным показателям заготавливаемого пиловочника в нашей стране как по качеству и размерам, так и объемам перерабатываемого сырья, лучше обеспечивает выполнение качественных показателей, а также получение наибольшего выхода пиломатериала и более высокую производительность. Этот процесс благодаря проходному способу пиления, сравнительно высокому выходу пиломатериалов и качеству обработки, простоте обслуживания, достаточно высокой производительности, хорошему уровню механизации и автоматизации в последнее время получает распространение не только в лесопильном и тарном производствах, но и в производстве паркета, лыж, мебельных заготовок и т. д. Отсюда следует, что вопросы совершенствования процесса пиления древесины на лесопильных рамах со временем становятся еще более значимыми.

К тому же процесс пиления древесины на лесопильных рамах имеет существенные резервы для повышения его эффективности. Повышения эффективности деления древесины рамными пилами можно достигнуть за счет совершенствования самого процесса пиления, конструкции и параметров пил, техники и технологии подготовки пил к работе, а также конструкции самих лесопильных рам. Одним из основных вопросов совершенствования процесса пиления древесины рамными пилами и лесопильных рам является улучшение способа осуществления процесса пиления древесины путем согласования движений резания и подачи.

Результат суммарного действия исходных движений инструмента и заготовки характеризует разновидности технологических способов резания и определяет форму и размеры сечения срезаемого слоя древесины каждым зубом (резцом) пилы. Это в значительной степени оказывает влияние на силовые и качественные показатели, условия работы инструмента и во многом обуславливает выбор параметров инструмента и режимов резания.

В нашей стране вопросы совершенствования процесса пиления древесины рамными пилами и лесопильных рам начали рассматриваться еще в начале 30-х годов XX века. За этот период выполнено огромное количество научных работ, предложено много новых технических решений как у нас в стране, так и за рубежом, а также изготовлено достаточное количество опытных и экспериментальных образцов лесопильных рам с улучшенной кинематикой резания.

Особенностью данной проблемы является то, что на традиционных лесопильных рамах с прямолинейным перемещением пил и с равномерным движением распиливаемой заготовки не обеспечивается согласование движений инструмента и заготовки. В результате этого в начале холостого хода происходит скобление зубьями пилы дна пропила, а во время рабочего хода не обеспечивается срезание зубом пилы слоев древесины равномерной толщины. Это обуславливает значительные колебания величины силы резания, наличие скобления (отбоя) древесины зубьями пилы в начале холостого хода и проскальзывания распиливаемой заготовки в подающих вальцах. Решение этой проблемы производится с целью исключения скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода и стабилизации толщины срезаемого слоя древесины каждым зубом пилы во время рабочего хода. Это позволяет существенно улучшить условия работы рамных пил и тем самым изменить их параметры, прежде всего толщину пилы и углы резания. Все это улучшает качество обработки, уменьшает потери древесины в опилки, снижает энергоемкость процесса и повышает производительность лесопильных рам.

Решение этой задачи возможно путем создания

- механизмов резания со сложным движением пильной рамки;
- механизмов подачи с переменной скоростью распиливаемой заготовки;
- одновременно механизмов резания со сложным движением пил и механизмов подачи с переменной скоростью.

До сих пор при проектировании и эксплуатации лесопильных рам имеются случаи выбора неперспективных способов перемещения пил и распиливаемой заготовки и недостаточно научно и обоснованно выбираются параметры процесса, рамных пил и лесопильных рам. В связи с этим в монографии, прежде всего, излагается анализ предлагаемых ранее способов пиления древесины рамными пилами, теория согласования движений резания и подачи, а также приводятся методики по расчету и выбору режимов резания, параметров рамных пил и лесопильных рам с улучшенной кинематикой резания.

Важны вопросы уравнивания сил инерции, а также поиска устройств для стабилизации натяжения рамных пил. Освещение всех этих вопросов направлено на обеспечение предпосылок к переходу на создание лесопильных рам нового поколения с повышенной эффективностью. Следует отметить, что существенное повышение эффективности лесопильных рам связано с совершенствованием самого способа процесса пиления древесины на лесопильных рамах. Без успешного решения этой проблемы невозможно получить высокую эффективность лесопильных рам нового поколения.

При решении этой проблемы необходимо, прежде всего, обратить внимание на анализ кинематики процесса пиления древесины на лесопильных рамах. Кинематика резания обуславливает принципиальные схемы и разновидности технологических способов обработки. В свою очередь, принципиальные схемы определяются сочетанием исходных движений инструмента и заготовки. Результат суммарного сочетания этих движений характеризует траектории движения резцов в обрабатываемой заготовке, формообразование стружки и новых поверхностей, кинематические и геометрические параметры резца, форму и размеры сечения срезаемого слоя древесины и т. д.

Следовательно, необходимо научно разработать и обосновать новые наиболее эффективные способы пиления заготовок на лесопильных рамах и предложить методики расчета кинематических параметров механизмов резания с качанием пил по предлагаемым перспективным траекториям, а также механизмов подачи с переменной скоростью движения распиливаемой заготовки с остановками и с возвратными перемещениями.

1. ОСНОВНЫЕ ПУТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПИЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ НА ЛЕСОПИЛЬНЫХ РАМАХ

1.1. Особенности процесса пиления древесины рамными пилами

Повышения эффективности деления древесины на лесопильных рамах можно достигнуть за счет совершенствования процесса пиления, конструкции натяжных устройств и параметров рамных пил, техники и технологии подготовки пил к работе, а также конструкции самих лесопильных рам (см. рис. 1.1).

Как видим, эта проблема весьма обширная, многогранная, требующая различных методических подходов при её решении. При этом, как правило, намечается и решается одновременно несколько задач, которые оцениваются технологическими, социальными, техническими и экономическими показателями. Таким образом, сложились три пути повышения эффективности пиления древесины на лесопильных рамах, каждый из которых имеет, в свою очередь, несколько направлений. Эти направления определяются прежде всего состоянием и уровнем науки и техники по рассматриваемым вопросам. Выбор путей и направлений совершенствования процесса и техники пиления древесины на лесопильных рамах может производиться с учетом постановки различных целей и задач. Отсюда методы решения их могут быть многообразны. При анализе и совершенствовании любого процесса резания древесины необходимо системное представление о нем. Если представлять резание древесины как вид механической обработки древесины, то прежде всего производится классификация всех процессов резания по технологическому признаку на группы и разновидности процессов в каждой группе (см. рис. 1.2). По технологическому назначению все процессы резания древесины подразделяются на следующие группы: процессы деления древесины на заготовки, процессы формирования поверхностей детали требуемых размеров и качества и процессы изготовления соединительных элементов в деталях и узлах для выполнения сборочных операций.

Далее все процессы рассматриваются с позиций получения заготовки или детали с образованием:

- стружки отхода,
- стружки продукта,
- бесстружечного резания.



Рис. 1.1. Пути повышения эффективности деления древесины рамными пилами

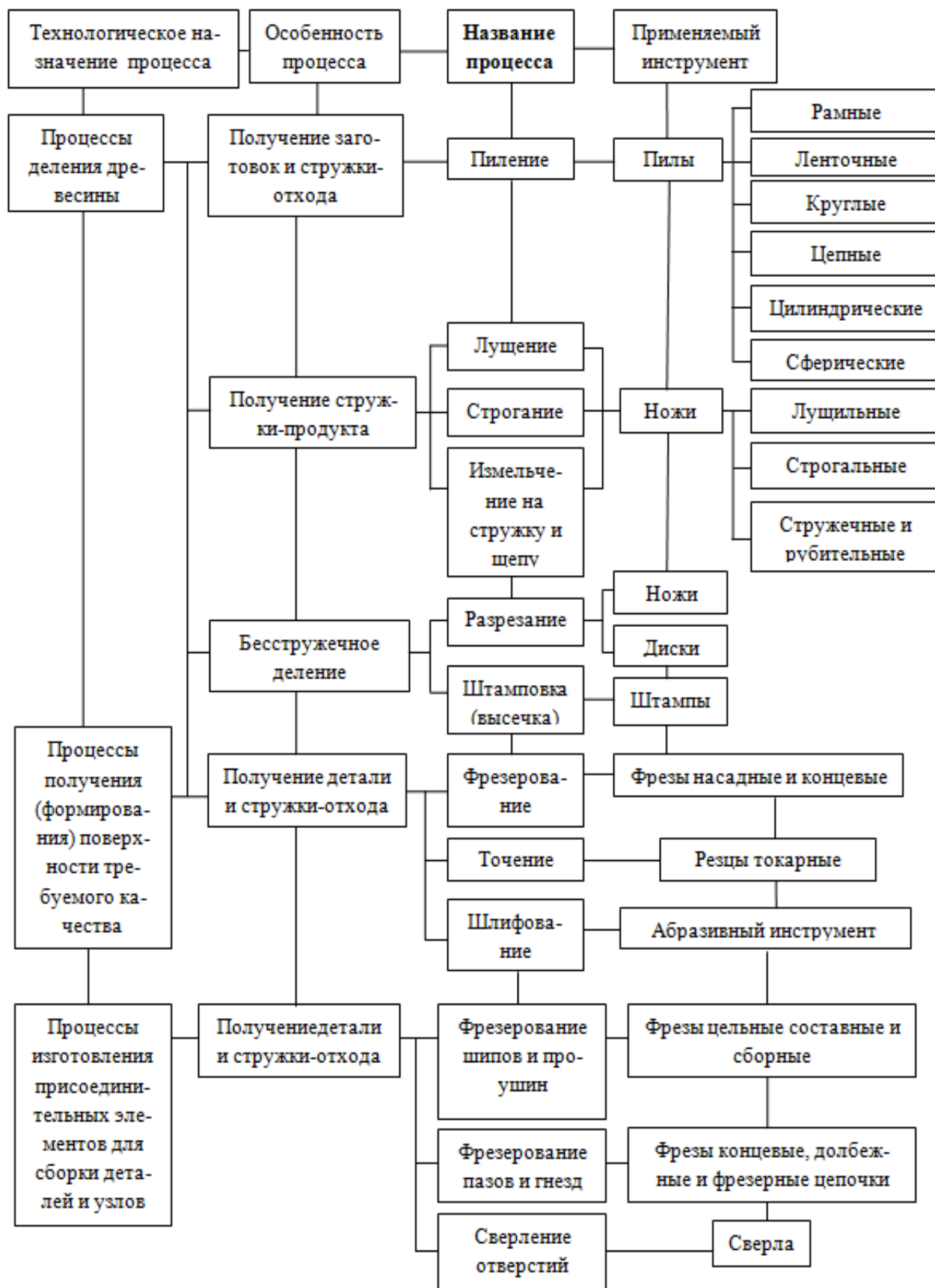


Рис. 1.2. Классификация процессов резания древесины по технологическому признаку

Данный признак пока не всегда учитывается при разработке режимов резания древесины. Каждый процесс резания рассматривается вначале с позиций осуществления способа и получения детали заданного размера. При этом отмечаются общие признаки, присущие способу (рис. 1.3), а затем анализируются особенности перемещения инструмента (пил) и перемещения обрабатываемой заготовки. Общие признаки осуществления процесса пиления древесины рамными пилами заключаются в том, что рамные пилы перемещаются возвратно-поступательно с переменной скоростью, а распиливаемая заготовка может перемещаться перпендикулярно или наклонно к вектору скорости движения пил с равномерной или переменной скоростью.



Рис. 1.3. Классификация перемещений инструмента и заготовки в процессах резания древесины

В теории резания прежде всего изучается взаимодействие резца с древесиной. В этом случае необходимо учитывать особенность волокнисто-слоистого строения древесины. В связи с этим приходится рассматривать положение лезвия резца и скорости главного движения относительно волокон древесины (см. рис. 1.4). По этому

признаку все процессы резания классифицируются на две крупные разновидности срезания слоев древесины лезвием резца: главные и переходные.

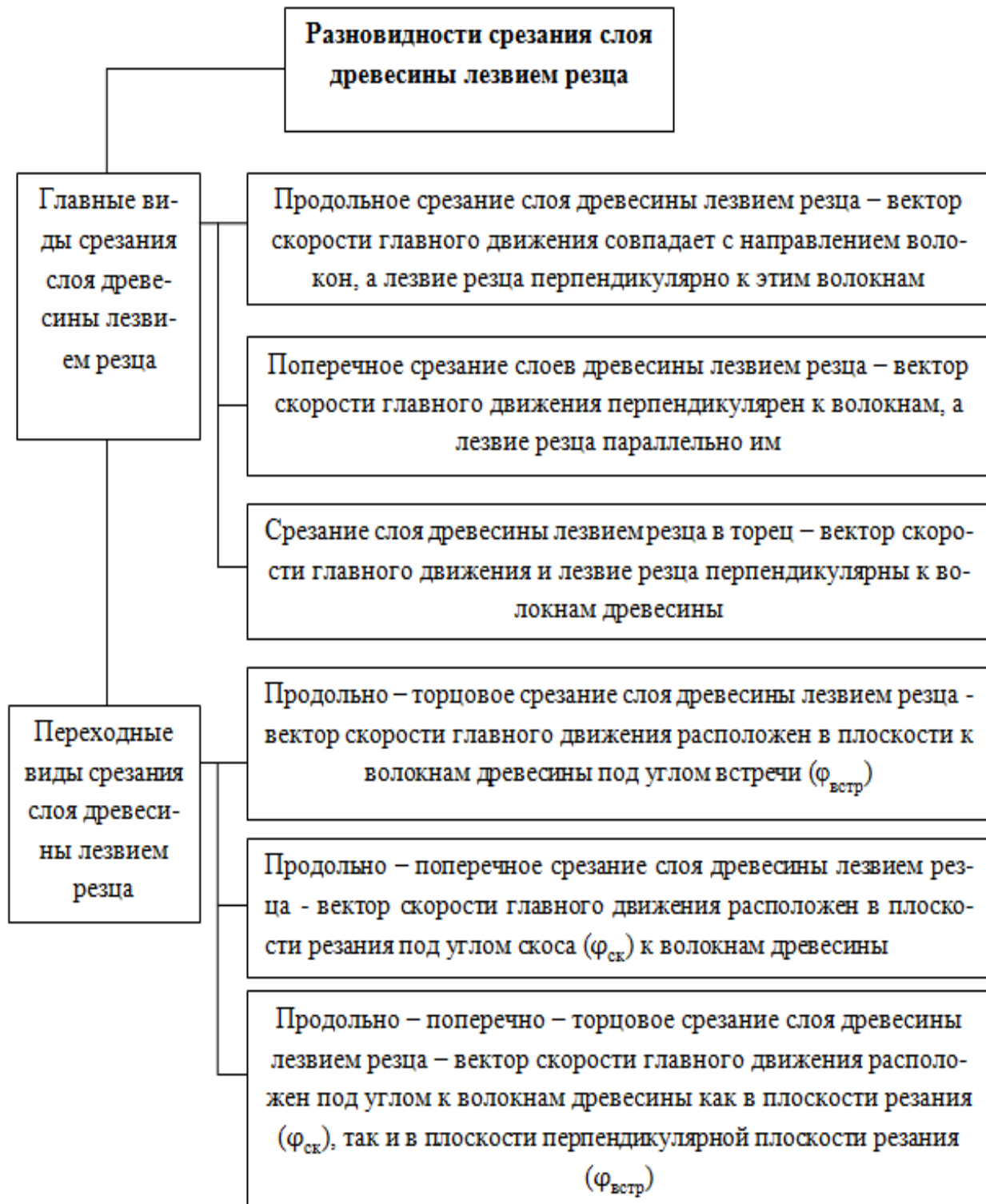


Рис. 1.4. Классификация разновидностей срезания слоев древесины лезвием резца в зависимости от положения лезвия резца и вектора скорости главного движения относительно волокон древесины заготовки

В главных видах при срезании слоев древесины лезвие резца и вектор скорости главного движения расположены перпендикулярно или параллельно волокнам. При этом выделяются три главных вида срезания слоя древесины лезвием резца: продольное, поперечное и торцовое. Если не выполняется такое требование, то процессы срезания слоев древесины относятся к переходным видам. С определенной степенью вероятности в процессе пиления древесины рамными пилами срезание слоя древесины лезвием резца осуществляется в торец. Это во многом предопределяет и силовое взаимодействие резца с древесиной, и стружкообразование в процессе пиления. Следует иметь в виду, что рамные пилы могут перемещаться прямолинейно или по различным сложным траекториям. В свою очередь, распиливаемая заготовка может перемещаться с равномерной или с переменной скоростью, причем переменная скорость может быть с циклом за ход или с циклом за оборот. Кроме того, переменная скорость подачи может осуществляться с остановками или возвратами, а также с опережением или запаздыванием и т. д. На основании такого анализа признаков осуществления способа дается классификация разновидностей способов осуществления процесса резания на лесопильных рамах. Применительно к процессу пиления древесины рамными пилами следует выделить четыре основные разновидности способа его осуществления в зависимости от различного сочетания движений резания и подачи:

- прямолинейное перемещение пил и равномерная скорость подачи распиливаемой заготовки;
- прямолинейное перемещение пил и переменная скорость подачи распиливаемой заготовки;
- перемещение пил по криволинейной траектории и равномерная скорость подачи распиливаемой заготовки;
- перемещение пил по криволинейной траектории и переменная скорость подачи распиливаемой заготовки.

В свою очередь, разновидности траекторий движения пил и скоростей перемещения материала являются дополнительными признаками способа его осуществления. Далее любой процесс рассматривается как объект исследования, представляемый в виде «черного ящика». При этом анализируются факторы, которые принято делить на три группы: факторы, относящиеся к обрабатываемой заготовке; факторы, относящиеся к инструменту, и факторы, относящиеся к станку. Все факторы, в свою очередь, принято клас-

сифицировать и по другим различным признакам, выделяя при этом оценочные показатели. Исследование процесса производится с целью обнаружения общих явлений, происходящих при резании, а также установления закономерностей протекания процесса. При этом определяются математические модели, раскрывающие влияние различных факторов на оценочные показатели процесса. В качестве оценочных показателей, прежде всего, выбираются силовые и качественные факторы. На основе этого затем разрабатываются методики для расчета и выбора как параметров станка и инструмента, так и режимов резания.

Такое системное понимание и представление о процессе необходимо ввиду того, что общие закономерности и явления, имеющие место при резании древесины, обычно рассматриваются и выделяются отдельно в общую главу «Основы теории резания древесины» [35, 44]. При анализе любого процесса резания древесины изучаются его особенности протекания и выявляются закономерности, присущие только этому способу обработки древесины резанием.

В настоящее время в теории резания принято каждый процесс представлять структурно и рассматривать его с точки зрения следующих позиций (см. рис. 1.5): кинематики осуществления способа процесса образования и перемещения стружки, качества обработки, силового взаимодействия, износа и затупления резца, теплофизики, режимов обработки производительности и эффективности процесса. При этом обычно рассматривается влияние различных факторов на основные показатели процесса.

Следует отметить, что определяющим аспектом изучения и анализа любого процесса и особенно пиления древесины рамными пилами является кинематика [1, 7, 11, 17, 20, 34, 72]. Кинематика резания обуславливает принципиальные схемы и разновидности технологических способов обработки заготовки. В свою очередь, принципиальные схемы определяются сочетанием исходных движений инструмента и заготовки. Результат суммарного сочетания этих движений характеризует траектории движения резцов в обрабатываемой заготовке, формообразование стружки и новых поверхностей, кинематические и геометрические параметры резца, форму и размеры сечения срезаемого слоя древесины и т. д.

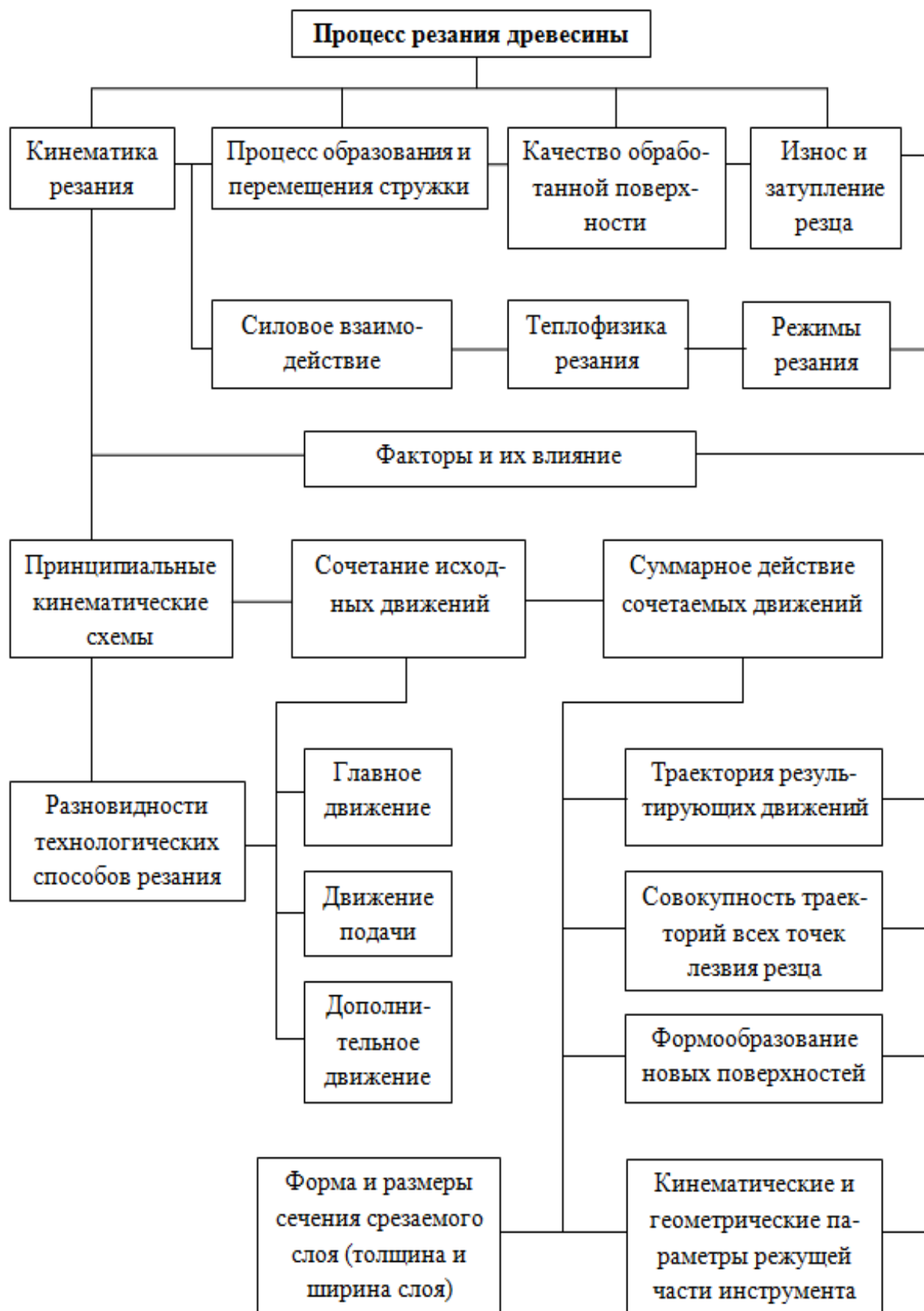


Рис. 1.5. Структурная схема процесса резания древесины

Анализ процесса резания древесины показывает, что кинематика его оказывает влияние на силовые и качественные показатели, условия работы инструмента и во многом обуславливает выбор режимов резания.

Таким образом, изменение кинематики процесса пиления древесины рамными пилами многогранно изменяет протекание процесса, что оказывает существенное влияние на эффективность процесса пиления.

1.2. Совершенствование кинематики процесса пиления древесины рамными пилами

В промышленности наибольшее распространение получил способ пиления древесины рамными пилами, при котором пилы перемещаются прямолинейно и возвратно-поступательно с переменной скоростью, а перемещение распиливаемой заготовки осуществляется с равномерной скоростью в направлении, перпендикулярном скорости движения пил [47]. Этот способ пиления прост в исполнении. Но в этом случае происходит скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода, а во время рабочего хода существенно изменяется толщина срезаемого слоя древесины зубом пилы [1, 80]. При таком способе пиления древесины нагрузки на пилы изменяются в значительных пределах, затрачивается ненужная работа на скобление древесины зубьями пилы в начале холостого хода, что вызывает необходимость использования более толстых пил. Все это ухудшает качество обработки, вызывает повышенные потери древесины в опилки, рост энергопотребления для осуществления процесса и сдерживает рост производительности лесопильных рам.

Улучшение кинематики процесса пиления древесины рамными пилами предполагает изменение параметров рамных пил и конструкции лесопильных рам. Поэтому совершенствование кинематики процесса пиления древесины рамными пилами является первоочередной проблемой.

Для решения этой проблемы необходимо выполнить анализ и систематизацию ранее предлагаемых способов пиления древесины рамными пилами с различными видами движений резания и подачи. При решении этой проблемы необходимо сформулировать основные технологические требования (см. рис. 1.6), так как без них задача будет неразрешима.



Рис. 1.6. Пути совершенствования кинематики процесса пиления древесины рамными пилами

Для решения проблемы нами были сформулированы следующие технологические требования: исключение скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода и стабилизация толщины срезаемого слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода.

Эти технологические требования сформулированы исходя из физической сущности протекания процесса и снижения силовых и улучшения качественных показателей процесса, а также условий работы рамных пил.

Решение данной проблемы возможно путем или изменения закона (математической модели) перемещения пил или распиливаемой заготовки, или совместного изменения законов (математических моделей) движения пил и заготовки.

Указанную проблему невозможно решить без научного обоснования рациональных законов (математических моделей) перемещения пил и заготовки. В связи с этим необходимо прежде всего найти методический подход к решению указанной проблемы.

1.3. Возможные варианты синхронизации перемещений инструмента и заготовки и методические подходы к их решению

Решение проблемы заключается в разработке теории согласования (синхронизации) движений пил и заготовки. Только лишь благодаря разработке теории согласования движений рамных пил и заготовки можно решить вопрос выбора законов (математических моделей) перемещения этих пил и заготовки.

Определение закона (математической модели) перемещения пил (см. рис. 1.7) можно осуществлять при рассмотрении следующего сочетания движений. В первом случае рассматривается вариант, когда известно перемещение заготовки, которое производится с равномерной скоростью, а также известно перемещение пил, осуществляемое в вертикальной плоскости перпендикулярно скорости движения заготовки. Требуется определить закон (математическую модель) перемещения пил в плоскости движения распиливаемой заготовки, в результате чего обеспечивалась бы синхронизация движений пил и заготовки, и тем самым выполнялись технологические требования процесса.

Для решения этой задачи весь цикл процесса пиления древесины рамными пилами, который совершается за один оборот коленчатого вала, исходя из его физической сущности, разделяется на три части, с выделением соответствующих участков, и разрабатываются методики определения перемещения пил на каждом участке в отдельности [25].

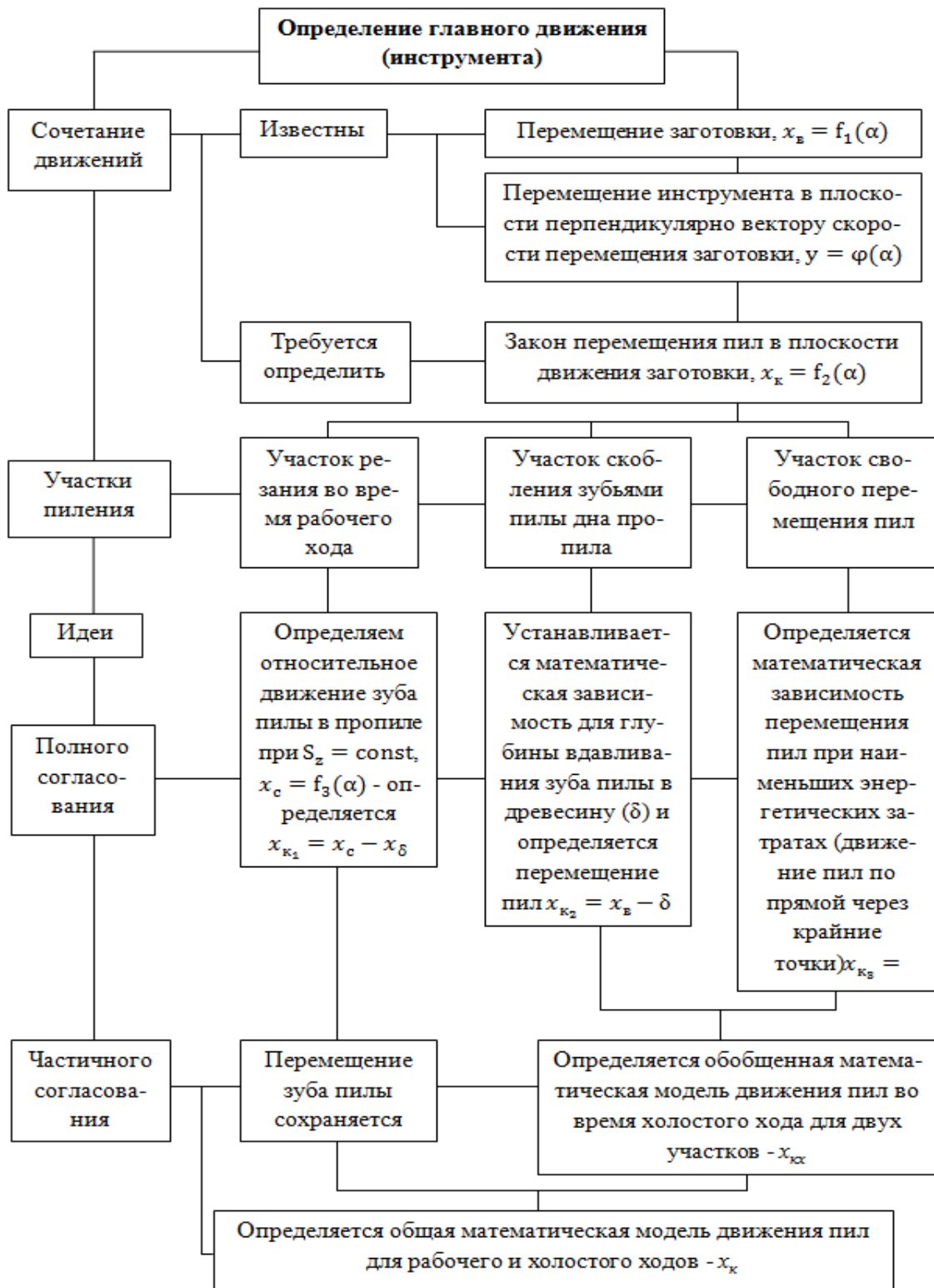


Рис. 1.7. Основные методические положения при определении закона перемещения пил

При решении этих задач могут быть выдвинуты идеи-гипотезы или полного, или частичного согласования главного движения (пил) и движения подачи (заготовки).

На первом участке – участке резания во время рабочего хода – вначале определяется движение зуба пилы относительно плоскости пропила (x_c) при условии выполнения технологического требования – толщина срезаемого слоя древесины сохраняется как постоянная величина на всем диапазоне перемещения пил. Затем, зная закон перемещения заготовки (x_δ), определяется закон перемещения пил:

$$x_{к1} = x_c - x_\delta, \quad (1.1)$$

где $x_{к1}$ – перемещение пил в плоскости движения распиливаемой заготовки на первом участке.

На втором участке – участке скобления зубьями пилы дна пропила в начальный период холостого хода пил – вначале устанавливается математическая зависимость для определения глубины вдавливания зуба пилы в древесину (δ), при условии обеспечения перемещения пил по ранее определенному закону без учета дополнительного движения (качания) пил, а затем определяется закон перемещения пил на данном участке:

$$x_{к2} = x_c - \delta, \quad (1.2)$$

где $x_{к2}$ – перемещение пил в плоскости движения распиливаемой заготовки на втором участке.

На третьем участке – участке свободного перемещения пил во время холостого хода и возвращения их в исходное положение – определяется математическая модель перемещения пил ($x_{к3}$) при наименьших энергетических затратах, которые обеспечиваются путем перемещения пил по прямой линии, проходящей через крайние точки, относящиеся к концу второго участка и началу первого участка. Зная координаты этих точек, составляем математическое уравнение прямой линии, по которой необходимо перемещать пилы на данном участке.

Таким образом, только при использовании такого методического подхода будет обеспечиваться полное согласование движений инструмента и заготовки. При этом перемещение пил на каждом участке будет осуществляться по различным закономерностям. Выполнение таких закономерностей перемещения пил в промышленности, видимо, на данном этапе развития техники и технологии будет вызывать затруднения. Поэтому вполне правомерна постановка

идеи частичного согласования движений инструмента и заготовки с определением математических моделей движения пил отдельно за рабочий и отдельно за холостой ходы или с определением общей математической модели движения пил совместно для рабочего и холостого ходов.

Определение математической модели распиливаемой заготовки (см. рис. 1.8) осуществлялось при рассмотрении следующего сочетания движений. В данном случае известным является перемещение инструмента в вертикальной плоскости (y) перпендикулярно вектору скорости движения распиливаемой заготовки, а требуется определить закон (математическую модель) перемещения распиливаемой заготовки в направлении вектора скорости движения заготовки [26].

На первом участке – участке резания во время рабочего хода – математическая модель перемещения распиливаемой заготовки вальца (x_{θ_1}) определяется исходя из условия обеспечения толщины срезаемого слоя древесины зубом пилы равномерной величины. При этом должны обеспечиваться два условия: величина перемещения распиливаемой заготовки за рабочий ход составляет половину посылки, а закон (математическая модель) перемещения распиливаемой заготовки соответствует закону (математической модели) перемещения инструмента. Тогда обеспечивается прямо пропорциональное перемещение заготовки относительно перемещения пил.

На втором участке – участке скобления зубьями пилы дна пропила – вначале устанавливается математическая зависимость для определения глубины вдавливания зуба пилы в древесину (δ) при условии, если распиливаемая заготовка перемещалась бы так же, как на первом участке, а затем определяется закон (математическая модель) перемещения заготовки на этом участке:

$$x_{\theta_2} = x_{\theta_1} - \delta, \quad (1.3)$$

где x_{θ_2} – перемещение распиливаемой заготовки (вальца) на втором участке.

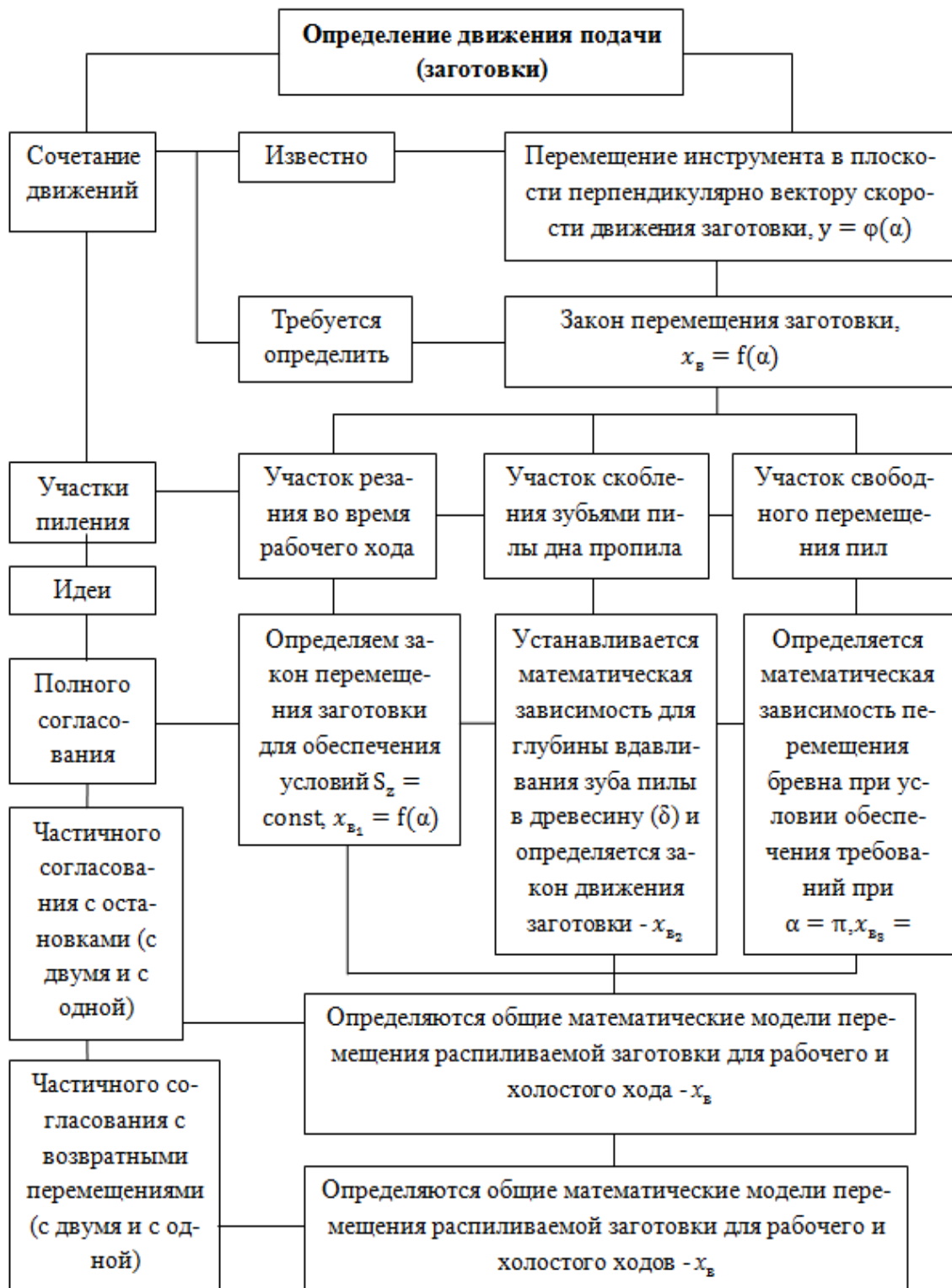


Рис. 1.8. Основные методические положения при определении законов (математических моделей) перемещения заготовки

На третьем участке – участке свободного перемещения пил во время холостого хода – математическая модель перемещения распиливаемой заготовки (x_{B3}) определяется из условия обеспечения

перемещения заготовки в конце этого участка на величину половины посылки и соответствия математической модели перемещения заготовки математической модели перемещения пил.

Таким образом, будет выполняться идея полного согласования движений резания и подачи за счет изменения математических моделей перемещения распиливаемой заготовки. В этом случае закономерности перемещения заготовки как за рабочий, так и за холостой ходы будут различны и практически выполнить их будет сложно. В связи с этим возникают идеи частичного согласования движений резания и подачи путем использования остановок или возвратных перемещений распиливаемой заготовки в моменты, когда пилы расположены в верхней и нижней мертвых точках.

При одновременном изменении математических моделей перемещения пил и заготовки (см. рис. 1.9) следует также рассматривать различное сочетание движений резания и подачи. Здесь можно задаваться или перемещением инструмента в двух плоскостях, или перемещением заготовки с переменной скоростью. При этом устанавливаются математические модели соответственно для определения перемещения распиливаемой заготовки и определения перемещения инструмента. В этом случае также могут решаться идеи полного или частичного согласования движений резания и подачи. Методические подходы при этом остаются прежними. Если решаются идеи частичного согласования, то можно выдвинуть на передний план только одно технологическое требование – условие отсутствия скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода.

Рассмотрение и анализ процесса пиления древесины рамными пилами необходимо начинать с систематизации математических моделей перемещения пил и заготовки, а затем производить определение кинематических параметров процесса при различных способах перемещения пил и заготовки.

В этом случае можно обеспечить более правильный выбор математической модели способа осуществления процесса пиления древесины рамными пилами и получить согласование движения пил и заготовки.



Рис. 1.9. Основные методические положения при различном сочетании и совместном изменении движений резания и подачи

1.4. Вопросы совершенствования конструкции лесопильных рам

Совершенствование конструкции лесопильных рам осуществляется с целью обеспечения многих технологических показателей (см. рис. 1.1). Однако качество конструкции лесопильной рамы оце-

нивается прежде всего надёжностью и долговечностью узлов и станка в целом, степенью уравнивания сил инерции, виброустойчивостью и уровнем звука [46, 77, 79, 80].

Наиболее ответственным механизмом лесопильной рамы является механизм резания, привод которого в последнее время претерпевает значительные конструктивные изменения [46, 77, 80, 83, 86]. Это происходит ввиду необходимости снижения возникающих колебаний нагрузок на электродвигатель привода механизма резания. Решается это путем использования упругих муфт и промежуточных валов с ременной передачей. Этот вопрос комплексный, который должен решаться в совокупности с решением вопросов уравнивания и работы электропривода. Видимо, в перспективе заслуживает внимания электропривод с возвратно-поступательным преобразованием, разработка которого позволит отказаться от кривошипно-ползунного механизма. Электродвигатель с линейным движением можно присоединить непосредственно к пильной рамке. В этом случае упрощается конструкция механизма резания лесопильной рамы. Создание механизмов резания с качанием пильной рамки требует особого подхода. Здесь прежде всего необходимы методики по выбору параметров и расчету динамических характеристик таких механизмов. Для этого требуется знание математических моделей перемещения пил.

Важным аспектом при совершенствовании механизмов резания является отказ от направляющих скольжений и установка пильной рамки в рычажную подвеску. В этом случае несколько усложняется конструкция и даже возрастает масса, но уменьшаются потери на трение, возрастает КПД станка и повышается надежность [78, 80].

Нуждается в конструктивном усовершенствовании и привод подачи. До сих пор на одноэтажных и тарных лесопильных рамах используются коробки скоростей, у которых мал диапазон изменения скоростей и недостаточное количество ступеней. Заслуживает внимание разработка и создание высокомоментных высокочастотных приводов электрического и гидравлического вида с возможностью увеличения диапазона изменения скоростей подачи (передаточного отношения) в соотношении до 10–15 раз. Для выполнения подачи распиливаемой заготовки с переменной скоростью требуется создание специального привода механизма подачи. Механизм подачи функционально включает вальцы передних и задних ворот. Поэтому конструкция ворот и связь их со станиной оказывают влияние на работу механизма подачи.

Конструкция валцов и прижимных устройств механизма подачи также оказывает влияние на протекание процесса резания. Важной характеристикой механизма подачи является усилие прижима валцов к распиливаемой заготовке. Выбор величины усилия прижима валцов к обрабатываемой заготовке должен регламентироваться условиями пиления и определяться в зависимости от величины посылки и диаметра распиливаемого заготовки или высоты бруса. С увеличением диаметра заготовки или высоты бруса усилие прижима валцов к заготовке должно возрастать. Следовательно, необходимы устройства для выполнения этих функций (требований) [39, 41, 49, 82, 102].

Современные лесопильные рамы должны иметь механизм изменения уклона пил, который должен обеспечивать выполнение главного технологического требования – согласование уклона пил с посылкой на всем диапазоне изменения скорости подачи с заданной точностью. Совершенствование конструкции механизма изменения уклона пил с целью повышения точности согласования уклона пил с посылкой, а также уменьшения времени на настройку позволит производить пиление с более точным соблюдением рекомендуемых режимных показателей процесса [5, 8, 53, 68].

Важным аспектом повышения эффективности пиления древесины на лесопильных рамах является научно обоснованный выбор параметров пил. Здесь прежде всего следует отметить выбор уширения зубьев, толщины полотна пилы, угловых параметров зубьев пил и минимально допустимой ширины полотна пилы. Эти вопросы тесным образом связаны с кинематическими, силовыми и качественными показателями процесса и определяются при расчете и выборе режимов резания [21, 22, 30, 59, 68, 73].

На работу рамных пил существенное влияние оказывает качество применяемых устройств для установки и натяжения пил. Современные средства, используемые при установке и контроле степени натяжения рамных пил, нельзя признать удовлетворительными, так как они не обеспечивают возможность натяжения пил с заданной величиной и не поддерживают стабильность этой величины натяжения в процессе работы рамных пил.

Важным параметром является уклон пил, который должен согласовываться с посылкой и для контроля которого должны использоваться более точные приборы и устройства. Установка пил в вертикальной и горизонтальной плоскостях до сих пор выверяется с

помощью простых устройств, требующих много времени и не обеспечивающих необходимой точности установки рамных пил как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях [5].

Следует пересмотреть и вопросы применения межпилльных прокладок, изготавливаемых, как правило, из породы березы. Срок службы таких прокладок сравнительно невелик, да и точность их изготовления низкая. Создание прокладок из легких металлов и сплавов с магнитами или из прессованных или литых компаундных полимерных материалов (пластиков) с магнитами – вот перспективный путь совершенствования межпилльных прокладок. Боковой прижим межпилльных прокладок до сих пор не регламентирован, и устройства, используемые для этой цели, не позволяют создать требуемое необходимое усилие бокового зажима прокладок. Все это снижает точность установки пил и оказывает отрицательное влияние на качество пиломатериалов и энергоемкость процесса, ведет к потере древесины в опилки.

Подготовка рамных пил к работе включает в себя цикл операций, каждая из которых имеет свои особенности, связанные с качеством зубьев (резцов) рамных пил [38]. Особенно следует подчеркнуть, что при подготовке рамных пил необходимо существенно повысить точность уширения зубьев пил, снизить шероховатость режущих граней зуба, а также строго выдерживать параметры зубьев пил, шаг зубьев, разновысотность зубьев, особенно величину радиуса впадины зубьев. Представляет интерес доводка зубьев пил химическим путем, а также термохимическая обработка режущих элементов зубьев пилы с целью повышения их твердости и износостойкости. Повышение первоначальной остроты зубьев пилы и создание условий для уменьшения износа и затупления зубьев пил весьма радикальный и эффективный путь, позволяющий не только снизить энергоемкость процесса, но и улучшить качество обработки, снизить расход пил и повысить производительность лесопильных рам. Одним из направлений улучшения качества рамных пил является отказ от плющения и развода зубьев пил и перехода к изготовлению и использованию рамных пил с поднутрением (строгальных) полотна пилы или применения пил, оснащенных пластинками из твердого сплава. В этом случае целесообразно перейти на выпуск лесопильных рам нового поколения с улучшенной кинематикой резания и улучшить условия эксплуатации лесопильных рам, в том числе и рамных пил. Следует обратить внимание и на сниже-

ние остаточных деформаций в рамных пилах, возникающих при длительном нагружении их силой натяжения. Во-первых, правильная регламентация и соблюдение ранее указанных параметров при эксплуатации рамных пил позволят уменьшить образование остаточных деформаций, во-вторых, необходимо применять различные способы снятия этих деформаций. Это позволит увеличить срок службы рамных пил и повысить их устойчивость в работе.

Разработка новых, более износостойких марок сталей и совершенствование техники и технологии подготовки рамных пил и в первую очередь зубьев пил относятся к инструментальному делу и связаны с металлургическим и станкоинструментальным производством.

Следует совершенствовать и методику испытаний лесопильных рам, предусматривая проведение испытаний как в лабораторных, так и в производственных условиях [42]. С этой целью необходимо предусмотреть разработку соответствующих устройств и приспособлений, нагрузочных стендов и измерительных средств для проведения испытаний по основным показателям. Это позволит работникам технического контроля проводить экспресс-испытания и определять все основные характеристики станка и тем самым давать объективные оценки качеству изготовления лесопильных рам как на заводе-изготовителе, так и на предприятии-потребителе [65].

Одним из важных вопросов совершенствования лесопильных рам является повышение механизации и автоматизации, для чего необходимо совершенствовать не только выполнение настроечных операций станка, но и околорамное оборудование. Решение этих вопросов возможно на базе создания специализированных роботов и манипуляторов, которые в сочетании с конвейерными механизмами, направляющими устройствами и загрузочно-разгрузочными средствами с кантователями позволят полностью или частично автоматизировать работу лесопильной рамы [48, 49, 66].

Большое значение имеют вопросы базирования и центрирования заготовки (заготовки, бруса) в лесопильных потоках, а также создания баз для последующей распиловки заготовки, бруса и досок. Имеющиеся в настоящее время установки и механизмы не удовлетворяют технологическим требованиям. В связи с этим точность размеров получаемых пиломатериалов невысокая, при этом также снижается выход пилопродукции [50, 65, 70, 71, 76].

Основные направления совершенствования лесопильных рам сформировались на базе проводимых в нашей стране исследований и сложившихся традиций следующим образом [64, 66, 69, 78]:

- оптимизация раскроя пиловочника с целью повышения объемного и ценностного выхода пиломатериалов и заготовок, повышения производительности и улучшения качества пиломатериалов;
- разработка перспективных технологических линий производства пиломатериалов с учетом размерно-качественных характеристик пиловочника хвойных и лиственных пород древесины;
- совершенствование кинематики (способов) процесса пиления на лесопильных рамах с целью исключения скобления древесины зубьями пилы dna пропила и стабилизации толщины срезаемого слоя древесины зубьями пилы;
- получение опилок в качестве технологического сырья для гидролизного производства, а также для изготовления прессованных изделий;
- повышение надёжности и долговечности узлов, механизмов и ответственных деталей лесопильной рамы;
- решение вопросов уравнивания и снижения вредного воздействия сил инерции путем уменьшения масс пильной рамки, шатунов и применения специальных механизмов уравнивания этих сил инерции;
- совершенствования механизмов резания путем отказа от направляющих скольжения и установки пильной рамки в шарнирно-рычажные механизмы, а также создание механизмов резания с качанием пильной рамки;
- разработка механизмов подачи с переменной скоростью движения валцов с целью улучшения условий пиления древесины;
- совершенствование рамных пил, способов их подготовки к работе, а также совершенствование устройств, используемых при установке и натяжении пил в пильную рамку.

Из представленных направлений совершенствования лесопильных рам наибольшее значение на данном этапе развития техники и технологии лесопиления имеют вопросы совершенствования способов процесса пиления древесины рамными пилами, так как решение этой проблемы существенно облегчает условия работы рамных пил, воздействует на все перечисленные выше направления совершенствования лесопильных рам, а также технологических линий и особенно влияет на совершенствование механизмов резания и подачи, выбор параметров пил и режимов пиления. Это направление кардинально изменяет условия протекания процесса и, как следствие этого, существенно повышает эффективность лесопиль-

ных рам. Поэтому данному направлению было посвящено огромное количество работ начиная с 30-х годов XX века. Анализ и систематизация всех работ предшественников в этом направлении, а также разработки автора данной работы позволили наметить пути создания лесопильных рам с новыми способами пиления.

1.5. Основные выводы

Анализируя процесс пиления древесины на лесопильных рамах, необходимо сделать следующие основные выводы.

1. Повышение эффективности пиления древесины на лесопильных рамах необходимо осуществлять в трех главных направлениях:

- совершенствование способа процесса пиления;
- совершенствование параметров рамных пил, а также техники и технологии подготовки и эксплуатации пил;
- совершенствование конструкции лесопильных рам, включая уравнивание движущихся масс, повышая при этом надежность и долговечность ее узлов, и прежде всего механизмов резания и подачи.

2. Особенности процесса пиления древесины рамными пилами заключаются в том, что рамные пилы перемещаются возвратно-поступательно с переменной скоростью или прямолинейно, или по различным криволинейным траекториям.

При этом заготовка может перемещаться с равномерной или переменной скоростью, причем переменная скорость может осуществляться с циклом за ход или за двойной ход пил. К тому же переменная скорость может осуществляться с остановками или с возвратами, а также с опережением или запаздыванием.

Такое большое многообразие вариантов осуществления способов пиления древесины рамными пилами затрудняет обоснование выбора наиболее эффективного способа процесса пиления.

3. В настоящее время сложились следующие основные разновидности способа осуществления процесса пиления древесины рамными пилами:

- прямолинейное перемещение пил и равномерная скорость подачи заготовки;
- прямолинейное перемещение пил и переменная скорость подачи заготовки;
- перемещение пил по криволинейной траектории и равномерная скорость подачи заготовки.

4. Осуществление способа пиления древесины рамными пилами путем перемещения пил по криволинейным траекториям и с переменной скоростью заготовки ранее не рассматривалось ввиду его сложности, так как необходимо одновременно изменять эти два движения.

5. Таким образом, способ пиления древесины рамными пилами может быть усовершенствован за счет перемещения пил, перемещения заготовки и путем совместного изменения математических моделей перемещения пил и заготовки.

6. Для решения проблемы совершенствования способа процесса пиления были выбраны следующие технологические требования к процессу:

- исключение скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода;

- стабилизация толщины срезаемого слоя древесным зубом пилы во время рабочего хода.

При этом предпочтительное требование при совершенствовании способа пиления – исключение скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода.

7. При определении теоретической математической модели перемещения пил и заготовки весь процесс пиления разделялся на три участка:

- участок резания во время рабочего хода пил;

- участок скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода пил;

- участок свободного перемещения пил во время холостого хода.

Только в этом случае можно учесть и выполнить одновременно два требования, сформулированные ранее.

8. Разработаны методические подходы для определения математической модели перемещения пил при равномерной скорости перемещения заготовки.

9. Разработаны методические положения для определения математической модели перемещения заготовки с переменной скоростью при прямолинейном перемещении пил.

10. Разработаны методические подходы для определения математических моделей перемещения пил и заготовки при совместном изменении главного движения (инструмента) и движения подачи (заготовки).

11. При совершенствовании конструкции лесопильных рам первостепенное внимание следует уделять механизму резания, ме-

ханизму подачи, а также надежности и долговечности пильной рамки и станины.

12. Для улучшения протекания процесса резания необходимо обоснованно выбирать параметры рамных пил, материал пил, особенно режущей части, а также повышать качество подготовки их к работе и точность установки их в пильную рамку.

13. Особое внимание следует уделить базированию заготовки, так как формы и размеры заготовки (бревна, бруса) значительно отличаются друг от друга, что влияет на центрирование заготовки относительно постава (набора) пил и, следовательно, на выход пиломатериалов.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ПОДАЧИ

2.1. Классификация главного движения

Главное движение в процессе пиления древесины рамными пилами производится, как правило, инструментом. Процесс пиления древесины рамными пилами может осуществляться при прямолинейной или при криволинейной траектории движения пил. Второй способ пиления имеет более сложную кинематическую схему и предусматривает перемещение пил в двух направлениях: первое – по вертикали, второе – дополнительное – в направлении движения заготовки. Второе дополнительное движение пил может сообщаться качанием: только нижней поперечиной пильной рамки, только верхней поперечиной пильной рамки, а также одновременно верхней и нижней поперечинами пильной рамки [7, 11, 17, 66, 79, 80].

Движение пил (см. рис. 2.1) может осуществляться по различным траекториям, которые нами разделены на три группы:

- криволинейные незамкнутые кривые;
- замкнутые непересекающиеся (типа петли) кривые;
- самопересекающиеся замкнутые кривые.

В свою очередь, замкнутая криволинейная траектория движения пильной рамки типа «петля» может быть:

- эллиптической (в частном случае окружность);
- каплевидной (с точкой возврата в ВМТ или в НМТ);
- в сочетании: прямой линии – во время рабочего хода и эллиптической – во время холостого хода;
- в сочетании прямых в средней части рабочего и холостого ходов и по дугам окружности в зонах, примыкающих к ВМТ и НМТ;
- в сочетании эллиптических траекторий с разными параметрами как за рабочий, так и за холостой ходы, соединенных между собой в зонах ВМТ и НМТ переходными кривыми.

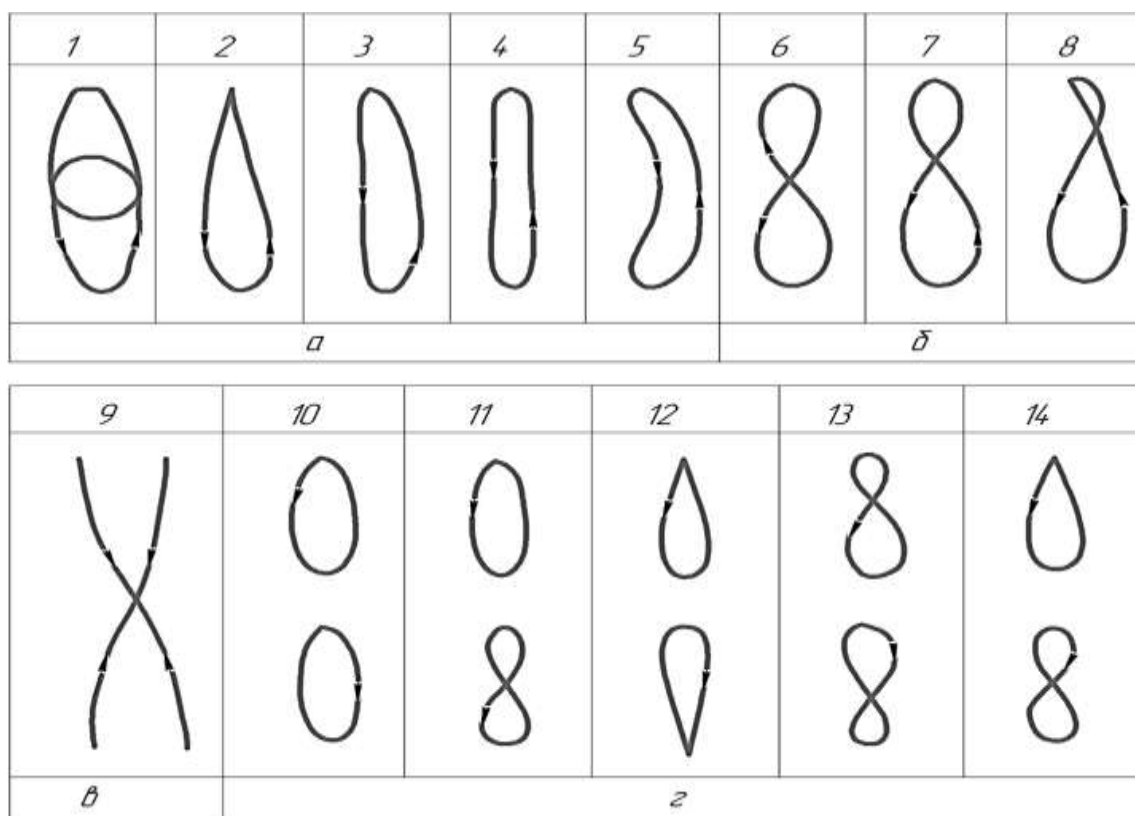


Рис. 2.1. Классификация траекторий движения пил:

a – непересекающиеся замкнутые кривые: 1 – эллиптическая (окружность), 2 – каплевидная, 3 – прямолинейная во время рабочего хода и эллиптическая во время холостого хода, 4 – прямолинейная в средней зоне рабочего и холостого ходов и части окружности в зонах ВМТ и НМТ, 5 – эллиптические с разными параметрами во время рабочего и холостого ходов, соединенные между собой кривыми в зонах ВМТ и НМТ; *b* – самопересекающиеся (замкнутые) кривые: 6 – с двумя осями симметрии, 7 – с одной вертикальной осью симметрии, 8 – части кривых – за рабочий ход с двумя осями симметрии, за холостой ход – каплевидной; *в* – незамкнутая кривая (9); *z* – сочетание перемещений верхней и нижней поперечин пильной рамки по разным траекториям; 10 – эллиптические с разными знаками; 11 – верхней – по эллиптической, нижней – по самопересекающейся кривой; 12 – каплевидные с разными знаками и точками возврата; 13 – самопересекающиеся замкнутые кривые со смещенной узловой точкой в разные стороны от середины хода пильной рамки; 14 – верхней – по каплевидной, нижней – по самопересекающейся кривой

Самопересекающиеся замкнутые кривые можно подразделить на следующие основные виды:

- с двумя осями симметрии (вертикальная и горизонтальная), узловая точка расположена в середине хода пильной рамки;

- с одной вертикальной осью симметрии, узловая точка смещена от середины хода в сторону ВМТ или НМТ;

- асимметричная траектория, представляющая сочетание кривых за рабочий ход – часть кривой с двумя осями симметрии, у ко-

торой узловая точка расположена в середине хода, а за холостой ход – часть кривой каплевидного типа с точкой возврата в ВМТ.

Кроме того, возможны варианты качания пил, когда верхние и нижние поперечины пильной рамки перемещаются по различным траекториям. В частности, можно качание верхней и нижней поперечин пильной рамки осуществлять по эллиптическим траекториям, у которых траектории имеют различные знаки. В этом случае поперечное перемещение поперечин пильной рамки происходит в противоположные стороны. Но так как в начале рабочего хода распиливаемая заготовка расположена ближе к нижней поперечине, то, следовательно, пильная рамка вместе с пилами отходит от дна пропила, что улучшает условия пиления. В конце рабочего хода распиливаемая заготовка расположена ближе к верхней поперечине пильной рамки. Следовательно, пильная рамка с пилами отводится от дна пропила и скобление зубьями пилы уменьшается.

Движение верхней и нижней поперечин пильной рамки можно осуществлять и таким образом, чтобы верхняя поперечина перемещалась по замкнутой непересекающейся траектории, а нижняя – по самопересекающейся замкнутой траектории. В этом случае обеспечивается отвод зубьев пил в начале и в конце рабочего хода, а также и в начале холостого хода, что и необходимо для улучшения условий работы пил.

2.2. Классификация движений подачи

Перемещение распиливаемой заготовки может осуществляться с равномерной или с переменной скоростью [17, 77, 78, 79].

При равномерной скорости подачи и прямолинейном движении пил с переменной скоростью наблюдается переменная толщина срезаемого слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода и взаимодействие зубьев пилы с древесиной во время холостого хода. Это оказывает отрицательное влияние на качество пиломатериалов и производительность лесопильных рам, а также вызывает увеличение потерь древесины в опилки из-за необходимости использования более толстых рамных пил.

Перемещение распиливаемой заготовки с переменной скоростью подачи может осуществляться с циклом за ход (см. рис. 2.2) и за оборот (см. рис. 2.3). Подача распиливаемой заготовки при изменении

скорости перемещения с циклом за ход может осуществляться только за холостой (см. рис. 2.2а) или только за рабочий (см. рис. 2.2б) ходы или же за холостой и рабочий ходы (см. рис. 2.2в – т). При подаче заготовки только за холостой или только за рабочий ход имеются остановки соответственно за рабочий и за холостой ходы. Однако исследования показали, что подача заготовки периодами сопряжена с возникновением значительных сил инерции, которые оказывают вредное влияние на работу механизма подачи и всей лесопильной рамы. В свою очередь, силы инерции движущихся масс заготовки, тележки, элементов подачи вызывают проскальзывание заготовки в вальцах и во фрикционных парах механизмов подачи. По этой причине осуществить подачу заготовки строго по заданному закону (математической модели) сложно, и это зависит во многом от величины ускорения. С целью уменьшения ускорения движущихся масс было рекомендовано осуществлять подачу с циклом за рабочий и холостой ходы, а еще лучше – с циклом за оборот (см. рис. 2.3). Движение вальца за рабочий и холостой ходы может происходить так, что скорость его достигает (см. рис. 2.2в) или не достигает (см. рис. 2.2г) нулевых значений.

По технологическим аспектам процесса пиления древесины рамными пилами оказалось, что в некоторых случаях целесообразно осуществлять подачу с запаздыванием или с опережением. Анализ кинематики процесса пиления показал, что возможно движение валцов за рабочий и холостой ходы осуществлять без остановок, с остановками и с возвратом, причем остановки и возвратные движения можно предусматривать за цикл пиления один или два раза. Если возвратное движение осуществлять в начале холостого хода и предусматривать перемещение заготовки как за холостой, так и за рабочий ход равными порциями, то тогда скорости подачи за рабочий и холостой ходы будут различными (см. рис. 2.2д). В этом случае оказалось, что максимальное значение скорости подачи за холостой ход больше максимального значения ее за рабочий ход. Возвратное перемещение можно распределить примерно равномерно в конце рабочего и в начале холостого ходов (см. рис. 2.2е), т. е. в этом случае подача заготовки будет осуществляться с некоторым опережением по сравнению с ранее рассмотренным вариантом, указанным на рис. 2.2д. Тогда перемещение заготовки за холостой ход будет несколько больше, чем за рабочий ход.

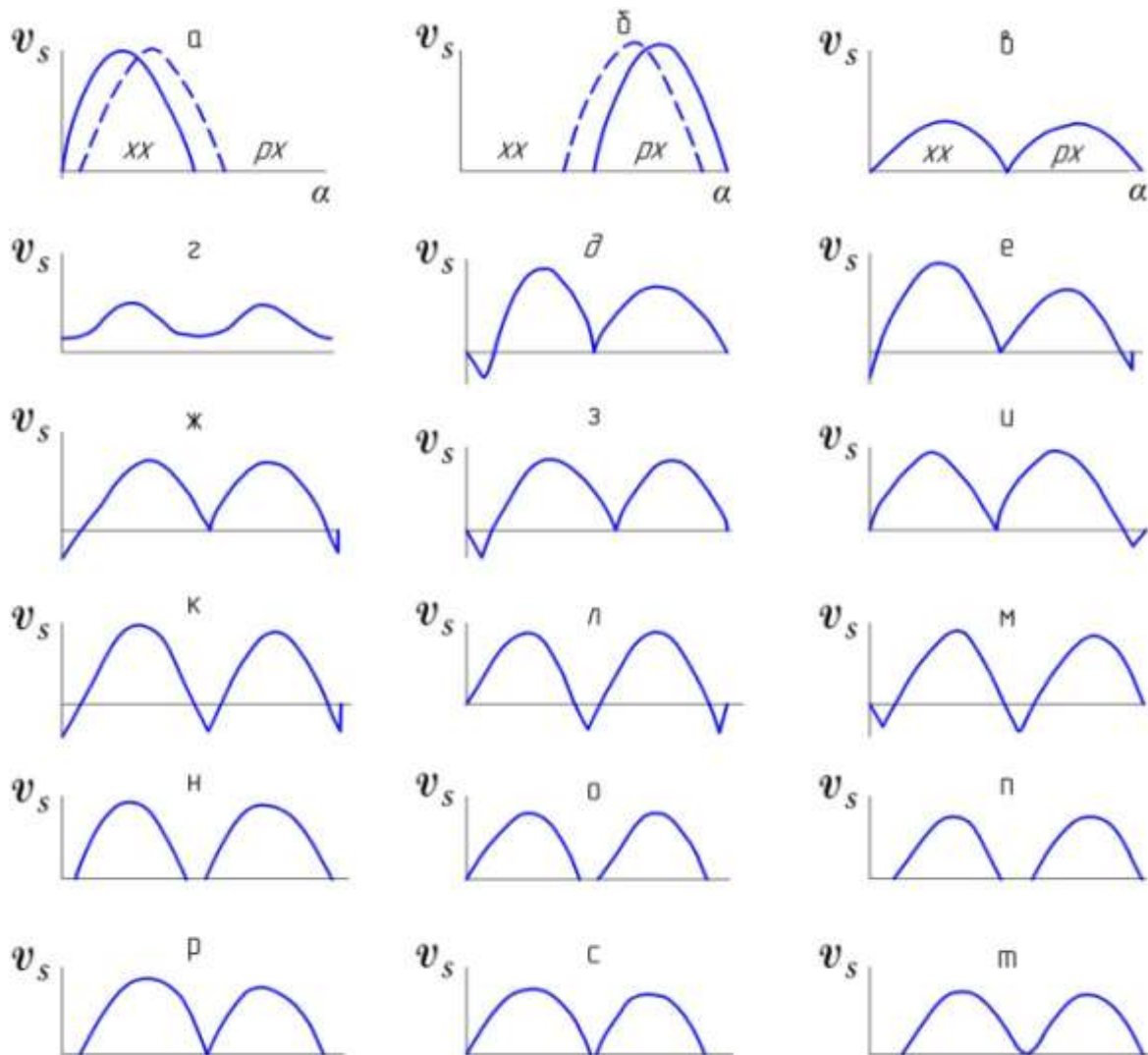


Рис. 2.2. Классификация движений подачи с циклом за ход пил:

a – за холостой ход; *б* – за рабочий ход; *в* – за рабочий и холостой ходы с $v_{s \min}$ равным нулю; *г* – за ход с $v_{s \min}$ не равным нулю; *д* – с возвратным движением в начале холостого хода и разным $v_{s \max}$; *е* – с возвратным движением в начале холостого и конце рабочего ходов и разным $v_{s \max}$; *ж* – с возвратным движением в конце рабочего и в начале холостого ходов; *з* – с возвратным движением в начале холостого хода; *и* – с возвратным движением в конце рабочего хода; *к* – с симметричными возвратными движениями за ход; *л* – случай «к» с опережением; *м* – случай «к» с опаздыванием; *н* – с симметричными остановками; *о* – случай «н» с опережением; *п* – случай «н» с опаздыванием; *р* – с остановкой в начале холостого и конце рабочего ходов; *с* – случай «р» с опережением; *т* – случай «р» с опаздыванием

Возможные варианты подачи, когда перемещение заготовки (математические модели) за рабочий и холостой ходы одинаково (рис. 2.2*к, н*) или симметрично относительно верхней мертвой точки (рис. 2.2*з, р*). Подача заготовки с одним возвратным движением в начале холостого и в конце рабочего ходов (рис. 2.2*ж*) может производиться с опережением (рис. 2.2*и*) или с запаздыванием (рис. 2.2*з*).

Если подача заготовки с одним возвратом осуществляется с опережением (см. рис. 2.2и), то возврат заготовки наблюдается в конце рабочего хода, и тогда перемещение заготовки за рабочий ход будет несколько меньше, чем за холостой ход. Если подача заготовки с одним возвратом будет осуществляться с запаздыванием (см. рис. 2.2з), то возвратное перемещение заготовки наблюдается в начале холостого хода, и тогда перемещение заготовки за рабочий ход будет больше, чем за холостой ход.

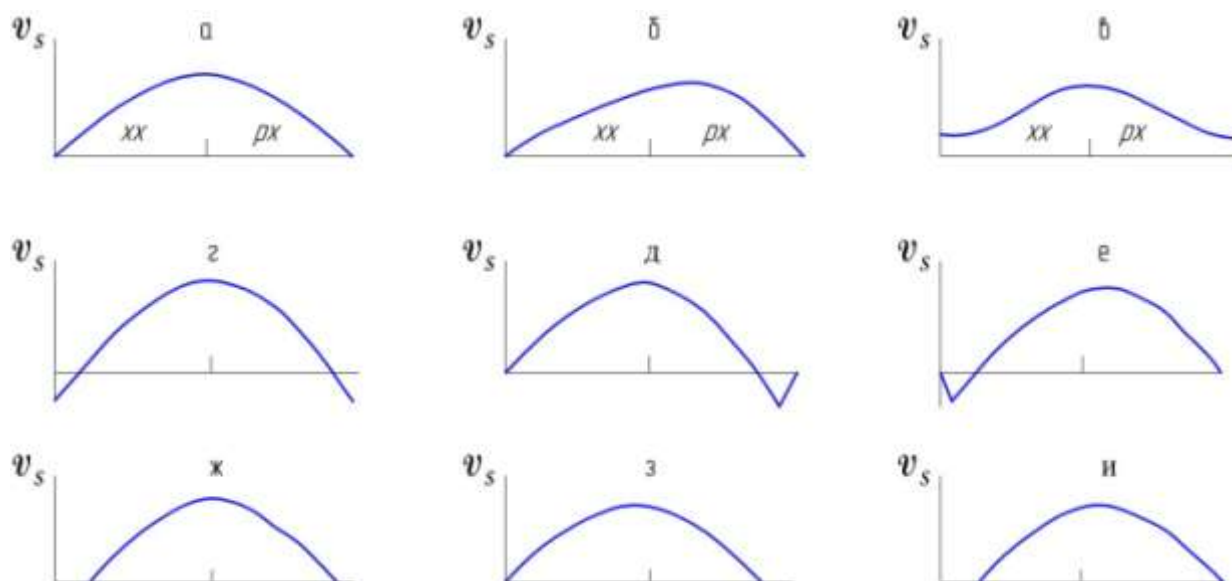


Рис. 2.3. Классификация движений подачи с циклом за оборот коленчатого вала:

а – с симметричным изменением скорости подачи и $v_{s \min}$ равным нулю;
 б – с асимметричным изменением скорости подачи и $v_{s \min}$ равным нулю;
 в – с симметричным изменением скорости подачи и $v_{s \min}$ не равным нулю;
 г – с возвратными движениями в начале холостого и в конце рабочего ходов;
 д – с возвратным движением в конце рабочего хода; е – с возвратным движением в начале холостого хода; ж – с остановками в начале холостого и в конце рабочего хода; з – с остановкой в конце холостого хода; и – с остановкой в начале холостого хода

Подача заготовки возможна также с двумя возвратами за один оборот коленчатого вала (рис. 2.2к). Если этот вид подачи осуществлять с опережением (рис. 2.2л), то возвратные перемещения заготовки будут наблюдаться в конце рабочего и холостого ходов, а величины перемещения заготовки за холостой и рабочий ходы равны между собой. Если же подача заготовки с двумя возвратами будет осуществляться с некоторым запаздыванием, то возвратные перемещения заготовки будут наблюдаться в начале холостого и рабо-

чего ходов (см. рис. 2.2м), а величины перемещения заготовки за рабочий и холостой ходы будут одинаковы.

Подача заготовки с двумя (см. рис. 2.2н) или же с одной (см. рис. 2.2р) остановками за один оборот коленчатого вала может осуществляться с опережением (см. рис. 2.2о). В этом случае эти остановки наблюдаются в начале холостого и рабочего ходов. Если подача заготовки осуществляется с запаздыванием (см. рис. 2.2п), то наблюдаются остановки в конце холостого и рабочего ходов. Если подача заготовки с одной остановкой в начале холостого и конце рабочего ходов (см. рис. 2.2р) осуществляется с опережением (см. рис. 2.2с), то остановка заготовки будет наблюдаться в конце рабочего хода. При осуществлении такого закона движения заготовки с некоторым запаздыванием (см. рис. 2.2т) остановка будет наблюдаться в начале холостого хода.

Как указывалось ранее, подача заготовки может осуществляться с циклом за оборот (см. рис. 2.3). Здесь возможны варианты с симметричным (см. рис. 2.3а, в, г, ж) законом (математической моделью) изменения скорости относительно верхней мертвой точки или асимметричным (см. рис. 2.3б, д, е, з, и). Движение заготовки может также осуществляться с таким расчетом, что скорость в начале холостого и в конце рабочего ходов достигает нулевого значения (см. рис. 2.3а, б), а также и не достигает нулевого значения (см. рис. 2.3в) или принимает отрицательное значение (см. рис. 2.3з) и к тому же может иметь остановки (см. рис. 2.3ж). Если подачу заготовки с возвратами (см. рис. 2.3г) производить с некоторым опережением, то получится вариант, указанный на рис. 2.3д, у которого возвратное перемещение заготовки наблюдается в конце рабочего хода и величина перемещения за холостой ход больше, чем за рабочий ход. Если подачу заготовки с возвратом осуществлять с некоторым запаздыванием (см. рис. 2.3е), то будет наблюдаться возвратное перемещение заготовки в начале холостого хода и величина перемещения заготовки за холостой ход будет меньше, чем за рабочий ход. При подаче заготовки с остановками и с опережением (см. рис. 2.3з) остановка заготовки наблюдается в конце рабочего хода, а при подаче с запаздыванием (см. рис. 2.3и) остановка заготовки будет происходить в начале холостого хода.

Представленная классификация движений резания и подачи при пилении древесины рамными пилами разработана на основании теоретических положений автора, а также обобщения и анализа

многих ранее выполненных работ, и прежде всего следующих [7, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 18, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 33, 34, 43, 47, 48, 49, 55, 61, 62, 66, 72, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 85].

При таком большом перечне научных исследований по данному вопросу специалисты затрудняются в выборе рациональных режимов процесса пиления древесины рамными пилами, а также возникают трудности определения параметров рамных пил и станка при разработке новых более перспективных моделей лесопильных рам.

2.3. Основные выводы

По классификации главного движения и движения подачи следует отметить:

1. Перемещение пил может осуществляться по различным замкнутым и незамкнутым траекториям, причем замкнутые траектории могут быть самопересекающимися и эллиптическими. Самопересекающиеся кривые могут быть с одной и двумя осями симметрии, а также ассиметричными.

2. Перемещение заготовки с переменной скоростью можно осуществлять с циклом только за рабочий ход или с циклом только за холостой ход, а также с циклом за рабочий и холостой ходы. Кроме того, перемещение заготовки можно осуществлять с остановками, когда пилы находятся в зонах ВМТ и НМТ. Перемещение заготовки с переменной скоростью можно производить с возвратными (отрицательными) перемещениями во время нахождения пил в зонах ВМТ и НМТ.

3. Перемещение заготовки с переменной скоростью можно осуществлять с циклом за один оборот коленчатого вала (двойной ход пил). В этом случае могут быть также варианты перемещения заготовки только с остановками или только с возвратными перемещениями во время, когда пилы находятся в НМТ.

4. Такое большое разнообразие вариантов перемещения пил и заготовки затрудняет поиск наиболее оптимального способа осуществления процесса. В связи с этим следует отдать предпочтение теоретическому (аналитическому) методу поиска оптимальной математической модели перемещения пил и заготовки.

5. Следует также отметить, что различные способы пиления древесины на лесопильных рамах изучены недостаточно, и поэтому

необходимо рассмотреть анализ кинематики процесса пиления для различных наиболее распространенных вариантов предлагаемых ранее процессов пиления.

6. Необходимо также разработать единый методический подход к математическому описанию процесса пиления древесины рамными пилами, предложить использование этой методики для анализа различных вариантов и создание новых способов пиления древесины рамными пилами.

3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПИЛ И РАВНОМЕРНОЙ СКОРОСТИ ПОДАЧИ

3.1. Траектории движения зубьев пилы в пропилах

Рассмотрим траектории зубьев пилы в пропилах при прямолинейном движении пильной рамки (пил) и при равномерной скорости подачи заготовки. Каждый зуб пилы описывает в пропилах свою траекторию относительно плоскости пропила, складывающуюся из двух движений: перемещения пильной рамки (пил) обычно в вертикальной плоскости и движения заготовки (бруса) в горизонтальной плоскости.

Для центрального кривошипно-шатунного механизма резания перемещение пильной рамки во время рабочего хода определяется уравнением:

$$y = R \left(1 - \cos \alpha + \frac{R}{L_{uu}} \sin^2 \alpha \right). \quad (3.1)$$

Подставив в него выражение $\sin^2 \alpha = 1 - \cos^2 \alpha$, получим:

$$y = R \left(1 - \cos \alpha + \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2} \cos^2 \alpha \right). \quad (3.2)$$

Движение заготовки при непрерывно-равномерной скорости можно выразить формулой:

$$x_g = \frac{S_o}{2\pi} \alpha. \quad (3.3)$$

Решим систему двух уравнений (3.2) и (3.3), для чего вначале выразим из уравнения (3.2) угол поворота кривошипа:

$$\alpha = \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 + \lambda)^2 - \frac{2y}{L_{uu}}}}{\lambda}. \quad (3.4)$$

Подставив выражение (3.4) в уравнение (3.3), получим:

$$x = \frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 + \lambda)^2 - \frac{2y}{L_{uu}}}}{\lambda} \quad (3.5)$$

Уравнение (3.5) описывает теоретическую траекторию движения зуба пилы за рабочий ход в плоскости пропила (с учетом конечной длины шатуна) при пилении древесины на лесопильных рамах с прямолинейной траекторией движения пильной рамки и непрерывно-равномерной скорости подачи. Оно было впервые предложено в работе [1].

Из этого уравнения можно сделать вывод, что траектория движения зуба пилы в пропиле зависит от положения пильной рамки (угла поворота кривошипа), радиуса кривошипа и длины шатуна, а также от величины подачи заготовки за один оборот кривошипного вала (посылки). Иногда влиянием конечной длины шатуна пренебрегают, т. е. рассматривают движение пильной рамки при «бесконечной» длине шатуна. Ошибка от такого допущения составляет 2...5%.

Для определения истинной траектории движения зуба пилы в плоскости пропила при бесконечной длине шатуна решается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} y = R(1 - \cos\alpha), \\ x_в = \frac{S_о}{2\pi} \cdot \alpha. \end{cases} \quad (3.6)$$

Из первого уравнения системы (3.6) выразим угол поворота кривошипа:

$$\alpha = \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (3.7)$$

Подставив выражение (3.7) во второе уравнение системы (3.6), получим:

$$x = \frac{S_о}{2\pi} \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (3.8)$$

Формулу (3.8) можно получить и из выражения (3.5), положив в последнем выражении $L_{ш} \rightarrow \infty$ и, следовательно, $\lambda = 0$.

Траектория относительного движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода определится по следующей формуле (отсчет угла поворота кривошипа производится от нижней мертвой точки):

$$x = \frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{1 - \sqrt{(1 - \lambda)^2 + \frac{2y}{L_{ш}}}}{\lambda}. \quad (3.9)$$

Истинная траектория движения зуба пилы относительно плоскости пропила несколько отличается от теоретической, так как во время холостого хода из-за скобления зубьями пилы дна пропила происходит скольжение заготовки относительно подающих валцов. Поэтому фактическая скорость подачи в лесопильной раме с равномерной скоростью подачи непостоянна и меньше конструктивной. Как показали исследования ряда авторов (Е. Г. Ивановский, В. Я. Филькевич, В. Ф. Фонкин, В. С. Ясинский и др.), скорость подачи в конце холостого и во время рабочего ходов больше средней скорости подачи заготовки и ее величина остается почти постоянной в этот период перемещения заготовки [67, 77, 78, 80, 85].

Следовательно, теоретическая траектория движения зуба пилы заметно отличается от фактической лишь за время холостого хода, особенно в начале его, а во время рабочего хода это отличие незначительно.

3.2. Величина потери рабочего хода

При подаче заготовки с равномерной скоростью движение распиливаемого заготовки или бруса в лесопильной раме осуществляется как за рабочий, так и за холостой ход. Теоретически при подаче заготовки с равномерной скоростью перемещения заготовки за рабочий и холостой ходы равны между собой, т. е. $S_{o_{px}} = S_{o_{xx}}$.

Общая подача заготовки за один оборот коренного вала лесопильной рамы представляет сумму этих перемещений:

$$S_o = S_{o_{px}} + S_{o_{xx}}.$$

Для обеспечения возможности осуществления подачи заготовки за холостой ход пилам необходимо придать уклон, так как при строго вертикальной установке пил подачу заготовки за холостой ход осуществить невозможно, а зубья пил при этом будут скоблить дно пропила.

Угол наклона « φ » пил принято определять на величине хода пильной рамки по выражению:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\xi \cdot S_o}{H}, \quad (3.10)$$

где ξ – относительный уклон пил, $\xi = \frac{S_{oy}}{H}$;

S_{oy} – величина абсолютного наклона (смещения) зубьев пилы на величине хода пильной рамки, $S_{oy} = \xi S_o$.

Величину абсолютного уклона пил рекомендуется выбирать несколько больше половины посылки на один оборот, т. е. величину относительного уклона пил ξ следует принимать несколько больше 0,5. Однако в этом случае во время рабочего хода встреча зубьев пилы с дном пропила будет происходить после прохождения ими некоторого пути, называющегося потерей рабочего хода. При увеличении уклона пил величина потери рабочего хода возрастает, а участок (путь) пиления во время рабочего хода уменьшается (см. рис. 3.1).

Для определения потери рабочего хода проф. М. А. Дешевой [47] использовал графический метод. Этот метод трудоемок и малоэффективен. Проф. Н. А. Батин [34] впервые предложил аналитическое определение потери рабочего хода. Однако проверка этой формулы показала, что определение потери рабочего хода можно производить с точностью до 18% только в диапазоне относительных уклонов 0,5...0,8.

Определить потерю рабочего хода можно, решив систему уравнений, одно из которых – уравнение движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода (3.5), а другое – линия наклона зубьев пилы (рис. 3.2).

Уравнение линии наклона зубьев пилы *mn* получим, используя уравнение прямой линий в отрезках, которое можно записать в следующем виде:

$$\frac{x - x_2}{x_1 - x_2} = \frac{y - y_2}{y_1 - y_2}. \quad (3.11)$$

Возьмем на этой линии «*mn*» точки M_1 и M_2 . Точка M_1 имеет координаты:

$$x_1 = \xi \cdot S_o - 0,5 \cdot S_o = S_o \cdot (\xi - 0,5), \quad y_1 = 0.$$

Точка M_2 имеет координаты $x_2 = 0,5S_o, y_2 = 2R$.

Подставим соответствующие значения координат в уравнение (3.11), получим:

$$x = \frac{S_o}{2R} [R(2\xi - 1) - \xi y]. \quad (3.12)$$

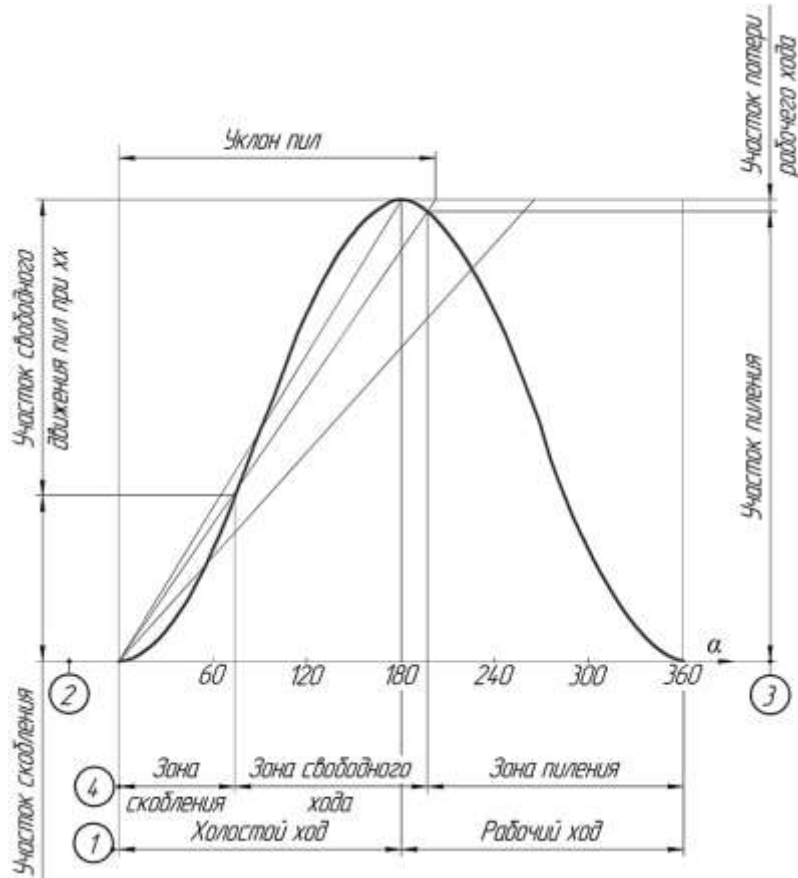


Рис. 3.1. Графический способ определения характерных участков:
 1 – холостой и рабочий ходы; 2 – движение пил во время холостого хода;
 3 – движение пил во время рабочего хода; 4 – зоны взаимодействия зубьев пилы с заготовкой

Это уравнение (3.2) является линией наклона вершин зубьев пилы.

Решая систему уравнений (3.12) и (3.5), получим:

$$\cos \left[\pi(2\xi - 1) - \frac{\pi\xi y_n}{R} \right] + \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{(1 + \lambda)^2 - \frac{2y_n}{L_{ш}}}$$

Возведя обе части последнего равенства в квадрат, получим:

$$\begin{aligned} \cos^2 \left[\pi(2\xi - 1) - \frac{\pi\xi y_n}{R} \right] + \frac{2}{\lambda} \cos \left[\pi(2\xi - 1) - \frac{\pi\xi y_n}{R} \right] + \\ + \frac{2y_n}{\lambda R} - 1 - \frac{2}{\lambda} = 0. \end{aligned} \quad (3.13)$$

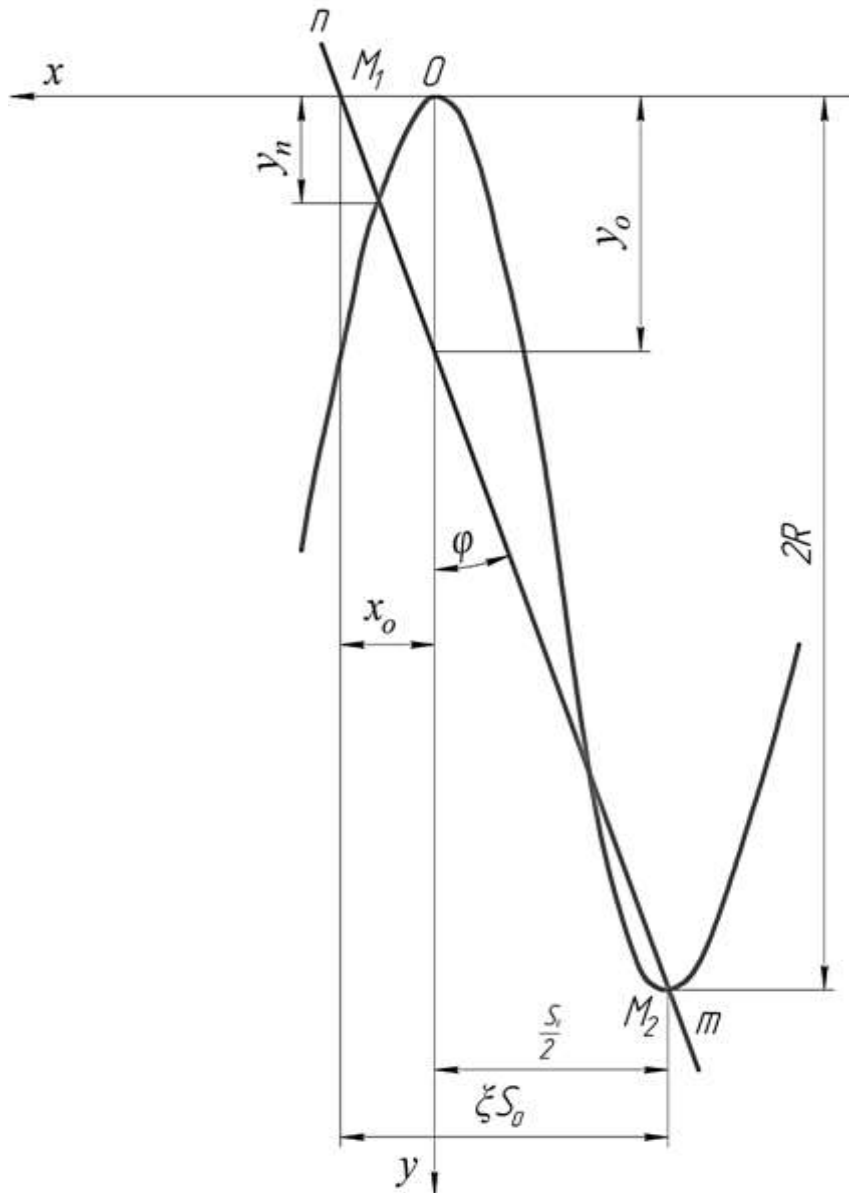


Рис. 3.2. Схема к расчету потери рабочего хода

Уравнение (3.13) содержит величину потери рабочего хода, выраженную в неявном виде. Данное уравнение решается методом приближенного вычисления или на ЭВМ с использованием численных методов. Из этого уравнения видно, что величина потери рабочего хода зависит от относительного уклона пил, величины хода пильной рамки и длины шатуна.

Безусловно, уравнение (3.13), выведенное с учетом конечной длины шатуна, громоздко и определение по нему величины потери рабочего хода трудоемко.

С достаточной для практики точностью иногда влиянием конечной длины шатуна можно пренебречь. Для определения потери рабочего хода решим систему уравнений (3.8) и (3.12).

После преобразований получим:

$$\cos \left[\pi(2\xi - 1) - \frac{\pi\xi y_n}{R} \right] + \frac{y_n}{R} - 1 = 0. \quad (3.14)$$

В уравнении (3.14) величина потери рабочего хода выражена также в неявном виде.

Обозначим:

$$a_n = \frac{R - y_n}{R}.$$

Потеря рабочего хода выразится:

$$y_n = R(1 - a_n). \quad (3.15)$$

Данные замены подставим в уравнение (3.14), получим:

$$\arccos a_n - \pi\xi a_n - \pi(\xi - 1) = 0.$$

Представим \arccos в ряд Тейлора, получим:

$$\arccos a_n = \frac{\pi}{2} - \arcsin a_n = \frac{\pi}{2} - a_n - \frac{a_n^3}{6} - \frac{3}{40}a_n^5 - \dots.$$

Анализируя ряд Тейлора, берем из него значение аргумента не выше третьей степени, так как решение уравнения с высшими степенями затруднено. Подставляя полученный ряд Тейлора в последнее уравнение, получим:

$$\frac{1}{6}a_n^3 + (\pi\xi + 1)a_n + \pi(\xi - 1,5) = 0. \quad (3.16)$$

В уравнении (3.16) коэффициент у первого члена уравнения будет явно занижен, так как ряд Тейлора содержит лишь отрицательные знаки. Для определения коэффициента первого члена в уравнении (3.16) воспользуемся физической сущностью описываемых этим уравнением явлений. При относительном уклоне пил $\xi = 0,5$ потеря рабочего хода $y_n = 0$. В этом случае $a_n = 1$. Подставим это значение в уравнение (3.16), получим коэффициент первого члена уравнения:

$$a_n = 0,5\pi - 1.$$

С учетом этого коэффициента уравнение (3.16) примет вид:

$$(0,5\pi - 1)a_n^3 + (\pi\xi + 1)a_n + \pi(\xi - 1,5) = 0. \quad (3.17)$$

Исследуя полученное уравнение, отмечаем, что дискриминант его положителен и, следовательно, это уравнение имеет один вещественный и два комплексных корня.

Вещественный корень этого уравнения имеет вид:

$$a_n = \sqrt[3]{\sqrt{\left[\frac{\pi\xi + 1}{1,5\pi - 3}\right]^3 + \left[\frac{\pi(\xi - 1,5)}{\pi - 2}\right]^2} - \frac{\pi(\xi - 1,5)}{\pi - 2}} - \sqrt[3]{\sqrt{\left[\frac{\pi\xi + 1}{1,5\pi - 3}\right]^3 + \left[\frac{\pi(\xi - 1,5)}{\pi - 2}\right]^2} + \frac{\pi(\xi - 1,5)}{\pi - 2}}. \quad (3.18)$$

Влияние относительного уклона пил на величину потери рабочего хода, определенную по формулам (3.15) и (3.18), представлено на рис. 3.3. Из этого рисунка видно, что при увеличении относительного уклона пил величина потери рабочего хода возрастает по сложному закону и при относительном уклоне, равном 1,5, будет равна примерно половине хода пильной рамки [7, 17].

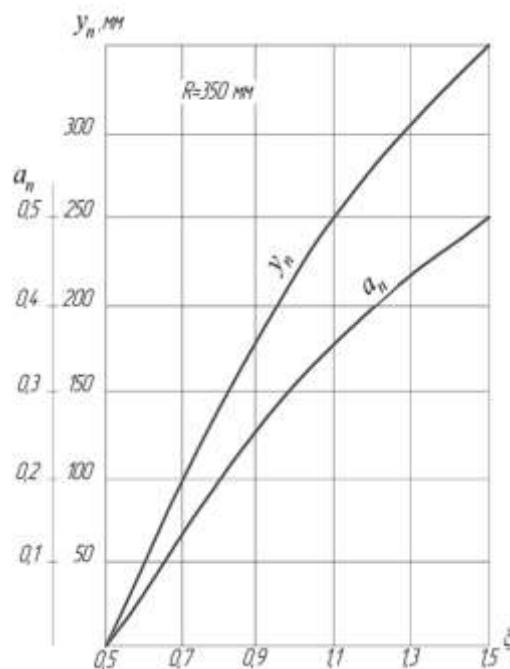


Рис. 3.3. Влияние относительного уклона пил на величину потери рабочего хода

Анализ формулы (3.18) показал, что определение потери рабочего хода по данной формуле с учетом конечной длины шатуна можно производить с точностью до 3% на всем диапазоне изменения относительного уклона пил от 0,5 до 1,5.

Следует иметь в виду, что потеря рабочего хода в процессе пиления древесины на лесопильных рамах обуславливается двумя причинами: повышенным уклоном пил и скольжением заготовки в подающих вальцах.

Уравнение (3.18) позволяет определять величину потери рабочего хода из-за повышенного уклона пил. Определение потери рабочего хода из-за скольжения заготовки или бруса в подающих вальцах зависит от многих технологических факторов, а также от технического состояния станка и особенно жесткости механизма подачи [39, 51]. Скольжение заготовки в вальцах приводит к уменьшению фактической скорости подачи заготовки (уменьшение посылки) и к изменению относительного уклона пил. Это изменение повлияет на потерю рабочего хода, которая будет учтена в предложенном уравнении (3.14). На практике потеря рабочего хода, возникающая за счет скольжения заготовки в подающих вальцах, отдельно не учитывается. При определении потери рабочего хода из-за повышенного уклона пил относительный уклон пил учитывается по отношению к фактической посылке. Поэтому предложенные формулы по определению потери рабочего хода одновременно учитывают и повышенный уклон, и скольжение заготовки в подающих вальцах.

3.3. Подача на зуб

Из теории резания известно, что толщина срезаемого слоя древесины резцом определяет силу резания и качество обработки продукции, а также условия работы самого резца, объясняющие в итоге его износ и затупление.

Вот почему при изучении кинематики процессов резания древесины прежде всего анализируется характер изменения толщины срезаемого слоя древесины. При пилении древесины рамными пилами с плющеными зубьями толщина срезаемого слоя древесины зубом пилы принимается равной подаче на зуб, так как косинус угла наклона касательной к траектории относительного движения зубьев пилы в пропиле и вертикалью близок к единице. Только на

участках, примыкающих к верхней и нижней мертвым точкам, будет наблюдаться некоторое расхождение между толщиной срезаемого слоя древесины и подачей на зуб. Однако определение толщины срезаемого слоя древесины зубом на этих участках при пилении древесины рамными пилами весьма сложно и поэтому в настоящее время не производится.

Следует различать среднюю величину подачи на зуб и мгновенную (текущую) величину подачи на зуб.

Средняя величина подачи на каждый зуб пилы определяется по выражению:

$$S_{z\text{ cp}} = \frac{S_o t}{H} \cdot \cos\varphi. \quad (3.19)$$

Из-за малого угла наклона пилы среднюю подачу на зуб часто определяют по выражению:

$$S_{z\text{ cp}} = \frac{S_o t}{H}. \quad (3.20)$$

Средняя подача на зуб зависит не только от законов (математических моделей) движения заготовки и пил, но и от потери рабочего хода. С учетом потери рабочего хода средняя подача на зуб определяется по формуле:

$$S_{z\text{ cp}} = \frac{S_o t}{H - y_n}. \quad (3.21)$$

Из формулы (3.21) следует, что с увеличением потери хода средняя подача на зуб возрастает.

Мгновенная подача на зуб зависит от законов (математических моделей) перемещения пил и заготовки и определяется как расстояние между относительными траекториями движения соседних зубьев пилы:

$$S_z = x_1 - x_2. \quad (3.22)$$

Уравнение относительного движения первого зуба пилы в пропиле описывается выражением (3.5). Траектория относительного движения второго (нижнего) соседнего зуба пилы x_2 определится из системы уравнений (начало координат в ВМТ):

$$\begin{cases} y_2 = R \left(1 - \cos \alpha + \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2} \cos^2 \alpha \right) + t \cos \varphi, \\ x_2 = \frac{S_o}{2\pi} \alpha - t \sin \varphi. \end{cases} \quad (3.23)$$

Из первого уравнения системы определяем значение угла поворота кривошипа:

$$\alpha = \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 + \lambda)^2 - \frac{2y}{L_{uu}} + \frac{2t \cos \varphi}{L_{uu}}}}{\lambda}. \quad (3.24)$$

Принимая $\cos \varphi = 1$, при малых углах:

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{\xi S_o}{2R} = \frac{\xi S_{z \text{ cp}}}{t}.$$

Тогда траекторию относительного движения нижнего соседнего зуба в пропиле опишем уравнением:

$$x_2 = \frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 + \lambda)^2 - \frac{2y}{L_{uu}} + \frac{2t}{L_{uu}}}}{\lambda} - \xi S_{z \text{ cp}}. \quad (3.25)$$

Тогда мгновенная величина подачи на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_o}{2\pi} \left[\arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 + \lambda)^2 - \frac{2y}{L_{uu}}}}{\lambda} - \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 + \lambda)^2 + \frac{2(t-y)}{L_{uu}}}}{\lambda} \right] + \xi S_{z \text{ cp}}. \quad (3.26)$$

Аналогично при бесконечной длине шатуна траектория относительного движения нижнего соседнего зуба пилы определится при решении системы следующих уравнений:

$$\begin{cases} y_2 = R(1 - \cos \alpha) + t \cos \varphi, \\ x_2 = \frac{S_o}{2\pi} \alpha - t \sin \varphi. \end{cases} \quad (3.27)$$

Траектория относительного движения зуба пилы в пропиле будет иметь вид:

$$x_2 = \frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{R+t-y}{R} - \xi S_{z\text{cp}}. \quad (3.28)$$

Тогда мгновенная подача на зуб без учета конечной длины шатуна определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_o}{2\pi} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) + \xi S_{z\text{cp}}. \quad (3.29)$$

Из формул (3.26) и (3.29) видно, что подача на зуб за рабочий ход не постоянна и зависит от хода пильной рамки, ее положения по высоте (угла поворота кривошипа), шага зубьев пилы, уклона пилы, подачи на оборот коленчатого вала (посылки).

По формулам (3.26) и (3.29) мгновенную подачу на зуб можно определить на участке движения пильной рамки от $t\cos\varphi$ до $2R$. На участке рабочего хода от 0 до $t\cos\varphi$ мгновенную подачу на зуб по вышеприведенным формулам определить нельзя. Здесь мгновенная подача на зуб зависит не только от траектории относительного движения первого зуба пилы в пропиле, но и от уравнения, описывающего контур дна пропила, который получается в конце рабочего хода и в начале холостого хода.

Математическое описание контура дна пропила очень сложно, так как на дне пропила имеются ступеньки, положение которых по высоте пропила определяется в зависимости от расположения зубьев пилы по высоте относительно подающих (нижних) валцов, величины хода пильной рамки и шага зубьев пилы. В настоящее время такой анализ не производится, а условно принимается, что дно пропила в начале рабочего хода представляет собой наклонную прямую линию, совпадающую с линией зубьев пилы, когда они находятся в НМТ.

В этом случае на участке рабочего хода от 0 до $t\cos\varphi$ подача на зуб определится по выражению:

$$S_z = \frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1+\lambda)^2 - 2y/L_{uu}}}{\lambda} + y \sin \varphi. \quad (3.30)$$

При бесконечной длине шатуна мгновенная подача на зуб на участке рабочего хода от 0 до $t\cos\varphi$ определится так:

$$S_z = \frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{R-y}{R} + y \sin \varphi. \quad (3.31)$$

Важно знать максимальные значения подачи на зуб, так как ими определяются максимальные силы резания и качество продукции, что в конечном счете оказывает влияние на условия работы рамных пил и производительность лесопильных рам.

Мгновенная подача на зуб будет максимальной при прохождении пильной рамкой расстояний от ВМТ:

$$y = t \cos \varphi \text{ и } y = 2R.$$

Подставим эти выражения в уравнение мгновенной подачи на зуб, получим их максимальные значения. Первое значение максимальной подачи на зуб определяется по формуле:

$$S_{z \max 1} = \frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 + \lambda)^2 - 2t/L_{uu}}}{\lambda} + \xi S_{z \text{ ср}}. \quad (3.32)$$

Второе значение максимальной подачи на зуб определится по формуле:

$$S_{z \max 2} = \frac{S_o}{2} - \frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 - \lambda)^2 - 2t/L_{uu}}}{\lambda} + \xi S_{z \text{ ср}}. \quad (3.33)$$

При бесконечной длине шатуна максимальная подача на зуб в начале рабочего хода равна максимальной подаче на зуб в конце рабочего хода. Она определится по формуле:

$$S_{z \max} = \frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{R - t \cos \varphi}{R} + \xi S_{z \text{ ср}}. \quad (3.34)$$

Интересно знать угол поворота кривошипа, при котором подача на зуб принимает первое максимальное значение. Этот угол с учетом конечной длины шатуна равен:

$$\alpha_{S_{z \max}} = \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 + \lambda)^2 - 2t/L_{uu}}}{\lambda}. \quad (3.35)$$

При бесконечной длине шатуна угол поворота кривошипа, при котором подача на зуб принимает максимальное значение, определяется по формуле:

$$\alpha_{S_{z \max}} = \arccos \frac{R - t}{R}. \quad (3.36)$$

Минимальное значение подачи на зуб принимает при перемещении пильной рамки от ВМТ, равном приблизительно $y = R + t/2$.

Подставим это значение в формулы (3.26) и (3.29), получим выражения для определения минимальной подачи на зуб.

Минимальная подача на зуб с учетом конечной длины шатуна определяется по формуле:

$$S_{z \min} = \frac{S_o}{2\pi} \left(\arccos \frac{-1 + \sqrt{1 + \lambda^2 - t/L_{ш}}}{\lambda} - \arccos \frac{-1 + \sqrt{1 + \lambda^2 + t/L_{ш}}}{\lambda} \right) + \xi S_{z \text{ ср}}. \quad (3.37)$$

При бесконечной длине шатуна минимальная подача на зуб определится по формуле:

$$S_{z \min} = \frac{S_o}{2\pi} \left(\pi - 2 \arccos \frac{t}{2R} \right) + \xi S_{z \text{ ср}}. \quad (3.38)$$

Угол поворота кривошипа, при котором подача на зуб минимальная, определится по формулам:

при учете длины шатуна

$$\alpha_{S_{z \min}} = \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 + \lambda)^2 + t/L_{ш}}}{\lambda}, \quad (3.39)$$

при бесконечной длине шатуна:

$$\alpha_{S_{z \min}} = \pi - \arccos \frac{t}{2R}. \quad (3.40)$$

Характер изменения мгновенной подачи на зуб во время рабочего хода в зависимости от положения пильной рамки (угла поворота кривошипа) представлен на рис. 3.4. Он представляет собой двугорбую кривую. Следует иметь в виду, что горб (максимум) в начале рабочего хода можно устранить путем придания пилам большего уклона. Второй же горб (максимум) в конце рабочего хода может быть устранен при условии изменения: закона (математической модели) движения пилы, закона (математической модели) движения заготовки (бруса) или законов (математических моделей) совместного движения пил и заготовки.

Из рис. 3.4, а также в представленных формулах видно, что на характер изменения мгновенной подачи на зуб влияют ход пильной рамки, шаг зубьев и уклон пил. С увеличением хода пильной рамки максимальная подача на зуб увеличивается, значение угла поворота, при котором подача на зуб принимает первое максимальное значение, уменьшается, а минимальная подача на зуб практически сохраняется. При бесконечной длине шатуна максимальная подача на зуб в начале рабочего хода равна максимальной подаче на зуб в конце рабочего хода (рис. 3.4).

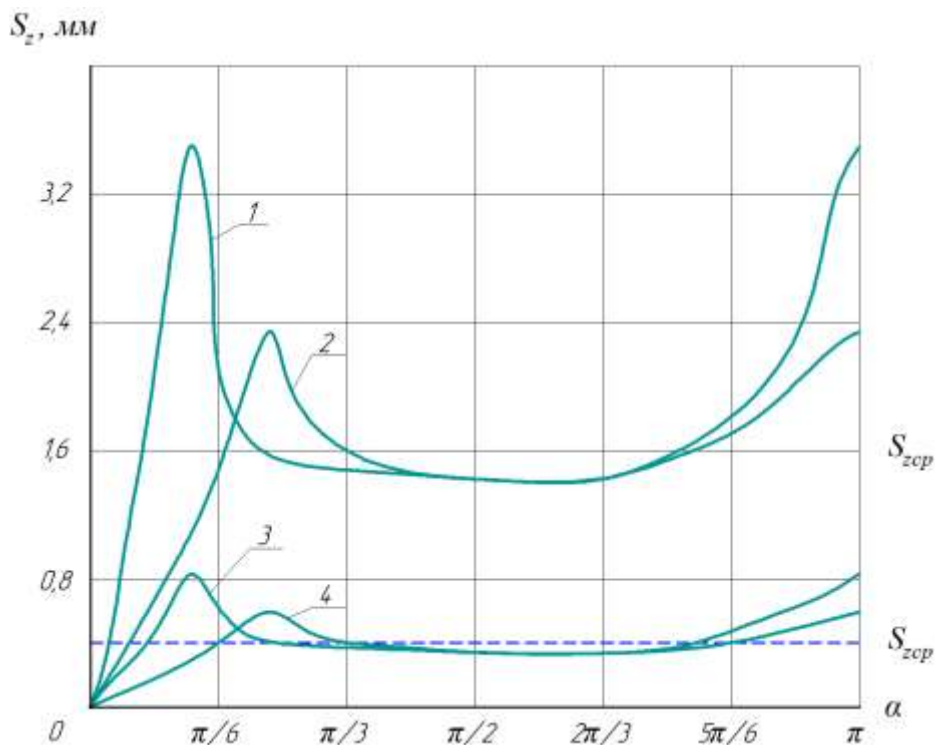


Рис. 3.4. Характер изменения подачи на зуб без учета длины шатуна:
 1 – $R = 300$ мм; 2 – $R = 100$ мм ($S_{zcp} = 1,6$ мм); 3 – $R = 300$ мм;
 4 – $R = 100$ мм ($S_{zcp} = 0,4$ мм)

Максимальные подачи на зуб, определяемые по формулам с учетом конечной длины шатуна, несколько больше, чем максимальные подачи на зуб, определяемые без учета конечной длины шатуна [7, 11] (см. рис. 3.5).

Максимальная подача на зуб в конце рабочего хода несколько больше максимальной подачи на зуб в начале рабочего хода.

Следует помнить, что при выводе формул (3.26) и (3.29) нами принято, что дно пропила представляет собой прямую, соответствующую линии наклона зубьев пилы « mn » (рис. 3.2), и взаимодействие зубьев пилы с древесиной начинается с начала рабочего хода

без учета потери рабочего хода. С учетом потери рабочего хода в указанных формулах следует вместо $\frac{S_0}{2\pi}$ принимать $\frac{S_0 H}{2\pi(H-y_n)}$. В этом случае подача на зуб пилы возрастает.

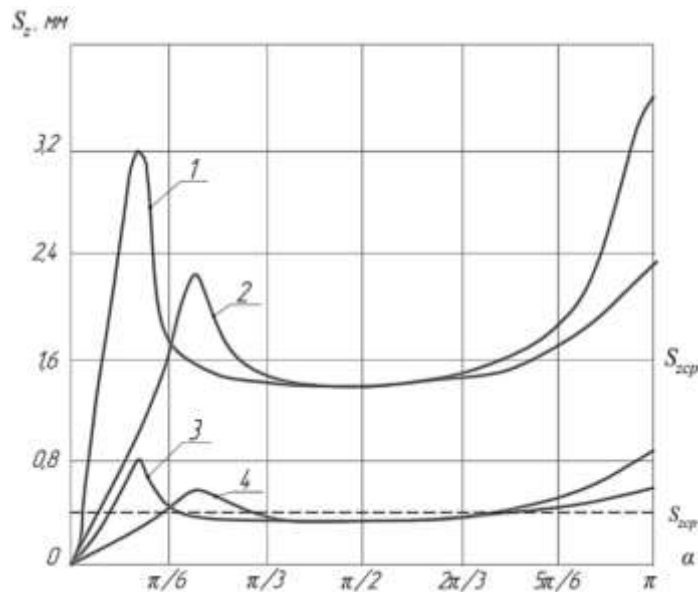


Рис. 3.5. Характер изменения подачи на зуб с учетом конечной длины шатуна:
 1 – $R = 300$ мм; 2 – $R = 100$ мм ($S_{zcp} = 1,6$ мм); 3 – $R = 300$ мм;
 4 – $R = 100$ мм ($S_{zcp} = 0,4$ мм)

3.4. Путь скобления

Ранее полагали [47], что глубина вдавливания зуба пилы в древесину в начале холостого хода пил определяется между линией наклона зубьев пилы и траекторией движения зуба пилы во время холостого хода (см. рис. 3.1 и 3.2). Впервые Н. Н. Сурадейкин [72] представил взаимодействие зубьев пилы с древесиной в начале холостого хода в виде траекторий движения двух соседних зубьев пилы. Далее Н. А. Батин [34] и другие авторы стали предлагать формулы для определения глубины возможного вдавливания в древесину зуба пилы в начале холостого хода, расположенной между двумя соседними зубьями пилы. Однако эта методика не получила распространения в науке и технике.

Современное представление о смятии древесины зубом пилы в начале холостого хода изложено в работах [1, 7, 17].

В начале холостого хода (при движении пил вверх) скорость отхода зубьев от дна пропила меньше, чем скорость движения заготовки (бруса). Поэтому происходит взаимодействие задних граней

зубьев пилы с дном пропила, что вызывает скобление зубьями пилы дна пропила. На рис. 3.6 видно, что дно пропила имеет наклон по линии вершин зубьев пилы mn .

На рис. 3.6 видно, что дно пропила имеет наклон по линии вершин зубьев пилы mn , на которой образованы выступы ode траекторией движения зуба пилы и линией наклона зубьев пилы mn . Эти выступы препятствуют движению пил вверх. Путь скобления будет равен расстоянию от нижней мертвой точки «0» до пересечения траекторий двух соседних зубьев пилы « b ». Путь скобления в основном характеризует время взаимодействия зубьев пилы с древесиной за холостой ход (время действия силы резания за холостой ход, которую называют силой скобления), что очень важно при анализе процесса пиления древесины рамными пилами. Траектория относительного движения первого зуба пилы за холостой ход описывается уравнением (3.9) (отсчет угла поворота кривошипа производится от нижней мертвой точки).

Траекторию относительного движения соседнего зуба пилы за холостой ход можно представить следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} y = R(1 - \cos \alpha - \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2} \cos^2 \alpha) \pm t \cos \varphi, \\ x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \alpha \pm t \sin \varphi. \end{cases} \quad (3.41)$$

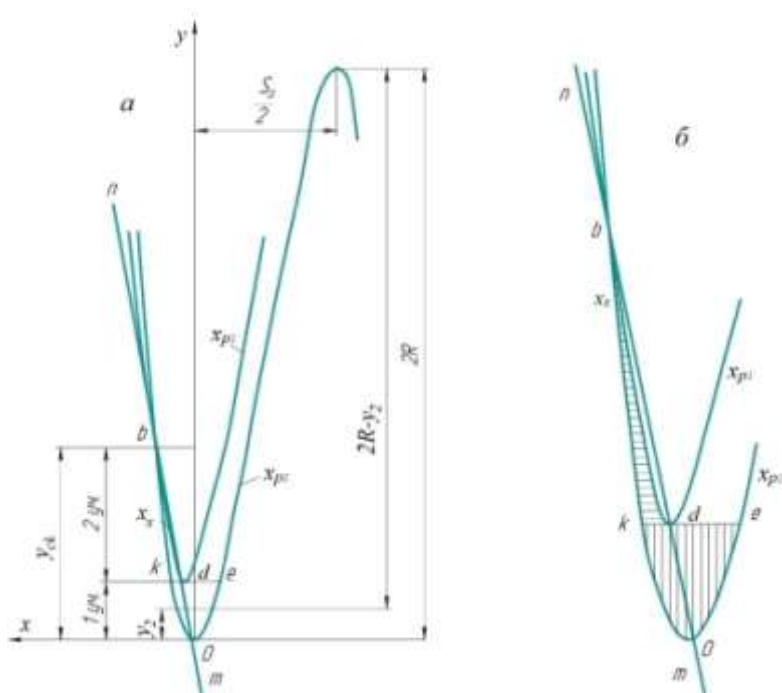


Рис. 3.6. Схема к расчету пути скобления (а) и схема зоны возможного смятия древесины зубом пилы (б)

В системе уравнений (3.41) знак плюс относится к верхнему соседнему зубу пилы, а минус – к нижнему соседнему зубу пилы. Решая систему уравнений для верхнего соседнего зуба пилы, получим траекторию относительного движения соседнего зуба пилы в пропиле:

$$x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{1 - \sqrt{(1 - \lambda)^2 + \frac{2(y-t)}{L_u}}}{\lambda} + \xi S_{z\text{cp}}. \quad (3.42)$$

Решая совместно уравнения (3.9) и (3.42), получим угол поворота кривошипа, при котором происходит пересечение траекторий двух соседних зубьев пилы:

$$\alpha_c = \arcsin \frac{t \cos \varphi}{2R \sin \frac{\pi \xi t}{2R} (1 + \lambda \cos \frac{\pi \xi t}{2R})} + \frac{\pi \xi t}{2R}. \quad (3.43)$$

Величину пути скобления определим по формуле:

$$y_{ск} = R \left\{ 1 - \cos \left[\arcsin \frac{t \cos \varphi}{2R \sin \frac{\pi \xi t}{2R} (1 + \lambda \cos \frac{\pi \xi t}{2R})} + \frac{\pi \xi t}{2R} \right] + \frac{\lambda}{2} \cos^2 \left[\arcsin \frac{t \cos \varphi}{2R \sin \frac{\pi \xi t}{2R} (1 + \lambda \cos \frac{\pi \xi t}{2R})} + \frac{\pi \xi t}{2R} \right] - \frac{\lambda}{2} \right\}. \quad (3.44)$$

Для определения пути скобления зубом пилы дна пропила без учета конечной длины шатуна решаем систему уравнений, выражающих траектории относительных движений двух соседних зубьев пилы:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R - y}{R}, \\ x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R - y + t \cos \varphi}{R} + \xi S_{z\text{cp}}. \end{cases} \quad (3.45)$$

При решении системы уравнений (3.45) находим угол поворота кривошипа, при котором заканчивается скобление зубьями пилы дна пропила:

$$\alpha_c = \frac{\pi \xi t}{2R} + \arcsin \frac{t \cos \varphi}{2R \sin \frac{\pi \xi t}{2R}}. \quad (3.46)$$

Тогда путь скобления определится по формуле:

$$y_{ск} = R \left[1 - \cos \left(\frac{\pi \xi t}{2R} + \arcsin \frac{t \cos \varphi}{2R \sin \frac{\pi \xi t}{2R}} \right) \right]. \quad (3.47)$$

Уравнения (3.44) и (3.47) показывают, что путь скобления зависит от шага зубьев пилы, хода пильной рамки (радиуса кривошипа), относительного уклона пил и длины шатуна.

Следует отметить, что увеличение уклона пилы приводит вначале к уменьшению пути скобления до значения, равного $t \cos \varphi$. При дальнейшем увеличении уклона пилы путь скобления остается равным $t \cos \varphi$. Минимальный путь скобления получается при относительном уклоне пилы, который можно определить, положив в формуле (3.47) $y_{ск} = t \cos \varphi$.

Тогда получим:

$$t \cos \varphi = R \left[1 - \cos \left(\frac{\pi \xi t}{2R} + \arcsin \frac{t \cos \varphi}{2R \sin \frac{\pi \xi t}{2R}} \right) \right]. \quad (3.48)$$

Решив это равенство относительно уклона пилы, получим:

$$\frac{\pi \xi t}{2R} = \arccos \frac{1}{2R} \sqrt{2R(2R - t \cos \varphi)}. \quad (3.49)$$

Тогда относительный уклон пил, при котором путь скобления будет равен $t \cos \varphi$, определится по формуле:

$$\xi = \frac{2R}{\pi t} \arccos \frac{1}{2R} \sqrt{4R^2 - 2Rt \cos \varphi}. \quad (3.50)$$

Так как $\cos \varphi$ является функцией относительного уклона, то вычисление по формуле (3.50) относительного уклона затруднительно. С достаточной для практики точностью можно принять $\cos \varphi = 1$. Тогда

$$\xi = \frac{2R}{\pi t} \arccos \frac{1}{2R} \sqrt{4R^2 - 2Rt}. \quad (3.51)$$

Таким образом, впервые получена формула для определения относительного уклона пил, при котором наблюдается минимальный путь скобления. Расчеты по формуле (3.51) показывают, что с увеличением шага зубьев пилы относительный уклон, при котором наблюдается минимальный путь скобления, уменьшается, а при увеличении хода пильной рамки – возрастает. Величина этого уклона, как показал анализ, для существующих параметров лесопильных рам находится в пределах 0,9...1,8. Такую величину относительного угла пилы вполне возможно получить на практике.

Эта формула также показывает, что изменением уклона пилы ликвидировать скобление зубьями пилы дна пропила, как это ранее полагали [47], невозможно.

Для более точного определения величины относительного уклона пилы, при котором наблюдается минимальный путь скобления, необходимо в формулу (3.50) подставить выражение (3.10). Тогда получим:

$$\xi = \frac{2R}{\pi t} \arccos \frac{1}{2R} \sqrt{4R^2 - 2Rt \cos \alpha \operatorname{ctg} \frac{\xi S_0}{2R}}. \quad (3.52)$$

Решая последнее тождество методом итерации, определим с большей точностью величину относительного уклона пилы, при которой наблюдается минимальный путь скобления. Формула (3.52) показывает, что на величину этого уклона также оказывает влияние и посылка [17].

3.5. Глубина вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода

В начальный период холостого хода зубья пилы вдавливаются в древесину, смятая ее своими задними гранями. Это происходит из-за несогласованного движения заготовки и перемещения пил [34, 67, 72, 78, 80].

Глубина вдавливания в основном характеризует силу резания (скобления) за холостой ход. Аналитическое выражение для определения глубины вдавливания позволит, прежде всего, установить основные факторы, влияющие на величину вдавливания (смятия) и на величину силы взаимодействия зубьев пилы с древесиной за холостой ход.

Из рис. 3.6б видно, что скобление наблюдается на линии okb . В процессе скобления сминаются объемы древесины $okde$ и kdb . Сминаемая часть древесины $okde$ образована участками траекторий относительного движения зуба пилы, проходимыми зубом пилы за время рабочего хода от $(2R - t \cos \varphi)$ до $2R$ (отсчет от ВМТ) и за время холостого хода от 0 до $t \cos \varphi$ (отсчет от НМТ). Этот участок назовем первым участком скобления. Глубина вдавливания зуба пилы в древесину на первом участке определится расстоянием по горизонтали между указанными выше траекториями движений одного зуба пилы, совершаемыми за холостой и рабочий ходы, причем эти движения совершаются следующим образом. За холостой ход движение зуба осуществляется в начале этого хода, а за рабочий ход движение зуба происходит в конце этого рабочего хода.

Участок dkb назовем вторым участком скобления. Глубина вдавливания на нем определится расстоянием по горизонтали между траекториями относительного движения двух соседних зубьев за холостой ход. Из рисунка 3.6б видно, что максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину, определяющая в основном максимальные силы скобления за холостой ход, наблюдается на первом участке скобления приблизительно на расстоянии $t \cos \varphi$ от НМТ.

Определим глубину вдавливания зуба пилы в древесину на первом участке скобления. Траектория относительного движения зуба пилы в пропиле за рабочий ход с учетом конечной длины шатуна определится по формуле (3.5). В этом случае положение зуба пилы за рабочий ход (от ВМТ) изменяется в следующих пределах:

$$y_2 = (2R - t \cos \varphi) \dots 2R.$$

Траектория относительного движения этого же зуба пилы за холостой ход с учетом конечной длины шатуна определится по формуле (3.9). Положение зуба пилы за холостой ход (от НМТ) изменяется в пределах $y_2 = 0 \dots t \cos \varphi$. В уравнении (3.5) значение (y_1) можно выразить так:

$$y_1 = 2R - y, x_1 = x + \frac{S_0}{2}.$$

Тогда траектория движения соседнего зуба пилы в пропиле определится по формуле:

$$x_1 = \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1-\lambda)^2 + 2y/L_{uu}}}{\lambda} + \frac{S_0}{2}. \quad (3.53)$$

Глубина вдавливания зуба пилы в древесину за холостой ход на первом участке скобления определится по формуле:

$$\delta_1 = \frac{S_0}{2\pi} \left(\arccos \frac{1 - \sqrt{(1-\lambda)^2 + 2y/L_{uu}}}{\lambda} - \right. \\ \left. - \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1-\lambda)^2 + 2y/L_{uu}}}{\lambda} \right) + \frac{S_0}{2}. \quad (3.54)$$

Изменив знаки в функции \arccos во втором слагаемом в скобках, последнее выражение можно записать так:

$$\delta_1 = \frac{S_0}{\pi} \arccos \frac{1 - \sqrt{(1-\lambda)^2 + \frac{2y}{L_{uu}}}}{\lambda}. \quad (3.55)$$

Из формулы (3.55) ясно, что глубина вдавливания зуба пилы в древесину за холостой ход на первом участке скобления зависит от посылки, хода пильной рамки, длины шатуна и положения пильной рамки. Формула (3.55) не учитывает влияние уклона пил. С учетом уклона пил глубина вдавливания зуба пилы в древесину определится по формуле:

$$\delta_1 = \frac{S_0 H}{\pi(H - y_n)} \arccos \frac{1 - \sqrt{(1-\lambda)^2 + 2y/L_{uu}}}{\lambda}. \quad (3.56)$$

Следует подчеркнуть, что глубина вдавливания зуба пилы в древесину на первом участке скобления при увеличении относительного уклона возрастает, но при этом уменьшается длина этого участка. Следовательно, изменением уклона пилы нельзя ликвидировать скобление зубьями пилы дна пропила и даже уменьшить глубину вдавливания зуба пилы в древесину на первом участке скобления, как это трактуется в работах [35, 47, 68].

Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину, как отмечалось выше, наблюдается на первом участке скобления на расстоянии $t \cos \varphi$ от НМТ. Подставив $t \cos \varphi$ в формулу (3.56), получим:

$$\delta_{max} = \frac{S_0 H}{\pi(H - y_n)} \arccos \frac{1 - \sqrt{(1 - \lambda)^2 + \frac{2t}{L_{uu}} \cos \varphi}}{\lambda}. \quad (3.57)$$

Угол поворота кривошипа, при котором глубина вдавливания максимальна, определится из выражения:

$$\alpha_{\delta max} = \arccos \frac{1 - \sqrt{(1 - \lambda)^2 + \frac{2t}{L_{uu}} \cos \varphi}}{\lambda}. \quad (3.58)$$

При бесконечной длине шатуна траектория относительного движения зуба пилы в плоскости пропила симметрична относительно вертикальной оси y , поэтому

$$\delta'_1 = \frac{S_0 H}{\pi(H - y_n)} \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (3.59)$$

В этом случае положение пильной рамки изменяется в пределах $y = 0 \dots t \cos \varphi$ (отсчет от НМТ). Формулу (3.59) можно получить также из формулы (3.56), положив в ней $L_{uu} \rightarrow \infty$.

Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину при бесконечной длине шатуна определится по формуле:

$$\delta'_{max} = \frac{S_0 H}{\pi(H - y_n)} \arccos \frac{R - t \cos \varphi}{R}. \quad (3.60)$$

Угол поворота кривошипа, при котором глубина вдавливания зуба пилы в древесину достигает максимальной величины, определится из выражения:

$$\alpha'_{\delta max} = \arccos \frac{R - t \cos \varphi}{R}. \quad (3.61)$$

Определим глубину вдавливания зуба пилы в древесину за холостой ход на втором участке скобления. Траектория относительного движения соседнего зуба пилы в плоскости пропила за холостой ход определится по формуле (3.9). Траектория относительного движения верхнего соседнего зуба пилы относительно плоскости пропила за холостой ход определится по формуле (3.42).

Глубина вдавливания зуба пилы в древесину на втором участке скобления определится по формуле:

$$\delta_2 = \frac{S_0 H}{\pi(H - y_n)} \left(\arccos \frac{1 - \sqrt{(1 - \lambda)^2 + 2y/L_{uu}}}{\lambda} - \arccos \frac{1 - \sqrt{(1 - \lambda)^2 + 2(y - t \cos \varphi)/L_{uu}}}{\lambda} \right) - \frac{\xi S_0 t}{2R}. \quad (3.62)$$

На втором участке скобления ($y = t \cos \varphi \dots y_{ск}$) глубина вдавливания зуба пилы в древесину зависит от положения пильной рамки, хода пильной рамки, длины шатуна, шага зубьев пилы, относительного уклона пилы и величины посылки.

Глубина вдавливания зуба пилы в древесину на втором участке скобления при бесконечной длине шатуна определится по формуле:

$$\delta'_2 = \frac{S_0 H}{\pi(H - y_n)} \left(\arccos \frac{R - y}{R} - \arccos \frac{R - y + t \cos \varphi}{R} \right) - \frac{\xi S_0 t}{2R}. \quad (3.63)$$

Следует отметить, что с увеличением уклона пилы второй участок скобления уменьшается по длине. Может наступить такой момент, когда этот участок будет равен нулю и, следовательно, взаимодействие зуба пилы с древесиной на этом участке исключится. Это произойдет при величине относительного уклона с учетом конечной длины шатуна:

$$\xi = \frac{R}{\pi t} \arccos \frac{1 - \sqrt{(1 - \lambda)^2 + 2t \cos \varphi / L_{uu}}}{\lambda}. \quad (3.64)$$

При бесконечной длине шатуна относительный уклон пилы, при котором исчезает второй участок скобления, определится по формуле:

$$\xi' = \frac{R}{\pi t} \arccos \frac{R - t \cos \varphi}{R}. \quad (3.65)$$

Итак, скобление зубом пилы древесины во время холостого хода при данной кинематике лесопильной рамы, при изменении любых параметров процесса пиления рамными пилами ликвидировать нельзя.

Фактически из-за явлений скольжения заготовки в подающих вальцах глубина вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода меньше определяемой по предлагаемым ранее формулам (3.56), (3.62). Однако эти формулы вскрывают сущность явлений, происходящих при взаимодействии зуба пилы и древесины в начале холостого хода, указывают на факторы, влияющие на процесс скобления, и позволяют оценить их влияние количественно.

Следует иметь в виду, что формулы (3.65) и (3.51) получены различным путем, но отражают одну и ту же физическую сущность, а расчеты, выполненные по этим формулам, практически совпадают, что говорит о достоверности и правильности сделанных выводов.

Важно знать объем (площадь) возможного смятия древесины зубом пилы во время холостого хода, так как он будет во многом определять средние силы скобления при холостом ходе. Положим в формуле (3.59) $\cos \varphi = 1$. Тогда площадь поперечного сечения возможного сдавливания древесины зубом пилы во время холостого хода примерно определится (без учета потери хода) так:

$$f_c = 2 \int_0^t \frac{S_{z\text{cp}} R}{\pi t} \arccos \frac{R-y}{R} dy. \quad (3.66)$$

Обозначим $\frac{R-y}{R} = z$.

Тогда $dy = -Rdz$.

Пределы интегрирования изменятся следующим образом.

При $y = 0$, $z_0 = 1$.

При $y = t$, $z_t = (R-t)/R$.

Подставив их в формулу (3.66), получим:

$$f_c = 2 \frac{S_{z\text{cp}} R}{\pi t} \int_1^{\frac{R-t}{R}} \arccos(-Rzdz).$$

Проинтегрировав, получим:

$$f_c = -2 \frac{S_{z\text{cp}} R^2}{\pi t} \left(\frac{R-t}{R} \arccos \frac{R-t}{R} - \sqrt{1 - (R-t)^2/R^2} \right).$$

После преобразования окончательно имеем:

$$f_c = 2 \frac{S_{z\text{cp}} R}{\pi t} \left[\sqrt{2Rt - t^2} - (R-t) \arccos \frac{R-t}{R} \right]. \quad (3.67)$$

Таким образом, на площадь возможного сдавливания древесины зубом пилы во время холостого хода влияют радиус кривошипа (ход пильной рамки), подача на зуб и шаг зубьев пилы.

Из формулы (3.67) видно, что с увеличением средней подачи на зуб площадь возможного сдавливания древесины зубом пилы во время холостого хода увеличивается прямо пропорционально, так как члены формулы в квадратной скобке при этом остаются неизменными.

При увеличении шага зубьев пилы (рис. 3.7) площадь возможного сдавливания древесины зубом пилы во время холостого хода возрастает по кривой с небольшой выпуклостью вверх. Практически можно считать эту зависимость прямолинейной. Отношение площади возможного сдавливания древесины зубом пилы во время холостого хода (f_c) к ходу пильной рамки (H) с увеличением шага зубьев (t) также возрастает.

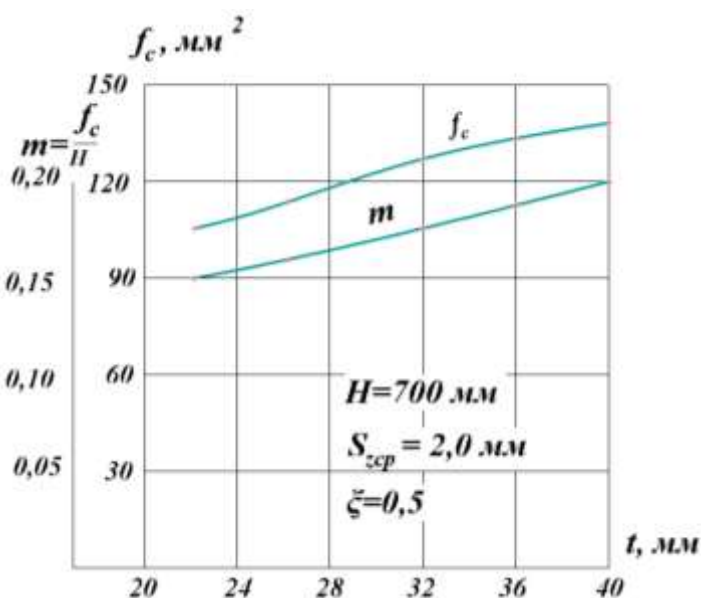


Рис. 3.7. Влияние шага зуба на площадь возможного сдавливания древесины зубом пилы

Зная эти закономерности, можно предсказать, что при увеличении шага зубьев пилы силы резания (скобления) во время холостого хода будут возрастать. Однако следует иметь в виду, что при увеличении шага зубьев пилы уменьшается число зубьев, находящихся одновременно в пропилах (высота пропила принята при этом постоянной).

В общем случае при заключении о влиянии шага зубьев пилы на силы резания во время холостого хода следует учитывать выражение:

$$f_0 = f_c \frac{h}{t \cos \varphi}, \quad (3.68)$$

где f_0 — общая площадь возможного смятия древесины всеми зубьями пилы, находящимися в пропилене во время холостого хода, мм².

Из формулы (3.68) видно, что с увеличением шага зубьев пилы общая площадь возможного сдавливания древесины всеми зубьями пилы, расположенными в пропилене, во время холостого хода уменьшается. Следовательно, при увеличении шага зубьев пилы средние силы резания, действующие на один зуб, во время холостого хода будут возрастать, а средние силы резания (скобления), действующие на всю пилу во время холостого хода, будут уменьшаться. Это окажет благоприятное влияние на энергетические показатели процесса пиления и на устойчивое состояние полотна пилы. Следует ожидать в этом случае меньший отбой (скольжение) заготовки во время холостого хода.

Увеличение хода пильной рамки вызывает рост площади возможного сдавливания древесины зубом во время холостого хода по кривой с выпуклостью, направленной вверх (см. рис. 3.8). Отношение этой площади к ходу пильной рамки уменьшается. Поэтому можно сделать важный вывод, что при увеличении хода пильной рамки средние силы резания (скобления) за холостой ход должны уменьшаться.

В формуле (3.67) относительный уклон пил принят равным 0,5. С увеличением относительного уклона пил наблюдается потеря рабочего хода. Это, в свою очередь, вызовет увеличение средней подачи на зуб на участке пиления, и тогда с учетом потери рабочего хода площадь возможного сдавливания древесины зубом пилы во время холостого хода увеличится за счет увеличения средней подачи на зуб.

Влияние уклона пилы на площадь возможного сдавливания древесины зубом пилы во время холостого хода представлено на рис. 3.9. С увеличением уклона пилы эта площадь возрастает. Следовательно, средние силы резания за холостой ход при увеличении уклона пилы должны увеличиваться. Кроме того, максимальная величина силы резания (скобления) во время холостого хода при увеличении уклона пил возрастает. Это ухудшает условия работы пил.

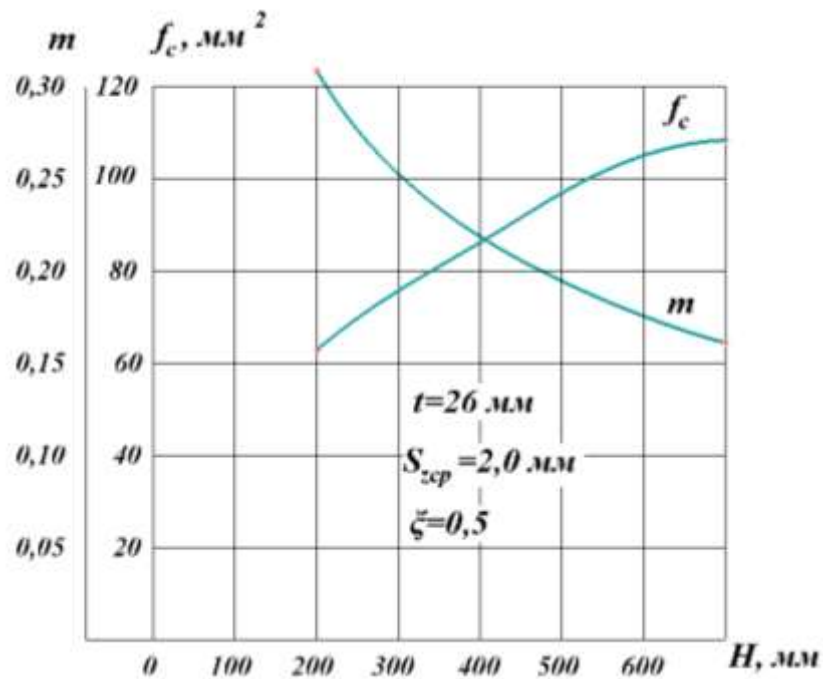


Рис. 3.8. Влияние хода пильной рамки на площадь возможного сдавливания древесины зубом пилы

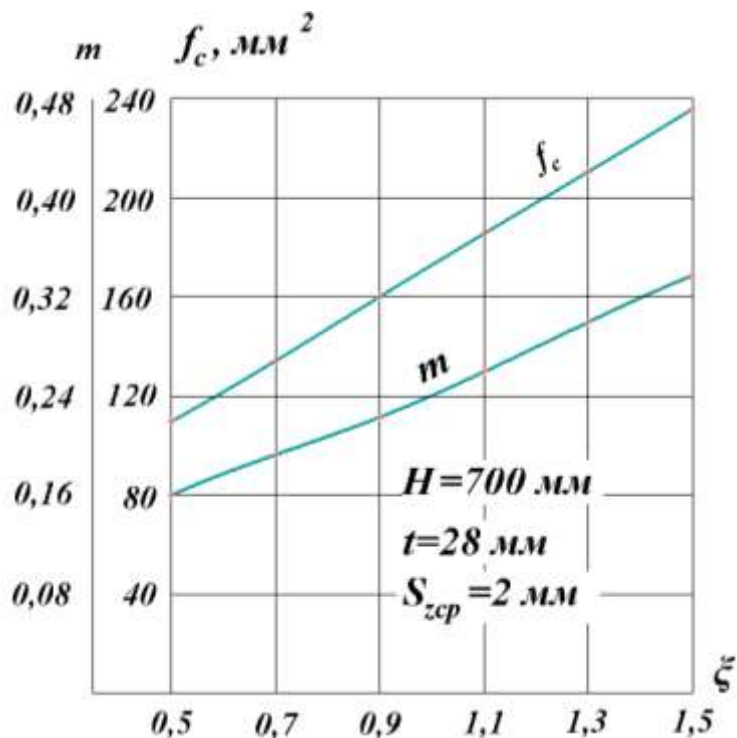


Рис 3.9. Влияние уклона пил на площадь возможного сдавливания древесины зубом пилы

Анализ влияния площади возможного сдавливания древесины зубом пилы на средние силы резания (скобления) при холостом ходе выполнен без учета влияния других факторов.

3.6. Влияние основных факторов на кинематические показатели процесса пиления

В предыдущих параграфах данного раздела мы теоретически рассмотрели кинематические соотношения, которые наблюдаются в процессе пиления древесины рамными пилами при равномерной скорости подачи и центральном кривошипно-шатунном механизме резания с прямолинейным перемещением пил.

Средняя подача на зуб является основным режимным фактором резания и определяет качество пиломатериалов, производительность лесопильных рам, а также силы и мощность резания.

По полученным в этом разделе формулам сделаны расчеты, выясняющие влияние средней подачи на зуб на кинематику процесса пиления древесины рамными пилами. В расчетах относительный уклон пил принят равным 0,55, а шаг зубьев пилы – 26 мм. Расчеты произведены для ходов пильной рамки 200 и 700 мм (рис. 3.10).

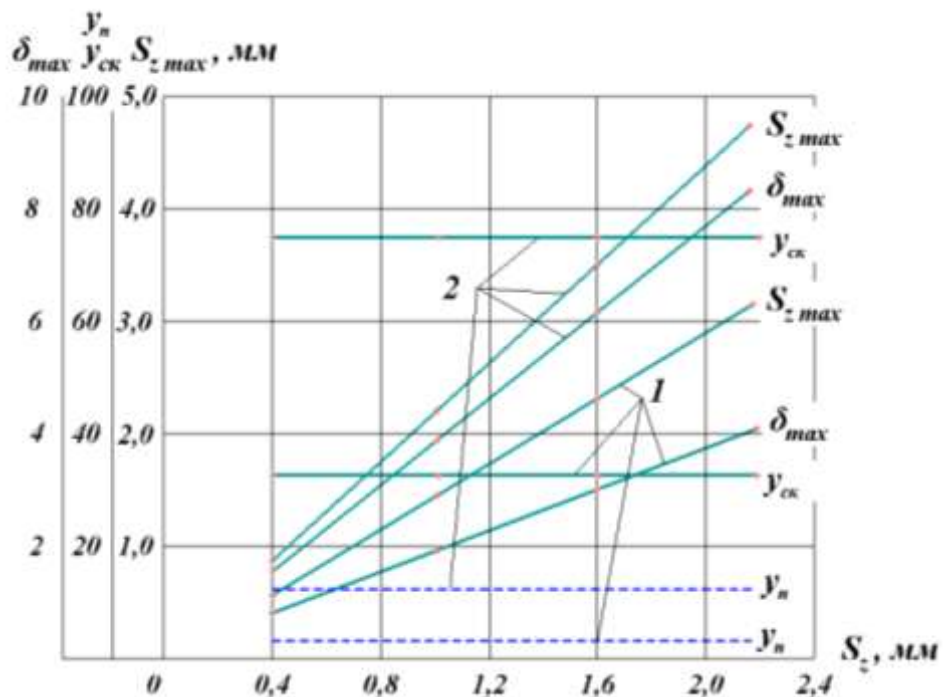


Рис. 3.10. Влияние средней подачи на зуб на кинематические параметры процесса: 1 – ход пильной рамки 200 мм; 2 – ход пильной рамки 700 мм

Анализ показывает, что путь скобления зубом пилы дна пропила и потеря рабочего хода не изменяются с изменением средней подачи на зуб. С увеличением средней подачи на зуб максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода увеличивается прямо пропорционально (по закону прямой линии).

Углы поворота кривошипа, при которых наблюдаются максимальные значения мгновенной подачи на зуб, а также глубины вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода с изменением средней подачи на зуб $S_{z\text{ cp}}$ не изменяются.

С увеличением подачи на зуб их максимальные и минимальные значения изменяются по закону прямой линии. Составим отношения максимальной и минимальной подачи на зуб к среднему значению подачи на зуб:

$$\frac{S_{z\text{ min}}}{S_{z\text{ cp}}} = \frac{R(1 - a_n)}{\pi t} \left(\arccos \frac{-1 + \sqrt{1 + \lambda^2 - t \cos \varphi / L_{\text{ш}}}}{\lambda} - \arccos \frac{-1 + \sqrt{1 + \lambda^2 + t \cos \varphi / L_{\text{ш}}}}{\lambda} \right) + \xi(1 - a_n). \quad (3.69)$$

$$\frac{S_{z\text{ max}}}{S_{z\text{ cp}}} = \frac{R(1 - a_n)}{\pi t} \arccos \frac{-1 + \sqrt{(1 + \lambda)^2 - \frac{t \cos \varphi}{L_{\text{ш}}}}}{\lambda} + \xi(1 - a_n). \quad (3.70)$$

Из выражений (3.69) и (3.70) видно, что отношения $S_{z\text{ min}}/S_{z\text{ cp}}$ и $S_{z\text{ max}}/S_{z\text{ cp}}$ не зависят от средней подачи на зуб.

На рис. 3.11 представлены расчеты по влиянию шага зубьев пилы на кинематику процесса пиления древесины рамными пилами. Расчеты произведены для условий: средняя подача на зуб 1,6 мм, относительный уклон пилы 0,55, ход пильной рамки 700 мм, $\lambda = 0,175$. Из анализа этих данных можно сделать следующие выводы.

При увеличении шага зубьев пилы (при условии сохранения при этом средней подачи на зуб) максимальная подача на зуб $S_{z\text{ max}}$ уменьшается, минимальная подача на зуб $S_{z\text{ min}}$ сохраняется неизменной, а угол поворота кривошипа, при котором наблюдается первое максимальное значение подачи на зуб, увеличивается. Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода с увеличением шага зубьев пилы уменьшается. При увеличении шага зубьев путь скобления увеличивается, а потеря рабочего хода остается без изменения.

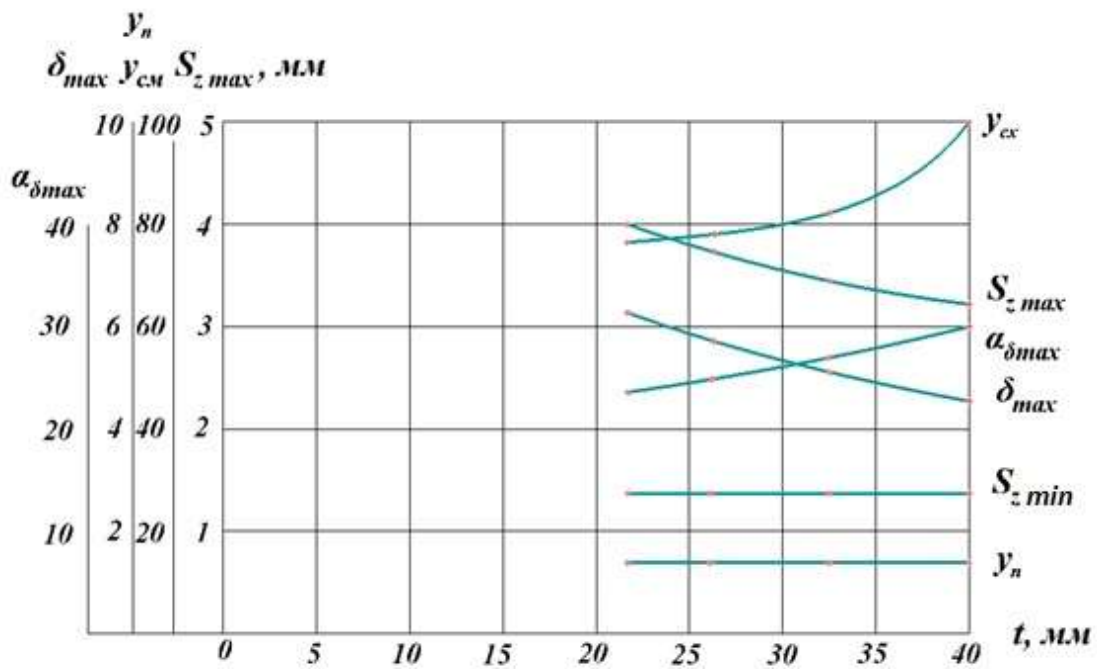


Рис. 3.11. Влияние шага зубьев пилы на кинематические параметры процесса пиления

С увеличением уклона пил потеря рабочего хода увеличивается, что при определенном значении относительного уклона приводит к ликвидации первого максимального значения мгновенной подачи на зуб. Кроме того, увеличение потери рабочего хода приводит к увеличению средней подачи на зуб (при сохранении неизменной посылки на оборот), что приведет, в свою очередь, к росту мгновенной подачи на зуб (см. рис. 3.12).

Максимальные $S_{z max}$ и минимальные $S_{z min}$ подачи на зуб пилы при увеличении уклона пилы увеличиваются, но отношение их $S_{z max} / S_{z cp}$ при этом будет уменьшаться.

Это объясняется тем, что при увеличении уклона пил удельный рост минимальной мгновенной подачи на зуб больше, чем максимальной мгновенной подачи на зуб.

Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода с увеличением уклона пилы возрастает (см. рис. 3.13), а путь скобления при этом сначала уменьшается до $t \cos \varphi$ (см. рис. 3.14), а затем снова возрастает.

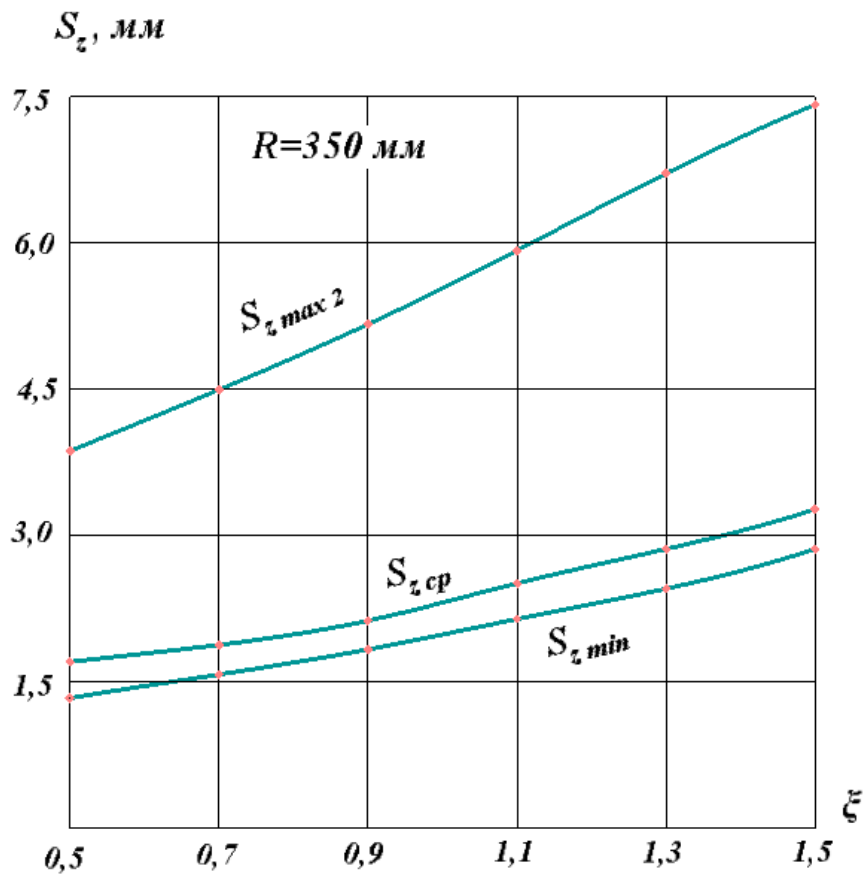


Рис 3.12. Влияние уклона пил на максимальную, среднюю и минимальную подачи на зуб

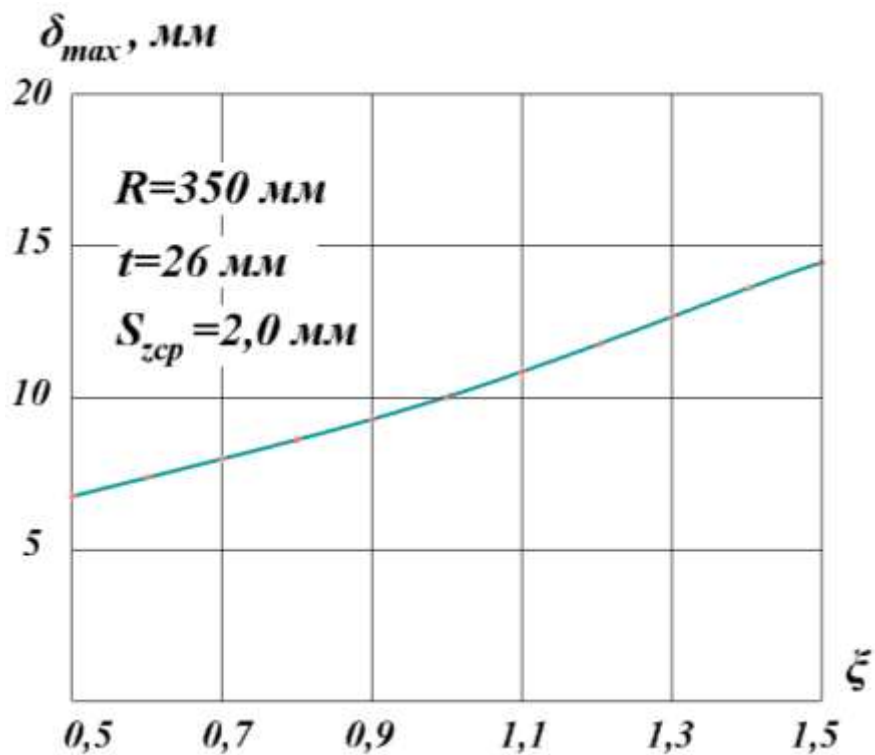


Рис. 3.13. Влияние уклона пил на максимальную глубину вдавливания зуба пилы в древесину

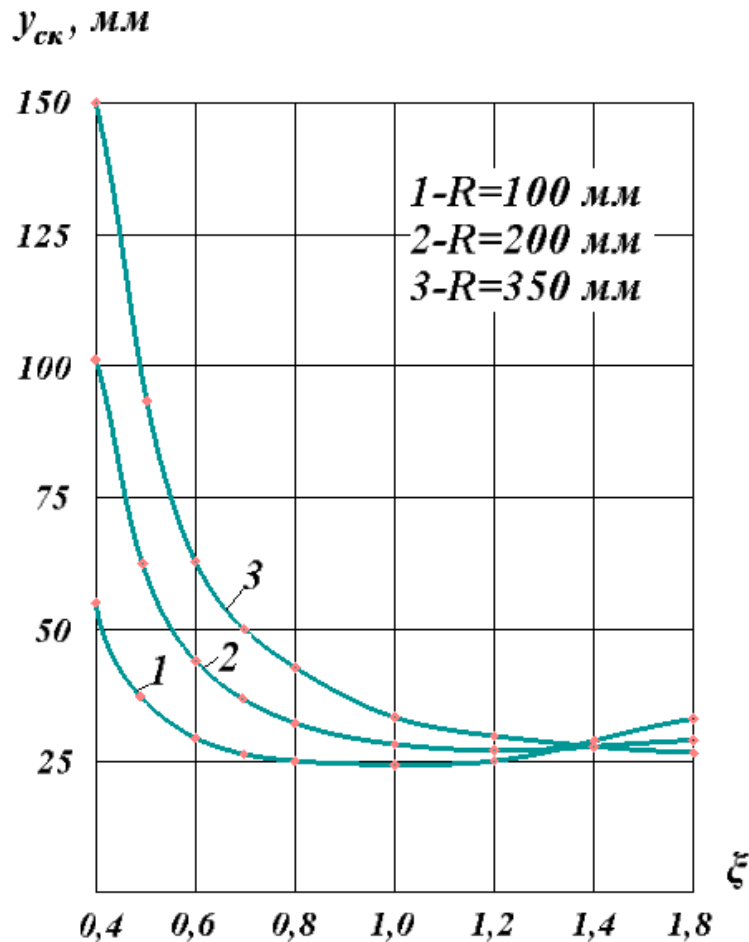


Рис. 3.14. Влияние уклона пил на величину пути скобления зубом пилы дна пропила для различных радиусов кривошипа

Влияние хода пильной рамки на кинематику процесса пиления представлено на рис 3.15. Анализируя его, можно сделать следующие выводы (при условии сохранения всех факторов, в том числе $S_{z\text{ ср}}$ и относительного уклона пил ξ , постоянными).

Максимальная подача на зуб возрастает при увеличении хода пильной рамки, а минимальная подача на зуб сохраняется постоянной, так что отношение $S_{z\text{ max}} / S_{z\text{ ср}}$ будет при этом возрастать.

Величина потери рабочего хода при увеличении хода пильной рамки возрастает по закону параболы с выпуклостью, направленной вверх.

При увеличении хода пильной рамки максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину при холостом ходе увеличивается, но при этом отношение δ_{max} / H уменьшается. При увеличении хода пильной рамки путь скобления зубом пилы дна пропила увеличивается, но по отношению к ходу пильной рамки путь скобления уменьшается.

При увеличении хода пильной рамки при условии сохранения величины средней подачи на зуб посылка на один оборот коренного вала прямо пропорционально возрастает, а соотношение высоты пропила и хода пильной рамки уменьшается, что оказывает благоприятное влияние на условия работы впадины зуба, так как увеличивается свободный путь зуба пилы. Однако увеличение хода пильной рамки приводит к увеличению силы натяжения пил, что вызывает применение более толстых пил и увеличение веса пильной рамки. Увеличение веса пильной рамки приводит к возрастанию сил инерции и, как следствие этого, к снижению частоты вращения колчатого вала привода пильной рамки.

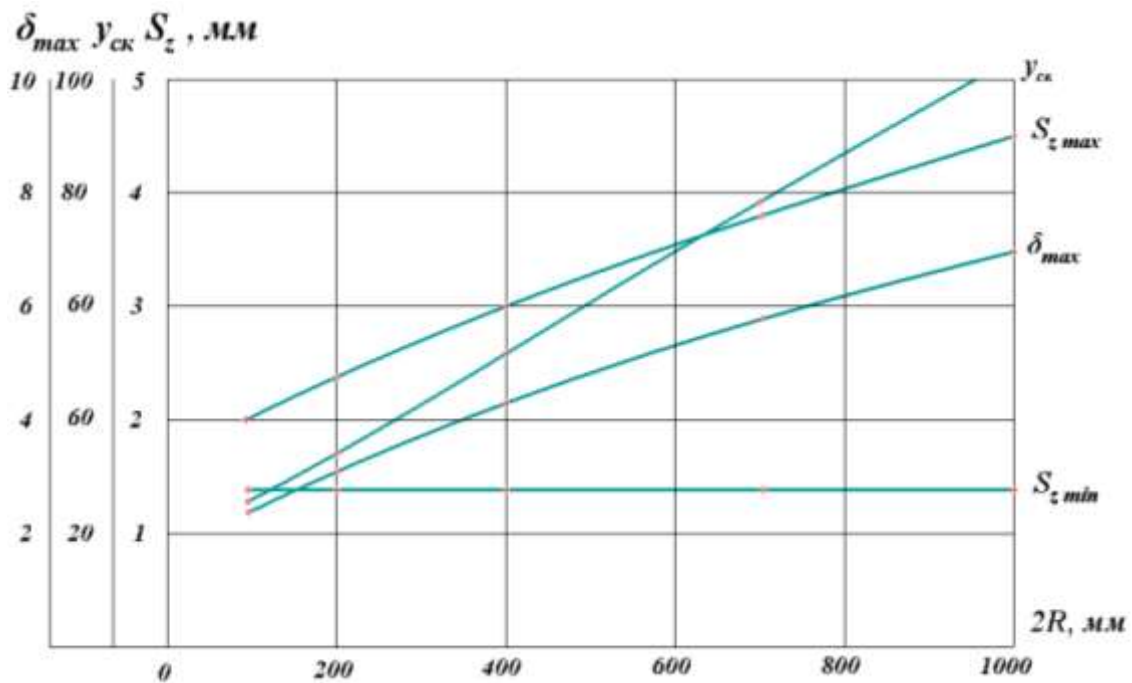


Рис. 3.15. Влияние хода пильной рамки на кинематические параметры процесса

С увеличением хода пильной рамки (рис. 3.15) максимальное значение подачи на зуб как в начальный период рабочего хода, так и в конце его возрастает. Максимальная подача на зуб в конце рабочего хода принимает большее значение, чем максимальная подача на зуб в начальный период рабочего хода. Явно выраженное превышение максимальной подачи на зуб наблюдается при большем значении хода пильной рамки и большей средней подаче на зуб. Минимальная подача на зуб наблюдается примерно в середине рабочего хода и при изменении хода пильной рамки остается постоянной величиной.

Углы поворота кривошипа, при которых первое максимальное значение мгновенной подачи на зуб во время рабочего хода пил и максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода, с увеличением хода пильной рамки уменьшаются (рис 3.16).

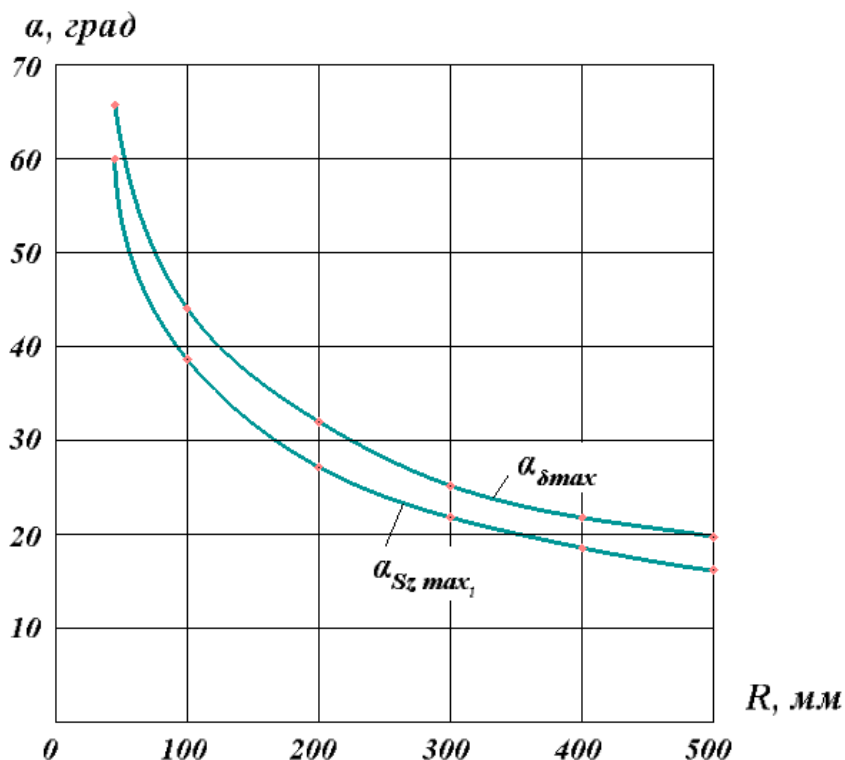


Рис. 3.16. Влияние хода пильной рамки на значения углов поворота кривошипа, при которых наблюдается максимальная подача на зуб ($\alpha_{S_z max 1}$) и максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину ($\alpha_{\delta max}$)

При увеличении хода пильной рамки максимальная теоретическая глубина вдавливания зубьев пилы в древесину во время холостого хода возрастает (см. рис 3.15), а угол поворота кривошипа, при котором должна наблюдаться максимальная глубина вдавливания зубьев пилы в древесину, уменьшается (рис. 3.16). Отсюда можно сделать вывод, что с увеличением хода пильной рамки максимальное значение силы скобления возрастает, что будет оказывать отрицательное влияние на условия работы рамных пил и на точность распиловки.

Теоретический путь скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода ($y_{ск}$) при увеличении хода пильной рамки возрастает, а угол поворота кривошипа, при котором заканчивается скобление, уменьшается. С увеличением хода пильной рамки теоретический путь скобления зубьями пилы дна пропила по отношению

к ходу пильной рамки уменьшается. Следовательно, с увеличением хода пильной рамки средние силы скобления за холостой ход должны уменьшаться, а их максимальные значения будут возрастать.

С точки зрения кинематики процесса пиления древесины рамными пилами при увеличении хода пильной рамки условия работы рамных пил ухудшаются, так как возрастают максимальные значения сил резания и скобления. Это необходимо учитывать при проектировании лесопильных рам, а также при расчете режимов пиления древесины на лесопильных рамах. При выборе хода пил необходимо учитывать также работу А. Л. Бершадского [36].

При увеличении высоты пропила число одновременно режущих зубьев (число зубьев, одновременно находящихся в пропиле) увеличивается прямо пропорционально, что видно из формулы:

$$Z = \frac{h}{t \cos \varphi}. \quad (3.71)$$

Суммарный путь скобления древесины зубьями пилы во время холостого хода также растет при увеличении высоты реза (пропила):

$$y_c = y_{ск} \frac{h}{t \cos \varphi}. \quad (3.72)$$

Суммарная максимальная глубина вдавливания зубьев пилы в древесину во время холостого хода возрастает при увеличении высоты пропила:

$$\delta_c = \delta_{max} \frac{h}{t \cos \varphi}. \quad (3.73)$$

Кроме того, с увеличением высоты пропила изменяется соотношение высоты пропила и хода пильной рамки, что оказывает влияние на условия работы зубьев пилы.

При анализе кинематики рамного пиления обычно рассматривают во взаимодействии с древесиной один или два соседних зуба. Высота пропила при этом принимается бесконечной, т. е. зуб пилы при перемещении всегда находится во взаимодействии с древесиной. Однако рамная пила – многорезцовый инструмент, а высота пропила имеет конечную величину и не всегда больше хода пильной рамки. Каждый зуб пилы имеет различное расположение отно-

сительно распиливаемого материала заготовки, поэтому при неравномерной текущей подаче на зуб он имеет свою, отличную от другого зуба траекторию относительного движения в пропилах (кроме зубьев, не выходящих из плоскости пропила). Траектория движения каждого зуба пилы будет соответствовать какому-то определенному участку общей истинной траектории относительного движения зуба пилы в пропилах, когда высота пропила принята бесконечной. В случае, когда высота пропила больше хода пильной рамки, только часть зубьев, не выходящих из пропила, имеет идентичные траектории относительного движения зуба пилы в пропилах.

Следовательно, в процессе пиления зубья рамной пилы срезают различные виды стружки, отличающиеся как по форме, так и по размерам. Это объясняется тем, что зубья пилы при высоте пропила меньше хода пилы срезают древесину во время рабочего хода только на некоторой части своего пути пильной рамки. При высоте пропила больше хода пилы только часть зубьев срезают древесину на всей высоте хода пилы (зубья, не выходящие из пропила). Остальная же часть зубьев срезает древесину только на некотором участке своего перемещения во время рабочего хода относительно заготовки. Таким образом, на кинематику рамного пиления древесины влияют не только ход пильной рамки, но также и соотношение высоты пропила и величины хода пильной рамки [7, 17].

При исследовании динамики процесса пиления рамными пилами многими авторами (А. Л. Бершадский, В. Ф. Фонкин, М. Н. Орлов, Л. С. Сморгон) сделан вывод о дифференцированном учете влияния соотношения высоты пропила и хода пильной рамки. Этими авторами указывалась переходная граница, при достижении которой начинает оказывать дополнительное влияние соотношение высоты пропила и хода пильной рамки на силы резания. Так, А. Л. Бершадский в своих работах отмечал, что при соотношении $h \geq (H-50)$ начинается интенсивный рост сил резания [35]. В. Ф. Фонкин указывал границу начала увеличения сил резания при соотношении $h \geq 0,9H$ [79].

Л. С. Сморгон принимал в расчетах интенсивный рост сил резания при $h = H$ [65]. Приведенные соотношения рекомендованы авторами на основании экспериментальных исследований динамики рамного пиления без глубокого теоретического анализа этого процесса. Из анализа процесса видно, что наиболее благоприятные условия для пиления наблюдаются тогда, когда все впадины зубьев пилы выходят

из пропила (освобождение впадин зубьев от опилок благоприятное) (рис. 3.17). Это возможно при следующем соотношении высоты пропила и хода пильной рамки: $h < (H - t)$ (см. рис. 3.18).

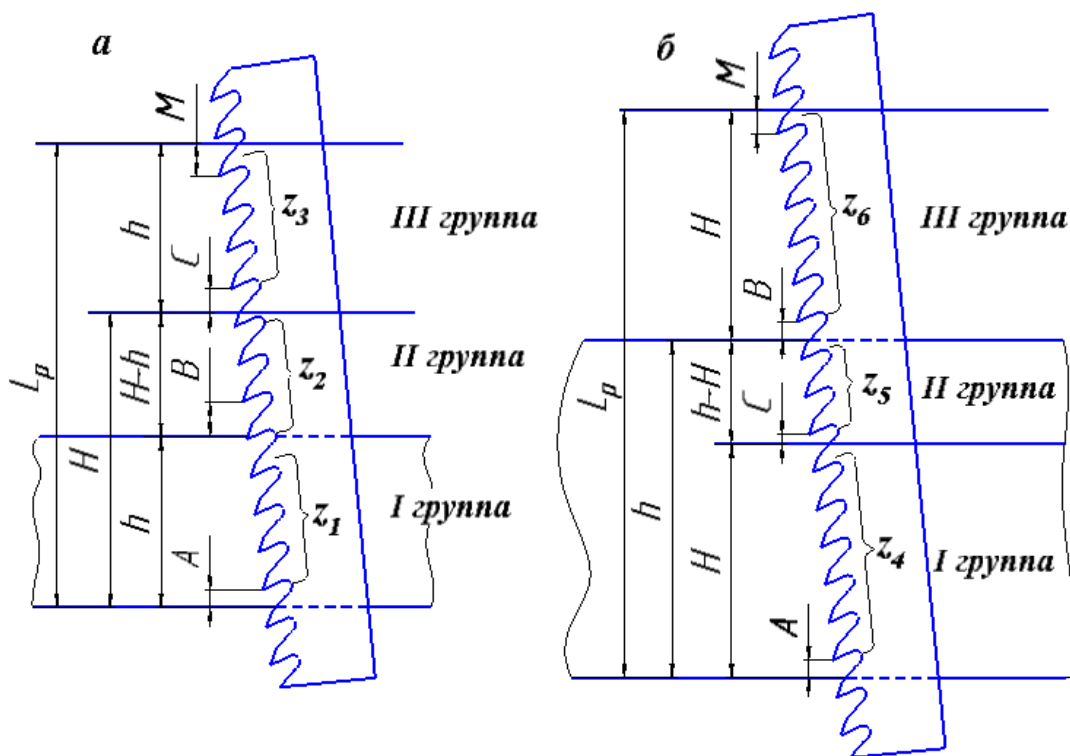


Рис. 3.17. Соотношение высоты пропила и хода пильной рамки:
 а – при $h < (H - t)$; б – при $h > (H + t)$

Наихудшие условия пиления наблюдаются тогда, когда хотя бы одна впадина зуба пилы не выходит из пропила (условия освобождения этой впадины зуба от опилок неблагоприятные). Это происходит при следующем соотношении высоты пропила и хода пильной рамки $h > (H + t)$.

Высоты же пропила, находящиеся между этими двумя диапазонами, занимают промежуточное положение от одного условия к другому:

$$(H - t) < h < (H + t).$$

Следовательно, при анализе кинематики процесса рамного пиления можно выделить три характерных соотношения высоты пропила и хода пил.

1. Благоприятные условия пиления рамными пилами:

$$h < (H - t). \quad (3.74)$$

2. Неблагоприятные условия пиления древесины рамными пилами:

$$h > (H + t). \quad (3.75)$$

3. Переходные условия пиления древесины рамными пилами:

$$(H - t) < h < (H + t). \quad (3.76)$$

Таким образом, впервые установлена аналитическая взаимосвязь трех важнейших параметров рамного пиления: высоты пропила, хода пильной рамки и шага зубьев пилы [1].

Рассмотрим кинематику рамного пиления при различных соотношениях величины хода пильной рамки и высоты пропила с учетом расположения зубьев на пиле (см. рис. 3.17).

При соотношении (3.74) зубья пилы срезают разновидности мгновенной подачи на зуб, представленные на рис. 3.18*a*. В этом случае все зубья выходят из пропила, освобождение впадин зубьев от опилок нормальное и двугорбый график изменения подачи на зуб для одного отдельно взятого зуба пилы не наблюдается. В начале рабочего хода срезаются стружки, длину которых можно определить по равенству:

$$l_1 = A + (n - 1)t, \quad (a)$$

где l_1 – длина стружки, срезанная n -м зубом в начале рабочего хода, мм;

n – порядковый номер зуба, начиная от первого нижнего зуба пилы, расположенного в пропиле, когда пильная рамка находится в ВМТ;

A – расстояние от первого нижнего зуба, расположенного в пропиле, до уровня верха нижнего подающего вальца, когда пильная рамка находится в ВМТ, мм.

Число таких зубьев пилы можно определить по формуле:

$$z_1 = \frac{h - A}{t} + 1. \quad (б)$$

У отношения $\frac{h - A}{t}$ в расчетах учитывается только целая часть.

Длина срезаемых стружек типа II равна высоте пропила h . Число зубьев, которые срезают такие виды стружки, можно определить по формуле:

$$z_2 = \frac{H - h - B}{t} + 1, \quad (e)$$

где B – расстояние от верхней поверхности распиливаемой заготовки до режущей кромки расположенного над ней первого зуба пилы, когда пила находится в ВМТ, мм.

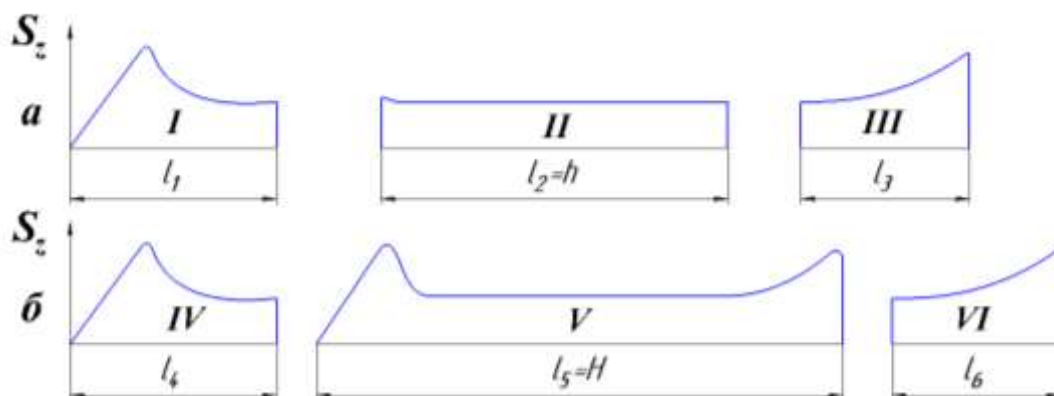


Рис. 3.18. Характерные виды изменения подачи на зуб, срезаемые различными группами зубьев пилы при a – при $h < (H - t)$; b – при $h > (H + t)$

Так как расстояние $B = (z_1 + t)t + A - h$, тогда можно написать:

$$z_2 = \frac{H - (z_1 + t)t - A}{t} + 1. \quad (e)$$

Длина срезаемых стружек в конце рабочего хода типа III:

$$l_3 = h + H - A - (n - 1)t. \quad (z)$$

Число зубьев, срезающих стружки типа III:

$$z_3 = \frac{h - C - M}{t} + 1, \quad (d)$$

где C – расстояние от верха нижнего подающего вальца до режущей кромки первого зуба пилы, находящегося на расстоянии, большем хода пильной рамки, когда пила находится в ВМТ. Величину этого расстояния рекомендуется определять по формуле:

$$C = (z_1 + z_2)t + A - H,$$

где M – расстояние первого верхнего рабочего зуба пилы от рабочей длины пилы L_p .

Рабочая длина (средняя часть) пилы определяется по формуле:

$$L_p = H + h.$$

Тогда количество зубьев, срезающих стружки III вида, определится по равенству:

$$z_3 = \frac{H + h - A - (z_1 + z_2)t - M}{t} + 1. \quad (\partial)$$

При соотношении (3.75) (см. рис. 3.17б) различными зубьями пилы срезаются разновидности мгновенной подачи на зуб, представленные на рис. 3.18б. В этом случае часть зубьев не выходит из пропила, поэтому они срезают стружки двугорбого вида. Освобождение впадин зубьев от опилок у этой группы зубьев затруднено. В начале и конце рабочего хода срезаются стружки одногорбого типа, которые выбрасываются из пропила соответственно вверх и вниз. Длина и число срезаемых стружек IV вида определяется по формулам:

$$l_4 = A + (n - 1)t, \quad (\text{ж})$$

$$z_4 = \frac{H - A}{t} + 1. \quad (\text{з})$$

Число срезаемых стружек двугорбого вида типа (V) с длиной, равной величине хода пильной рамки, определится по формуле:

$$z_5 = \frac{h - H - C}{t} + 1 = \frac{h - A}{t} - z_4 + 1. \quad (\text{и})$$

Длина срезаемых стружек вида VI определяется по формуле (з).

Число таких зубьев:

$$z_6 = \frac{H - B - M}{t} + 1 = \frac{H + h - A - M - (z_4 + z_5)t}{t} + 1. \quad (\text{к})$$

Анализируя разновидности срезаемых стружек при различных соотношениях хода пильной рамки H и высоты пропила h , все работающие зубья пилы условно можно разделить на три группы.

Первая группа зубьев пилы, работающая в начале рабочего хода, срезает слои древесины длиной равной или менее высоты про-

пила h при соотношении (3.74) или длиной равной или менее хода пил H при соотношении (3.75) с максимальной толщиной в начале длины срезаемой стружки. Освобождение впадин зубьев от опилок у этой группы незатруднительно и происходит за рабочий ход, когда зубья пилы движутся вниз.

Вторая группа зубьев пилы срезает слой древесины длиной h при соотношении (3.74) или H при соотношении (3.75). При соотношении (3.74) срезается слой древесины, как правило, без максимального значения толщины или с одним максимальным значением толщины в конце длины стружки. Освобождение впадин зубьев от опилок не лимитируется и происходит за рабочий ход. Условия работы у данной группы зубьев нормальные. При соотношении (3.75) срезаются стружки с двумя максимальными значениями толщины. Условия работы зубьев пилы в этом случае очень тяжелые. На зубья пилы в начале холостого хода действуют силы скобления. Следует отметить, что в начале холостого хода стружка, расположенная во впадине зуба, начинает перемещаться по задней грани зуба пилы и попадает в зазор между дном пропила и зубьями пилы. Далее в начале рабочего хода, когда первая группа зубьев пилы вступает в пиление, эта стружка, расположенная на дне пропила, попадает во впадины зубьев первой группы зубьев пилы и выносится из пропила.

Третья группа зубьев срезает стружки различной длины и с максимальным значением толщины в конце их длины. Образовавшиеся во впадине зубьев стружки выбрасываются в основном вверх. Освобождение впадин зубьев от опилок происходит во время холостого хода. В начале холостого хода эти зубья подвергаются нагрузке на задние грани (явление скобления). Эта группа зубьев пилы находится в тяжелых условиях.

Таким образом, при проектировании лесопильных рам, а также при расчете режимов пиления необходимо учитывать соотношение высоты пропила и хода пильной рамки.

3.7. Пиление древесины двухсторонними рамными пилами

Двухсторонние полосовые пилы применяются на горизонтальных лесопильных рамах, которыми производят продольный раскрой кряжей большого диаметра в производстве строганого шпона. Распиловка кряжей производится одной, реже двумя-тремя пилами.

Поэтому можно осуществлять индивидуальный раскрой каждого кряжа с учетом его размера и расположения в нем пороков (сучков, трещин, гнили и т. п.).

Горизонтальные лесопильные рамы по сравнению с вертикальными малопродуктивны. Для повышения производительности и уменьшения микронеровностей на поверхности пропила используются двухсторонние пилы, позволяющие исключить холостой ход. Пиление (резание) осуществляется при перемещении зубьев пилы в правую и левую стороны. При переменной скорости подачи за рабочий и холостой ходы траектории движения вершин зубьев пилы будут параллельными для обоих ходов, а толщина срезаемых слоев древесины зубьями пилы равномерна. Однако при распиловке тяжелых (больших) кряжей с частотой вращения коленчатого вала более 250 оборотов в минуту при переменной скорости подачи перемещение кряжей необходимо осуществлять с частотой свыше 500 циклов в минуту, что практически сделать трудно. Поэтому в промышленности на горизонтальных лесопильных рамах используется равномерная скорость подачи. Пила работает при движении в левую и правую стороны, уклон ей не нужен (рис. 3.19). Зубья пилы имеют форму равнобедренных треугольников. Так как осуществляется продольная распиловка, то указанные зубья по форме не удовлетворяют требованиям по форме резца, прежде всего из-за отрицательного переднего угла [47].

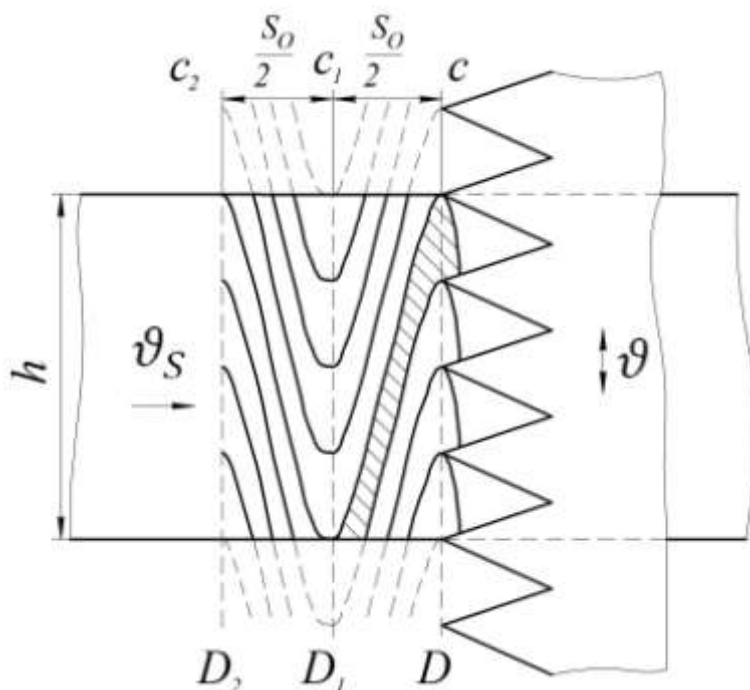


Рис. 3.19. Схема процесса пиления двухсторонними пилами при непрерывной подаче с равномерной скоростью

Траектория движения зуба пилы в пропиле будет аналогична лесопильным рамам с равномерной скоростью подачи. На участке движения от t до H подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{4\pi} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \arccos \frac{R-y+t}{R} \right). \quad (3.77)$$

В формуле (3.77), по сравнению с формулой (3.29), отсутствует третий член, так как пила установлена без уклона и подача на зуб получается в два раза меньше, чем при пилении древесины односторонними пилами.

На участке от 0 до t подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R-y}{R}. \quad (3.78)$$

Пиление древесины такими пилами обуславливает отсутствие потери хода и отсутствие скобления зубьями пилы древесины.

Основной недостаток у таких пил – угол резания больше $\pi/2$ рад, в связи с чем происходит не резание, а смятие со скоблением. Поэтому на практике двухсторонние рамные пилы с равнобедренным зубом не получили распространения. Чтобы устранить этот недостаток, на горизонтальных лесопильных рамах используют иногда двухсторонние пилы, перемещаемые по наклонным в разные стороны направляющим к оси заготовки (см. рис. 3.20) [47].

Пила AB движется концами по направляющим AA_1 и BB_1 , которые наклонны к линии перпендикулярной к оси заготовки под углом η . При небольших значениях этого угла, что имеет место на практике, средняя точка пилы, в нашем случае точка k , описывает кривую с перегибом, очень близкую к прямой линии. Предположим, что линия вершин AB зубьев пилы в одном из крайних (мертвых) её положений совпадает с дном пропила km . Если теперь пила и бревно будут перемещаться с таким расчетом, чтобы точка k в относительном движении в плоскости пропила описывала прямую km или линию правее линии km , то при перемещении пилы из положения AB в положение A_1B_1 будут работать только зубья, расположенные на половине полотна Ak . Зубья на участке (длине) пилы kB будут отходить от дна пропила. При обратном перемещении пилы из A_1B_1 в AB работать будут зубья на участке пилы K_1B_1 , а на участке K_1A_1 зубья пилы будут отходить от дна пропила.

тории движения зубьев пил в пропиле представляют собой прямые линии.

Абсолютный уклон направляющих:

$$a_H = \frac{S_0 L_n}{2H}. \quad (3.80)$$

Из рис. 3.20 легко также видеть, что наклон направляющих можно определить из выражения:

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{a_H}{H}.$$

Подставляя последнее выражение в формулу (3.80), получим:

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{S_0 L_n}{2H^2}. \quad (3.81)$$

Возьмем любую точку M на длине пилы Ak . Эта точка будет иметь поступательное движение со скоростью ϑ , и вращение около точки k с некоторой скоростью ϑ_x перпендикулярно к направлению линии Ak . Ввиду малости угла φ скорость ϑ_x можно считать параллельной подаче, т. е. перпендикулярной к линии A_1B .

Абсолютная скорость точки A направлена по линии AA_1 и является равнодействующей двух скоростей: скорости движения пилы в плоскости, перпендикулярной движению заготовки ϑ , и скорости движения пилы в плоскости перемещения заготовки ϑ_A . Эти скорости связаны между собой следующим равенством:

$$\vartheta_A = \vartheta \operatorname{tg} \eta.$$

Истинная скорость движения точки A :

$$\bar{\vartheta}_A = \bar{\vartheta}_S + \bar{\vartheta}.$$

Вращательная скорость точки M будет перпендикулярной расстоянию y_M этой точки от средней точки на пиле k . Можно написать:

$$\frac{\vartheta_M}{y_M} = \frac{2\vartheta_A}{Ln} \mp \frac{2\vartheta \operatorname{tg} \eta}{Ln},$$

где $y_M = kt$, k – порядковый номер зубьев пилы от её середины.

В последнее выражение подставим значение $tg \eta$ и получим:

$$\vartheta_M = \frac{S_0 y_M}{H^2} \vartheta.$$

Если предположить, что при перемещении пилы из положения AB в положение A_1B_1 бревно осталось на месте и дно пропила совпало с AB , то благодаря наличию скорости ϑ_M пила сняла бы слой материала, отвечающего площадке nrk . Фактически бревно перемещается со скоростью

$$\vartheta_S = \frac{S_0}{2\pi} \omega. \quad (3.82)$$

Дно пропила mq совместится с A_1B_1 , т. е. будет снят слой площадью mqk . При следующем перемещении пилы из A_1B_1 в AB будет удален слой древесины, отвечающей площадке mqr .

Следовательно, за двойной ход пильной рамки или за один оборот коленчатого вала лесопильной рамы будет осуществлена посылка (перемещение) заготовки на величину S_0 , а за один ход пильной рамки перемещение заготовки составит $S_0/2$. Скорость движения точки M относительно заготовки в плоскости перемещения этой заготовки будет

$$\vartheta_{SM} = \vartheta_S + \vartheta_M.$$

В свою очередь, имеем соотношение:

$$\frac{\vartheta_S}{\vartheta} = \frac{S_{z\text{ cp}}}{t} = \frac{S_0}{2H}.$$

Тогда отношение ϑ_{SM}/ϑ можно представить так:

$$\frac{\vartheta_{SM}}{\vartheta} = \frac{\vartheta_S + \vartheta_M}{\vartheta} = \frac{S_0}{2H} \left(1 + \frac{2y_M}{H} \right). \quad (3.83)$$

Выражение (3.83) характеризует форму траектории относительного движения зубьев пилы в плоскости пропила. Для данного зуба пилы соотношение ϑ_{SM}/ϑ является постоянным и, следовательно, траектории движения зубьев пилы в пропилах при двухтолчковой подаче – прямые линии. При увеличении y_M отношение ϑ_{SM}/ϑ растёт

и подача на зуб (толщина стружки) возрастает. Отношение ϑ_{SM}/ϑ может колебаться от $\frac{S_0}{2H}$ до $\frac{3S_0}{2H}$. Чем больше y_M , тем больше подача на зуб (толщина стружки), но меньше длина срезаемой стружки по высоте пропила.

В формуле (3.83) величина $\frac{S_0}{2H}$ постоянная, а скорость пилы меняется во время хода. Чтобы отношение ϑ_{SM}/ϑ было постоянным, необходимо скорость ϑ_{SM} менять по тому же закону, что и ϑ , т. е. формула (3.83) характеризует толчковую подачу за рабочий ход, подобную подаче в односторонних пилах. Следует иметь в виду, что процесс пиления в этом случае протекает иначе, так как толщина срезаемых стружек меняется по высоте хода пильной рамки.

Для определения объема древесины, срезаемого каждым зубом, можно воспользоваться выражением:

$$S_{Z\text{ cp}} = \frac{S_0 t}{2H} \left(1 + \frac{2y_M}{H} \right).$$

Если зуб пилы проходит в древесине всю высоту пропила, объем срезаемой этим зубом древесины определится по формуле:

$$V_{cm} = S_{Z\text{ cp}} hB = \frac{S_0 thB}{2H} \left(1 + \frac{y_M}{H} \right).$$

Зубья, которые проходят через всю высоту пропила, расположены ближе к середине пилы, т. е. y_M можно принять близким к нулю. Тогда объем срезаемой древесины можно определить по формуле:

$$V_{cm} = \frac{S_0 thB}{2H}. \quad (3.84)$$

Площадь поперечного сечения срезаемой древесины зубом пилы определится по выражению:

$$f_{cm} = \frac{S_0}{2H} th. \quad (3.85)$$

Двухсторонние пилы могут быть со сходящимися к середине длины пилы зубьями (см. рис. 3.21а) и расходящимися зубьями от середины длины пилы (см. рис. 3.21б).

Разница между этими пилами заключается в том, что в первом случае максимальная подача на зуб будет наблюдаться в конце хода, а во втором случае – в начале хода пилы. Вынос стружек из плоскости пропила в первом случае происходит задними гранями зубьев пилы, а во втором случае – передними гранями зубьев пилы. Следовательно, пилы с расходящимися зубьями предпочтительнее.

Для изменения скорости подачи заготовки необходимо менять угол наклона пилы и угол наклона направляющих пильной рамки, что неудобно и на практике не делается. Максимальную подачу обычно стремятся только уменьшать, так как увеличение максимальной подачи на зуб пилы вызывает увеличение скобления зубьями пилы дна пропила. Однако уменьшение подачи на зуб вызывает увеличение потери хода. Часть зубьев пилы, расположенных около средней линии, не будет срезать стружку, а работающие (оставшиеся) зубья будут срезать более толстые стружки.

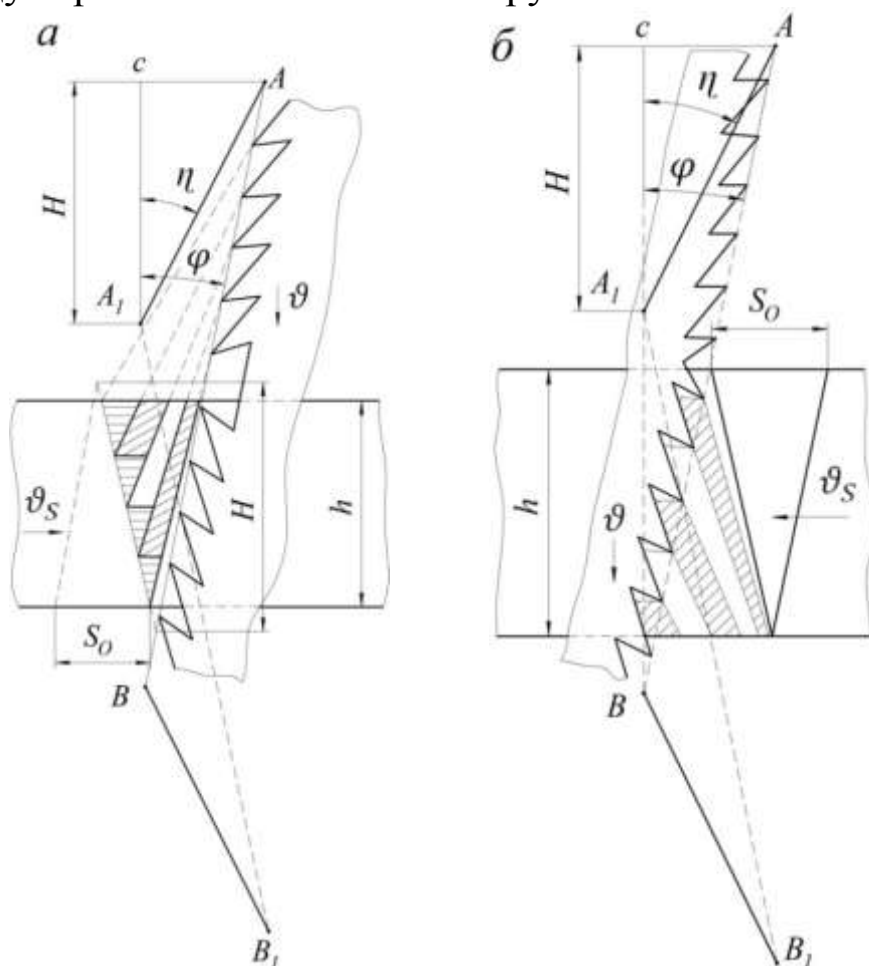


Рис. 3.21. Схема пиления с наклонными направляющими двухсторонними пилами с зубьями, расположенными вовнутрь пилы (а), и с расходящимися зубьями (б) при переменной скорости подачи за рабочий и холостой ходы

Так как осуществить переменную подачу на практике довольно трудно, используют равномерную подачу (рис. 3.22). В этом случае траектории относительного движения зубьев пилы в пропиле будут уже кривыми линиями и наблюдается большая неравномерность толщины слоя древесины, срезаемого каждым зубом.

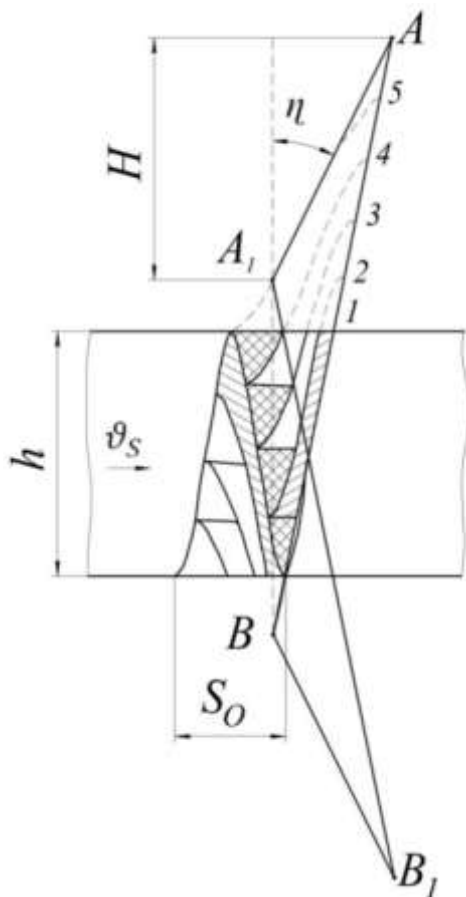


Рис. 3.22. Схема пиления с наклонными направляющими и равномерной скоростью подачи

Здесь также с удалением зуба от середины пилы наблюдается увеличение толщины срезаемой стружки.

Для определения мгновенной подачи на зуб составляем уравнения траектории относительного движения в пропиле двух соседних зубьев пилы. Для k -го зуба пилы траектория относительного движения в пропиле выразится в параметрическом виде так (начало координат принято в середине пилы):

$$\begin{cases} x_1 = \frac{S_0}{4\pi} \alpha + \frac{S_0 kt}{H^2} R(1 - \cos \alpha) - \frac{S_0 kt}{2H}, \\ y_1 = R(1 - \cos \alpha) + kt. \end{cases} \quad (3.86)$$

Из второго уравнения выражаем угол α и подставляем в первое уравнение системы (3.86), получим:

$$x_1 = \frac{S_0}{4\pi} \arccos \frac{R - y + kt}{R} + \frac{S_0 kt}{H} \left(\frac{y - kt}{H} - \frac{1}{2} \right). \quad (3.87)$$

Для второго соседнего зуба, расположенного на пиле дальше от её центра, траектория относительного движения в пропиле представляется в параметрическом виде так:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_0}{4\pi} \alpha + \frac{S_0(k+1)t}{H^2} R(1 - \cos\alpha) - \frac{S_0(k+1)t}{2H}, \\ y_2 = R(1 - \cos\alpha) + (k+1)t. \end{cases}$$

Откуда траектория движения соседнего зуба в пропиле описывается уравнением:

$$x_2 = \frac{S_0}{4\pi} \arccos \frac{R - y + (k+1)t}{R} + \frac{S_0(k+1)t}{H} \left[\frac{y - (k+1)t}{H} - \frac{1}{2} \right]. \quad (3.88)$$

Подача на зуб определяется по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{4\pi} \left(\arccos \frac{R - y + (k+1)t}{R} - \arccos \frac{R - y + kt}{R} \right) + \frac{S_0 t}{H} \left(\frac{y - (2k+1)t}{H} - \frac{1}{2} \right). \quad (3.89)$$

По формуле (3.89) определяется подача на зуб на участке хода пильной рамки от t до $2R$. На участке хода пильной рамки от 0 до t подачу на зуб можно вычислить приближенно или по приведенной формуле и результат удвоить, или по формуле 3.78.

В лесопильных рамах с равномерной скоростью подачи также необходимо согласовывать уклон пил и уклон направляющих пильной рамки с величиной посылки.

При равномерной скорости подачи (см. рис. 3.22) наблюдается скобление зубьями пилы дна пропила, в связи с чем ухудшаются условия пиления в начальный момент хода пилы. Глубина вдавливания зубьев пилы в древесину будет меняться, её величину можно определить приближенно по формулам (3.54) и (3.56).

В настоящее время наклонные направляющие делают редко, применяют пилы двухстороннего типа с зубьями, расположенными группами по 6–8 штук. Пиление ими сопряжено с большим скоблением зубьями пилы дна пропила, так как такие пилы устанавливаются в пильную рамку без уклона. Поэтому использование указанных пил для раскроя кряжей, с точки зрения экономической эффективности процесса, нецелесообразно.

Представляет интерес установка пилы вертикально (рис. 3.23а). В этом случае направляющие необходимо устанавливать с наклоном в другую сторону (в сторону подачи заготовки) и регулировать посылку изменением наклона направляющих [45]. МГУЛ (МЛТИ) предлагает пилы и направляющие выполнить наклонными (рис. 3.23б). Согласно теории резания [44], при уменьшении угла встречи снижается энергоемкость процесса и улучшается качество поверхности пиломатериалов, так как происходит переход от срезания слоя древесины в торец к продольно-торцовому срезанию слоя древесины. При этом кинематические соотношения в процессе пиления остаются те же самые, что и при вертикальном расположении направляющих.

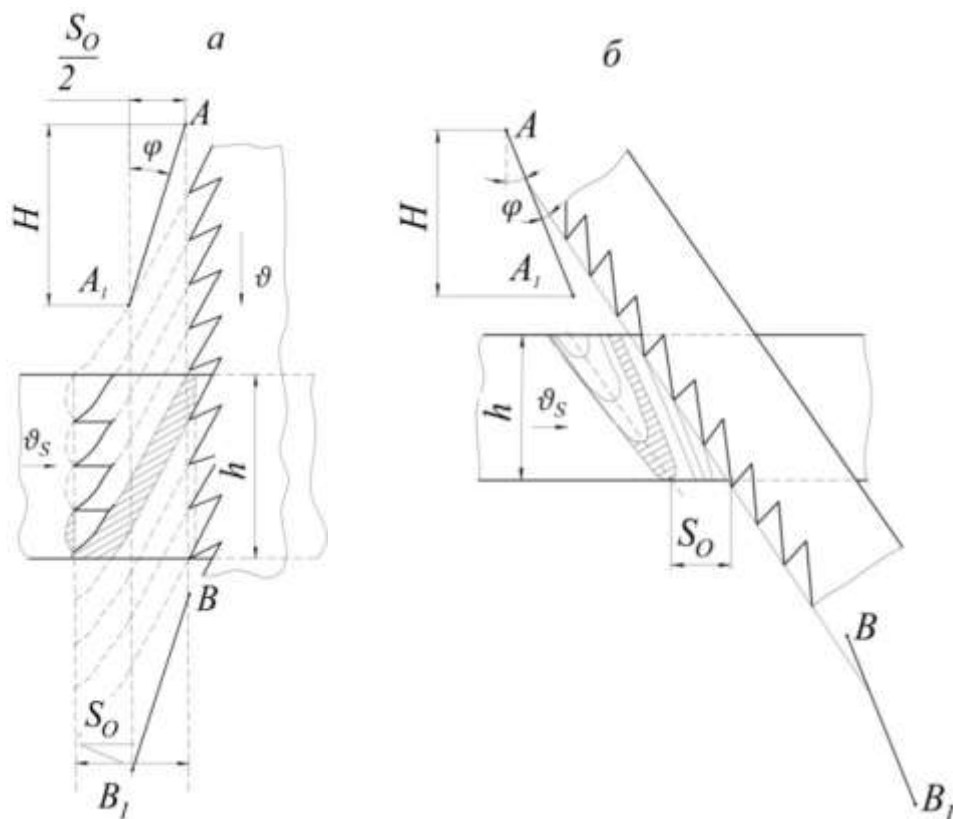


Рис. 3.23. Схема пиления с наклонными направляющими и пилами, установленными вертикально (а) или наклонно (б)

3.8. Экспериментальные исследования перемещения распиливаемой заготовки и вальцов

Исследования В. Я. Филькевича, В. Ф. Фонкина, В. С. Ясинского и других [39, 77, 80] показали, что при равномерной скорости подачи распиливаемой заготовки в начале холостого хода происходит «отбой» заготовки и скорость движения заготовки не сохраняется постоянной.

В начале холостого хода, когда скорость отхода зубьев пил от дна пропила близка к нулю, бревно под действием тягового усилия вальцов все же продолжает движение в направлении скорости подачи, оказывая определенное давление на пилы. После этого заготовка начинает двигаться в сторону, противоположную направлению скорости подачи, из-за значительного роста сил резания (особенно нормальной составляющей силы резания). В этот момент скорость подачи заготовки уменьшается и даже принимает отрицательное значение [77], в результате чего бревно перемещается в противоположную сторону. В конце холостого хода скорость заготовки оказывается больше средней окружной скорости вальцов благодаря упругим деформациям древесины и звеньев механизма подачи. В период торможения заготовки на участке скобления зубцы вальцов и зубья пилы, находящиеся в пропиле, производят дополнительную деформацию древесины. Она сопровождается накоплением потенциальной энергии в упруго-деформированных (напряженных) волокнах древесины. Кроме того, происходит дополнительная упругая деформация и накопление потенциальной энергии в заготовке и звеньев механизмов лесопильной рамы, и прежде всего в механизме подачи. Когда пилы отойдут от дна пропила и не будут препятствовать продвижению заготовки, потенциальная энергия деформированной древесины и звеньев механизма подачи превращается в кинетическую энергию движения заготовки.

Таким образом, наблюдается проскальзывание заготовки в механизме подачи лесопильной рамы. По экспериментальной и теоретической кривым перемещения заготовки и вальца можно определить суммарную потерю посылки (S_{0n}), которая складывается из потери из-за скольжения в фрикционных парах механизма подачи (S_{0nn}) и скольжения распиливаемой заготовки в подающих вальцах (S_{0ne}):

$$S_{0n} = S_{0ne} + S_{0nn}.$$

Оценку работы лесопильной рамы иногда производят по величине относительного скольжения заготовки (бруса), которую определяют по формуле:

$$C_c = \frac{S_0 - S_{op}}{S_0} \cdot 100\%,$$

где C_c – полная величина скольжения распиливаемой заготовки в элементах механизма подачи лесопильной рамы, %,

$$C_c = C_{не} + C_{nn};$$

$C_{не}$ – относительное скольжение распиливаемой заготовки (бруса) в подающих вальцах;

C_{nn} – относительное скольжение в фрикционных звеньях механизма подачи;

S_0 – подача на один оборот коленчатого вала (посылка), мм/об;

S_{op} – рисковая (фактическая посылка), мм/об.

Исследования показали, что при равномерной скорости подачи полная величина скольжения в элементах механизма подачи составляет обычно 10–15%, а скольжение заготовки в подающих вальцах колеблется от 8 до 12%, так как зависит от состояния подающих вальцов, поверхности заготовки (бруса), его диаметра, степени прижима вальцов, угла наклона пил и степени затупления зубьев пилы, а также от толщины пилы и угловых параметров зубьев.

Деформация древесины и звеньев механизма подачи, величина накопленной энергии зависят от условий пиления, конструкции и состояния механизма подачи [78].

При определенных других условиях пиления может наблюдаться второй отбой на участке скобления, при котором скорость движения заготовки снова становится меньше скорости движения вальца. После этого скорость движения заготовки возрастает и бревно движется с равномерной скоростью, примерно соответствующей скорости вальцов.

Анализ показывает, что при равномерной скорости подачи скорость движения заготовки в начальный период холостого хода изменяется скачкообразно и неравномерно. С этой точки зрения существенное различие между переменными и равномерными скоростями подачи состоит в том, что при переменной скорости подачи силы инерции ускоренно движущихся масс заготовки и тележки передаются на ве-

дущие звенья подачи лесопильной рамы минуя механизм резания вместе с пилами. При равномерной скорости подачи давление заготовки полностью передается на пилы, вызывая их изгиб и нестабильную работу лесопильной рамы. Следовательно, переменные скорости подачи заготовки выгодно отличаются от движения валцов с равномерной скоростью, но их применение ограничивается силами инерции масс заготовки и тележки, а также звеньями механизма подачи.

Экспериментальные исследования хорошо согласуются и объясняются теоретическими положениями процесса пиления древесины на лесопильных рамах. Под действием сил сопротивления движение заготовки происходит по сложному закону, наблюдается скольжение заготовки в начале холостого хода пильной рамки, когда происходит скобление зубьями пил дна пропила. В общем случае при равномерной скорости подачи можно выделить три характерных периода движения заготовки за время одного оборота кривошипного вала (одного цикла резания):

- 1) период установившегося движения во время рабочего хода;
- 2) период неустановившегося движения в первой половине холостого хода пильной рамки, когда происходит скобление зубьями пилы дна пропила и наблюдаются переменные силы отбоя;
- 3) период установившегося движения во второй половине холостого хода пильной рамки, когда действуют примерно постоянные силы сопротивления при перемещении заготовки.

Для уменьшения сил отбоя в начальный период холостого хода, когда происходит скобление зубьями пилы дна пропила, рекомендуется применять муфты предельного момента или подпружиненные подающие валцы.

Муфты предельного момента, разработанные ВНИИДМАШ, впервые применялись на лесопильных рамах РК и Р63. Их применение снижает силы отбоя во время холостого хода за счет проскальзывания в этой муфте, что приводит к большей потере величины перемещения заготовки. Величина скольжения будет зависеть от настройки муфты и условий пиления.

Упругие валцы, предложенные проф. Б. Тунеллом [87], были применены на лесопильной раме «Максимум». Принципиальное отличие упругих валцов от муфт предельного момента и других устройств, применяемых для уменьшения максимальных сил скобления (отбоя), в том, что после прекращения действия сил отбоя работа, затраченная на деформацию упругого элемента вальца (пружины),

почти полностью возвращается в форме кинетической энергии и передается бревну в направлении скорости подачи. Теоретический анализ работы упругих вальцов, выполненный проф. В. Я. Филькевичем, показал, что максимальная нагрузка (сила отбоя) на зубья пилы во время холостого хода в этом случае может уменьшиться на $1/3$. При этом он отмечает, что имеется опасность возникновения резонансных колебаний [87].

При движении заготовки с применением упругих вальцов происходит следующее. В начале холостого хода перемещение заготовки прекращается и скорость движения его даже меняет свое направление. В это время пружины сжимаются. После прохождения пилами пути скобления пружины разжимаются и скорость движения заготовки будет несколько больше, чем средняя скорость вальца. Во время рабочего хода скорости вальца и заготовки примерно равны средним значениям.

Движение заготовки с применением муфт предельного момента сопровождается почти всегда возвратным перемещением заготовки в начале холостого хода, так как наблюдается проскальзывание в муфте под действием сил скобления, которое не компенсируется в последующем. Однако при прекращении действия сил отбоя происходит возвращение упругой деформации звеньев механизма в кинетическую. Поэтому в данном случае движение заготовки происходит и с проскальзыванием в механизме подачи и в то же время с упругой деформацией звеньев механизма подачи, но меньшей величины, чем при использовании упругих вальцов. Следовательно, условия работы рамных пил и в целом механизма подачи при использовании муфт предельного момента будут лучше, чем при применении упругих вальцов.

3.9. Основные выводы

В третьей главе разработана методика определения основных кинематических показателей процесса пиления при прямолинейном перемещении пил и равномерной скорости подачи заготовки, а также выполнен анализ этого процесса. На основании этого анализа необходимо сделать следующие основные выводы.

1. Получены математические модели для определения следующих кинематических показателей процесса:

– траектории движения зуба пилы в пропиле с учетом конечной длины шатуна;

- подачи на зуб во время рабочего хода пил;
- пути скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода пил;
- глубины вдавливания зуба пилы в древесины в начале холостого хода пил.

2. Приведен анализ влияния различных факторов процесса пиления древесины рамными пилами на эти показатели.

Рассматривалось влияние хода пил, шага зубьев пилы, высоты пропила и соотношения высоты пропила и хода пил на кинематические показатели процесса.

3. Рассмотрены особенности пиления древесины двухсторонними рамными пилами на горизонтальных лесопильных рамах с равномерной скоростью подачи заготовки с прямолинейными направляющими, установленными без уклона в горизонтальной плоскости и прямолинейными наклонными направляющими, установленными с уклоном в разные стороны. Выполнен также анализ процесса пиления пилами с зубьями пилы, расположенными в противоположные стороны от середины длины пилы.

4. Экспериментальными исследованиями установлены и раскрыты особенности перемещения распиливаемой заготовки в связи с наличием скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода пил. Заготовка в этот период времени проскальзывает в вальцах, и даже наблюдается ее «попятное» перемещение.

Таким образом, экспериментальные исследования подтверждают теоретический анализ процесса пиления древесины с прямолинейным перемещением пил и с равномерной скоростью подачи заготовки. Характер изменения силы резания во время рабочего хода совпадает с характером изменения подачи на зуб [2, 51, 70, 81].

Итак, на основе единого подхода разработаны методики для определения всех главных кинематических показателей процесса пиления древесины рамными пилами (мгновенной подачи на зуб, потери рабочего хода, пути скобления и глубины вдавливания зубьев пилы в древесину) при равномерной скорости подачи и прямолинейном перемещении пил. Проанализировано влияние различных факторов (хода пил, шага зубьев, подачи на зуб, посылки, уклона пил, высоты пропила и соотношения высоты пропила и хода пил) на кинематику такого процесса пиления рамными пилами с равномерной скоростью подачи и прямолинейным перемещением пил.

4. РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ПОДАЧИ И ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПИЛ

4.1. Перемещение заготовки за холостой ход

Этот вид подачи представлен на рис. 2.2а. Перемещение заготовки осуществляется с переменной скоростью только за холостой ход. Во время рабочего хода заготовка не перемещается. При этом пилы перемещаются прямолинейно с переменной скоростью. Пилы необходимо устанавливать в пильную рамку с уклоном, так как во время холостого хода при перемещении пильной рамки вверх пилы должны освободить место для возможного перемещения заготовки или бруса. Величина угла наклона пил определится из выражения (принимая относительный уклон пил равным единице):

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{S_0}{H}. \quad (4.1)$$

Относительный уклон пил часто рекомендуют принимать несколько больше единицы, а именно $\xi = 1, 1 \dots 1,2$. Тогда уклон пилы на практике определяется по выражению:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left[(1, 1 \dots 1,2) \frac{S_0}{H} \right]. \quad (4.1a)$$

Скорость движения распиливаемой заготовки за холостой ход в этом случае определится по формуле:

$$v_s = \frac{S_0}{2} \omega \sin \alpha. \quad (4.2)$$

Перемещение распиливаемой заготовки за холостой ход определится из выражения:

$$x_g = \frac{S_0}{2} (1 - \cos \alpha). \quad (4.3)$$

Скорость движения и перемещение распиливаемой заготовки за рабочий ход равны нулю.

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода в параметрической форме запишется так:

$$\begin{cases} x_g = 0, \\ y = R(1 - \cos\alpha). \end{cases} \quad (4.4)$$

Следовательно, траектории зубьев пилы в пропиле во время рабочего хода представляют собой прямые параллельные вертикальные линии. Это объясняется тем, что пиление древесины осуществляется при неподвижной заготовке.

Траекторию соседнего нижнего зуба пилы во время рабочего хода в параметрической форме можно представить так:

$$\begin{cases} x_g = -t \sin\varphi, \\ y = R(1 - \cos\alpha) + t \cos\varphi. \end{cases} \quad (4.5)$$

Толщина срезаемого слоя a древесины каждым зубом пилы постоянна и равна подаче на зуб:

$$a = S_z = t \sin\varphi.$$

При подаче заготовки с переменной скоростью только за холостой ход в конце рабочего хода на дне пропила образуются ступеньки, которые препятствуют движению пил в начале холостого хода. В связи с этим рекомендуется осуществлять подачу заготовки с некоторым запаздыванием. Величину запаздывания определяют по выражениям:

– для разведенных зубьев:

$$\alpha_3 = \arccos \frac{R - 2t}{R}, \quad (4.6)$$

– для плющенных зубьев:

$$\alpha_3 = \arccos \frac{R - t}{R}. \quad (4.7)$$

С учетом конечной длины шатуна угол запаздывания для плющенных зубьев определится по выражению (3.58).

При подаче заготовки с запаздыванием скорость подачи (вальца) определится по формулам:

– во время холостого хода (на участке от α_3 до π):

$$S_{zx} = \frac{S_0}{2} \omega \sin(\alpha - \alpha_3), \quad (4.8)$$

– во время рабочего хода на участке от 0 до α_3 :

$$S_{zp} = \frac{S_0}{2} \omega \sin(\alpha_3 - \alpha). \quad (4.9)$$

Тогда перемещение вальца за холостой ход определится по формуле:

$$x_x = \frac{S_0}{2} [1 - \cos(\alpha - \alpha_3)]. \quad (4.10)$$

Перемещение вальца за рабочий ход определится по выражению:

$$x_p = \frac{S_0}{2} [\cos(\alpha - \alpha_3) - \cos \alpha_3]. \quad (4.11)$$

В данном случае перемещение заготовки за холостой ход в итоге составит величину, определяемую по выражению:

$$x_{xo} = \frac{S_0}{2} (1 + \cos \alpha_3). \quad (4.12)$$

За рабочий ход перемещение заготовки в итоге составит суммарную величину, определяемую по выражению:

$$x_{po} = \frac{S_0}{2} (1 - \cos \alpha_3). \quad (4.13)$$

Так как суммарное перемещение заготовки за холостой ход несколько уменьшится, то и уклон пил должен снизиться. В этом случае уклон пил можно определить по выражению (принимая относительный уклон пил равным 1,0):

$$\varphi = \arctg \left[\frac{S_0}{4R} (1 + \cos \alpha_3) \right]. \quad (4.14)$$

На практике относительный уклон пил изменяется в пределах 1,1–1,2, то угол уклона пил следует определять по выражению:

$$\varphi = \arctg \left[(1,1 \dots 1,2) \frac{S_0}{4R} (1 + \cos \alpha_3) \right]. \quad (4.15)$$

Расчеты по формулам (4.11) и (4.15) показывают, что величина абсолютного уклона пил на ходе пильной рамки (применительно к одноэтажным лесопильным рамам) при изменении подачи на зуб в пределах от 10 до 40 мм/об находится в диапазоне 10–40 мм, т. е. примерно равна посылке.

Траектория движения зуба пилы в пропиле определится по формуле (на участке от 0 до α_3):

$$x_1 = \frac{S_0}{2} \left[\cos \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \alpha_3 \right) - \cos \alpha_3 \right]. \quad (4.16)$$

Траектория движения нижнего соседнего зуба пилы в пропиле определится по формуле (на участке от 0 до α_3):

$$x_2 = \frac{S_0}{2} \left[\cos \left(\arccos \frac{R+t-y}{R} - \alpha_3 \right) - \cos \alpha_3 \right] - t \sin \varphi. \quad (4.17)$$

Тогда подача на зуб на участке перемещения пильной рамки от 0 до t определится по выражению:

$$S_Z = \frac{S_0}{2} \left[\cos \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \alpha_3 \right) - \cos \alpha_3 \right] + y \sin \varphi. \quad (4.18)$$

Анализ формулы показывает, что подача на зуб в начале рабочего хода пил возрастает, достигая максимального значения при $y = t$ (см. рис. 4.1а). В этом случае подача на зуб равна $S_{Z \max} = 2t \sin \varphi$, т. е. ее значение в два раза больше средней подачи на зуб.

На участке перемещения пильной рамки от t до $2t$ верхний соседний зуб будет перемещаться прямолинейно, а нижний соседний зуб на этом участке движения пильной рамки имеет криволинейную траекторию. Следовательно, на этом участке подача на зуб определится по формуле:

$$S_Z = 2t \sin \varphi - \frac{S_0}{2} \left[\cos \left(\arccos \frac{R+t-y}{R} - \alpha_3 \right) - \cos \alpha_3 \right]. \quad (4.19)$$

Расчеты по формуле (4.19) показывают, что подача на зуб уменьшается (см. рис. 4.1а) до значения $S_Z = t \sin \varphi$. На участке движения пильной рамки от $2t$ до $2R$ распиливаемая заготовка находится в состоянии покоя, и поэтому подача на зуб будет величиной постоянной и равной примерно $t \sin \varphi$.

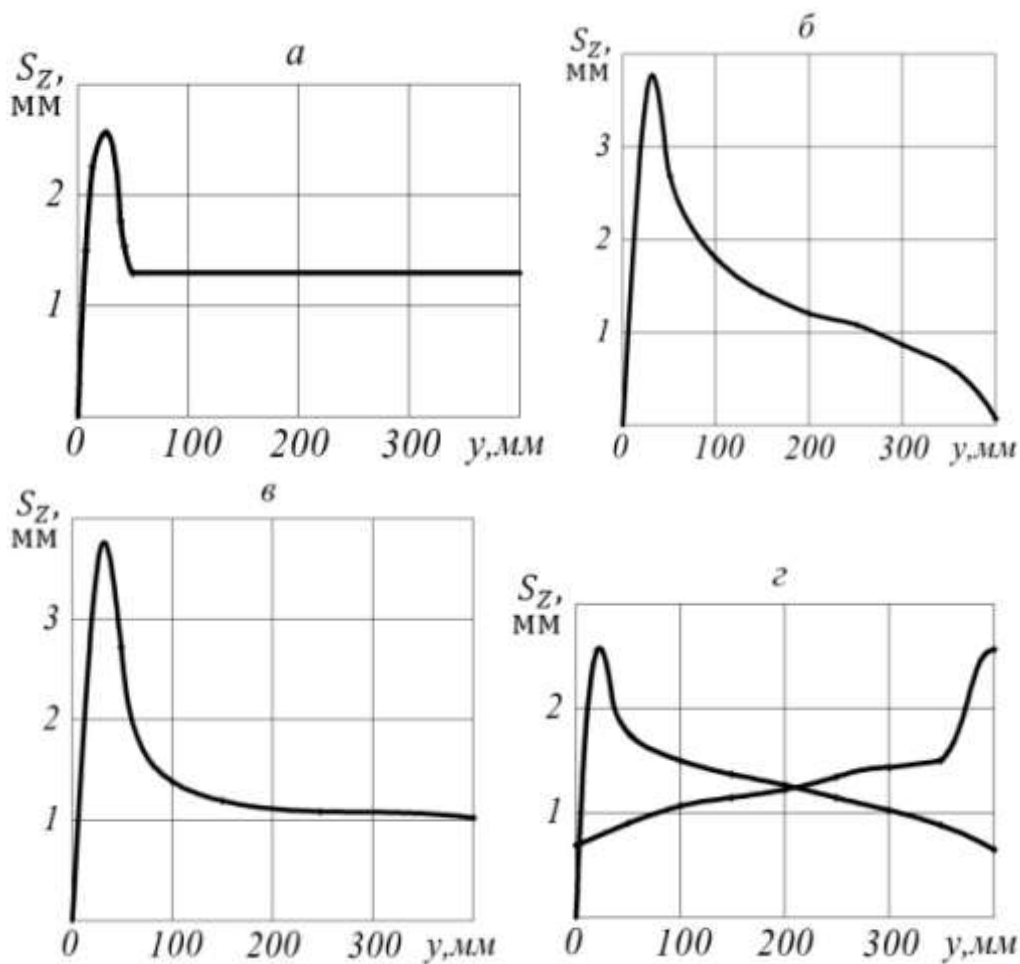


Рис. 4.1. Характер изменения подачи на зуб при подаче заготовки:
a – за холостой ход с запаздыванием; *б* – за рабочий ход с опережением;
в – за оборот; *г* – за рабочий и холостой ходы: 1 – с опережением на $\alpha_0 = 30^\circ$;
 2 – с запаздыванием на $\alpha_3 = 30^\circ$

Таким образом, перемещение заготовки с переменной скоростью за холостой ход с запаздыванием не обеспечивает получение равномерной подачи на зуб. Максимальная подача на зуб в два раза выше ее среднего значения. Это отрицательно повлияет на силовые и качественные показатели процесса и условия работы рамных пил.

В конце рабочего хода на дне пропила будут образованы уступы. Но так как в начале холостого хода распиливаемая заготовка в это время не перемещается, то пилы беспрепятственно продвигаются вверх на величину шага зубьев пилы. После этого начинается подача заготовки. Следовательно, теоретически в начале холостого хода скобление отсутствует. Таким образом, подача заготовки с переменной скоростью за холостой ход с запаздыванием позволяет исключить скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода, но при этом наблюдается неравномерная толщина срезаемого слоя зубом пилы во время рабочего хода [17].

4.2. Перемещение заготовки за рабочий ход

Так как бревно перемещается только за рабочий ход, то пилы теоретически не следует устанавливать с уклоном. Пилы при этом перемещаются прямолинейно и с переменной скоростью. На практике пилам придают незначительный уклон на величине хода пильной рамки, равный 2...3 мм. Движение пил и заготовки происходит одновременно, начиная от ВМТ. Скорость движения заготовки определится по выражению:

$$v_s = x'_s = \frac{S_0}{2} \omega \sin \alpha. \quad (4.20)$$

Уравнение движения заготовки (вальца) имеет вид:

$$x_s = \frac{S_0}{2} (1 - \cos \alpha). \quad (4.21)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется системой уравнений заготовки и пил:

$$\begin{cases} x_s = \frac{S_0}{2} (1 - \cos \alpha), \\ y = R(1 - \cos \alpha). \end{cases} \quad (4.22)$$

Решая систему уравнений (4.22), получим:

$$x_1 = \frac{S_0 y}{2R}. \quad (4.23)$$

Таким образом, траектории движения зубьев пилы в пропиле представляют собой прямые наклонные линии. Угол наклона траекторий движения зубьев пилы в пропиле (φ_t) определится по выражению:

$$\varphi_t = \arctg \frac{v_s}{v} = \arctg \frac{S_0}{2R}. \quad (4.24)$$

Траектория нижнего соседнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется в параметрической форме так:

$$\begin{cases} x_s = \frac{S_0}{2} (1 - \cos \alpha), \\ y = R(1 - \cos \alpha) + t. \end{cases} \quad (4.25)$$

Решая систему уравнений (4.25), получим:

$$x_2 = \frac{S_0}{2} \left(\frac{y-t}{R} \right). \quad (4.26)$$

Тогда подача на зуб определится по выражению:

$$S_Z = x_1 - x_2 = \frac{S_0 t}{2R}. \quad (4.27)$$

Выражение (4.27) показывает, что подача на зуб в этом случае величина постоянная. Однако в конце рабочего хода на дне пропила образуются ступеньки длиной, равной шагу зубьев пилы, и толщиной, равной подаче на зуб. Если теперь осуществлять движение пил вверх, то произойдет скобление зубьями пилы дна пропила. Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину будет равна подаче на зуб, а длина пути скобления равна шагу зубьев пилы. В связи с этим предлагается осуществлять подачу заготовки с опережением. Величину угла опережения (α_0) рекомендуется определять по выражениям (4.6) и (4.7). Тогда произойдет изменение синхронизации двух движений – подачи заготовки и перемещения пил, что должно отразиться на характере изменения подачи на зуб. Если подачу заготовки производить с опережением, то тогда подача заготовки будет осуществляться не только за рабочий, но и за холостой ход. Скорость движения заготовки определится по выражениям:

– за рабочий ход (на участке перемещения пильной рамки при повороте кривошипа на угол от θ до $\pi - \alpha_0$):

$$v_{sp} = \frac{S_0}{2} \omega \sin(\alpha + \alpha_0), \quad (4.28)$$

– за холостой ход (на участке перемещения пильной рамки при повороте кривошипа на угол от $\pi - \alpha_0$ до π):

$$v_{sx} = -\frac{S_0}{2} \omega \sin(\alpha + \alpha_0). \quad (4.29)$$

Взяв интегралы от этих выражений, получим формулы для определения перемещений заготовки на соответствующих участках поворота кривошипа:

– за рабочий ход:

$$x_p = \frac{S_0}{2} [\cos \alpha_0 - \cos(\alpha - \alpha_0)], \quad (4.30)$$

– за холостой ход:

$$x_x = \frac{S_0}{2} [1 + \cos(\alpha + \alpha_0)]. \quad (4.31)$$

Таким образом, перемещение заготовки теперь будет осуществляться за рабочий и холостой ходы и величина этих перемещений составит:

– за рабочий ход:

$$x_{po} = \frac{S_0}{2} [1 + \cos \alpha_0], \quad (4.32)$$

– за холостой ход:

$$x_{xo} = \frac{S_0}{2} [1 - \cos \alpha_0]. \quad (4.33)$$

В итоге за один оборот коленчатого вала перемещение заготовки осуществится на величину посылки S_0 , которую можно определить по равенству $S_0 = x_{po} + x_{xo}$.

Осуществление частичной подачи заготовки за холостой ход обуславливает необходимость придания уклона зубьям пилы, так как иначе будет происходить скобление зубьями пилы дна пропила в конце холостого хода. Величину необходимого (минимального) угла наклона пил можно определить по формуле (принимая величину относительного уклона пил равной 1,0 от величины перемещения заготовки за холостой ход):

$$\varphi = \arctg \left[\frac{S_0}{4R} (1 - \cos \alpha_0) \right]. \quad (4.34)$$

На практике обычно величину относительного уклона пил принимают несколько больше, в пределах 1,10–1,20 от величины перемещений за холостой ход. Тогда величина угла наклона пил определится по формуле:

$$\varphi = \arctg \left[(1,1 \dots 1,2) \frac{S_0}{4R} (1 - \cos \alpha_0) \right]. \quad (4.35)$$

Расчеты по формулам (4.34) и (4.35) показывают, что величина абсолютного уклона пил на величине хода пильной рамки при изменении посылки на одноэтажных лесопильных рамах в пределах от 10 до 40 мм/оборот находится в пределах от 1 до 4 мм.

Траектория движения зубьев пилы в пропиле во время рабочего хода в этом случае определится из решения такой системы уравнений:

$$\begin{cases} y = R(1 - \cos\alpha), \\ x = \frac{S_0}{2} [\cos\alpha_0 - \cos(\alpha + \alpha_0)]. \end{cases} \quad (4.36)$$

Решая систему уравнений (4.36), получим:

$$x_1 = \frac{S_0}{2} \left[\cos\alpha_0 - \cos\left(\arccos\frac{R-y}{R} + \alpha_0\right) \right]. \quad (4.37)$$

Как видно из уравнения (4.37), траектория движения зуба пилы в пропиле не будет представлять собой прямую линию. Траектория движения нижнего соседнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется такой системой уравнений:

$$\begin{cases} y = R(1 - \cos\alpha) + t, \\ x = \frac{S_0}{2} [\cos\alpha_0 - \cos(\alpha + \alpha_0)] - t \sin\varphi. \end{cases} \quad (4.38)$$

Решая эту систему уравнений, получим:

$$x_2 = \frac{S_0}{2} \left[\cos\alpha_0 - \cos\left(\arccos\frac{R+t-y}{R} + \alpha_0\right) \right] - t \sin\varphi. \quad (4.39)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$\begin{aligned} S_z = \frac{S_0}{2} \left[\cos\left(\arccos\frac{R+t-y}{R} + \alpha_0\right) - \right. \\ \left. - \cos\left(\arccos\frac{R-y}{R} + \alpha_0\right) \right] + t \sin\varphi. \end{aligned} \quad (4.40)$$

Принимая в расчетах данные применительно к одноэтажным лесопильным рамам ($R = 200$ мм, $t = 26$ мм, $S_0 = 20$ мм, зубья плющенные), получим характер изменения подачи на зуб, представлен-

ный на рис. 4.1б. График показывает, что подача на зуб в начале рабочего хода значительно возрастает и ее максимальное значение становится в 2,8 раза больше средней величины подачи на зуб.

В первой половине рабочего хода мгновенные значения подачи на зуб больше его среднего значения, а во второй половине рабочего хода наоборот – меньше его среднего значения. В конце рабочего хода подача на зуб становится незначительной величины, что в наших расчетах составляет 0,085 мм. Следовательно, в конце рабочего хода на дне пропила будут, хотя и маленькие, ступеньки. Но пилы имеют уклон, и при условии отсутствия подачи пилы могут беспрепятственно перемещаться вверх, т. е. скобление будет отсутствовать. Однако такой характер изменения подачи на зуб существенно отразится на динамике процесса пиления древесины на лесопильных рамах, а также на качестве поверхности обработки. В таком случае силы резания будут значительно изменяться по величине, а максимальные значения будут в несколько раз превышать их среднее значение. Все это отрицательно повлияет на условия работы рамных пил.

Таким образом, переменная подача за рабочий ход с опережением обеспечивает исключение скобления зубьями пилы дна пропила, но не позволяет получить срезание стружки во время рабочего хода равномерной толщины, что отрицательно повлияет на качественные и силовые показатели процесса.

В связи с этим получить существенный эффект от использования на лесопильных рамах механизмов подачи с переменными скоростями движений заготовки как за рабочий, так и за холостой ходы не представляется возможным. Кроме того, для осуществления подачи заготовки с переменной скоростью только за холостой или только за рабочий ход, как отмечали М. А. Дешевой, В. Я. Филькевич и другие [47, 78], необходимо преодолевать ускорения в два раза больше, чем при подаче заготовки с переменной скоростью одновременно за рабочий и холостой ходы. Это обстоятельство оказалось важным, особенно при создании быстроходных лесопильных рам, так как существенно меняется динамика машины. В связи с этим механизмы подачи с переменной скоростью движения заготовки только за рабочий или только за холостой ходы не получили дальнейшего распространения в промышленности. Следует также иметь в виду, что реализация четкой синхронизации этих движений на практике трудно выполнима. Отклонение движения заготовки и

пил от указанных выше требований будет приводить к еще большей рассогласованности в работе этих двух механизмов, что отрицательно повлияет на кинематику процесса и, следовательно, на качество обработки, условия работы рамных пил и производительность лесопильных рам.

4.3. Перемещение заготовки за рабочий и холостой ходы

Такая подача заготовки осуществляется двумя частями – за рабочий и холостой ходы. Пилы при этом перемещаются прямолинейно с переменной скоростью. Угол наклона зубьев пилы при относительном уклоне, равном 0,5, будет равен:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{0,5S_0}{2R} = \operatorname{arctg} \frac{S_0}{4R}. \quad (4.41)$$

Скорость движения заготовки как за рабочий, так и за холостой ходы определится по формуле:

$$v_S = x'_e = \frac{S_0}{4} \omega \sin \alpha. \quad (4.42)$$

Уравнение движения заготовки имеет вид:

$$x_e = \frac{S_0}{4} (1 - \cos \alpha). \quad (4.43)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода определится по формуле:

$$x_1 = \frac{S_0 y}{4R}. \quad (4.44)$$

Формула (4.44) показывает, что траектория движения зубьев пилы в пропиле представляет собой прямую линию и она наклонна к вектору скорости движения пил на угол, определяемый по выражению (4.41). Толщина срезаемого слоя древесины зубом пилы определится по выражению $a = S_z \cos \varphi$.

Траектория движения нижнего соседнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_0}{4}(1 - \cos\alpha) - t\sin\varphi, \\ y = R(1 - \cos\alpha) + t. \end{cases} \quad (4.45)$$

Решая систему уравнений (4.45), получим:

$$x_2 = \frac{S_0}{4R}(y - t) - t\sin\varphi. \quad (4.46)$$

Тогда подача на зуб будет равна:

$$S_z = \frac{S_0 t}{4R} + t\sin\varphi. \quad (4.47)$$

Учитывая формулу (4.41) и принимая условие, что при малых углах $t g\varphi \approx \sin\varphi$, можно написать:

$$S_z = \frac{S_0 t}{2R}. \quad (4.47a)$$

Таким образом, во время рабочего хода обеспечивается срезание стружки равномерной толщины. В конце рабочего хода на дне пропила образуются ступеньки, глубина которых по величине равна подаче на зуб. Эти ступеньки будут в начале движения пил во время холостого хода оказывать препятствие. Следовательно, в начале холостого хода будет происходить скобление зубьями пилы дна пропила. Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину будет равна подаче на зуб.

Если подачу заготовки осуществлять с опережением или запаздыванием, то тогда скорость подачи заготовки определится по формуле:

$$v_s = \frac{S_0}{4} \omega \sin(\alpha \pm \alpha_0). \quad (4.48)$$

Траектория движения зубьев пилы в древесине во время холостого хода определится по формуле (отсчет нуля от НМТ):

$$x_x = \frac{S_0}{4} \left[\cos\alpha_0 - \cos\left(\arccos\frac{R-y}{R} \pm \alpha_0\right) \right]. \quad (4.49)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода (при условии отсчета нуля от НМТ) определится по формуле:

$$x_p = \frac{S_0}{4} \left[\cos \alpha_0 + \cos \left(\arccos \frac{R-y}{R} \mp \alpha_0 \right) \right]. \quad (4.50)$$

Тогда глубина вдавливания зубьев пилы в древесину в начале холостого хода определится по формуле:

$$\delta = \frac{S_0}{2} \left(1 - \frac{R-y}{R} \cos \alpha_0 \right). \quad (4.51)$$

Максимального значения глубина вдавливания достигнет при $y = t$ и определится из выражения:

$$\delta_{max} = \frac{S_0}{2} \left(1 - \frac{R-t}{R} \cos \alpha_0 \right). \quad (4.52)$$

Анализ формул (4.51) и (4.52) показывает, что при использовании опережения или запаздывания ликвидировать скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода невозможно, так как с увеличением угла опережения или запаздывания максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину возрастает (рис. 4.2). При этом рост максимальной глубины вдавливания зубьев пилы в древесину в начале холостого хода при увеличении угла опережения или запаздывания происходит ускоренно.

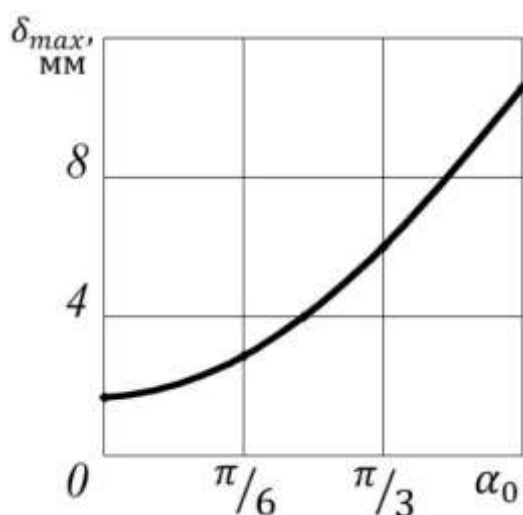


Рис. 4.2. Влияние угла опережения или запаздывания на максимальную глубину вдавливания зуба пилы в древесину

При изменении параметров процесса пиления глубина вдавливания зубьев пилы в древесину во время холостого хода также изменяется. С увеличением хода пильной рамки глубина вдавливания зуба

пилы в древесину в начале холостого хода уменьшается (рис. 4.3а). С увеличением шага зубьев пил глубина вдавливания зубьев пилы в древесину в начале холостого хода возрастает (рис. 4.3б).

При увеличении угла опережения или запаздывания происходит изменение формул для определения подачи на зуб.

С учётом угла опережения подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{4} \left[\frac{t}{R} \cos \alpha_0 + \sin \alpha_0 \left(\sin \arccos \frac{R-y}{R} - \sin \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) \right] + t \sin \varphi. \quad (4.53)$$

С учётом угла запаздывания подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{4} \left[\frac{t}{R} \cos \alpha_3 + \sin \alpha_3 \left(\sin \arccos \frac{R+t-y}{R} - \sin \arccos \frac{R-y}{R} \right) \right] + t \sin \varphi. \quad (4.54)$$

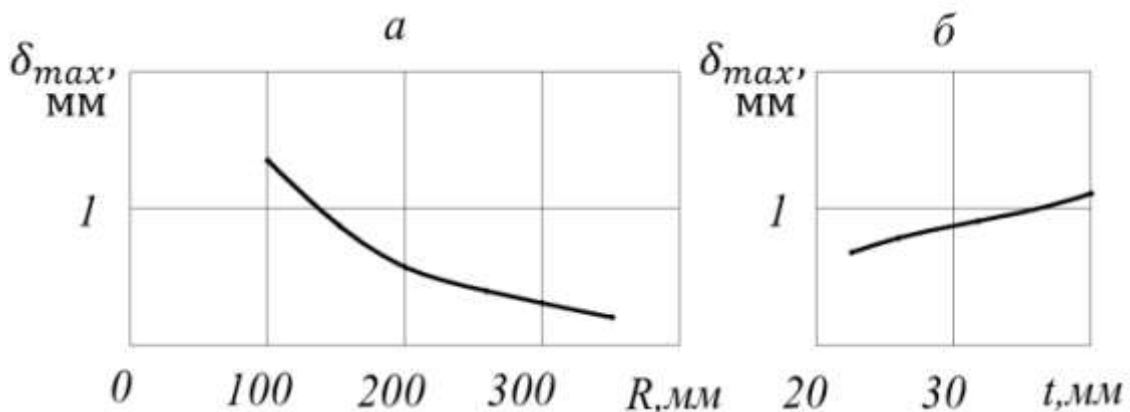


Рис. 4.3. Влияние радиуса кривошипа (а) и шага зубьев (б) на максимальную глубину вдавливания зуба пилы в древесину

Расчёты по указанным выше формулам показывают, что при опережении подачи заготовки на угол 30° максимальное значение подачи на зуб наблюдается в начале половины рабочего хода, а при запаздывании на 30° , наоборот, в конце его (см. рис. 4.1з). Максимальное значение подачи на зуб в этом случае в 1,88 раза превышает её среднее значение.

Таким образом, при подаче заготовки с переменной скоростью за рабочий и холостой ходы исключить скобление зубьями пилы дна пропила невозможно, даже используя опережение или запаздывание.

4.4. Движение заготовки с циклом за ход и с переменной скоростью, не достигающей нулевого значения

В этом варианте пилы перемещаются прямолинейно, возвратно-поступательно с переменной скоростью.

В таком случае (см. рис. 2.2г) скорость движения заготовки можно определить по формуле:

$$x'_g = \frac{S_0}{4} (1 - c) \omega \sin \alpha + \frac{S_0}{2\pi} c \omega, \quad (4.55)$$

где c – коэффициент, показывающий степень неравномерности скорости перемещения заготовки, изменяющийся в пределах от 0 до 1.

При $c = 0$ формула (4.55) примет вид, аналогичный формуле (4.42), т. е. движение заготовки будет происходить со скоростями, принимающими нулевое значение в ВМТ и НМТ. При $c = 1$ формула (4.55) примет вид $x'_g = S_0 \omega / 2\pi$, что будет характеризовать движение заготовки с равномерной скоростью.

Перемещение заготовки в этом случае определится по выражению:

$$x_g = \frac{S_0}{4} (1 - c) (1 - \cos \alpha) + \frac{S_0}{2\pi} c \alpha. \quad (4.56)$$

Так как движение заготовки осуществляется за рабочий и холостой ходы теоретически на равные величины, то пилам необходимо придавать уклон. Величина угла уклона пил определится по выражению:

$$\varphi = \arctg \frac{\xi S_0}{2R}.$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода определится по формуле:

$$x_1 = \frac{S_0 y}{4R} (1 - c) + \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (4.57)$$

Траектория нижнего соседнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода будет иметь вид:

$$x_2 = \frac{S_0(y-t)}{4R}(1-c) + \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R+t-y}{R} - t \sin \varphi. \quad (4.58)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0 t}{4R}(1-c) + t \sin \varphi + \frac{S_0}{2\pi} c \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \arccos \frac{R+t-y}{R} \right). \quad (4.59)$$

Проведённый анализ показывает, что данный случай представляет собой промежуточный вариант между подачей заготовки с равномерной скоростью и подачей заготовки с переменной скоростью за рабочий и холостой ходы. Следовательно, недостатки, присущие этим видам подач заготовки, будут наблюдаться и здесь. Таким образом, в этом случае невозможно обеспечить исключение скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода и невозможно получить срезание слоя древесины каждым зубом пилы равномерной толщины во время рабочего хода.

4.5. Движение заготовки с циклом за оборот

Перемещение пил осуществляется прямолинейно и возвратно-поступательно с переменной скоростью.

В этом случае скорость движения заготовки может осуществляться по такому закону (от НМТ):

$$x'_g = \frac{S_0}{4} \omega \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (4.60)$$

Формула (4.60) показывает, что максимальное значение скорости движения заготовки будет равно максимальным значениям скорости при подаче за рабочий и холостой ходы, а число циклов будет в два раза меньше (см. рис. 2.3а). Взяв первую производную от скорости движения заготовки по времени, получим формулу для определения ускорения:

$$x_g'' = \frac{S_0}{8} \omega^2 \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (4.61)$$

Максимальные значения ускорений будут в два раза меньше, чем при подаче за рабочий и холостой ходы, и в четыре раза меньше по сравнению с подачей только за рабочий или только за холостой ход.

Перемещение заготовки за холостой ход определится по формуле (отсчет нуля от НМТ):

$$x_g = \frac{S_0}{2} \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right). \quad (4.62)$$

Движение заготовки за рабочий ход опишется уравнением (отсчет нуля от ВМТ):

$$x_g = \frac{S_0}{2} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (4.63)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле за рабочий ход определится по выражению:

$$x_1 = \frac{S_0}{2} \sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R - y}{R} \right). \quad (4.64)$$

Траектория движения нижнего соседнего зуба пилы в пропиле за рабочий ход определится по выражению:

$$x_2 = \frac{S_0}{2} \sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) - t \sin \varphi. \quad (4.65)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{2} \left[\sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R - y}{R} \right) - \sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) \right] + t \sin \varphi. \quad (4.66)$$

Расчёты, выполненные применительно к одноэтажным лесопильным рамам ($R = 200$ мм, $t = 26$ мм, $S_0 = 20 \frac{\text{мм}}{\text{оборот}}$), показывают (см. рис. 4.1в), что подача на зуб изменяется по сложному закону. В

начале рабочего хода она достигает максимального значения, а затем интенсивно уменьшается и при $y = R/2$ становится меньше её среднего значения. При дальнейшем перемещении пильной рамки подача на зуб уменьшается, а интенсивность уменьшения величины подачи на зуб снижается.

Максимальное значение текущей подачи на зуб в 2,46 раза больше её среднего значения. Важно знать, будет ли наблюдаться скобление зубьями пилы dna пропила в начале холостого хода. С этой целью напишем формулу для определения теоретической глубины вдавливания зубьев пилы в древесину в начале холостого хода в следующем виде:

$$\delta = x_x - x_p + \frac{S_0}{2}. \quad (4.67)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода опишется уравнением (от НМТ):

$$x_x = \frac{S_0}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R - y}{R} \right) \right]. \quad (4.68)$$

Для определения траектории движения зубьев пилы в пропиле во время холостого хода с отсчётом нуля от НМТ необходимо в формулу (4.64) сделать подстановку $y' = 2R - y$. После преобразований получим:

$$x_p = \frac{S_0}{2} \cos \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R - y}{R} \right). \quad (4.69)$$

Тогда, подставив формулы (4.68) и (4.69) в равенство (4.67) и сделав преобразования, получим:

$$\delta = S_0 \left[1 - \cos \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R - y}{R} \right) \right]. \quad (4.70)$$

Максимального значения глубина вдавливания зуба пилы в древесину достигает при $y = t$. Её значение определится по формуле:

$$\delta_{max} = S_0 \left[1 - \cos \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R - t}{R} \right) \right]. \quad (4.71)$$

Расчёты по формуле (4.71) показывают, что максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину зависит от посылки, шага зубьев и радиуса кривошипа. С увеличением посылки максимальная глубина вдавливания зубьев пилы в древесину возрастает прямо пропорционально. С увеличением радиуса кривошипа максимальная глубина вдавливания зубьев пилы в древесину уменьшается (см. рис. 4.3а), а при увеличении шага зубьев пилы – возрастает (см. рис. 4.3б). Анализ показывает, что ликвидировать скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода невозможно.

В последнее время предлагаются механизмы подачи с переменной скоростью с циклом за оборот, у которых минимальное значение скорости подачи не достигает нуля (см. рис. 2.3в). В таком случае скорость движения заготовки определится по формуле (отсчет нуля от НМТ):

$$x'_e = \frac{S_0}{4}(1 - c)\omega \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{S_0}{2\pi} c\omega. \quad (4.72)$$

Перемещение заготовки определится по формуле (отсчет нуля от НМТ):

$$x_e = \frac{S_0}{2}(1 - c) \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) + \frac{S_0}{2\pi} c\alpha. \quad (4.73)$$

За рабочий ход движение заготовки определится выражением (от ВМТ):

$$x_e = \frac{S_0}{2}(1 - c) \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{S_0}{2\pi} c\alpha. \quad (4.74)$$

При $c = 0$ формулы (4.72), (4.73) и (4.74) совпадают с формулами (4.59), (4.61) и (4.62), т. е. движение заготовки будет осуществляться с переменной скоростью с циклом за оборот, а минимальное значение скорости подачи становится равным нулю.

При $c = 0$ формулы (4.72), (4.73) и (4.74) показывают, что движение заготовки происходит с равномерной скоростью. Следовательно, при c , изменяющемся в пределах от 0 до 1, будут наблюдаться промежуточные варианты между подачей за оборот с $v_{s \min} = 0$ и равномерной скоростью движения заготовки.

Можно сделать выводы, что такой вариант движения заготовки не позволяет обеспечить срезание стружки равномерной толщи-

ны во время рабочего хода и исключить скобление зубьями пилы дна пропила во время холостого хода.

Предлагалось использовать в механизмах подачи лесопильных рам эллиптические и овалыные колёса, эксцентричные круглые колёса, кривошипно-кулисные механизмы и шарниры Гука. Анализ кинематики процесса пиления древесины рамными пилами с использованием таких механизмов подачи производится с целью определения прежде всего перспективности развития и совершенствования предлагаемых механизмов, а также выбора параметров механизмов подачи с переменной скоростью движения распиливаемой заготовки.

4.6. Кулисно-дифференциальный механизм подачи

Кулисно-дифференциальный механизм подачи был впервые рассмотрен проф. В. Я. Филькевичем (ЛТА) [77]. Кинематическая схема механизма показана на рис. 4.4. Ведущий вал 1 жёстко соединён с коленчатым валом 2 лесопильной рамы. Вращение от ведущей шестерни 3 передаётся через шестерню 4 на кулисное устройство 5 и далее через шестерни 6, 7 на центральное зубчатое колесо 8 планетарного редуктора.

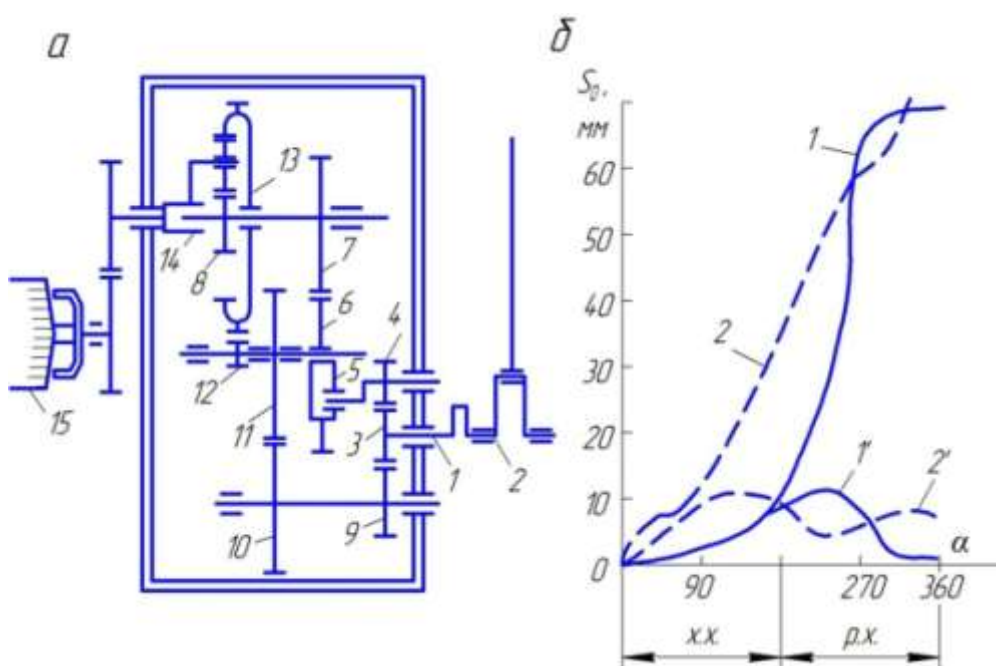


Рис. 4.4. Кулисно-дифференциальный механизм подачи:
а – кинематическая схема, *б* – диаграмма перемещения заготовки:
 1 – фактический путь, 2 – теоретический путь движения заготовки при непрерывно-равномерной подаче, 1' и 2' – кривые потери подачи

Одновременно вращение передаётся через шестерни 9, 10, 11, 12 на внешнее зубчатое колесо 13. Скорость вращения ведомого вала 14 складывается из скоростей вращения центрального колеса 8 и наружного колеса 13. Поскольку центральное колесо 8 соединено с кулисным устройством и вращается в разные стороны, изменяется скорость ведомого вала. При помощи такого механизма можно принципиально обеспечить кратковременную остановку вальцов в начале холостого хода или даже их возвратное (попятное) движение. Однако строгое согласование механизмов резания и подачи приведёт к крайне нестабильной работе механизма подачи из-за ударов в кинематических парах, возникающих за счёт выборки зазоров после остановки вальцов.

Наибольшая скорость подачи вальца и максимальная подача на зуб наблюдаются в начале рабочего хода (см. рис. 4.4б). Для ликвидации этого отрицательного явления необходимо увеличить частоту вращения кулисного механизма в два раза по сравнению с частотой вращения коленчатого вала. Исследования В. Я. Филькевича [77] показывают, что данный механизм вполне работоспособен, а применение непрерывно-переменных подач является одним из основных направлений совершенствования лесопильных рам.

4.7. Кривошипно-кулисный механизм подачи с вращающейся кулисой

Механизм был предложен ЦНИИМОД [62, 63] (см. рис. 4.5). Кривошип 5 вращается с постоянной угловой скоростью, равной угловой скорости вращения кривошипа 6 коленчатого вала лесопильной рамы (при передаточном отношении цепной передачи, равном 1).

Угловая скорость вращения кулисы 4 переменная, так как её ось вращения смещена относительно оси вращения кривошипа 5 на угол α_c . Передаточное отношение кривошипно-кулисного механизма за один оборот кривошипа 5 изменяется по следующему закону [33]:

$$i_k = \frac{1 + \lambda_k \cos \alpha'}{1 + 2\lambda_k \cos \alpha' + \lambda_k^2}, \quad (4.75)$$

где $\lambda_k = \frac{e}{r}$ – параметр кривошипно-кулисного механизма;

e – расстояние между осями кривошипа и кулисы, мм;
 r – радиус кривошипа, мм; $\alpha' = \alpha + \alpha_c$ – угол поворота кривошипа, рад;
 α_c – угол смещения кривошипа кривошипно-кулисного механизма по отношению к кривошипу коленчатого вала лесопильной рамы, рад.

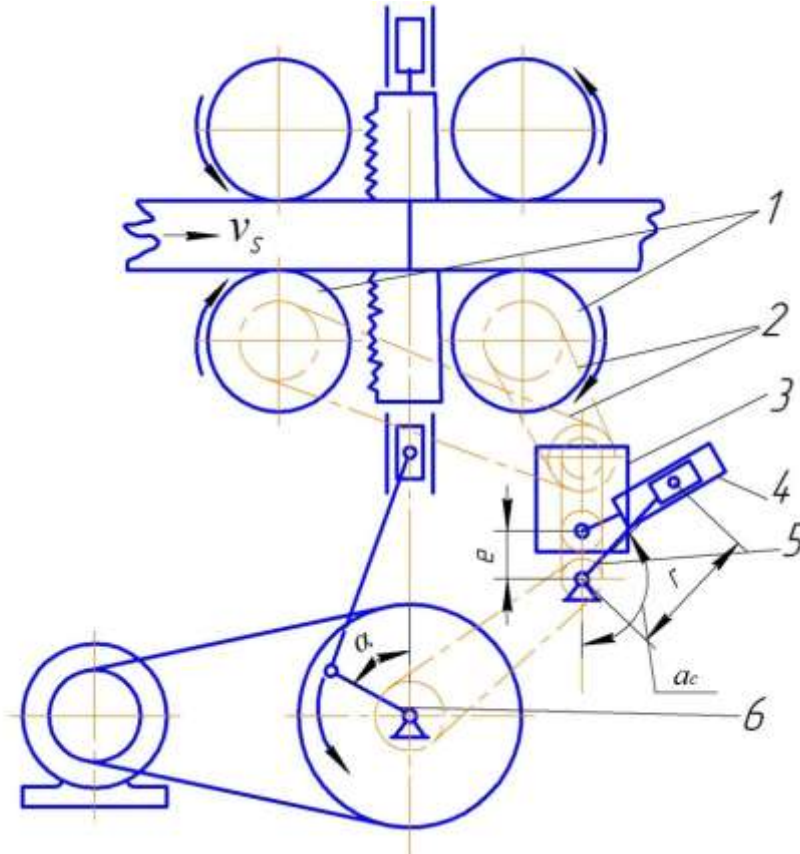


Рис. 4.5. Кривошипно-кулисный механизм подачи:

1 – вальцы подачи заготовки; 2 – цепная передача; 3 – основание кулисного механизма; 4 – кулиса; 5 – кривошип кулисы; 6 – коленчатый вал

Анализируя график (см. рис. 4.6), находим, что угол смещения кривошипа кривошипно-кулисного механизма от кривошипа коленчатого вала для получения согласованной подачи заготовки будет равен $\pi/2$.

Передаточное отношение кривошипно-кулисного механизма определится по выражению:

$$i_k = \frac{1 - \lambda_k \sin \alpha}{1 - 2\lambda_k \sin \alpha + \lambda_k^2}. \quad (4.76)$$

Так как перемещение заготовки за рабочий и холостой ходы различно, то и уклон пил меняют в зависимости от параметра λ_k .

Для того чтобы найти величину уклона пил, необходимо определить перемещение заготовки во время холостого хода.

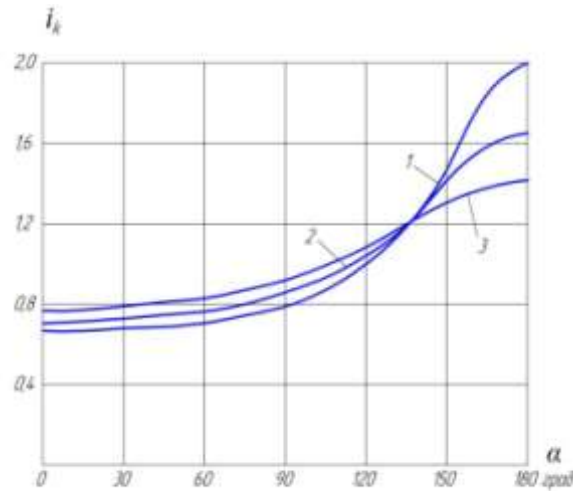


Рис. 4.6. Изменение передаточного отношения во время рабочего хода для различных λ_k : 1 – $\lambda_k = 0,5$; 2 – $\lambda_k = 0,4$; 3 – $\lambda_k = 0,3$

Для этого возьмём интеграл:

$$S_{0\text{ }xx} = \frac{S_0}{2\pi} \int_{\pi+\frac{\pi}{2}}^{2\pi+\frac{\pi}{2}} \frac{1 + \lambda_k \cos \alpha}{1 + 2\lambda_k \cos \alpha + \lambda_k^2} d\alpha. \quad (4.77)$$

Решая интеграл, имеем:

$$S_{0\text{ }xx} = \frac{S_0}{2\pi} \left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{1 - \lambda_k}{1 + \lambda_k} - \operatorname{arctg} \frac{\lambda_k - 1}{1 + \lambda_k} \right). \quad (4.78)$$

Расчёты по формуле (4.78) показали следующий уклон пил:

при $\lambda_k = 0,3$ уклон пил $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{0,41S_0}{2R}$,

при $\lambda_k = 0,4$ уклон пил $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{0,38S_0}{2R}$,

при $\lambda_k = 0,5$ уклон пил $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{0,35S_0}{2R}$.

Перемещение одного зуба относительно пропила в горизонтальном направлении определится по формуле:

$$x_1 = iR_B \left[\frac{\alpha_1}{2} + \operatorname{arctg} \left(A \operatorname{tg} \frac{\alpha_1 + \alpha_c}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left(A \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2} \right) \right], \quad (4.79)$$

где $A = \frac{1-\lambda_k}{1+\lambda_k}$, $\alpha_1 = \arccos \frac{R-y}{R}$.

Перемещение второго соседнего (нижнего) зуба пилы в пропи-
ле в горизонтальном направлении определится по формуле:

$$x_2 = iR_B \left[\frac{\alpha_2}{2} + \arctg \left(A \operatorname{tg} \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) - \arctg \left(A \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} \right) \right] - t \sin \varphi, \quad (4.80)$$

где $\alpha_2 = \arccos \frac{R-y+t}{R}$.

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{2\pi} \left[\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} + \arctg \left(A \operatorname{tg} \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) - \right. \\ \left. - \arctg \left(A \operatorname{tg} \frac{\alpha_2 + \alpha_c}{2} \right) \right] + t \sin \varphi. \quad (4.81)$$

Подача на зуб во время рабочего хода изменяется в зависимо-
сти от выбранного параметра λ_k (см. рис. 4.7). В расчётах принят
ход пильной рамки 600 мм, средняя подача на зуб $S_{z\text{cp}} = 2,0$ мм, шаг
зубьев пилы 26 мм.

Применение кривошипно-кулисного механизма позволяет
уменьшить максимальную подачу на зуб в конце рабочего хода на
15–20%. Как видно из расчётов, снижение максимальной подачи на
зуб сравнительно мало и не обеспечивает срезание стружки равно-
мерной толщины. Следовательно, использование кривошипно-
кулисного механизма с вращающейся кулисой для механизмов пода-
чи лесопильных рам малоэффективно.

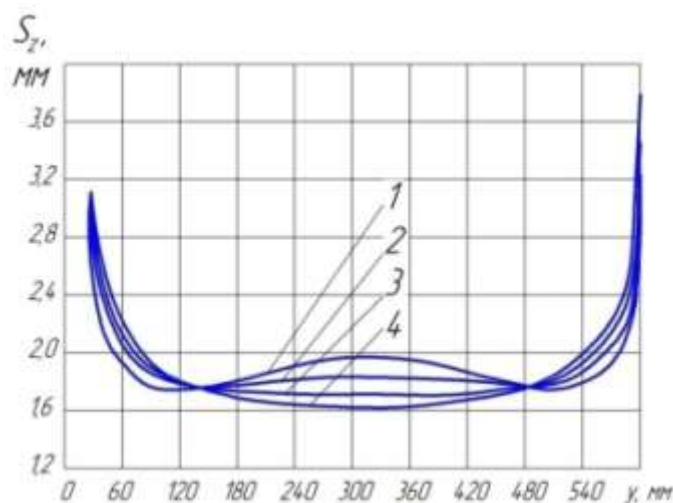


Рис. 4.7. Характер изменения подачи на зуб для различных параметров λ_k :
1 – $\lambda_k = 0,5$; 2 – $\lambda_k = 0,4$; 3 – $\lambda_k = 0,3$; 4 – $\lambda_k = 0$

4.8. Механизм подачи с эллиптическими колесами

Механизм был предложен Костромским технологическим институтом [49]. От коленчатого вала вращение передаётся через пару эллиптических шестерён, постоянно находившихся в зацеплении. Далее вращение через цепную передачу, вариатор и редуктор передаётся вальцу механизма подачи лесопильной рамы. Ведущая эллиптическая шестерня имеет постоянную угловую скорость, а ведомая шестерня – переменную. Передаточное отношение в этих парах, если угол поворота ведущей шестерни находится в пределах $\pi \geq \alpha_1 \geq 0$, определяется по формуле:

$$i_{21} = \frac{1 - 2e \cos \alpha_1 + e^2}{1 - e^2}, \quad (4.82)$$

где $e = \frac{a}{c}$ – эксцентриситет эллипса;

a – расстояние от центра эллипса до фокуса (оси вращения), мм;

c – большая ось эллипса, мм;

α_1 – угол поворота коленчатого вала.

Для углов поворота в пределах $2\pi \geq \alpha_1 \geq \pi$ передаточное отношение этой пары зацепления определится по формуле:

$$i_{21} = \frac{1 - 2e \cos(2\pi - \alpha_1) + e^2}{1 - e^2}. \quad (4.83)$$

Передаточное отношение зубчатых эллиптических колёс зависит от эксцентриситета эллипса и угла поворота этих колёс. Максимальное и минимальное передаточные отношения определяются по выражениям:

$$i_{max} = \frac{1 + e}{1 - e}, \quad (4.84)$$

$$i_{min} = \frac{1 - e}{1 + e}. \quad (4.85)$$

Передаточное отношение зубчатых эллиптических колёс обычно принимают не более 0,33, так как при эксцентриситете $e = 1/3$ радиус кривизны овальной центроиды в одной точке при $\alpha_1 = \pi/2$ равен бесконечности. Овальная центроида в этой точке переходит в прямую линию.

Влияние эксцентриситета на максимальное и минимальное передаточное отношение пары эллиптических колёс показано на рис. 4.8.

Для максимально неравномерного вращения ведомой эллиптической шестерни примем эксцентриситет 0,3. Для этих условий $i_{max} = 1,85$, $i_{min} = 0,53$, а отношение $i_{max}/i_{min} = 3,5$.

Скорость вращения вальца лесопильной рамы можно определить по выражению:

$$\vartheta_e = \frac{\omega_1 i_k i_n 60 R_e}{1000}, \quad (4.86)$$

где ω_1 – угловая скорость вращения коленчатого вала лесопильной рамы, рад/с;

i_k – передаточное отношение эллиптических колёс (корректирующей передачи);

i_n – передаточное отношение механизма подачи лесопильной рамы;

R_e – радиус подающего вальца, мм.

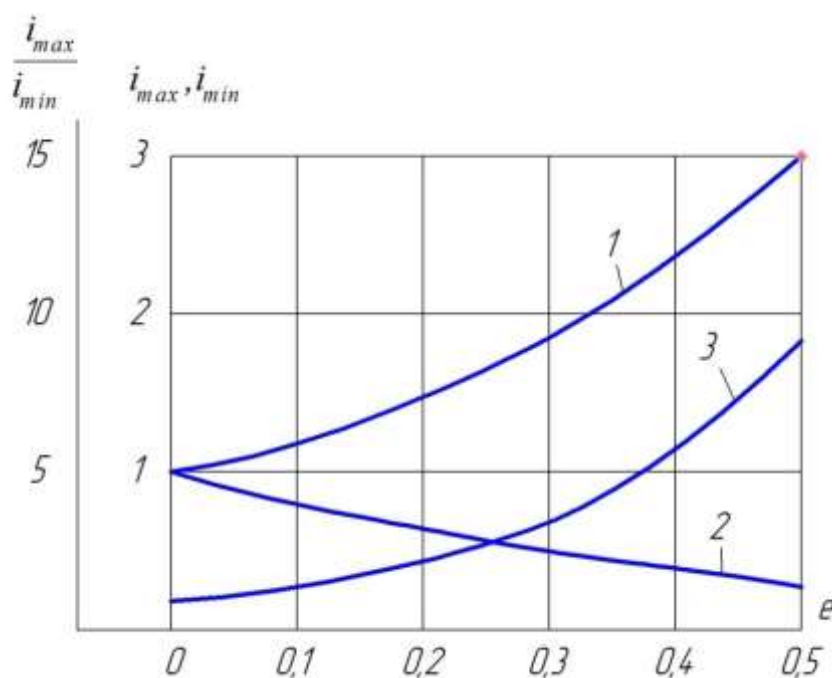


Рис. 4.8. Влияние эксцентриситета эллиптических колёс e на величину передаточного отношения: 1 – i_{max} ; 2 – i_{min} ; 3 – i_{max}/i_{min}

Угол поворота ведомого эллиптического колеса определяется по формуле:

$$\alpha_2 = 2 \arctg \left(\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} \right), \quad (4.87)$$

где α_1 – угол поворота кривошипа коленчатого вала, рад.

Уравнение движения заготовки будет иметь вид:

$$x = \frac{S_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} \right). \quad (4.88)$$

Решая систему уравнений (4.4) и (4.88), получим относительную траекторию движения одного зуба пилы в пропилене:

$$x_1 = \frac{S_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \frac{\arccos R - y}{2} \right]. \quad (4.89)$$

Траектория движения соседнего нижнего зуба пилы в пропилене определится при решении системы уравнений:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} \right), \\ y_2 = R(1 - \cos \alpha_1) + t \cos \varphi. \end{cases} \quad (4.90)$$

Траектория относительного движения соседнего нижнего зуба пилы в пропилене опишется уравнением:

$$x_2 = \frac{S_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \frac{\arccos \frac{R-y+t}{R}}{2} \right] - t \sin \varphi. \quad (4.91)$$

Подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \frac{\arccos \frac{R-y}{R}}{2} \right] - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \frac{\arccos \frac{R-y+t}{R}}{2} \right] \right\} + t \sin \varphi. \quad (4.92)$$

Характер изменения подачи на зуб за рабочий ход представлен на рис. 4.9. При расчёте подачи на зуб принято: посылка 42 мм/об; радиус кривошипа 300 мм; шаг зубьев пилы 26 мм; относительный уклон пил 0,6.

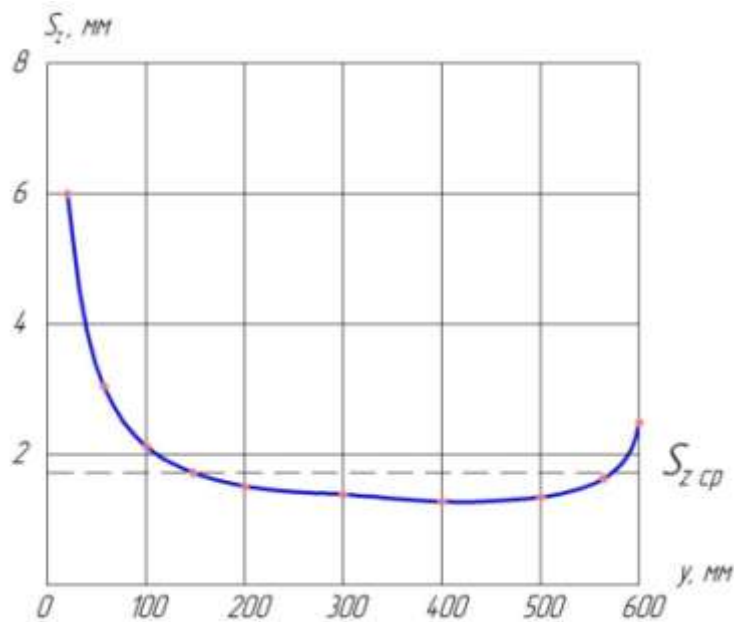


Рис. 4.9. Характер изменения подачи на зуб с использованием в механизме подачи эллиптических колёс

График показывает, что в начале рабочего хода (при $y = t$) наблюдается максимальное значение подачи на зуб, которое даже больше, чем при непрерывно-равномерной скорости подачи. В конце рабочего хода подача на зуб уменьшается по сравнению с непрерывно-равномерной скоростью подачи, что окажет благоприятное влияние на работу пил, так как уменьшится глубина вдавливания зубьев пилы в древесину и, следовательно, путь скобления во время холостого хода.

Скорость движения пильной рамки изменяется от 0 до 10,1 м/с с частотой изменения в два раза больше, чем скорость подачи заготовки.

Величина подачи на зуб в начале рабочего хода на протяжении 150 мм хода пильной рамки выше средней величины подачи на зуб. Минимальное значение подачи на зуб принимает не в середине рабочего хода, как это обычно наблюдается при непрерывно-равномерной скорости подачи, а на расстоянии $2/3$ хода пильной рамки от верхней мёртвой точки.

Проф. В. Ф. Фонкин [78, 79], анализируя механизмы с непрерывно-переменной скоростью подачи заготовки, рекомендует для уменьшения и даже ликвидации максимального значения подачи на зуб в начале рабочего хода придавать уклон пилам с таким расчётом, чтобы потеря рабочего хода была несколько больше шага зубьев пилы. Величину уклона можно определить, пользуясь формула-

ми (3.14) и (3.18) и задавшись при этом потерей хода, например, $y_n = 1,5t$.

Для уменьшения максимального значения подачи на зуб в начале рабочего хода необходимо увеличить частоту вращения эллиптических колёс в два раза по сравнению с частотой вращения коленчатого вала.

4.9. Механизм подачи с овальными колесами

Для преобразования равномерного вращения коленчатого вала лесопильной рамы в неравномерное вращение подающих валцов рекомендуют применять пару овальных шестерён [33].

Неравномерность вращения валцов лесопильной рамы определяется эксцентриситетом овальных колёс. Оптимальную величину эксцентриситета находят из условия постоянства отношения скорости движения пил к скорости вальца. В этом случае подача на зуб будет постоянной.

Передаточное отношение механизма овальных колёс изменяется по следующему закону:

$$i_{12} = \frac{1 + 2e \cos 2\alpha + e^2}{1 - e^2}, \quad (4.93)$$

где $e = \frac{a}{c}$ – эксцентриситет овального колеса;

a – половина расстояния между фокусами, мм;

c – половина длины большой оси, мм;

α – угол поворота ведущего вала, рад.

Максимальное значение передаточное отношение достигает при $\alpha = 0$ и π рад и определяется по формуле:

$$i_{max} = \frac{1 + e}{1 - e}. \quad (4.94)$$

Минимальное значение передаточное отношение принимает при $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и $\frac{3\pi}{2}$ рад и определяется по формуле:

$$i_{min} = \frac{1 - e}{1 + e}. \quad (4.95)$$

Влияние эксцентриситета на минимальное и максимальное передаточные отношения представлено на рис. 4.10. С увеличением эксцентриситета максимальное передаточное отношение растёт, а минимальное – уменьшается. При эксцентриситете овальных колёс 0,30 максимальное передаточное отношение 1,84, а минимальное – 0,54. Таким образом, при эксцентриситете овальных колёс 0,30 отношение $\frac{i_{max}}{i_{min}} = 3,5$.

Максимальная величина эксцентриситета, так же как и в эллиптических колёсах, ограничивается вогнутостью центроид овальных колёс.

Эксцентриситет овальных колёс рекомендуется выбирать не более 0,33.

Скорость движения заготовки (вальца) определится по формуле

$$v_s = \frac{\omega_1 S_0}{2\pi} i_k = \frac{\omega_1 S_0}{2\pi} \frac{1 - e^2}{1 + 2e \cos 2\alpha_1 + e^2}. \quad (4.96)$$

Угловая скорость вращения коленчатого вала:

$$\omega_1 = \frac{2\pi n}{60}. \quad (4.97)$$

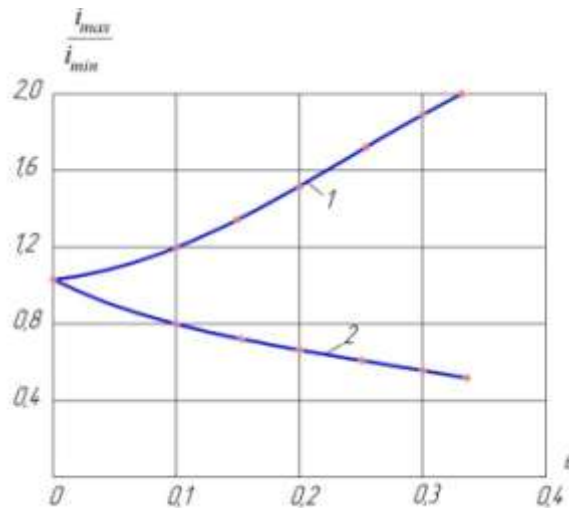


Рис. 4.10. Влияние эксцентриситета e на максимальное и минимальное передаточные отношения: 1 – i_{max} ; 2 – i_{min}

Скорость движения заготовки:

$$v_s = S_0 n \frac{1 - e^2}{1 + 2e \cos 2\alpha_1 + e^2}. \quad (4.98)$$

Интегрируя выражение (4.98) по времени, получим уравнение пути движения заготовки:

$$x = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg}(1 - e^2) \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (4.99)$$

Дифференцируя уравнение по времени, определим ускорение заготовки:

$$x'' = \frac{\omega_1^2 S_0}{2\pi 1000} \frac{(1 - e^2) 4e \sin 2\alpha_1}{(1 + e^2 + 2e \cos 2\alpha_1)^2}. \quad (4.100)$$

Максимальные и минимальные скорости подачи зависят от посылки, величины эксцентриситета овальных колёс и скорости вращения коленчатого вала.

Для определения мгновенной подачи на зуб используется уравнение перемещения заготовки в функции от угла поворота кривошипа:

$$x_1 = \frac{S_0}{2\pi} \alpha_2, \quad (4.101)$$

где α_2 — угол поворота ведомого овального колеса:

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \left[\frac{1 + e}{1 - e} \operatorname{tg} \alpha_1 \right]. \quad (4.102)$$

Перемещение пил без учёта конечной длины шатуна определяется по формуле (4.4).

За начало отсчёта угла поворота кривошипа принимается положение пильной рамки в верхней мёртвой точке. Для согласованной работы механизма подачи с механизмом резания необходимо повернуть овальные колёса на угол $\pi/2$ (90°). Тогда

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \left[\frac{1 + e}{1 - e} \operatorname{tg} \left(\alpha_1 - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (4.103)$$

Подставив выражение (4.103) в формулу (4.101), получим:

$$\alpha_2 = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1 + e}{1 - e} \operatorname{tg} \left(\alpha_1 - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (4.104)$$

Решив систему уравнений (4.4) и (4.104), получим перемещение первого зуба в плоскости пропила:

$$x_1 = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (4.105)$$

Перемещение второго соседнего (нижнего) зуба пилы определится системой уравнений:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg}(\alpha_1 - \pi/2) \right] - t \sin \varphi, \\ y_2 = R(1 - \cos \alpha_1) + t \cos \varphi. \end{cases} \quad (4.106)$$

Уравнение движения соседнего зуба пилы в плоскости пропила имеет вид:

$$x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y+t \cos \varphi}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] - t \sin \varphi. \quad (4.107)$$

Мгновенная подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{2\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y+t \cos \varphi}{R} - \pi/2 \right) \right] \right\} + t \sin \varphi. \quad (4.108)$$

Мгновенная подача на зуб представлена на рис. 4.11. В расчётах принято: шаг зубьев пилы 26 мм, посылка 30 мм/об, ход пильной рамки 500 мм, величина эксцентриситета 0,3, относительный уклон пил 0,55. На рис. 4.11 видно, что максимальная подача на зуб с применением овальных колёс значительно уменьшается по сравнению с непрерывно-равномерной скоростью подачи заготовки.

Путь скобления зубом пилы дна пропила во время холостого хода – это расстояние от нижней мёртвой точки до точки пересечения относительных траекторий движения двух соседних зубьев. Путь скобления зубьями пилы с использованием овальных колёс можно определить следующим образом.

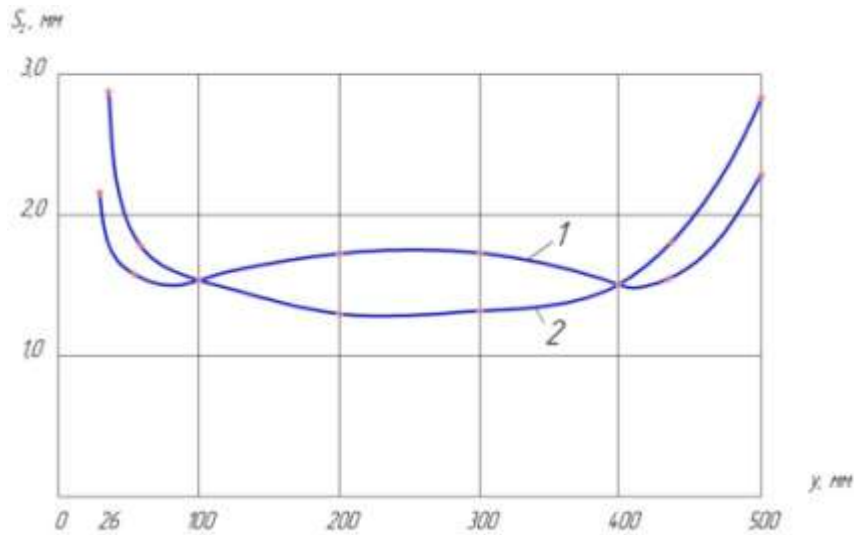


Рис. 4.11. Характер изменения подачи на зуб:
 1 – при непрерывно-переменной скорости подачи с овальными колёсами;
 2 – при непрерывно-равномерной скорости подачи

Траектория относительного движения первого зуба пилы в пропиле за холостой ход (отсчёт от НМТ) выразится уравнением:

$$x_1 = \frac{S_0}{2\pi} \arctg \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (4.109)$$

Уравнение относительного движения верхнего соседнего зуба пилы в пропиле во время холостого хода имеет вид:

$$x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \arctg \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y+t \cos \varphi}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] + t \sin \varphi. \quad (4.110)$$

Для определения пути скобления зубом пилы дна пропила решаем систему уравнений (4.109) и (4.110). Получим:

$$\begin{aligned} \frac{2\pi t \cos \varphi}{S_0} &= \arctg \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \pi/2 \right) \right] - \\ &- \arctg \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y+t \cos \varphi}{R} - \frac{x}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4.111)$$

В формуле (4.111) путь скобления выражен в неявном виде. Его можно определить методом приближённого вычисления или использовать численные методы.

Теоретическая глубина вдавливания зуба пилы в древесину на пути скобления является переменной и зависит от положения пиль-

ной рамки. Глубину вдавливания от 0 до величины шага зубьев пилы (первый участок) и от шага зубьев пилы до величины пути скобления зубом пилы дна пропила (второй участок) следует определять различно.

На первом участке теоретическая глубина вдавливания зуба пилы в древесину определяется расстоянием по направлению скорости подачи между траекторией относительного движения зуба пилы за холостой ход от 0 до t (отсчёт нуля от НМТ) и траекторией относительного движения этого зуба пилы за рабочий ход при перемещении пильной рамки от $(2R - t)$ до $2R$ (отсчёт нуля от ВМТ).

На втором участке теоретическая глубина вдавливания зуба пилы в древесину определится расстоянием по направлению скорости подачи между траекториями относительного движения двух соседних зубьев пилы за холостой ход при перемещении пильной рамки от t до величины равной пути скобления (отсчёт нуля от НМТ).

Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину будет при положении пильной рамки $y = t$ за холостой ход и при $y = 2R - t$ за рабочий ход:

$$x_{вд} = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] - \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1+e}{1-e} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{t-e}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] + \frac{S_0}{2}. \quad (4.112)$$

Применение овальных колёс с эксцентриситетом 0,3 уменьшает теоретическую глубину вдавливания зуба пилы в древесину и тем самым значительно снижает максимальные силы скобления во время холостого хода. Наиболее эффективно применение овальных колёс при распиловке с большими скоростями подач заготовки.

4.10. Механизм подачи с эксцентричными круглыми колесами

Впервые был предложен ВНИИДМАШ [79, 80], причём предлагались эксцентричные круглые шестерни равного диаметра, у которых эксцентриситет равен радиусу начальной окружности. Анализ показывает, что зубчатая передача с парой круглых эксцентричных колёс не может быть реализована. Согласно теории И. И. Артоболевского [33], с круглым эксцентричным колесом может находиться в за-

цеплении другое колесо некруглой формы. Здесь возможны варианты зубчатой передачи с различным передаточным отношением. Для механизма подачи лесопильной рамы наиболее приемлемо передаточное отношение, равное единице или двум. Последний вариант с теоретической точки зрения наиболее полно согласовывает механизм подачи с механизмом резания. Кроме того, ведущей шестерней может быть круглое эксцентричное колесо или, наоборот, некруглое. В первом случае при $i_k = 2$ для согласованной работы механизмов подачи и резания необходимо ведущему круглому колесу сообщить число оборотов в два раза больше, чем число оборотов коленчатого вала. Во втором случае число оборотов ведущей некруглой шестерни должно быть равно числу оборотов коленчатого вала лесопильной рамы.

Когда ведущим является круглое эксцентричное колесо, передаточное отношение данного зацепления изменяется по следующему закону:

$$i_k = \frac{m}{m - \sqrt{1 - e^2 \sin^2 2\alpha} + e \cos 2\alpha} - 1, \quad (4.113)$$

где m — относительное межцентровое расстояние;

$$m = (n - 1) - \frac{(n + 1)(n - 2)e^2}{4n}, \quad (4.114)$$

n — число оборотов круглого эксцентричного колеса, приходящихся на один оборот сопряжённого колеса, мин^{-1} ;

α — угол поворота ведущего колеса, рад;

e — относительный эксцентриситет, $e = \frac{a}{r}$;

a — абсолютный эксцентриситет, мм;

r — радиус круглого колеса, мм.

Расстояние между осями вращения центра $A = rm$.

Экстремальные значения передаточных отношений определяются по формулам:

$$i_{max} = \frac{1 + e}{m - (1 + e)}, \quad (4.115)$$

$$i_{min} = \frac{1 - e}{m - (1 + e)}. \quad (4.116)$$

Влияние относительного эксцентриситета круглого колеса на максимальное и минимальное передаточные отношения показано на рис. 4.12. С увеличением эксцентриситета максимальное передаточное отношение зубчатой передачи возрастает от 0,5 по кривой с выпуклостью, направленной вниз, и достигает максимума, равного 2, при $e = 1$. Минимальное передаточное отношение уменьшается от 0,5 и при $e = 1$ равно 0. Величина i_{max}/i_{min} изменяется от 1 до ∞ .

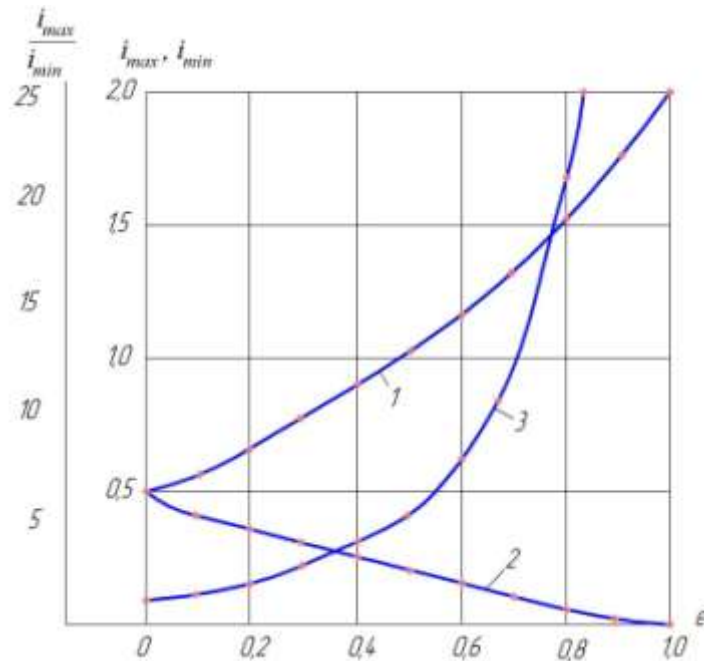


Рис. 4.12. Влияние эксцентриситета e на передаточные отношения при ведущем круглом колесе: 1— i_{max} ; 2— i_{min} ; 3— i_{max}/i_{min}

Скорость вращения подающих валцов лесопильной рамы определится по формуле:

$$\vartheta_s = \frac{\omega_1 S_0}{2000\pi} \left(\frac{m}{m - \sqrt{1 - e^2 \sin^2 2\alpha} + e \cos 2\alpha} - 1 \right), \quad (4.117)$$

где ω_1 — угловая скорость вращения коленчатого вала, рад.

Интегрируя выражение (4.117), получим уравнение пути перемещения заготовки (вальца):

$$x_{\delta} = \frac{S_0}{2\pi} \int_0^{\alpha} \left(\frac{m}{m - \sqrt{1 - e^2 \sin^2 2\alpha} + e \cos 2\alpha} - 1 \right) d\alpha. \quad (4.118)$$

Дифференцируя выражение (4.117), получим формулу для определения ускорения движения заготовки:

$$\vartheta'_s = -\frac{\omega_1 S_0 m}{2000\pi} \frac{\frac{2e^2 \sin 2\alpha (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 2\alpha}} - e \sin 2\alpha}{(m - \sqrt{1-e^2 \sin^2 2\alpha} + e \cos 2\alpha)^2}. \quad (4.119)$$

При ведущем некруглом колесе передаточное отношение зубчатой передачи определится по формуле:

$$i_k = \frac{m}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 [2(\alpha + \pi)]} - e \cos [2(\alpha + \pi)]} - 1. \quad (4.120)$$

Экстремальные значения передаточных отношений для случая, когда ведущим является некруглое колесо, а ведомым – круглое эксцентричное колесо, определяются по формулам:

$$i_{max} = \frac{m - (1 + e)}{1 - e}, \quad (4.121)$$

$$i_{min} = \frac{m - (1 + e)}{1 + e}. \quad (4.122)$$

Влияние эксцентриситета на экстремальные передаточные отношения представлено на рис. 4.13. Максимальное передаточное отношение с увеличением эксцентриситета возрастает от 2 до ∞ , а минимальное при этом уменьшается от 2 до 0,5. Таким образом, величина i_{max}/i_{min} с увеличением эксцентриситета возрастает от 1 до ∞ , т. е. так же, как и в первом случае.

Теоретическая скорость перемещения заготовки в вальцах определится по формуле:

$$\vartheta_s = \frac{\omega_1 S_0}{2000\pi} \left[\frac{m}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 2(\alpha + \pi)} - e \cos 2(\alpha + \pi)} - 1 \right]. \quad (4.123)$$

Перемещение заготовки определится по формуле:

$$x_{\delta} = \frac{S_0}{2\pi} \int_0^{\alpha} \left[\frac{m}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 2(\alpha + \pi)} - e \cos 2(\alpha + \pi)} - 1 \right] d\alpha. \quad (4.124)$$

Ускорение при перемещении заготовки можно определить по формуле:

$$x_6'' = -\frac{\omega_1 S_0 m}{2000\pi} \frac{2e^2 \sin 2(\alpha + \pi) [\cos^2(\alpha + \pi) - \sin^2(\alpha + \pi)] + e \sin 2\alpha}{\left[\sqrt{1 - e^2 \sin^2 2(\alpha + \pi)} - e \cos 2(\alpha + \pi) \right]^2}. \quad (4.125)$$

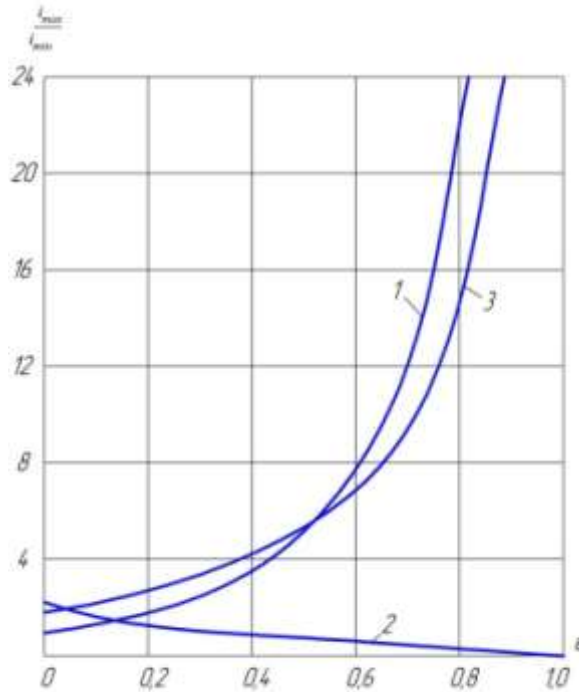


Рис. 4.13. Влияние эксцентриситета e на передаточные отношения при ведущем некруглом колесе: 1 — i_{max} ; 2 — i_{min} ; 3 — i_{max}/i_{min}

При некруглом ведущем колесе ускорение при перемещении заготовки несколько меньше, хотя закономерности при этом сохраняются. Анализ показывает, что предпочтение следует отдать ведущему некруглому колесу. В этом случае число оборотов ведущего колеса равно числу оборотов коленчатого вала.

Подача на зуб при ведущем некруглом эксцентричном колесе определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{2\pi} (\alpha_2' - \alpha_2'') + t \sin \varphi, \quad (4.126)$$

где α_2' — угол поворота ведомого колеса для первого зуба пилы;

$$\alpha_2' = \int_0^{\alpha_1'} \left(\frac{m}{m - \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \alpha_1'} + e \cos \alpha_1'} - 1 \right) d\alpha_1', \quad (4.127)$$

α_1' — угол поворота ведущего колеса, который в два раза больше, чем число оборотов коленчатого вала:

$$\alpha_1' = 2 \arccos \frac{R-y}{R}, \quad (4.128)$$

α_2'' — угол поворота ведомого колеса для нижнего соседнего зуба пилы:

$$\alpha_2'' = \int_0^{\alpha_1''} \left(\frac{m}{m - \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \alpha_1''} + e \cos \alpha_1''} - 1 \right) d\alpha_1'', \quad (4.129)$$

α_1'' — угол поворота ведущего колеса для этого зуба пилы:

$$\alpha_1'' = 2 \arccos \frac{R-y+t}{R}. \quad (4.130)$$

Угол поворота ведомого колеса через элементарные функции выразить нельзя. Поэтому эти уравнения решают на ЭВМ или используют графоаналитический метод. Для различных значений относительного эксцентриситета изменение подачи на зуб за рабочий ход представлено на рис. 4.14.

При относительном эксцентриситете 0,4–0,5 подача на зуб более равномерна. Наиболее оптимальным эксцентриситетом, при котором получается более равномерная подача на зуб, является 0,5.

При ведущем некруглом колесе определение подачи на зуб производится аналогично, только угол поворота ведомого колеса для первого зуба пилы определится по выражению:

$$\alpha_2' = \int_0^{\alpha_1'} \left(\frac{m}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 2(\alpha + \pi)} - e \cos 2(\alpha + \pi)} - 1 \right) d\alpha_1', \quad (4.131)$$

где $\alpha_1' = \arccos \frac{R-y}{R}$.

Угол поворота ведомого колеса для нижнего соседнего зуба пилы определится по формуле:

$$\alpha_2'' = \int_0^{\alpha_1''} \left(\frac{m}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 2(\alpha + \pi)} - e \cos 2(\alpha + \pi)} - 1 \right) d\alpha_1'', \quad (4.132)$$

где $\alpha_1'' = \arccos \frac{R-y+t}{R}$.

Характер изменения подачи на зуб за рабочий ход при ведущем некруглом колесе представлен на рис. 4.14б. Оптимальный

эксцентриситет, при котором получается более равномерная подача на зуб, равен 0,5.

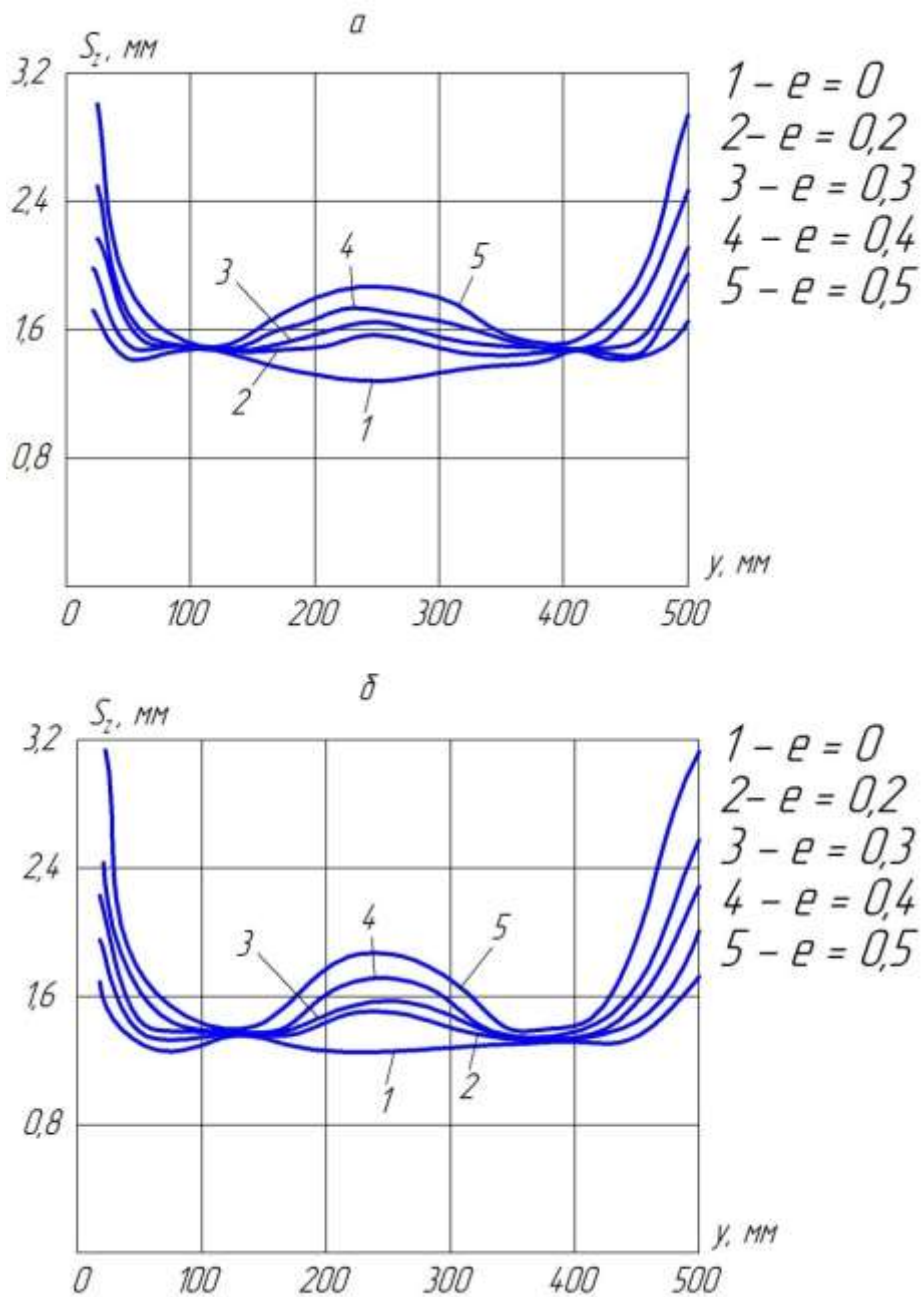


Рис. 4.14. Характер изменения подачи на зуб: *a* – при ведущем круглом колесе, *б* – при ведущем некруглом колесе

Максимальную глубину вдавливания зубьев пилы в древесину в начале холостого хода можно определить по формуле:

$$x_{\theta\delta} = 2S'_{z \max} - 2t \sin \varphi,$$

где $S'_{z \max}$ – максимальная подача на зуб в конце рабочего хода.

Расчёты показывают, что при непрерывно-переменной скорости подачи с одним эксцентричным колесом с эксцентриситетом 0,5 для хода пильной рамки 500 мм теоретическая максимальная глубина вдавливания зубьев пилы в древесину в начале холостого хода уменьшается почти в два раза. Таким образом, использование непрерывно-переменной скорости подачи с эксцентричным круглым колесом значительно улучшает кинематику процесса пиления древесины на лесопильных рамах, способствует повышению их производительности, облегчает условия работы рамных пил и улучшает качество пиломатериалов.

4.11. Механизм подачи с шарнирами Гука

Механизм Гука позволяет передавать вращательное движение от одного вала к другому с пересекающимися под углом γ осями [33, 102].

Средняя угловая скорость вращения выходного вала механизма с шарнирами Гука $\omega_{2\text{ ср}}$ равна средней угловой скорости вращения входного вала $\omega_{1\text{ ср}}$, так как за время одного оборота входной и выходной валы совершают один оборот. Отношение средних угловых скоростей входных и выходных валов универсального шарнира всегда равно единице.

Передаточное отношение универсального механизма с шарнирами Гука зависит от угла расположения входного и выходного валов γ . Наибольшая угловая скорость выходного вала наблюдается при углах α , равных 0 и 2π рад:

$$\omega_{2\text{ max}} = \omega_1 \frac{1}{\cos \gamma}. \quad (4.133)$$

Передаточное отношение при этом $i_{\text{max}} = \frac{1}{\cos \gamma}$.

Наименьшая угловая скорость выходного вала при углах (α), равных $\pi/2$ и $3\pi/2$ рад, определяется так:

$$\omega_{2\text{ min}} = \omega_1 \cos \gamma. \quad (4.134)$$

Передаточное отношение при этом $i_{\text{min}} = \cos \gamma$.

Таким образом, передаточное отношение у механизма с шарнирами Гука изменяется в пределах от $1/\cos \gamma$ до $\cos \gamma$. Теоретически

угол γ может доходить до $\pi/2$, однако практически он не достигает этого значения, так как звенья будут задевать друг за друга. Поэтому по конструктивным соображениям угол γ не может быть больше $\pi/3$ и чаще всего ограничивается $\pi/4$.

В универсальном шарнире, если валы в нём расположены под углом γ , угол поворота выходного вала определится по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{\cos \gamma} \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (4.135)$$

где α_1 – угол поворота входного вала, рад;

α_2 – угол поворота выходного вала, рад.

Передаточное отношение этого механизма определяется по формуле:

$$i_{21} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\cos \gamma}{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \gamma}. \quad (4.136)$$

Из формулы (4.136) видно, что при постоянной угловой скорости вращения входного вала ω_1 выходной вал получает переменную скорость вращения ω_2 , изменяющуюся с изменением угла α_1 . Данное свойство позволяет применять шарнир Гука в качестве механизма согласования скорости резания и подачи на лесопильных рамах.

$$\text{При } \alpha_1 = \frac{\pi}{4}, \quad \frac{i_{21 \max}}{i_{21 \min}} = \frac{\omega_{1 \max}}{\omega_{2 \min}} = 2.$$

Такое максимально возможное отношение скоростей вращения выходного вала при использовании одного шарнира Гука для согласования скоростей резания и подачи лесопильных рам сравнительно мало. С целью увеличения неравномерности вращения выходного вала предлагается использовать совместно два и более шарниров Гука, причём вилки промежуточных валов, соединяющих эти шарниры, располагаются не в одной, а во взаимно перпендикулярных плоскостях [102].

Если вилки промежуточного вала двух шарниров Гука расположены в одной плоскости, то

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_1 &= \cos \gamma \operatorname{tg} \alpha_2, \\ \operatorname{tg} \alpha_3 &= \cos \gamma \operatorname{tg} \alpha_2, \end{aligned}$$

откуда $\alpha_1 = \alpha_3$ и, следовательно, $\omega_1 = \omega_3$.

В этом случае угловые скорости входного и выходного валов равны.

Если вилки промежуточного вала двух шарниров Гука лежат в плоскостях, расположенных под углом $\pi/2$, то

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_1 &= \cos \gamma \operatorname{tg} \alpha_2, \\ \operatorname{tg}(\alpha_3 + 90) &= \cos \gamma \operatorname{tg}(\alpha_2 + 90). \end{aligned}$$

Из последнего равенства находим:

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\cos \gamma}.$$

Подставляя в последнее выражение значение $\operatorname{tg} \alpha_2$, получим:

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\cos^2 \gamma}. \quad (4.137)$$

Таким образом, неравномерность вращения выходного вала возрастает. При соединении в ряд нескольких шарниров Гука формула (4.137) примет вид:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{вых}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\cos^k \gamma}. \quad (4.138)$$

где k – число соединённых в ряд шарниров Гука.

В этом случае неравномерность вращения последующих валов будет увеличиваться, а точность согласования скоростей движения рамных пил и заготовки будет повышаться. Это окажет положительное влияние на условия работы рамных пил, качество пиломатериалов и производительность лесопильных рам.

Передаточное отношение соединённых между собой нескольких шарниров Гука зависит от их числа и угла γ .

Передаточное отношение двух шарниров Гука определится из произведения отношений каждого шарнира:

$$i_{31} = \frac{\omega_3}{\omega_1} = i_{21} \cdot i_{32} = \frac{\omega_3}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (4.139)$$

Подставив в формулу (4.136) передаточные отношения шарниров, получим передаточное отношение двух шарниров:

$$i_{31} = \frac{\cos^2 \gamma}{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \alpha_1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \gamma \cos^2 \alpha_1}. \quad (4.140)$$

Максимальное передаточное отношение двух шарниров Гука:

$$i_{31 \max} = \frac{1}{\cos^2 \gamma}.$$

Минимальное –

$$i_{31 \min} = \cos^2 \gamma.$$

Тогда отношение максимальной и минимальной угловых скоростей выходного вала определится по выражению:

$$m = \frac{\omega_{31 \max}}{\omega_{31 \min}} = \frac{1}{\cos^4 \gamma}.$$

Передаточное отношение трёх шарниров Гука:

$$i_{41} = \frac{\omega_4}{\omega_1} = i_{31} \cdot i_{43}. \quad (4.141)$$

Тогда передаточное отношение трёх шарниров определится по формуле:

$$i_{41} = \frac{\cos^3 \gamma}{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \alpha_1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \gamma \cos^2 \alpha_1 - \sin^2 \gamma \cos^4 \gamma \cos^2 \alpha_1}. \quad (4.142)$$

Максимальное передаточное отношение трёх шарниров Гука:

$$i_{41 \max} = \frac{1}{\cos^3 \gamma}.$$

Минимальное передаточное отношение трёх шарниров Гука:

$$i_{41 \min} = \cos^3 \gamma.$$

Тогда отношение максимальной и минимальной угловых скоростей движения выходного вала:

$$m = \frac{\omega_{4 \max}}{\omega_{4 \min}} = \frac{i_{4 \max}}{i_{4 \min}} = \frac{1}{\cos^6 \gamma}.$$

Аналогично рассуждая, можно получить формулы для определения передаточных отношений при большем числе шарниров Гука.

Максимальное и минимальное передаточные отношения при количестве шарниров k определяются по формуле:

$$i_{max} = \frac{1}{\cos^k \gamma}, \quad i_{min} = \cos^k \gamma.$$

Отношение экстремальных угловых скоростей:

$$\frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} = \frac{1}{\cos^{2k} \gamma}. \quad (4.143)$$

Таким образом, неравномерность вращения выходного вала зависит от числа шарниров Гука, используемых в механизме подачи, и угла между осями валов универсальных шарниров. Влияние числа шарниров при различных углах γ на неравномерность вращения выходного вала представлено на рис. 4.15. Из этого графика видно, что от числа шарниров неравномерность вращения выходного вала изменяется по закону параболы. Существенное влияние оказывает также угол γ . Так, при $\gamma = \pi/6 = 30^\circ$ и $k = 2$ отношение экстремальных значений угловых скоростей выходного вала равно 2,0, а при $\gamma = 45^\circ$ и 60° , при сохранении числа шарниров прежним, отношение экстремальных значений угловых скоростей соответственно 4 и 16. Следовательно, по конструктивным соображениям угол γ необходимо выбирать возможно максимальный.

Оптимальный выбор k и γ окончательно определяется исходя из условия постоянства отношений скоростей движения пил и подачи.

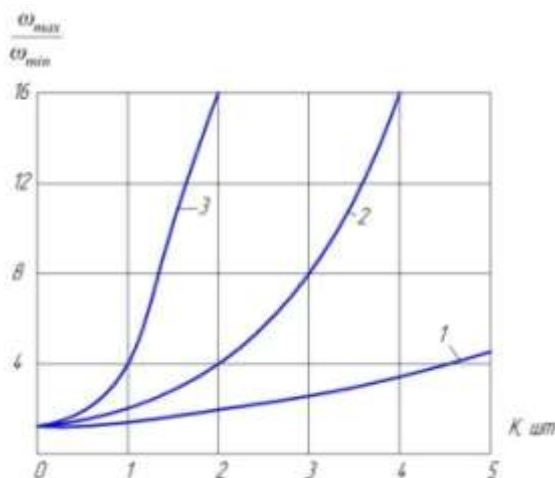


Рис. 4.15. Влияние числа шарниров Гука на передаточные отношения:
1 – при $\gamma = \pi/6$ (30°); 2 – при $\gamma = \pi/4$ (45°); 3 – при $\gamma = \pi/3$ (60°)

Связь между углами поворота ведомого и ведущего валов определится формулой академика Е. А. Чудакова [33], позволяющей выявить влияние угла между вилками на промежуточном валу двух шарниров Гука:

$$tg \varphi_3 = \frac{tg \alpha_1 \cos \gamma (1 + tg \theta)}{\cos \gamma (1 + tg^2 \theta \cos^2 \gamma) - \sin^2 \gamma tg \alpha tg \theta}, \quad (4.144)$$

где θ – угол между осями вилок промежуточного вала.

Придадим уравнению (4.144) другой вид, умножив числитель и знаменатель на $ctg^2 \theta$:

$$tg \varphi_3 = \frac{tg \alpha_1 \cos \gamma (ctg^2 \theta - 1)}{\cos \gamma (ctg^2 \theta + \cos^2 \gamma) - \sin^2 \gamma tg \alpha ctg \theta}. \quad (4.145)$$

Если в формуле (4.145) взять угол между вилками $\gamma = \pi/2$, то получим:

$$tg \varphi_3 = \frac{1}{\cos^2 \gamma} tg \varphi_1, \quad (4.146)$$

откуда можно определить угол поворота выходного вала механизма подачи лесопильной рамы с двумя шарнирами Гука по формуле:

$$\varphi_3 = arctg \left[\frac{1}{\cos^2 \gamma} tg \alpha_1 \right].$$

Скорость движения вальца определится по формуле:

$$\vartheta_s = \frac{\omega_g R_g i_k}{1000}, \quad (4.147)$$

где ω_g – угловая скорость вращения подающих вальцов;

R_g – радиус подающего вальца.

Передаточное отношение корректирующего механизма при $k = 2$ определяется по формуле (4.140). Подставив в формулу (4.147) выражение (4.140), получим:

$$\vartheta_s = \frac{S_0 n}{1000} \cdot \frac{\cos \gamma}{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \alpha_1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \gamma \cos^2 \alpha_1}. \quad (4.148)$$

Интегрируя по времени выражение (4.148), получим уравнение движения заготовки:

$$x_{\delta} = \frac{S_0 \cos^2 \alpha_1}{2\pi 1000} \int_0^{\alpha_1} \frac{\alpha \alpha_1}{1 - \cos^2 \alpha_1 (\sin^2 \gamma - \sin^2 \gamma \cos^2 \gamma)}.$$

При $\gamma = \pi/4$ оно примет вид:

$$x_{\delta} = \frac{S_0}{2\pi 1000} \operatorname{arctg}[2 \operatorname{tg} \alpha_1]. \quad (4.149)$$

Дифференцируя уравнение скорости движения заготовки (4.148) по времени, определим ускорение заготовки:

$$x_{\delta}'' = -\frac{0,375 \omega^2 S_0}{2\pi 1000} \cdot \frac{\sin 2\alpha}{(1 - 0,75 \cos^2 \alpha_1)}. \quad (4.150)$$

Анализ показывает, что скорость движения подающего вальца за один оборот коленчатого вала имеет два максимума и два минимума, то есть согласуется с движением пильной рамки. Однако относительно среднего значения максимальная скорость движения вальца не симметрична. Величина максимальных и минимальных значений скоростей подач и ускорений движения вальца зависит от величины посылки, числа шарниров Гука, угловой скорости вращения коленчатого вала, угла расположения валов в шарнирах Гука. Ускорение подающих вальцов в конце рабочего и в начале холостого ходов изменяется более плавно, что благоприятно влияет на взаимодействие зубьев рамных пил с бревном в это время.

Относительную траекторию движения зуба пилы в пропиле определяем решением системы уравнений движения заготовки

$$x = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg}[i_k \operatorname{tg} \alpha_1]$$

и движения пил, определяемого по формуле (4.4).

За начало отсчёта угла поворота кривошипа принимается положение пильной рамки в верхней мёртвой точке. Для согласования работы механизмов резания и подачи необходимо шарнир Гука повернуть на угол $\pi/2$.

Решая систему этих уравнений, получим относительное перемещение первого зуба пилы в пропиле:

$$x_1 = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1}{\cos^k \gamma} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (4.151)$$

Перемещение в пропиле нижнего соседнего зуба пилы выразим в параметрической форме:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1}{\cos^k \gamma} \operatorname{tg} \left(\alpha_1 - \frac{\pi}{2} \right) \right] - t \sin \varphi, \\ y_2 = R(1 - \cos \alpha_1) + t \cos \varphi. \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений и принимая $\cos \varphi = 1$, получим:

$$x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{1}{\cos^k \gamma} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y+t}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] - t \sin \varphi.$$

Подача на зуб определится по формуле:

$$\begin{aligned} S_z = \frac{S_0}{2\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \left[\frac{1}{\cos^k \gamma} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \left[\frac{1}{\cos^k \gamma} \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y+t}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\} + t \sin \varphi. \end{aligned} \quad (4.152)$$

Изменение подачи на зуб во время рабочего хода показано на рис. 4.16. Для построения графиков в расчётах было принято: шаг зубьев пилы 26 мм; посылка 30 мм/об, ход пил $H = 500$ мм.

На рис. 4.16 видно, что подача на зуб во время рабочего хода наиболее равномерна при двух шарнирах Гука и угле между осями валов $\gamma = 45^\circ$. Этот вариант и рассматривается нами в дальнейшем.

Глубина вдавливания зубьев пилы в древесину на первом участке пути скобления определяется по формуле:

$$x_{\text{вд}} = x_x - x_p + \frac{S_0}{2},$$

где x_x — траектория движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода;

x_p — траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода.

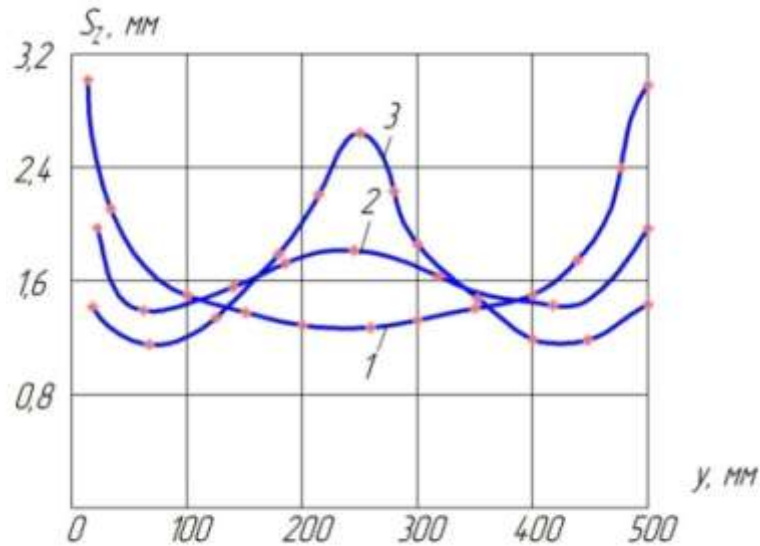


Рис. 4.16. Характер изменения подачи на зуб:

1 – при непрерывно-равномерной скорости подачи; 2 – с шарнирами Гука при $k = 2$ и $\gamma = \pi/4$ (45°); 3 – с шарнирами Гука при $k = 3$ и $\gamma = \pi/3$ (60°)

Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину по время холостого хода наблюдается при $y = t$ и определяется по формуле:

$$x_{\text{год}} = \frac{S_0}{2\pi} \left\{ \arctg \left[2 \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] - \arctg \left[2 \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{t-R}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\} + S_0. \quad (4.153)$$

Расчёты показывают, что глубина вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода с использованием двух шарниров Гука с $\gamma = \pi/4$ рад уменьшается в 1,95 раза.

Определим путь скобления зубом пилы дна пропила. Траектория относительного движения зуба пилы в пропиле за холостой ход при $k = 2$ и $\gamma = 45^\circ$ имеет вид:

$$x_1 = \frac{S_0}{2\pi} \arctg \left[2 \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right].$$

Траектория относительного движения верхнего зуба пилы в пропиле за холостой ход имеет вид:

$$x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \arctg \left[2 \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R-y+t}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] + t \sin \varphi.$$

Для определения пути скобления зубом пилы дна пропила во время холостого хода решаем систему этих уравнений:

$$\frac{2\pi t \sin \varphi}{S_0} = \operatorname{arctg} \left[2 \operatorname{tg} \left(\operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right] - \operatorname{arctg} \left[2 \operatorname{tg} \left(\operatorname{arccos} \frac{R-y+t}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (4.154)$$

Выражение (4.154) представляет собой уравнение, в котором путь скобления зубом пилы дна пропила представлен в неявном виде. Указанное уравнение решается методом приближённого вычисления.

4.12. Основные выводы

1. Перемещение заготовки с переменной скоростью с циклом за рабочий ход с опережением позволяет исключить скобление зубьями пилы дна пропила. Однако в начале рабочего хода в этом случае максимальное значение подачи на зуб больше его среднего значения в 2,8 раза. Это отрицательно влияет на силовые и качественные показатели процесса.

2. При перемещении заготовки с переменной скоростью с циклом за холостой ход с запаздыванием исключается скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода, но не обеспечивается срезание стружки равномерной толщины во время рабочего хода. Максимальное значение подачи на зуб в два раза больше его среднего значения.

3. При осуществлении движения заготовки с переменной скоростью с циклом за рабочий и холостой ходы исключить скобление зубьями пилы дна пропила невозможно. При использовании опережения или запаздывания подачи заготовки максимальная глубина вдавливания зубьев пилы в древесину в начале холостого хода возрастает, а неравномерность толщины срезаемой стружки во время рабочего хода увеличивается. Максимальное значение подачи на зуб возрастает с увеличением угла опережения или запаздывания.

4. При осуществлении движения заготовки с переменной скоростью с циклом за оборот скобление зубьями пилы дна пропила исключить нельзя. Кроме того, в начале рабочего хода подача на зуб имеет максимум, значение которого в 2,46 раза больше средней подачи на зуб.

5. Предлагаемые ранее механизмы подачи лесопильных рам с переменной скоростью с использованием некруглых колёс, шарниров Гука, кулисно-дифференциальных и кривошипно-шатунных механизмов не обеспечивают срезание слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода равномерной толщины и не позволяют исключить скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода. Следовательно, в таком варианте предлагаемые ранее известные способы пиления древесины рамными пилами с переменной скоростью подачи экономически малоэффективны.

6. Как наиболее благоприятные механизмы подачи с переменной скоростью можно отметить механизмы с использованием некруглых колёс и шарниров Гука. Однако следует подчеркнуть, что и эти отмеченные механизмы подачи с переменной скоростью хотя и облегчают условия пиления, но не исключают скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода пил. Во время рабочего хода пил также не обеспечивается срезание зубом пилы слоя древесины равномерной толщины.

7. Таким образом, ни один из указанных и рассмотренных выше механизмов перемещения заготовки с переменной скоростью на лесопильных рамах не удовлетворяет современным требованиям.

8. Следует также отметить, что все исследователи искали и рассматривали механизмы с переменной скоростью подачи, полагая, что они могут обеспечить возможность создать вполне благоприятные условия работы рамных пил. Однако эти надежды не оправдались.

9. Анализ механизмов подачи с переменной скоростью позволяет сделать вывод, что необходимо, прежде всего, теоретически (аналитически) разработать математические модели, обеспечивающие благоприятные условия пиления, а затем заниматься проектированием (конструированием) таких механизмов подачи.

5. РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРИ РАВНОМЕРНОЙ СКОРОСТИ ПОДАЧИ И КАЧАНИИ ПИЛ

5.1. Движение пил по эллиптической траектории

В промышленности было предложено большое количество отводящих механизмов с эллиптической траекторией перемещения пильной рамки, так как такой способ перемещения пил наиболее прост в осуществлении. К тому же полагали, что такой способ пиления древесины на лесопильных рамах с равномерной скоростью подачи удовлетворяет всем требованиям. Лесопильные рамы с эллиптической траекторией движения пильной рамки были изучены раньше всех других видов качания пил [57, 65, 79, 85]. Однако испытания и исследования лесопильных рам с таким способом пиления показали, что ожидаемого положительного эффекта не получается. Раскрыть особенности такого способа пиления заготовки на лесопильных рамах можно прежде всего при анализе кинематики процесса.

На лесопильных рамах с эллиптической траекторией движения пильной рамки подача на зуб в общем случае определяется по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{2\pi} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) + \frac{\xi S_0 t}{H} + A \left(\operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} - \operatorname{sinarccos} \frac{R+t-y}{R} \right). \quad (5.1)$$

Основным параметром отводящих механизмов является амплитуда качания (A). С увеличением амплитуды качания пильной рамки скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода уменьшается, и может наступить такой момент, когда оно полностью исключится. В то же время с увеличением амплитуды качания пильной рамки возрастают силы инерции. Экспериментальные исследования [79] показали, что с точки зрения удельной работы резания оптимальная амплитуда качания составляет четвертую часть посылки. В этом случае мгновенная подача на зуб будет изменяться по кривой 2 (см. рис. 5.1).

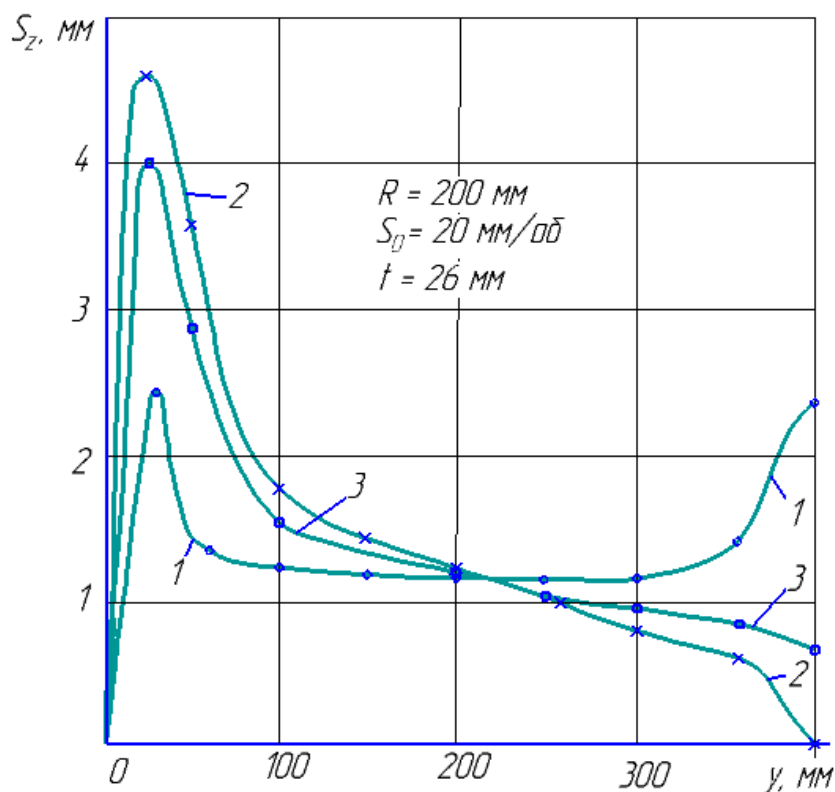


Рис. 5.1. Характер изменения подачи на зуб во время рабочего хода при различных значениях размаха качания пил:
 1 – $A = 0$; 2 – $A = S_0/2$; 3 – $A = 6,67$ мм

Анализируя кривую 2, можно сделать вывод, что такая величина амплитуды не позволяет получить срезание стружки равномерной толщины, так как максимальное значение подачи на зуб в начале рабочего хода возрастает по сравнению с пилением без отводящего механизма (кривая 1). В этом случае подача на зуб в конце рабочего хода принимает нулевое значение. Величину увеличения максимальной подачи на зуб в начале рабочего хода можно определить по выражению [12]:

$$K = \frac{2\pi A \sin \arccos \frac{R-t}{R}}{S_0 \arccos \frac{R-t}{R} + \frac{\xi S_0 t}{2R}} \quad (5.2)$$

Из этой формулы можно сделать вывод, что амплитуда качания пильной рамки должна быть оптимальной. Следует отметить, что при малых значениях амплитуды качания пил может наблюдаться скобление зубьями пил дна пропила, что явно нежелательно. Поэтому оптимальное (минимальное) значение амплитуды качания пил определяем из условия отсутствия скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода. Определение оптимальной (ми-

нимальной) амплитуды качания пил, при которой будет отсутствовать скобление зубьями пилы dna пропила, производится следующим образом. Траектория относительного движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода будет иметь вид (начало координат в ВМТ):

$$x_p = A \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} - \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R}. \quad (5.3)$$

Траектория относительного движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода будет иметь вид (начало координат в НМТ):

$$x_x = \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} - A \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R}. \quad (5.4)$$

Уравнения (5.3) и (5.4) составлены для различных начал координат. Для приведения уравнения (5.3) к началу координат уравнения (5.4) необходимо в уравнение (5.3) сделать следующие подстановки:

$$y' = 2R - y \quad \text{и} \quad x_p = x_x + \frac{S_0}{2}.$$

После соответствующих преобразований траектория относительного движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода при начале координат в НМТ выразится так:

$$x_p = A \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} + \frac{S_0}{2} - \frac{S_0}{2\pi} \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R}. \quad (5.5)$$

Скобление зубьями пилы dna пропила будет отсутствовать при выполнении условия:

$$x_x - x_p + \frac{S_0}{2} = 0.$$

Подставив в последнее выражение формулы (5.4) и (5.5), можно определить минимальную (оптимальную) величину амплитуды качания пил по формуле:

$$A = \frac{S_0 \operatorname{arccos} \frac{R-t}{R}}{2\pi \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R}}. \quad (5.6)$$

Для минимальной амплитуды качания изменение подачи на зуб во время рабочего хода происходит по кривой 3 (см. рис. 5.1).

Формула (5.6) показывает, что амплитуда качания пильной рамки зависит от посылки, радиуса кривошипа и шага зубьев пилы. С увеличением посылки минимальная величина амплитуды качания пильной рамки возрастает по прямолинейному закону. Увеличение радиуса кривошипа вызывает некоторое уменьшение минимальной амплитуды качания. При увеличении шага зубьев пилы минимальная величина амплитуды качания незначительно возрастает. Анализ показывает, что минимальная величина амплитуды качания изменяется в среднем в пределах $(0,15 \dots 0,17) S_0$.

При анализе кинематики и динамики процесса пиления древесины на лесопильных рамах часто рассматриваются оценочные факторы не при постоянной посылке, а при постоянной средней подаче на зуб, так как величина посылки зависит не только от средней подачи на зуб, но и от хода пильной рамки, а также шага зубьев пилы и уклона пил. В этом случае при увеличении средней подачи на зуб минимальная амплитуда качания пильной рамки возрастает по прямолинейному закону и составляет для принятых расчетных данных $2,56 S_{z\text{ cp}}$. С увеличением радиуса кривошипа минимальная амплитуда качания возрастает, а при увеличении шага зубьев пилы минимальная амплитуда существенно снижается. Это можно проследить по формуле, если в равенство (5.6) подставить формулу для определения посылки. Тогда амплитуда качания пил определится по следующей формуле:

$$A = \frac{S_{z\text{ cp}} R \arccos \frac{R-t}{R}}{\pi t \sin \arccos \frac{R-t}{R}} \quad (5.7)$$

Подставив в формулу (5.2) выражение (5.7), получим:

$$K = \frac{\arccos \frac{R-t}{R}}{\arccos \frac{R-t}{R} + \frac{t}{4R}} \quad (5.2a)$$

Формула (5.2a) показывает, что величина « K » при любых практических значениях параметров R и t больше нуля. Следовательно, при качании пильной рамки по эллиптической траектории максимальное значение подачи на зуб в начале рабочего хода будет

возрастать по сравнению с пилением древесины на лесопильных рамах без отводящего механизма. С увеличением шага зубьев пилы максимальная подача на зуб уменьшается (рис. 5.2а), а с увеличением радиуса кривошипа – возрастает (рис. 5.2б).

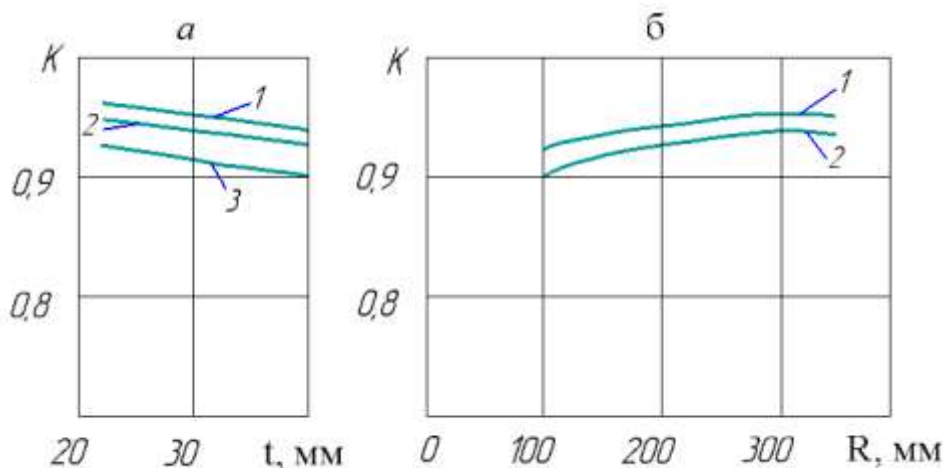


Рис. 5.2. Изменение максимального значения подачи на зуб в зависимости от шага зубьев пилы (а) – (при 1 – $R = 350$ мм; 2 – $R = 200$ мм; 3 – $R = 100$ мм) и радиуса кривошипа (б) – (при 1 – $t = 22$ мм; 2 – $t = 40$ мм)

Анализ показывает, что величина коэффициента K находится в пределах $0,9 \dots 1,0$. Таким образом, с учетом потери рабочего хода максимальная подача на зуб в начале рабочего хода возрастает почти в два раза. Это обстоятельство оказывает отрицательное влияние на качество продукции и на максимальные значения силы резания.

При качании пил поперечное перемещение, скорость и ускорение пильной рамки определяются по формулам:

$$x_k = A \sin \alpha, \quad (5.8)$$

$$x'_k = A \omega \cos \alpha, \quad (5.9)$$

$$x''_k = -A \omega^2 \sin \alpha. \quad (5.10)$$

Таким образом, формула (5.6) показывает, что амплитуда качания пильной рамки должна регулироваться с изменением посылки, то есть необходимо предусматривать специальное устройство для согласования посылки и амплитуды качания. Это усложняет конструкцию лесопильной рамы. Возникает вопрос: каким образом будет изменяться кинематика пиления, если амплитуда качания

пильной рамки на лесопильной раме не регулируется? При проектировании таких лесопильных рам необходимо, чтобы амплитуда качания была выбрана прежде всего с таким расчетом, чтобы скобление зубьями пилы дна пропила отсутствовало на всех режимах пиления. Если принять для одноэтажных лесопильных рам максимальную посылку равной 40 мм/об, то для шага зубьев 26 мм амплитуда качания пильной рамки должна быть 6,67 мм. Для таких лесопильных рам подача на зуб во время рабочего хода будет изменяться для всех величин посылок по сложным кривым (рис. 5.3).

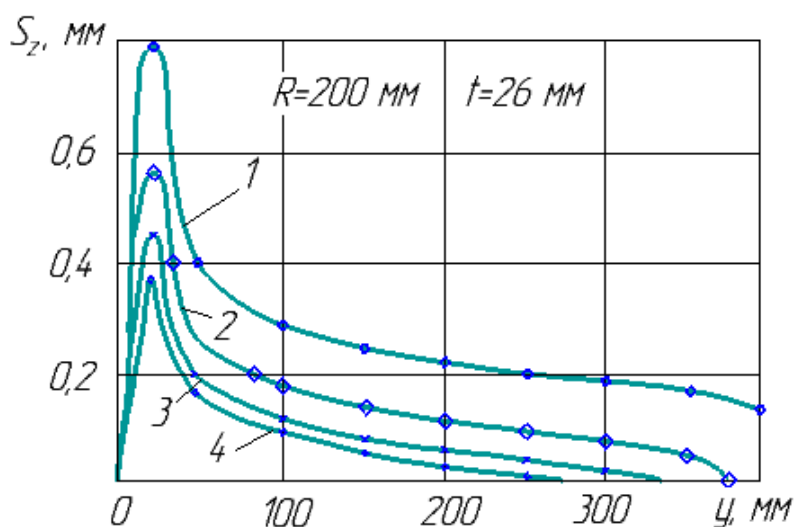


Рис. 5.3. Характер изменения подачи на зуб при постоянной амплитуде качания для различных посылок: 1 – $S_0 = 40$ мм/об; 2 – $S_0 = 20$ мм/об; 3 – $S_0 = 10$ мм/об; 4 – $S_0 = 5$ мм/об

При пилении древесины с посылками меньше максимальных значений в два раза (кривая 2, рис. 5.3) подача на зуб в конце рабочего хода становится равной нулю, а с посылками еще меньших величин (кривые 3 и 4, рис. 5.3) наблюдается потеря рабочего хода в конце его. Максимальное значение подачи на зуб в начале рабочего хода с уменьшением посылки возрастет относительно его среднего значения (см. рис. 5.4).

Следовательно, при проектировании лесопильных рам с качанием пильной рамки по эллиптической траектории необходимо предусматривать механизм согласования посылки и величины амплитуды качания пил (A).

Таким образом, эллиптическая траектория движения пильной рамки обеспечивает исключение скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода, но не обеспечивает срезание слоя

древесины зубом пилы во время рабочего хода равномерной толщины. Существенное влияние на кинематику процесса пиления оказывает амплитуда качания пильной рамки, которая, в свою очередь, зависит от посылки (средней подачи на зуб), радиуса кривошипа и шага зубьев пилы. Минимальная величина амплитуды качания должна определяться по формуле (5.6) и регулироваться в зависимости от величины посылки (подачи на зуб).

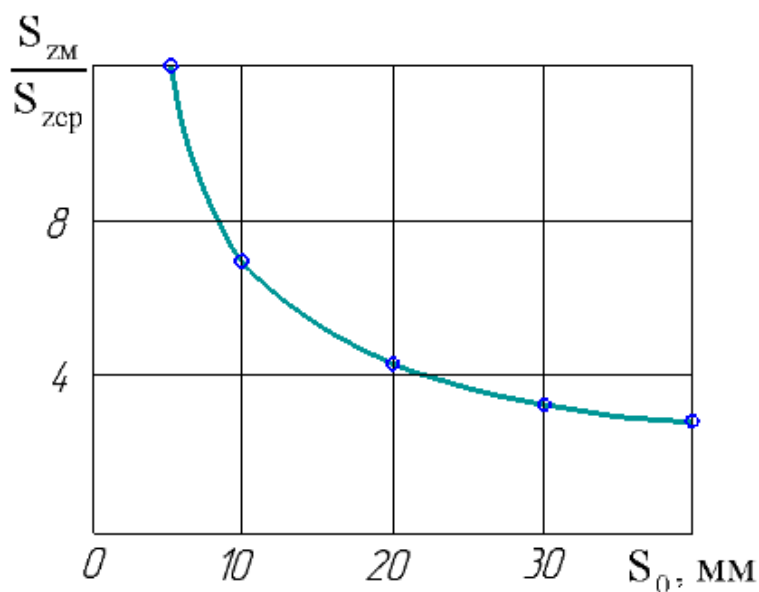


Рис. 5.4. Зависимость отношения S_{zm}/S_{zcp} от посылки

Такой отводящий механизм был реализован в нашей стране на двухэтажной лесопильной раме РД110-2М [79], а также за рубежом на лесопильных рамах фирмы Диамонд и фирмы Викс. Качание пильной рамки осуществляется от кривошипно-шатунного механизма, кривошип которого закреплен на главном валу лесопильной рамы, через систему рычагов, соединенную с нижней частью направляющих, верх которых установлен шарнирно в опоре качания. Такой механизм конструктивно прост и достаточно надежен в работе. Во всей технической литературе указывается, что при этом получается эллиптическая траектория движения зубьев пил, а угол заклинивания показан в одних случаях в виде угла опережения, а в других случаях – в виде угла запаздывания.

При использовании для качания пильной рамки качательного свойства перемещения шатуна поперечное перемещение нижней оси ползунов пильной рамки определится по выражению:

$$x_{\kappa} = \frac{e}{L_{uu}} R \sin \alpha, \quad (5.11)$$

где e – величина смещения подвески пильной рамки от верхней головки шатуна до оси качания, мм.

Движение качания шатуна происходит в плоскости перемещения заготовки (заготовки) и описывается синусным законом.

В выражении (5.11) малая полуось эллипса будет равна $A = Re/L_{uu}$. При качании только нижних поперечин пильной рамки каждый зуб пилы будет иметь свою траекторию. Для зуба, расположенного на пиле в точке Р, траектория движения определится по формуле:

$$x_{\kappa} = \frac{e}{L_{uu}} R \frac{L_n - l_3}{L_n} \sin \alpha, \quad (5.12)$$

где l_3 – расстояние зуба пилы (точки Р) от нижней оси подвески пильной рамки, мм;

L_n – расстояние по высоте между осями ползунов пильной рамки, мм.

При увеличении l_3 амплитуда качания пильной рамки уменьшается и при $l_3 = L_n$ будет равна нулю. Следовательно, у верхних зубьев пилы амплитуда качания меньше, чем у нижних. Это обстоятельство показывает, что для отвода зубьев пилы от дна пропила в начале холостого хода необходимо увеличивать качание нижней поперечины пильной рамки, так как в начале холостого хода во взаимодействии с древесиной находится верхняя часть пилы.

Для соседнего нижнего зуба траектория движения зуба пилы в пропиле определится по следующей формуле:

$$x_{\kappa} = \frac{e}{L_{uu}} R \frac{L_n - l_3 + t}{L_n} \sin \arccos \frac{R + t - y}{R} - t \sin \varphi. \quad (5.13)$$

Формула (5.13) показывает, что амплитуда качания нижнего зуба пилы больше, чем верхнего.

Отсюда можно сделать вывод, что перемещение зубьев пилы в направлении подачи заготовки для различных зубьев, расположенных по высоте пильной рамки, неодинаково. Поэтому эллиптическая траектория движения для каждого зуба пилы имеет различную малую ось, что вызывает непостоянство подачи на зуб в разных положениях пильной рамки.

Если происходит качание верхней поперечины пильной рамки, то траектория движения зуба пилы определится по формуле:

$$x_k = \frac{e}{L_{uu}} R \frac{l_3}{L_n} \operatorname{sinarccos} \frac{R - y}{R}. \quad (5.14)$$

Для нижнего соседнего зуба пилы траектория движения зуба пилы в пропиле определится по выражению:

$$x_k = \frac{e}{L_{uu}} R \frac{l_3 + t}{L_n} \operatorname{sinarccos} \frac{R + t - y}{R} - t \sin \varphi. \quad (5.15)$$

Из формулы (5.15) следует, что амплитуда качания нижнего соседнего зуба пилы меньше, чем верхнего. Так как отводить от дна пропила следует верхнюю часть пилы, которая имеет большую амплитуду качания, чем нижняя, то в этом случае при меньших значениях параметра (e) можно обеспечивать исключение скобления зубьями пилы дна пропила, чем при качании нижней поперечины. Таким образом, качание верхних направляющих с точки зрения кинематики процесса пиления и уменьшения ускорений от поперечного перемещения пильной рамки наиболее целесообразно, чем качание нижних направляющих. Однако в некоторых случаях конструктивно выполнить качание верхних поперечин пильной рамки труднее, чем нижних направляющих. Верхние ползуны пильной рамки расположены дальше от коленчатого вала, и им в некоторых случаях необходимо дополнительно передать перемещение для изменения уклона пильной рамки.

5.2. Движение пил по каплевидной траектории

В промышленности встречаются случаи, когда осуществляется качание одновременно верхней и нижней поперечин пильной рамки, а также качание только нижней поперечины пильной рамки или качание только верхней поперечины пильной рамки. В первом случае для качания пильной рамки используется дополнительный кривошипно-шатунный механизм, который через систему рычагов связан с поперечинами пильной рамки. Траектория движения пильной рамки зависит от угла между основным и дополнительным кривошипами (угла заклинивания – α_3). На рис. 5.5 угол заклинивания

между кривошипами основного кривошипно-шатунного механизма перемещения пильной рамки в вертикальной плоскости и дополнительного кривошипно-шатунного механизма качания пильной рамки в горизонтальной плоскости равен нулю.

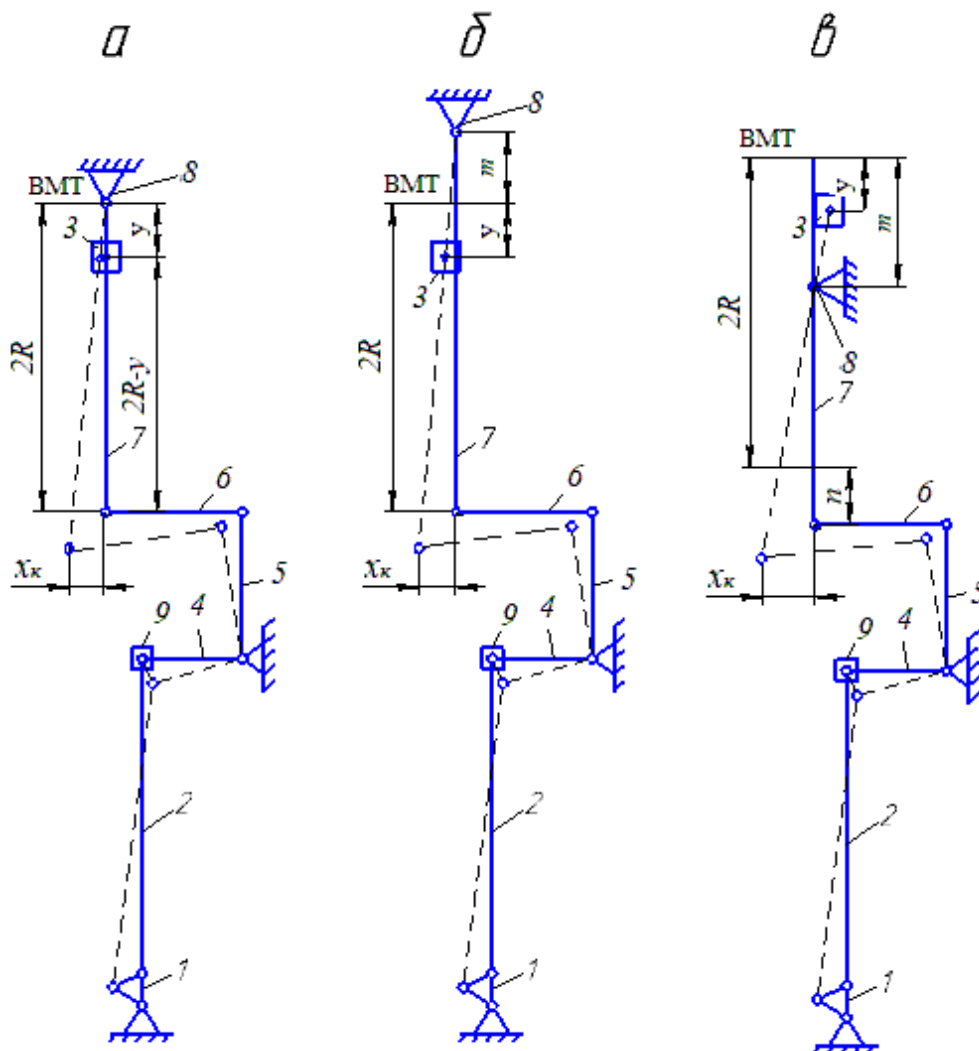


Рис. 5.5. Схема механизма качания направляющих пильной рамки: 1 – кривошип, 2 – шатун, 3 – ползун пильной рамки, 4,5 – плечи двуплечего рычага, 6 – рычаг, 7 – направляющая, 8 – опора качания направляющих, 9 – верхняя головка дополнительного кривошипно-шатунного механизма качания пильной рамки: *а* – при установке опоры качания в ВМТ; *б* – при установке опоры качания выше ВМТ; *в* – при расположении опоры качания направляющих ниже ВМТ и расположении рычага качания направляющих ниже НМТ

Однако в таком механизме перемещение пильной рамки в горизонтальной плоскости передается за счет особого расположения рычагов 4,5 и 6. Двуплечие рычаги 4 и 5 расположены под углом в 90° , рычаги 4 и 6 расположены параллельно (под углом 180°), а ры-

чаги 5 и 6 расположены под углом 90° . В этом случае угол заклинивания (смещения) кривошипов двух механизмов равен нулю.

Таким образом, в данном варианте исполнения механизма качания пильной рамки математическое описание перемещения верхней точки шатуна дополнительного кривошипно-шатунного механизма, осуществляемого в вертикальной плоскости, передается направляющим пильной рамки, осуществляемым перемещением в горизонтальной плоскости. В связи с этим можно написать, что качание направляющих пильной рамки в горизонтальной плоскости определяется по формуле (без учета конечной длины шатуна):

$$x_k = ri(1 - \cos\alpha). \quad (5.16)$$

Если изменить расположение кривошипа механизма перемещения пильной рамки в вертикальной плоскости и кривошипа механизма качания направляющих пильной рамки в горизонтальной плоскости, то появляется угол заклинивания (смещения) этих кривошипов относительно друг друга. При угле смещения (заклинивания) $\alpha_3 = \pi/2$ поперечное перемещение пильной рамки будет определяться по формуле:

$$x_k = \pm risin\alpha. \quad (5.17)$$

При опережении выражение (5.17) положительно, при запаздывании – отрицательно. Следовательно, с целью обеспечения отвода зубьев пилы от дна пропила в начале холостого хода необходимо в таких механизмах целесообразно принимать опережение.

Выражение (5.17) определяет эллиптическую траекторию. Легко заметить, что $ri = A$, а при передаточном отношении рычажной подвески, равном единице, $r = A$. Следовательно, все сделанные ранее рассуждения и расчеты для эллиптической траектории применимы для такого механизма качания пильной рамки.

Рассмотрим вариант, когда опора качания направляющих расположена на уровне верхней мертвой точки хода ползунов пильной рамки. При условии, когда верхняя мертвая точка ползуна кривошипно-шатунного механизма привода пильной рамки совпадает с осью качания направляющей, движение ползуна пильной рамки опишется уравнением (см. рис. 5.5а):

$$x_k = ri[\cos\alpha_0 - \cos(\alpha \pm \alpha_0)] \frac{y}{2R}. \quad (5.18)$$

В случае расположения оси качания направляющих выше верхней точки хода ползунов качание пильной рамки описывается уравнением (см. рис. 5.5б):

$$x_k = ri[\cos\alpha_0 - \cos(\alpha \pm \alpha_0)] \frac{y + m}{2R + m}, \quad (5.19)$$

где m – расстояние от опоры качания направляющих до верхней крайней точки хода ползунов, мм.

Если соединение рычагов механизма качания пильной рамки с направляющими выполнено со смещением от нижней точки хода ползунов, то тогда качание пильной рамки опишется уравнением (см. рис. 5.5в):

$$x_k = ri[\cos\alpha_0 - \cos(\alpha \pm \alpha_0)] \frac{y - m}{2R + n - m}, \quad (5.20)$$

где n – расстояние от места соединения рычагов механизма качания с направляющими до нижней крайней точки хода ползунов (НМТ), мм.

Следует обратить внимание, что при смещении опоры качания направляющих ниже ВМТ в начальный период хода пильной рамки происходит отрицательное перемещение, которое по мере приближения ползуна к опоре качания уменьшается. При достижении ползуном точки опоры качания направляющих перемещение пильной рамки становится равным нулю (см. рис. 5.5в).

Анализируя все эти три уравнения для трех вариантов подвески пильной рамки, отмечаем, что принципиальных отличий между ними нет. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать одно из этих уравнений, а влияние смещения достаточно легко можно учесть путем соответствующей подстановки.

Следует иметь в виду, что точка соединения рычагов с направляющими расположенными ниже перемещается по закону:

$$x_n = ri[\cos\alpha_0 - \cos(\alpha \pm \alpha_0)]. \quad (5.21)$$

Привлекает внимание закон движения пильной рамки при угле опережения, равном $\pi/2$. В этом случае образуется замкнутая петлеобразная траектория движения пильной рамки с точкой возврата в

ВМТ, которая симметрична относительно вертикальной оси. Скорости и ускорения движения пильной рамки как за рабочий, так и за холостой ходы совпадают между собой. В этом случае траектория движения пильной рамки за рабочий ход опишется уравнением (начало координат в ВМТ):

$$x_{кр} = \frac{ry}{2R} \sin\alpha = \frac{r}{2} \sin\alpha(1 - \cos\alpha). \quad (5.22)$$

Траектория движения пильной рамки во время холостого хода опишется уравнением (начало координат в НМТ):

$$x_{кх} = -r \frac{2R - y}{2R} \sin\alpha. \quad (5.23)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется формулой:

$$x_p = \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R - y}{R} + \frac{ry}{2R} \sin \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (5.24)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода определяется по формуле:

$$x_x = \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R - y}{R} - r \frac{2R - y}{2R} \sin \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (5.25)$$

Глубина вдавливания зубьев пилы в древесину определится по выражению:

$$\delta = x_x - x_p + \frac{S_0}{2}. \quad (5.26)$$

Траекторию движения зуба пилы в пропиле за рабочий ход приведем к другому началу координат, а именно к началу в НМТ. Для этого в уравнение (5.24) сделаем подстановку $y' = 2R - y$. Тогда получим:

$$x_p = \frac{S_0}{2} - \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R - y}{R} + r \frac{2R - y}{2R} \sin \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (5.27)$$

Подставляя уравнение (5.27) и (5.25) в выражение (5.26), получим:

$$\delta = \frac{S_0}{\pi} \arccos \frac{R-y}{R} - r \frac{2R-y}{R} \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R}. \quad (5.28)$$

Зная, что максимального значения глубина вдавливания зуба пилы в древесину в начале холостого хода пилы достигается при $y = t$, и принимая глубину вдавливания равной нулю, находим величину радиуса кривошипа механизма качания пильной рамки:

$$r = \frac{S_0 R \arccos \frac{R-t}{R}}{\pi(2R-t) \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R}}. \quad (5.29)$$

Расчеты по формуле (5.29) показывают, что радиус кривошипа механизма качания пильной рамки с увеличением хода пильной рамки возрастает при условии сохранения подачи на зуб постоянной (рис. 5.6), но отношение r/S_0 незначительно уменьшается.

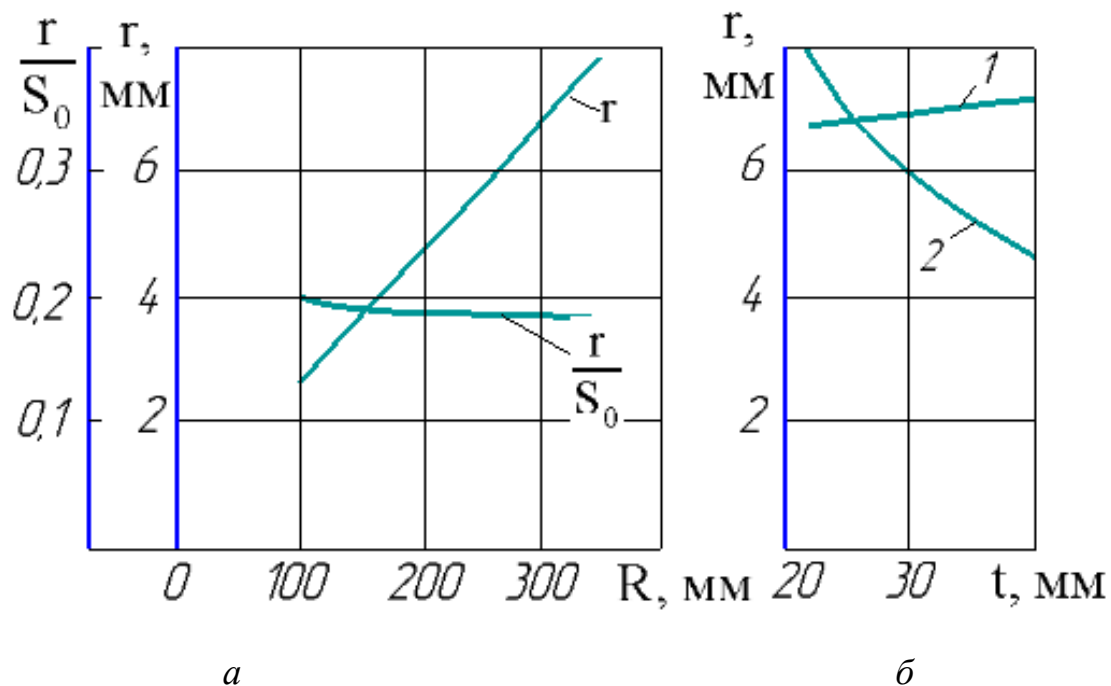


Рис. 5.6. Влияние радиуса кривошипа коленчатого вала (а) и шага зубьев пилы (б) на величину радиуса механизма качания пильной рамки:

- 1 – при постоянной посылке $S_0 = 40$ мм;
 2 – при постоянной подаче на зуб $S_{Zcp} = 1,73$ мм

С увеличением шага зубьев пилы радиус кривошипа механизма качания пильной рамки, при условии сохранения посылки постоянной величины, возрастает незначительно, а при условии сохранения подачи на зуб величиной постоянной – уменьшается. Это

объясняется тем, что при увеличении шага зубьев пилы глубина вдавливания зубьев пилы в древесину уменьшается и, следовательно, необходим меньший отвод пильной рамки, чтобы исключить скобление зубьями пилы дна пропила.

Для определения подачи на зуб необходимо составить уравнение, описывающее траекторию движения соседнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода. В параметрической форме траектория движения соседнего (нижнего) зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется такой системой:

$$\begin{cases} y = R(1 - \cos\alpha) + t, \\ x_B = \frac{S_0}{2\pi}\alpha - t\sin\varphi, \\ x_K = \frac{r(y - t)}{2R}\sin\alpha. \end{cases} \quad (5.30)$$

Решая систему уравнений (5.30), получим:

$$x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \left[\arccos \frac{R + t - y}{R} + \frac{r(y - t)}{2R} \operatorname{sinarccos} \frac{R + t - y}{R} \right] - t\sin\varphi. \quad (5.31)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{2\pi} \left(\arccos \frac{R - y}{R} - \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) + t\sin\varphi + \frac{r}{2R} \left[y \operatorname{sinarccos} \frac{R - y}{R} - (y - t) \operatorname{sinarccos} \frac{R + t - y}{R} \right]. \quad (5.32)$$

Расчеты по формуле (5.32) показывают, что подача на зуб для условий пиления на двухэтажных лесопильных рамах ($R = 300$ мм, $S_0 = 40$ мм/об, $t = 26$ мм, $r = 6,85$ мм) изменяется существенно (см. рис. 5.7).

В первую очередь необходимо проанализировать характер изменения подачи на зуб пилы во время рабочего хода, а затем рассмотреть и оценить кинематику перемещения пильной рамы, особенно в плоскости перемещения заготовки.

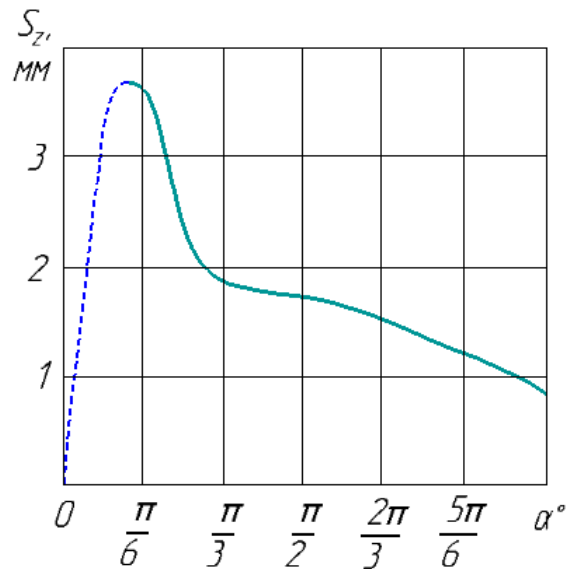


Рис. 5.7. Характер изменения подачи на зуб в зависимости от угла поворота коленчатого вала

В первой половине рабочего хода подача на зуб возрастает по сравнению с тем вариантом, когда пиление производилось без качания пильной рамки. При этом максимальное значение подачи на зуб возрастает немного (3,4%), а во второй половине рабочего хода подача на зуб уменьшается и достигает в конце хода пильной рамки половины ее среднего значения. Характер изменения подачи на зуб позволяет сделать вывод о том, что максимальные значения подачи на зуб в начале рабочего хода уменьшить невозможно.

Поэтому улучшить качество обработки также невозможно, хотя силы скобления во время холостого хода можно уменьшить или даже исключить.

Скорость качания пил можно определить по формуле:

$$x'_{кр} = \frac{r\omega}{2R} y \cos\alpha. \quad (5.33)$$

Ускорение при качании пил определится по формуле:

$$x''_{кр} = -\frac{r\omega^2}{2R} y \sin\alpha. \quad (5.34)$$

Поперечное перемещение, скорость и ускорение пил, в зависимости от угла поворота коленчатого вала, показаны на рис. 5.8, а в функции перемещения пильной рамки по вертикали представлены на рис. 5.9.

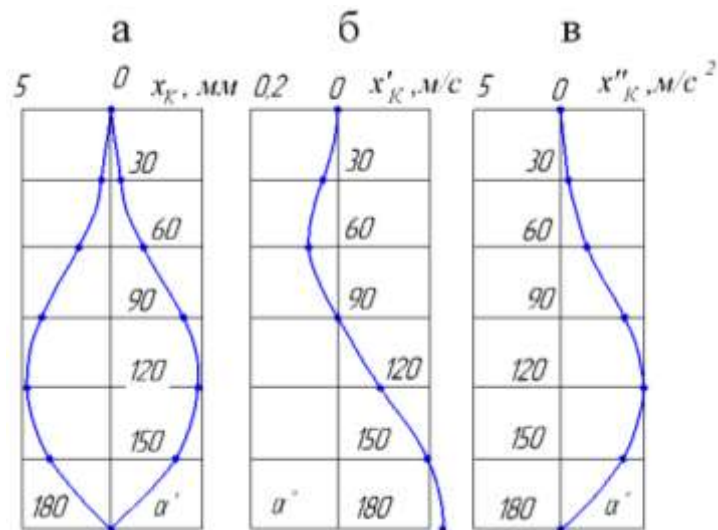


Рис. 5.8. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) пил в зависимости от угла поворота коленчатого вала

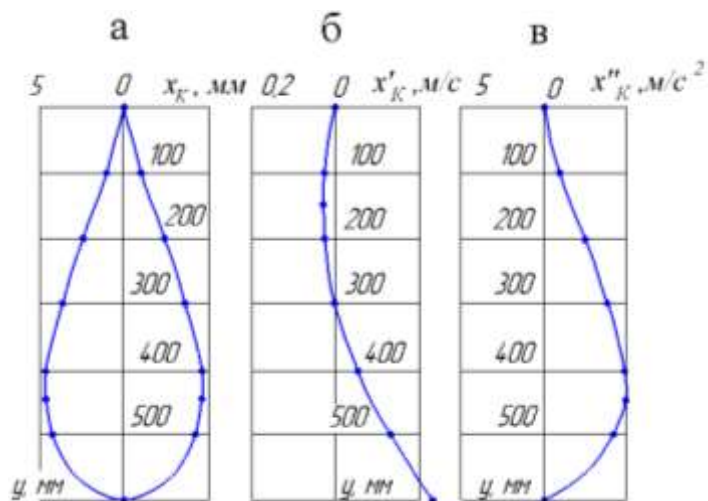


Рис. 5.9. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) пильной рамки в зависимости от ее перемещения по вертикали

В данном случае траектория движения пил представляет собой форму «капли», у которой максимальная амплитуда качания пил наблюдается при угле поворота кривошипа, равного 120° .

На одноэтажных лесопильных рамах Р63-5А и Р63-6 был использован отводящий механизм (см. рис. 5.10), в котором нижние направляющие пильной рамки установлены в опорах качания, расположенных в верхней мертвой точке [20]. Сами направляющие в нижней части жестко соединены между собой балкой, на которой закреплен рычаг. Рычаг соединен тягой – шатуном с эксцентриком, установленном на коленчатом валу. На тарной лесопильной раме РТ40 использован такой же механизм качания, как и на лесопильной раме Р63-6, только опора качания направляющих расположена выше ВМТ хода нижних ползунов [79, 80].

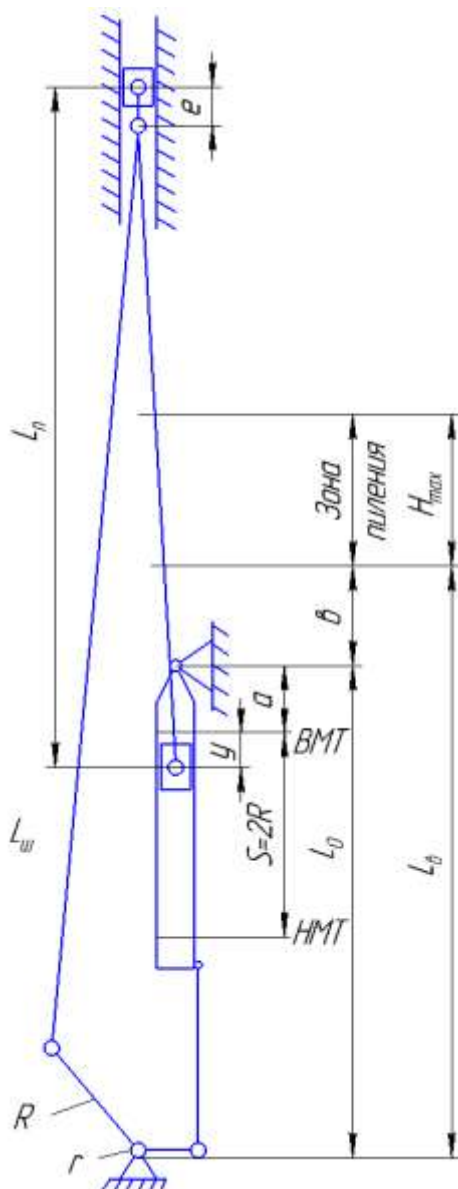


Рис. 5.10. Схема механизма резания тарной лесопильной рамы РТ40 – первый вариант

Уравнение траектории движения нижней поперечины пильной рамки за рабочий ход для такого механизма качания лесопильной рамы Р63-6 будет иметь вид (начало координат в ВМТ):

$$x_K = \frac{r}{L_0} y \sin \alpha. \quad (5.35)$$

В последнем уравнении заменим угол поворота коленчатого вала « α » выражением:

$$\alpha = \arcsin \frac{1}{R} \sqrt{2Ry - y^2}. \quad (5.36)$$

Тогда можно записать:

$$x_K = \frac{r}{L_0} y \frac{1}{R} \sqrt{2Ry - y^2}. \quad (5.37)$$

Возведем обе части уравнения в квадрат, получим:

$$x_K^2 = \frac{r^2 y^2}{L_0^2 R^2} (2Ry - y^2). \quad (5.38)$$

Для отыскания экстремальных значений траектории движения пильной рамки находим первую производную:

$$\frac{dx_K}{dy} = \frac{2r^2 y^2}{L_0^2 R^2 x_K} (3R - 2y) = \frac{2ry}{L_0 R} \cdot \frac{3R - 2y}{\sqrt{2Ry - y^2}}. \quad (5.39)$$

Приравняв первую производную к нулю и решив полученное уравнение, найдем $y = 3R/2$. Подставив это выражение в уравнение (5.37), получим максимальную амплитуду качания пильной рамки:

$$A_M = \frac{3\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{rR}{L_0}. \quad (5.40)$$

Из этого уравнения видно, что величина максимального качания пильной рамки лесопильной рамы зависит от радиуса эксцентрика, хода пильной рамки и расположения опоры качания направляющих от оси коленчатого вала.

Во время холостого хода траектория движения нижней поперечины пильной рамки для данного механизма выразится так (начало координат в НМТ):

$$x_K = -r \frac{2R - y}{L_0} \sin \alpha. \quad (5.41)$$

Скорость и ускорения при поперечном качании пильной рамки определяется по формулам:

$$x'_K = \frac{r\omega}{L_0} (2R - y) \cos \alpha, \quad (5.42)$$

$$x''_K = -\frac{r\omega^2}{L_0} (2R - y) \sin \alpha. \quad (5.43)$$

Приравняв уравнение (5.42) к нулю и решив его, найдем значение угла поворота кривошипа, при котором происходит максимальный отвод пильной рамки от вертикали. Оказалось, что этот угол зависит от параметров лесопильной рамы и пилы и составляет 60° от НМТ.

Перемещение пильной рамки для этих параметров будет иметь вид, представленный на рис. 5.11. Траектория движения пильной рамки представляет собой замкнутую кривую с точкой возврата в ВМТ (каплевидная кривая). В расчетах принимались данные применительно к одноэтажным лесопильным рамам модели Р63-6 ($R = 200$ мм, $t = 26$ мм, $r = 16$ мм, $L_0 = 810$ мм, $n = 285$ мин $^{-1}$).

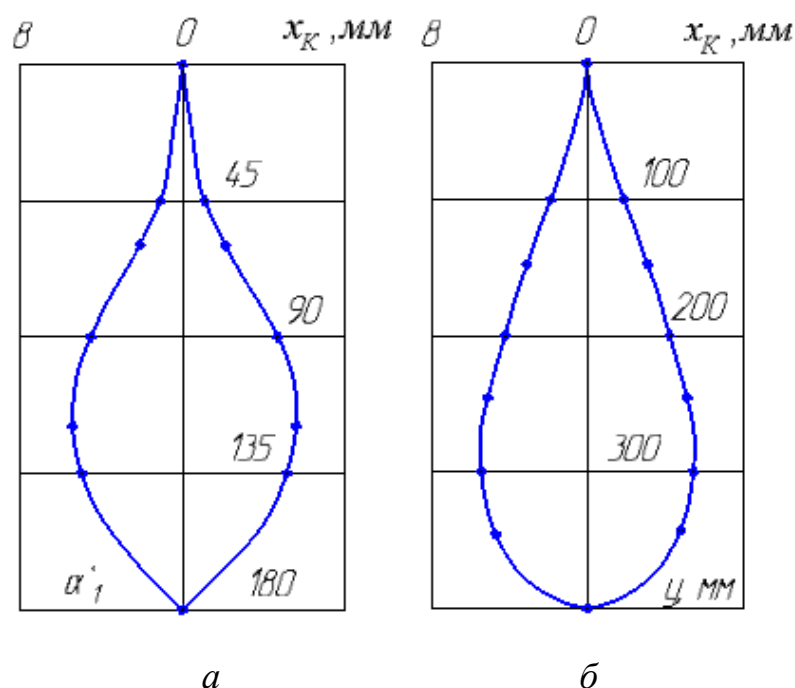


Рис. 5.11. Траектории движения пил в зависимости от угла поворота кривошипа (а) и перемещения пильной рамки по вертикали (б)

Скорость движения при поперечном качании пильной рамки в верхней мертвой точке равна нулю (см. рис. 5.12) и во время рабочего хода достигает максимального значения при угле поворота коленчатого вала равном 60° , что соответствует перемещению пильной рамки 100 мм. Затем скорость движения пильной рамки уменьшается, достигая нулевого значения при $\alpha = 90^\circ$, что соответствует перемещению пильной рамки от ВМТ на 200 мм. В конце рабочего хода скорость движения пильной рамки достигает максимального отрицательного значения.

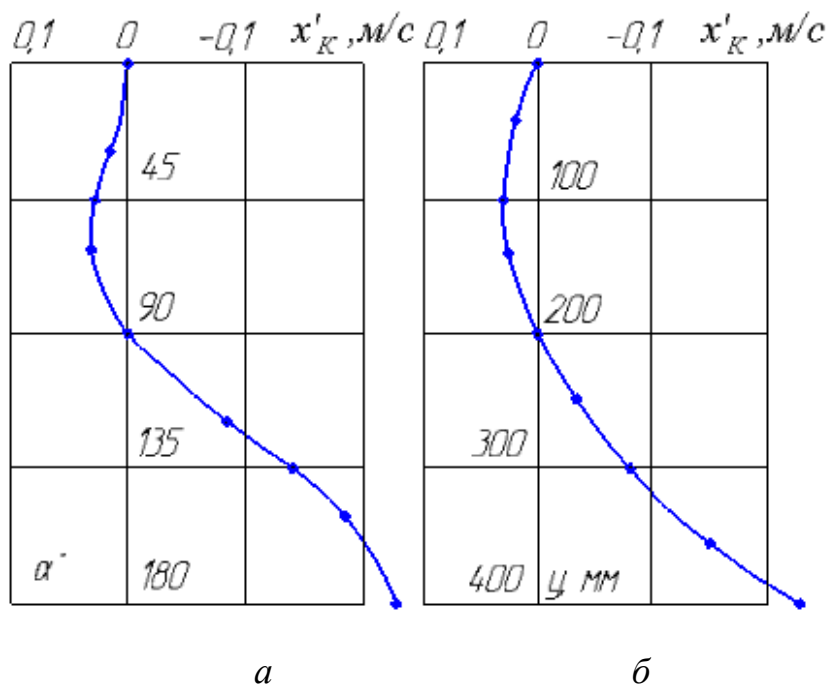


Рис. 5.12. Характер изменения скорости поперечного перемещения пильной рамки в зависимости от угла поворота кривошипа (*а*) и перемещения пильной рамки (*б*)

Ускорения пильной рамки (см. рис. 5.13) в верхней и нижней мертвых точках принимают нулевое значение, а в процессе хода пильной рамки не меняют свой знак и тем самым имеют один экстремум, причем экстремальное максимальное значение наблюдается во второй половине рабочего хода пильной рамки при угле поворота кривошипа, равном 120° .

Приведенный теоретический анализ справедлив для случая, когда верхние и нижние направляющие пильной рамки качаются одновременно по одному и тому же закону, а качание пильной рамки согласуется с посылками. Если амплитуда качания не согласуется с посылкой, то в этом случае механизм резания лесопильной рамы упрощается, но кинематические параметры процесса пиления будут изменяться при изменении посылки. С целью исключения скобления зубьями пилы дна пропила рекомендуется радиус эксцентрика в этом случае определять по наибольшей посылке. В случае уменьшения посылки характер изменения подачи на зуб будет меняться (см. рис. 5.14).

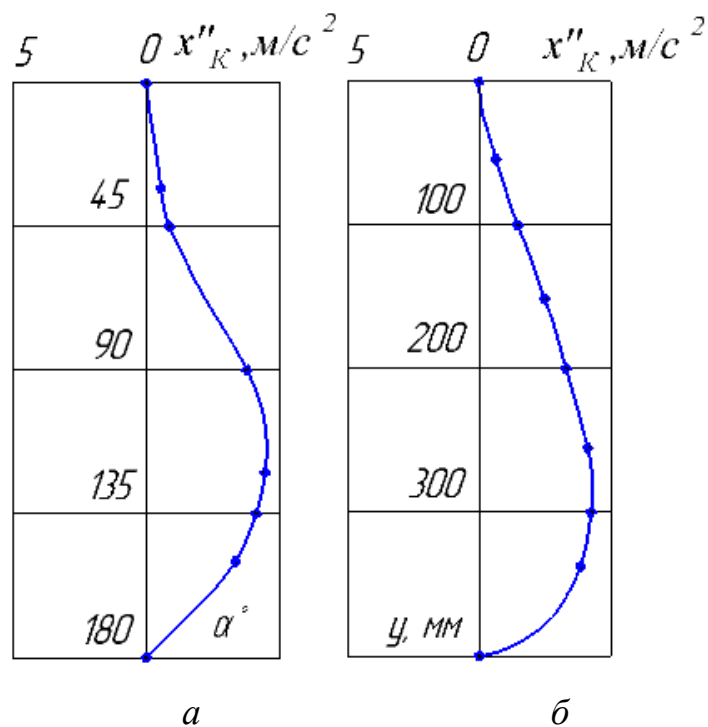


Рис. 5.13. Зависимость ускорения от угла поворота кривошипа (а) и перемещения пильной рамки (б)

При уменьшении величины посылки по сравнению с максимальной неравномерность подачи на зуб вначале возрастает, а затем уменьшается. При уменьшении максимальной посылки более чем в два раза происходит потеря рабочего хода в конце хода, которая возрастает при дальнейшем уменьшении посылки.

На лесопильных рамах Р63-5А и Р63-6А производится качание только нижних направляющих (см. рис. 5.10). В этом случае каждый зуб пилы имеет свою траекторию движения, которую можно определить по формуле:

$$x_K = \frac{L_n - m - y_m}{L_n} \cdot r \frac{y}{L_0} \sin \alpha, \quad (5.44)$$

где L_n – расстояние между шарнирными опорами качания ползунов пильной рамки;

m – расстояние от нижней опоры качания направляющих пильной рамки до верхнего уровня нижних валцов;

y_m – расположение зуба пилы от верха нижних валцов.

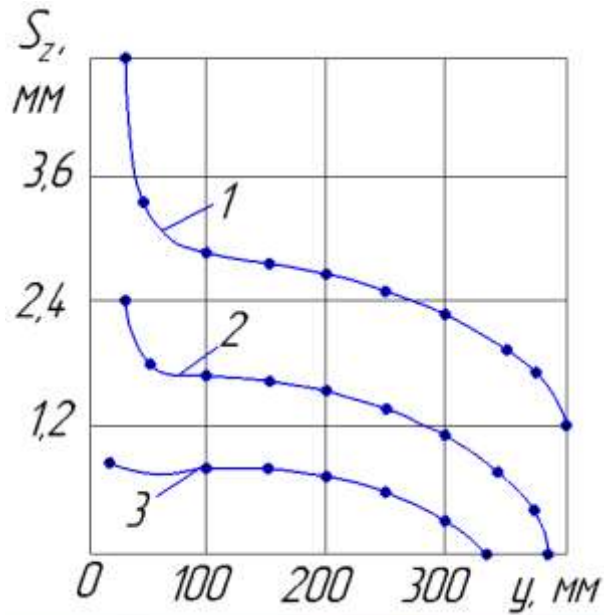


Рис. 5.14. Характер изменения подачи на зуб при неизменной амплитуде качания для различных посылок (мм/об): 1 – $S_0 = 40$; 2 – $S_0 = 20$; 3 – $S_0 = 5$

Радиус эксцентрика при данном конструктивном исполнении лесопильной рамы определится по формуле:

$$r = \frac{S_0 L_n L_0 \arccos \frac{R-t}{R}}{2\pi(2R-t)(L_n - m - y_m) \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R}}. \quad (5.45)$$

В этом случае подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{2\pi} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) + \frac{S_0 t}{4R} +$$

$$+ r \frac{L_n - m - y_m}{L_n} \cdot \frac{y}{L_0} \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} -$$

$$- r \frac{L_n - m - (y_m - t)}{L_n} \cdot \frac{y-t}{L_0} \operatorname{sinarccos} \frac{R+t-y}{R}. \quad (5.46)$$

На одноэтажной лесопильной раме с качанием пил модели Р63-6 ($r = 16$ мм, $L_n = 1545$ мм, $m = 255$ мм) подача на зуб для зубьев пил, расположенных на различной высоте, будет иметь вид, представленный на рис. 5.15. Из графиков видно, что у зубьев пилы, расположенных ниже, ввиду большей у них амплитуды качания в начале рабочего хода подача на зуб увеличивается, а в конце рабочего хода уменьшается.

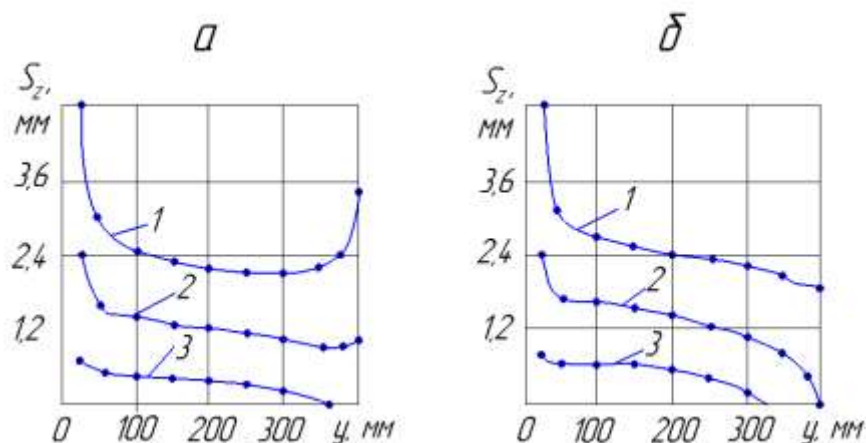


Рис. 5.15. Характер изменения подачи на зуб для зубьев пил, расположенных на расстоянии 300 мм (а) и 200 мм (б) от верха нижних подающих валцов, при различных посылках (мм): 1 – $S_0 = 40$ мм/об; 2 – $S_0 = 20$ мм/об; 3 – $S_0 = 5$ мм/об

Таким образом, теоретический анализ кинематики процесса пиления позволяет сделать вывод, что указанный механизм качания не удовлетворяет одному из основных требований – обеспечению срезания стружки равномерной толщины во время рабочего хода. В начале рабочего хода максимальное значение толщины стружки даже возрастает по сравнению с условием, когда пильная рамка перемещается прямолинейно. Следовательно, силы резания во время рабочего хода будут изменяться в еще больших пределах, чем при условии, когда движение пил осуществляется прямолинейно, и шероховатость поверхности пропила будет также ухудшаться. Все это окажет отрицательное влияние на качество обработки, силы резания и, следовательно, на производительность лесопильных рам, и невозможно обеспечить снижение потерь древесины в опилки. Данный анализ показывает, что качание только нижних направляющих без регулирования радиуса эксцентрика не обеспечивает исключения скобления зубьями пилы дна пропила при больших скоростях подачи.

5.3. Движение пил по незамкнутой криволинейной траектории

Для улучшения кинематики процесса пиления древесины на лесопильных рамах были предложены технические решения механизмов резания лесопильных рам, у которых траектория движения пильной рамки представляет собой незамкнутую кривую.

Действительно, если ни одно из звеньев в механизме качания пильной рамки не совершает полный цикл вращательного движения, то тогда траектория движения пильной рамки будет представлять собой незамкнутую кривую, так как во время холостого хода происходит возврат пильной рамки из нижнего положения в верхнее по той же траектории, что и во время рабочего хода. Следовательно в таких механизмах резания лесопильных рам движение пил происходит по незамкнутой криволинейной траектории.

Возникает вопрос: каким образом такой вид траектории движения пил оказывает влияние на кинематику процесса пиления? Для ответа на него определим глубину вдавливания зубьев пилы в древесину, когда пильная рамка перемещается по незамкнутой криволинейной траектории. В качестве примера рассмотрим применение механизма Эванса для качания пильной рамки (рис. 5.16) [33]. В технических решениях отмечалось, что если качание пильной рамки производится с помощью механизма Эванса, то исключается скобление зубьями пилы дна пропила.

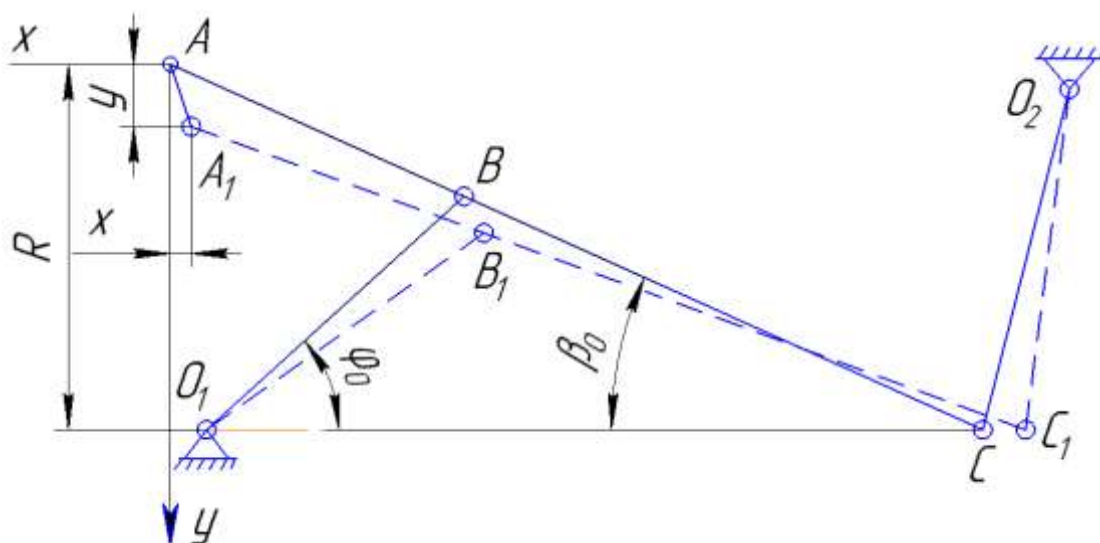


Рис. 5.16. Расчетная схема механизма Эванса

Траектория движения пильной рамки такого механизма описывается уравнением:

$$x_k = l_2(\cos\beta - \cos\beta_0) - l_1(\cos\varphi_p - \cos\varphi_0), \quad (5.47)$$

где l_2 – длина рычага AB , мм;

l_1 – длина рычага O_1B , мм;

β – угол поворота рычага AC ;

$$\beta = \arcsin \frac{R - y}{L_p};$$

L_p – длина рычага AC , мм;

β_0 – угол расположения рычага AC , когда пильная рамка занимает крайнее верхнее или нижнее положение;

$$\beta_0 = \arcsin \frac{R}{L_p};$$

φ_p – угол поворота рычага O_1B , рад;

$$\varphi_p = \arcsin \frac{R - y}{R} \cdot \frac{l_3}{l_1};$$

l_3 – длина рычага BC , мм;

φ_0 – угол поворота рычага O_1B , когда пильная рамка находится в крайних верхнем или нижнем положениях:

$$\varphi_0 = \frac{l_3}{l_1} \arcsin \frac{R}{L_p}.$$

Формула (5.47) показывает, что траектория движения пил зависит от размеров рычагов данного механизма, а также от радиуса кривошипа привода пильной рамки. Если $l_1 = l_2 = l_3$, то тогда движение пил будет происходить по прямой линии. В других случаях движение пил будет происходить по незамкнутым криволинейным траекториям. Тогда траектория движения зуба пилы в пропиле определится по формуле:

$$x_p = \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R - y}{R} + l_2(\cos\beta - \cos\beta_0) - l_1(\cos\varphi_p - \cos\varphi_0). \quad (5.48)$$

Во время холостого хода движение зуба пилы в пропиле определяется по формуле (5.48), но отсчет нуля при этом необходимо вести от НМТ. Для приведения уравнений к одной системе координат (начало в НМТ) необходимо в уравнение (5.48) сделать подстановку $y' = 2R - y$. После преобразований получим:

$$x_x = \frac{S_0}{2} - \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R - y}{R} + l_2(\cos\beta - \cos\beta_0) - l_1(\cos\varphi_p - \cos\varphi_0). \quad (5.49)$$

Глубина вдавливания зуба пилы в древесину определяется по формуле:

$$\delta = \frac{S_0}{\pi} \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (5.50)$$

Формула (5.50) показывает, что такой вид траектории движения пильной рамки не оказывает влияния на глубину вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода. Следовательно, улучшения условий работы рамных пил во время холостого хода не происходит. Кроме того, дополнительно могут возникнуть поперечные силы инерции пильной рамки, а также необходимо учесть перемещение рычагов в место ползунов.

Важно знать, каким образом изменится подача на зуб во время рабочего хода по сравнению с вариантом, когда пильная рамка перемещается прямолинейно. Движение нижнего соседнего зуба пилы в пропиле определится по формуле:

$$x_2 = \frac{S_0}{2\pi} \arccos \frac{R + t - y}{R} + l_2(\cos\beta_2 - \cos\beta_{20}) - l_1(\cos\varphi_2 - \cos\varphi_{20}), \quad (5.51)$$

где β_2 – угол поворота рычага AC :

$$\beta_2 = \arcsin \frac{R + t - y}{R};$$

β_{20} – угол поворота рычага AC , когда пильная рамка находится в крайних положениях:

$$\beta_{20} = \arcsin \frac{R + t}{R};$$

φ_2 – угол поворота рычага O_1B :

$$\varphi_2 = \frac{l_3}{l_1} \arcsin \frac{R + t - y}{R};$$

φ_{20} – угол поворота рычага O_1B , когда пильная рамка находится в крайних положениях:

$$\varphi_{20} = \frac{l_3}{l_1} \arcsin \frac{R+t}{R}.$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$\begin{aligned} S_z = & \frac{S_0}{2\pi} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) + \frac{S_0 t}{4R} + \\ & + l_2 (\cos \beta - \cos \beta_2 + \cos \beta_{20} - \cos \beta_0) - \\ & - l_1 (\cos \varphi_p - \cos \varphi_2 + \cos \varphi_{20} - \cos \varphi_0). \end{aligned} \quad (5.52)$$

Анализ формулы (5.52) показывает, что такая траектория движения пильной рамки не оказывает положительного влияния на равномерность толщины срезаемого слоя древесины зубом пилы. Если движение пильной рамки происходит по криволинейной траектории, то будет увеличиваться толщина стружки или в первой, или во второй половине рабочего хода. На второй части рабочего хода будет наблюдаться, соответственно, уменьшение толщины стружки. Следовательно, незамкнутая криволинейная траектория движения пильной рамки обуславливает увеличение неравномерности толщины срезаемой стружки, что приводит к отрицательным последствиям, так как возрастут максимальные нагрузки на зубья пилы и ухудшится качество поверхности пропила. При прямолинейном перемещении пильной рамки кинематика процесса пиления древесины рамными пилами остается неизменной, как и в случае перемещения пил по прямолинейным направляющим.

Таким образом, незамкнутая криволинейная траектория движения пильной рамки не улучшает кинематику процесса пиления древесины на лесопильной раме, так как не уменьшает глубину вдавливания зуба пилы в древесину в начальный момент холостого хода и не обеспечивает срезание слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода более равномерной толщины. Поэтому такой вид траектории движения пильной рамки обуславливает только отрицательные моменты. Следовательно, технические решения лесопильных рам с указанной траекторией не следует в дальнейшем анализировать как бесперспективные и не создающие положительного эффекта по улучшению кинематики процесса. Однако следует обратить внимание, что данный механизм может быть использован при замене ползунков пильной рамки на рычажную подвеску. Кроме

того, можно предусмотреть качание опоры O_1 рычага O_1B по определенной закономерности. Тогда можно изменить кинематику процесса пиления.

5.4. Основные выводы

Анализируя кинематику процесса пиления древесины рамными пилами при равномерной скорости подачи и качании пил, следует сделать следующие выводы.

1. При перемещении пил по эллиптической траектории можно исключить скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода, но при этом возрастает максимальное значение подачи на зуб в начале рабочего хода. Это вызывает рост силы резания, а также увеличение микронеровностей на поверхности пропила. Такой вариант перемещения пил не является перспективным.

2. При перемещении пил по каплевидной траектории не обеспечивается срезание стружки во время рабочего хода пил равномерной толщины. Поэтому силы резания во время рабочего хода изменяются в еще больших пределах, чем при условии, когда пилы перемещаются прямолинейно. Условия работы рамных пил во время рабочего хода ухудшаются по сравнению с вариантом, когда пилы перемещаются прямолинейно.

3. При перемещении пил по незамкнутым криволинейным траекториям толщина срезаемого слоя во время рабочего хода будет увеличиваться или в первой, или во второй половине хода. При этом во второй части рабочего хода, соответственно, уменьшается толщина срезаемого слоя древесины зубом пилы. Следовательно, такой способ перемещения пил обуславливает увеличение максимального значения подачи на зуб во время рабочего хода, что приводит к отрицательным результатам.

4. Таким образом, предлагаемые ранее способы перемещения пил с качанием пил по различным предлагаемым ранее траекториям движения пил не позволяют получить положительный эффект.

5. Для решения этой проблемы необходимо определить математические модели перемещения пил теоретически (аналитически), при которых обеспечивалось бы выполнение основных требований, сформулированных ранее в этой работе.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОВЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАСПИЛИВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПИЛ

6.1. Математическое описание модели движения заготовки

Математическое описание движения заготовки на лесопильных рамах производится прежде всего при условии соблюдения следующих технологических требований, которые выбраны критериями оптимизации (оптимальности):

- обеспечение срезания слоя древесины зубом пилы равномерной толщины во время рабочего хода, $S_z = const$;
- исключение скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода, $\delta = 0$.

Анализ одного цикла процесса пиления древесины рамными пилами, который совершается за один оборот коленчатого вала, показывает, что в нем необходимо выделить три характерных участка:

- резание во время рабочего хода;
- скобление в начальный период холостого хода;
- свободное движение пил в исходное положение в середине первой половины и во второй половине холостого хода.

На первом участке пилы перемещаются от верхней до нижней мертвых точек. Для обеспечения срезания слоя древесины зубом пилы равномерной толщины необходимо, чтобы математическая модель движения заготовки совпадала с математическим описанием движения пил, а перемещение заготовки за этот период составило половину посылки. Исходя из этих требований и зная математическое описание движения пил, можно написать уравнение движения заготовки [47]:

$$x_{\delta 1} = \frac{S_o}{4}(1 - \cos\alpha), \quad (6.1)$$

где $x_{\delta 1}$ – перемещение заготовки на первом участке во время рабочего хода, мм.

В этом случае траектория относительного движения зуба пилы в пропиле определится при решении следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} x_{\delta 1} = \frac{S_o}{4}(1 - \cos\alpha), \\ y = R \cdot (1 - \cos\alpha). \end{cases} \quad (6.2)$$

Решая систему уравнений (6.2), находим, что зуб пилы относительно плоскости пропила перемещается по выражению:

$$x_1 = \frac{S_0 y}{4R}. \quad (6.3)$$

Выражение (6.3) показывает, что зуб пилы в пропиле перемещается по прямой линии.

Для второго соседнего нижнего зуба траектория его движения в пропиле опишется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_0}{4} (1 - \cos\alpha) - t \sin\varphi, \\ y = R \cdot (1 - \cos\alpha) + t \cos\varphi. \end{cases} \quad (6.4)$$

Решая эту систему уравнений и принимая $\cos\varphi = 1$, найдем траекторию движения соседнего нижнего зуба пилы в пропиле:

$$x_2 = \frac{S_0}{4R} (y - t) - t \sin\varphi. \quad (6.5)$$

При малых углах уклона пилы $t \sin\varphi = t \operatorname{tg}\varphi = \frac{S_0 t}{4R}$.

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = x_1 - x_2 = \frac{S_0 t}{2R}. \quad (6.6)$$

Из формулы (6.6) видно, что подача на зуб во время рабочего хода, если бревно перемещается по уравнению (6.1), величина постоянная. Следовательно, первое требование удовлетворяется.

Если теперь принять движение заготовки во время холостого хода также по закону, описываемому уравнением (6.1), и полагать, что начало координат в НМТ, то траектория движения зуба пилы в пропиле описывается уравнением (6.3). В конце рабочего хода на дне пропила будут образованы ступеньки, и при движении пил вверх эти ступеньки будут оказывать сопротивление. Таким образом, в этом случае будет наблюдаться скобление зубьями пилы дна пропила.

Траектория зуба пилы в пропиле во время рабочего хода, когда начало координат в НМТ, опишется следующим уравнением:

$$x_p = \frac{S_0}{4R} (2R - y). \quad (6.7)$$

Тогда глубина вдавливания зуба пилы в древесину определится по выражению:

$$\delta = \frac{S_o y}{2R}. \quad (6.8)$$

Для исключения скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода необходимо заготовку дополнительно перемещать с таким расчетом, чтобы зубья пилы отводились от дна пропила на участке движения пильной рамки от 0 до t , когда зубья пилы плющенные, и на участке от 0 до $2t$, когда зубья пилы разведенные. Тогда на этом участке перемещение заготовки можно определить по выражению:

$$x_{e2} = x_{e1} - \delta. \quad (6.9)$$

Подставим в выражение (6.9) уравнения (6.8) и (6.3), получим:

$$x_{e2} = -\frac{S_o y}{4R} = -\frac{S_o}{4}(1 - \cos\alpha). \quad (6.10)$$

На третьем участке цикла работы пилы перемещаются от t при плющенных зубьях или от $2t$ при разведенных зубьях до $2R$ (начало координат в НМТ). За этот период необходимо переместить бревно с таким расчетом, чтобы к концу холостого хода перемещение заготовки за весь холостой ход составило половину посылки, а сама математическая модель перемещения заготовки значительно совпадала с математической моделью движения пил. При этом в конце холостого хода необходимо, чтобы скорость движения заготовки была равна нулю. Это можно математически описать следующим уравнением:

$$x_{e3} = \frac{S_o}{4} \{1 - m \cos[n(\alpha - \alpha_{ck})]\}, \quad (6.11)$$

где m, n – коэффициенты.

Значение угла поворота кривошипа, при котором заканчивается второй участок, можно определить по выражению:

$$\alpha_{ck} = \arccos \frac{R - y_{ck}}{R}. \quad (6.12)$$

Значение коэффициентов m и n определяем исходя из граничных условий. При угле поворота коленчатого вала $\alpha = \alpha_{ск}$ перемещение вальца будет равно половине глубины вдавливания, а $\cos[n(\alpha - \alpha_{ск})] = 1$ и $x_{\epsilon 3} = -\delta/2$. Тогда можно написать:

$$-\frac{S_o y}{4R} = \frac{S_o}{4}(1 - m). \quad (6.13)$$

Решая уравнение (6.13), получим:
– при плющенных зубьях:

$$m = 1 + \frac{t}{R}, \quad (6.14)$$

– при разведенных зубьях:

$$m = 1 + \frac{2t}{R}. \quad (6.14a)$$

В конце холостого хода угол поворота коленчатого вала равен π , а перемещение заготовки составляет половину посылки. Тогда, подставив данные в уравнение (6.11), получим:

$$\frac{S_o}{4} \{1 - m \cos[n(\pi - \alpha_{ск})]\} = \frac{S_o}{2}. \quad (6.15)$$

Решая уравнение (6.15), получим:

$$n = \frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} - \frac{1}{\pi - \alpha_{ск}} \arccos \frac{R}{R + t}. \quad (6.16)$$

Подставив уравнения (6.16) и (6.14) в формулу (6.11), получим:

$$x_{\epsilon 3} = \frac{S_o}{4} \cdot \left\{ 1 - \frac{R + t}{R} \cos \left[\frac{1}{\pi - \alpha_{ск}} \left(\alpha - \arccos \frac{R}{R + t} \right) (\alpha - \alpha_{ск}) \right] \right\}. \quad (6.17)$$

Скорости движения заготовки на соответствующих участках цикла резания древесины рамными пилами определяются по формулам:
– на первом участке:

$$x'_{\epsilon 1} = \frac{S_o}{4} \omega \sin \alpha, \quad (6.18)$$

– на втором участке:

$$x'_{\epsilon 2} = -\frac{S_0}{4} \omega \sin \alpha, \quad (6.19)$$

– на третьем участке:

$$x'_{\epsilon 3} = \frac{S_0}{4} \omega \frac{R+t}{R} \cdot \frac{1}{\pi - \alpha_{\text{СК}}} \left(\pi - \arccos \frac{R}{R+t} \right) \cdot \sin \left[\frac{1}{\pi - \alpha_{\text{СК}}} \left(\pi - \arccos \frac{R}{R+t} \right) (\alpha - \alpha_{\text{СК}}) \right]. \quad (6.20)$$

Ускорения заготовки на соответствующих участках пиления древесины рамными пилами определяются по выражениям:

– на первом участке:

$$x''_{\epsilon 1} = \frac{S_0}{4} \omega^2 \cos \alpha, \quad (6.21)$$

– на втором участке:

$$x''_{\epsilon 2} = -\frac{S_0}{4} \omega^2 \cos \alpha, \quad (6.22)$$

– на третьем участке:

$$x''_{\epsilon 3} = \frac{S_0}{4} \omega^2 \frac{R+t}{R} \cdot \left[\frac{1}{\pi - \alpha_{\text{СК}}} \left(\pi - \arccos \frac{R}{R+t} \right) \right]^2 \cdot \cos \left[\frac{1}{\pi - \alpha_{\text{СК}}} \left(\pi - \arccos \frac{R}{R+t} \right) (\alpha - \alpha_{\text{СК}}) \right]. \quad (6.23)$$

Подставив данные применительно к одноэтажным лесопильным рамам ($R = 200$ мм, $t = 26$ мм, $S_0 = 20$ мм/об, $n = 285$ мин⁻¹), построим графики перемещений, скоростей и ускорений заготовки в функции угла поворота коленчатого вала (времени) (см. рис. 6.1) и в функции перемещения пил (см. рис. 6.2). Анализируя эти графики, можно отметить следующее. В начале холостого хода необходимо осуществлять «попятное» движение заготовки. Величина обратного (попятного) движения заготовки небольшая и составляет 3,25% от

величины посылки. Скорости и ускорения заготовки во время холостого хода несколько больше, чем во время рабочего хода, а их максимальные значения во время холостого хода соответственно больше на 14,3% и на 15,7%, чем во время рабочего хода.

Таким образом, впервые получено математическое описание модели движения распиливаемой заготовки, обеспечивающее срезание слоя древесины каждым зубом пилы во время рабочего хода равномерной толщины и исключение скобления зубьями пилы древесины в начале холостого хода. Математическая модель описания перемещений заготовки справедлива для любых параметров процесса пиления древесины рамными пилами [16, 26].

Спроектировать механизм подачи с переменной скоростью движения заготовки, как указано на рис. 6.2, довольно сложно. Поэтому возникает вопрос разработки более упрощенной математической модели перемещения заготовки в механизмах подачи лесопильных рам.

Если производить перемещение заготовки с некоторым опережением (см. рис. 2.2e), то скопление зубьями пилы дна пропила будет также исключено, но будет наблюдаться срезание слоя древесины зубом пилы неравномерной толщины, а именно: её толщина в первой половине рабочего хода будет больше среднего значения, а во второй половине рабочего хода толщина срезаемого слоя древесины зубом пилы будет меньше ее среднего значения.

Если подачу заготовки осуществлять с некоторым запаздыванием, то будет наблюдаться скопление зубьями пилы дна пропила и будет происходить срезание слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода неравномерной толщины.

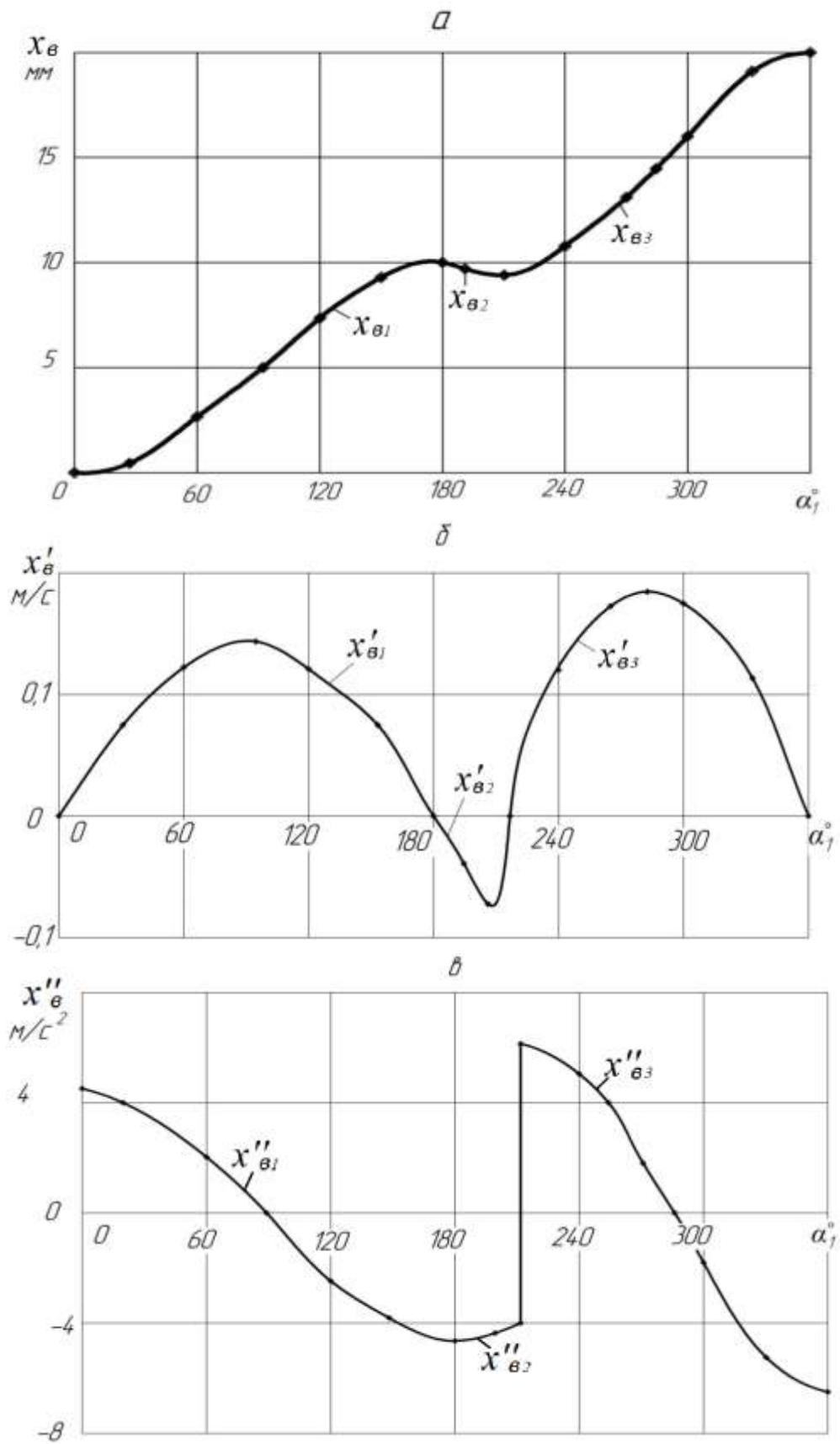


Рис. 6.1. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) с возвратом заготовки в функции угла поворота кривошипа

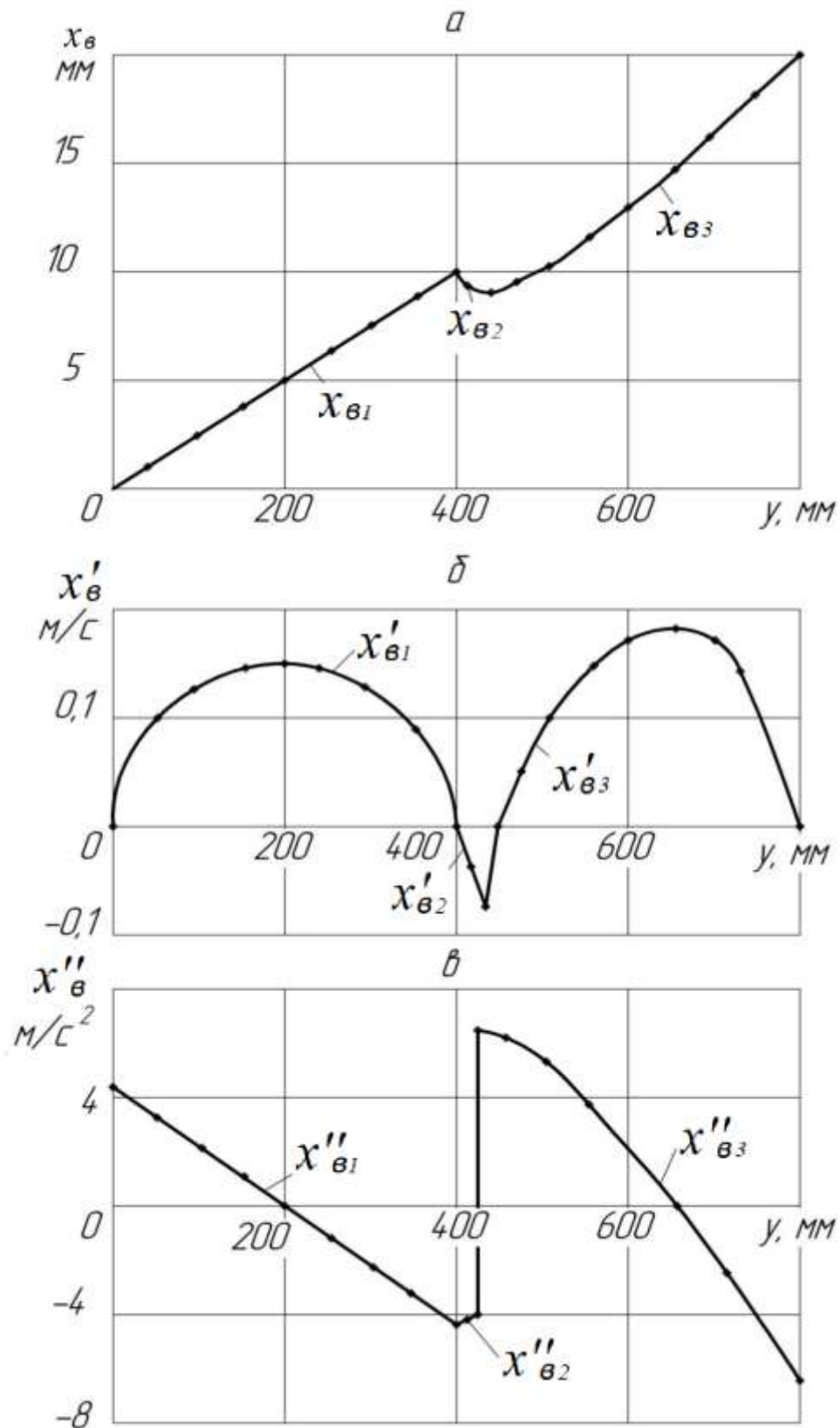


Рис. 6.2. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) с возвратом заготовки в функции движения пил по вертикали

6.2. Упрощенные математические модели движения заготовки

Теоретический анализ закона движения заготовки показал, что для согласования движения резания и подачи необходимо, чтобы скорость заготовки в начале холостого хода изменяла свой знак (становилась отрицательной), а бревно имело противоположное перемещение. Однако разработка и создание таких механизмов подачи с асимметричным законом перемещения за рабочий и холостой ходы – задача довольно трудная. Поэтому возникает вопрос разработки более упрощенных вариантов механизмов подачи с переменной скоростью, которые бы удовлетворяли в меньшей мере по кинематическим требованиям процесса резания древесины рамными пилами, но были бы проще в конструктивном исполнении. Анализируя теоретический закон движения заготовки, можно выделить следующие варианты, которые можно использовать в промышленности:

- с одной остановкой за цикл резания (см. рис. 2.2*р*);
- с двумя остановками за цикл резания (см. рис. 2.2*н*).

Движение заготовки с одной остановкой за цикл резания предусматривает его остановку в конце рабочего и в начале холостого ходов. Остановки могут быть расположены симметрично относительно нижней мертвой точки и асимметрично.

Указанные выше варианты законов движения заготовки конструктивно более проще разработать, чем механизм подачи с теоретическим законом движения заготовки. Однако важно знать при этом, как изменится кинематика процесса пиления древесины рамными пилами и каким образом можно определить основные кинематические параметры процесса с такими законами движения распиливаемой заготовки.

Кроме того, представляет интерес подача заготовки с возвратным движением заготовки. Здесь прежде всего необходимо рассмотреть варианты:

- с одним возвратом заготовки за цикл резания (см. рис. 2.2*з*);
- с двумя возвратами заготовки за цикл резания (см. рис. 2.2*к*).

Обратное перемещение заготовки необходимо предусмотреть в конце рабочего и в начале холостого ходов. Два обратных перемещения можно предусмотреть в начале и в конце рабочего и холостого ходов.

Кроме того, учитывая цикличность подачи, можно рассмотреть варианты движения заготовки с циклом за оборот:

- с одним возвратным движением (см. рис. 2.3з);
- с одной остановкой (см. рис. 2.3ж).

Рассмотрим вначале движение заготовки с одной симметричной остановкой в конце рабочего хода и в начале холостого хода. В этом случае подачу заготовки за рабочий ход необходимо произвести несколько раньше момента, когда пилы дойдут до нижней мертвой точки. Величина этой остановки определится величиной пути скобления древесины зубьями пилы в начале холостого хода. Эта величина равна шагу при плющенных зубьях и двум шагам при разведенных зубьях, а угол поворота кривошипа определится по выражению (6.12).

Тогда движение заготовки за рабочий ход можно математически описать уравнением:

$$x_{\delta 1} = \frac{S_o}{4} (1 - \cos n\alpha), \quad (6.24)$$

где n – коэффициент, учитывающий необходимость осуществления подачи несколько раньше момента, когда пилы подойдут к нижней мертвой точке.

Коэффициент n определим исходя из физико-механических условий процесса пиления. К концу рабочего хода бревно должно переместиться на половину посылки и в то же время угол поворота кривошипа, до значения которого необходимо осуществить подачу во время рабочего хода, определится выражением $(\pi - \alpha_{ск})$. Тогда можно написать:

$$\frac{S_o}{2} = \frac{S_o}{4} [1 - \cos n(\pi - \alpha_{ск})]. \quad (6.25)$$

Решив это тождество, найдем:

$$n = \frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}}. \quad (6.26)$$

Подставив данное выражение в формулу (6.24), получим:

$$x_{\delta 1} = \frac{S_o}{4} \left(1 - \cos \frac{\pi\alpha}{\pi - \alpha_{ск}} \right). \quad (6.27)$$

Тогда скорость и ускорение заготовки на этом участке работы пил определяются по формулам:

$$x'_{e1} = \frac{S_o}{4} \omega \frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} \sin \frac{\pi \alpha}{\pi - \alpha_{ск}}, \quad (6.28)$$

$$x''_{e1} = \frac{S_o}{4} \omega^2 \left(\frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} \right)^2 \cos \frac{\pi \alpha}{\pi - \alpha_{ск}}. \quad (6.29)$$

Такая математическая модель перемещения заготовки во время рабочего хода, видимо, изменит каким-то образом подачу на зуб. Для определения мгновенной подачи на зуб найдем траектории относительного движения двух соседних зубьев пилы в пропиле. Траектория движения первого зуба пилы в пропиле определится из решения такой системы уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{S_o}{4} \left(1 - \cos \frac{\pi \alpha}{\pi - \alpha_{ск}} \right), \\ y = R(1 - \cos \alpha). \end{cases} \quad (6.30)$$

Решая систему уравнений (6.30), траекторию зуба пилы в пропиле выразим так:

$$x_1 = \frac{S_o}{4} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} \arccos \frac{R - y}{R} \right) \right]. \quad (6.31)$$

Траектория движения нижнего соседнего зуба пилы в пропиле определится из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_o}{4} \left(1 - \cos \frac{\pi \alpha}{\pi - \alpha_{ск}} \right) - t \sin \varphi, \\ y = R(1 - \cos \alpha) + t. \end{cases} \quad (6.32)$$

Решая систему уравнений (6.32), траекторию нижнего соседнего зуба пилы определим по формуле:

$$x_2 = \frac{S_o}{4} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) \right] - \frac{S_o t}{4R}. \quad (6.33)$$

Тогда мгновенная подача на зуб определится по формуле:

$$\begin{aligned} S_z = \frac{S_o}{4} \frac{t}{R} + \frac{S_o}{4} \left[\cos \left(\frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) - \right. \\ \left. - \cos \left(\frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} \arccos \frac{R - y}{R} \right) \right]. \end{aligned} \quad (6.34)$$

Подставив данные применительно к одноэтажным лесопильным рамам ($R = 200$ мм, $t = 26$ мм, $S_o = 20$ мм/об), получим следующий график изменения подачи на зуб во время рабочего хода (рис. 6.3а). Анализируя этот график, отмечаем, что подача на зуб в первую половину рабочего хода несколько больше ее среднего значения, а во второй половине рабочего хода – наоборот. Такой характер изменения подачи на зуб практически вполне допустим. Во время холостого хода необходимо подачу заготовки производить с некоторым запаздыванием, величина которого равна пути скобления зубьями дна пропила. Кроме того, необходимо выполнить и другое требование – осуществить перемещение заготовки во время холостого хода на величину половины посылки. Учитывая эти требования, математическое описание модели перемещения заготовки можно выполнить в следующем виде:

$$x_{вз} = \frac{S_o}{4} [1 - \cos m(\alpha - \alpha_{ск})]. \quad (6.35)$$

Значение коэффициента m найдем из граничных условий. Если $\alpha = \pi$, то бревно должно переместиться на половину посылки, т. е. $x_{вз} = S_o/2$. Подставив эти значения в формулу (6.35), найдём:

$$m = \frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}}. \quad (6.36)$$

Подставив выражение (6.36) в формулу (6.35), получим:

$$x_{вз} = \frac{S_o}{4} \left\{ 1 - \left[\cos \frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} (\alpha - \alpha_{ск}) \right] \right\}. \quad (6.37)$$

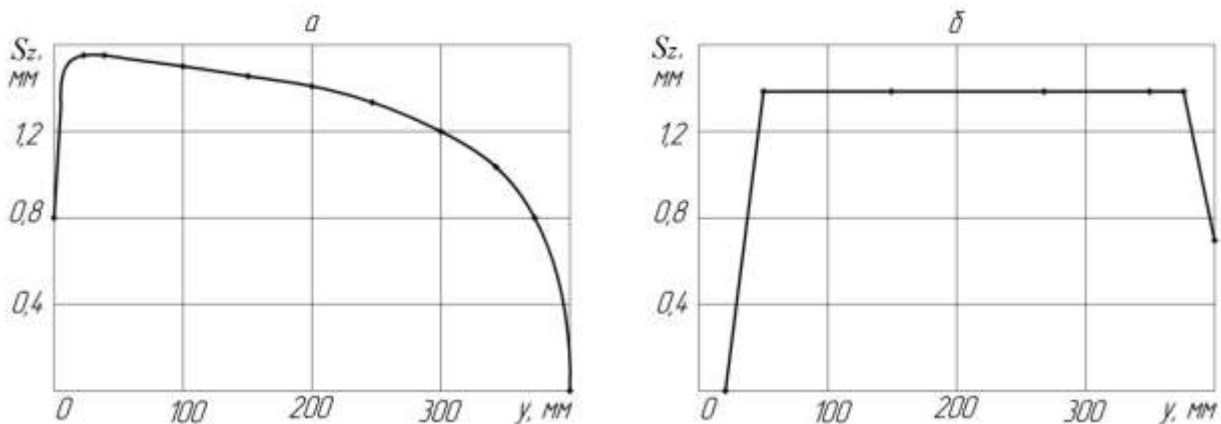


Рис. 6.3. Характер изменения подачи на зуб во время рабочего хода пил с одной остановкой заготовки (а), с двумя остановками заготовки (б)

Тогда скорости и ускорения заготовки на этом участке общего цикла пиления древесины рамными пилами определяются по формулам:

$$x'_{63} = \frac{S_0}{4} \omega \frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} \sin \left[\frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} (\alpha - \alpha_{ск}) \right], \quad (6.38)$$

$$x''_{63} = \frac{S_0}{4} \omega^2 \left(\frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} \right)^2 \cos \left[\frac{\pi}{\pi - \alpha_{ск}} (\alpha - \alpha_{ск}) \right]. \quad (6.39)$$

Подставив в формулы (6.27) – (6.29) и (6.37) – (6.39) данные, относящиеся к одноэтажным лесопильным рамам, определим графики перемещений, скоростей и ускорений заготовки в зависимости от величины перемещения пил (см. рис. 6.5). Эти графики показывают, что перемещение зубьев пилы в пропиле происходит в начале и в конце одного цикла работы лесопильной рамы почти по прямым линиям, а ускорения возрастают на 43% по сравнению с теоретическим вариантом перемещения вальца, когда бревно совершает обратное перемещение в начале холостого хода. Данный вид подачи можно рассматривать с опережением (см. рис. 2.2с) и с запаздыванием (см. рис. 2.2m). Тогда в приведенных выше формулах вводится соответствующая корректировка. Если рассматривается вариант с опережением, то в формулах вместо угла поворота коленчатого вала (α) делается подстановка ($\alpha + \alpha_0$). Если рассматривается вариант с запаздыванием, то в формулах вместо α делается подстановка $\alpha - \alpha_3$.

При подаче заготовки с опережением наблюдается скобление зубьями пилы дна пропила, так как в конце рабочего хода распиливаемая заготовка не перемещается и имеющиеся ступеньки на дне пропила будут оказывать препятствие зубьям пилы в начале холостого хода.

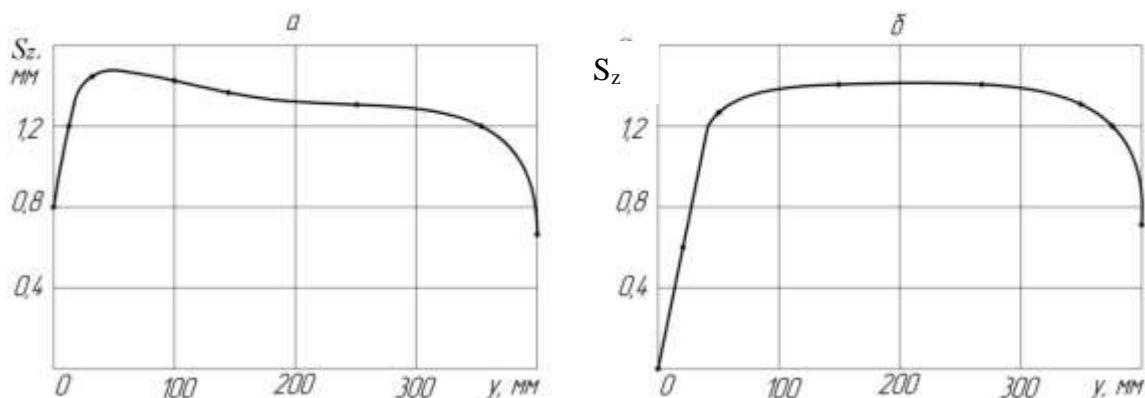


Рис. 6.4. Характер изменения подачи на зуб во время рабочего хода пил с одним возвратным перемещением (а) и с двумя возвратными перемещениями (б) заготовки

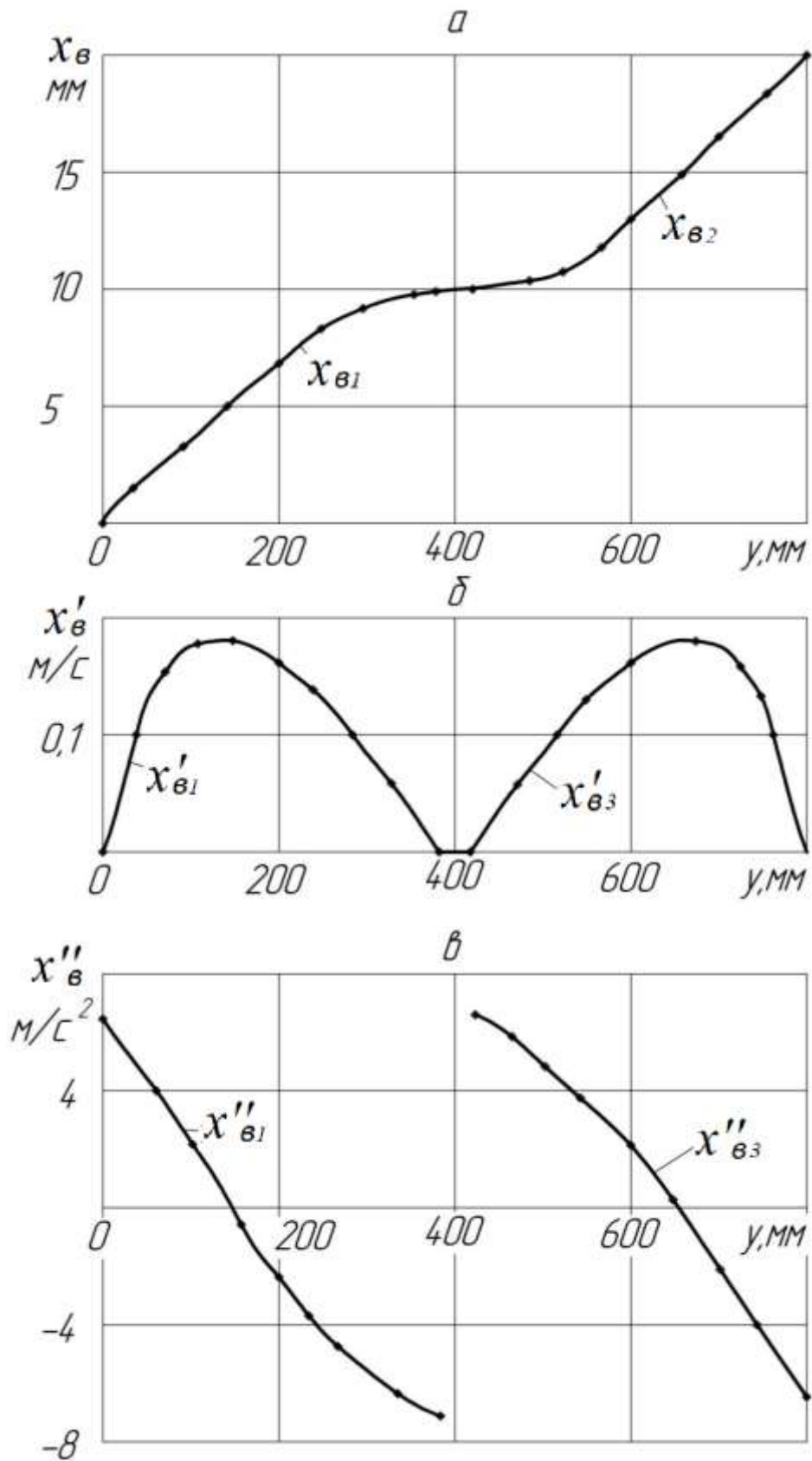


Рис. 6.5. Графики перемещений (а), скоростей (б) и ускорений (в) с остановкой заготовки в зависимости от величины перемещения пил

Кроме того, начало цикла подачи заготовки происходит несколько раньше движения пил во время рабочего хода. Это окажет отрицательное влияние на равномерность толщины срезаемого слоя древесины зубьями пилы, т. е. в начале рабочего хода толщина возрастает, а в конце рабочего хода толщина срезаемого слоя древесины будет приближаться к половине среднего значения подачи на зуб. Следует иметь в виду, что величина перемещения заготовки во время холостого хода будет больше, чем во время рабочего хода, и, следовательно, пилы необходимо устанавливать с несколько большим уклоном.

При подаче заготовки с запаздыванием также будет наблюдаться скобление зубьями пилы древесины в начале холостого хода, так как наклонные ступеньки на дне пропила будут оказывать препятствие зубьям пилы в начале холостого хода, когда распиливаемое бревно или брус находится в покое. В таком варианте перемещение распиливаемой заготовки за рабочий ход будет больше, чем за холостой ход. Таким образом, подача заготовки с запаздыванием или с опережением для данных вариантов перемещения заготовки нецелесообразна.

Рассмотрим вариант перемещения заготовки с двумя остановками за цикл работы лесопильной рамы. В этом случае бревно останавливается в начале и в конце рабочего и холостого ходов.

Математическую модель движения заготовки можно представить следующим уравнением (принимая только положительное значение функции):

$$x_{e1} = \frac{S_o}{4} (1 - m \cos \alpha). \quad (6.40)$$

Величину m определим из условия, что при $\alpha = \pi - \alpha_{ck}$, $x_{e1} = S_o/2$. Подставив эти значения в формулу, получим:

$$m = \frac{1}{\cos \alpha_{ck}} = \frac{R}{R - t}. \quad (6.41)$$

Учитывая выражение (6.41), в окончательном виде формулу (6.40) запишем так:

$$x_{e1} = \frac{S_o}{4} \left(1 - \frac{R}{R - t} \cos \alpha \right). \quad (6.42)$$

Скорости и ускорения движения заготовки определяются по выражениям:

$$x'_{\delta 1} = \frac{S_o}{4} \omega \frac{R}{R-t} \sin \alpha, \quad (6.43)$$

$$x''_{\delta 1} = \frac{S_o}{4} \omega^2 \frac{R}{R-t} \cos \alpha. \quad (6.44)$$

Следует помнить, что при определении перемещений заготовки по формуле (6.40) учитываем только положительные значения функции, т. е. расчет перемещений заготовки ведем только на участке изменения угла поворота коленчатого вала от $\alpha_{ск}$ до $\pi - \alpha_{ск}$. На участках от 0 до $\alpha_{ск}$ и от $\pi - \alpha_{ск}$ до π бревно не перемещается. Тогда формула (6.43) будет справедлива, если значение $\sin \alpha$ будет определяться от $\sin(\alpha - \alpha_{ск})$ до $\sin(\pi - \alpha_{ск})$. В формуле (6.44) значение $\cos \alpha$ необходимо определять от $\alpha_{ск}$ до $\pi - \alpha_{ск}$. Для вышеуказанных условий построены графики перемещений, скоростей и ускорений заготовки в зависимости от перемещения пил (см. рис. 6.6). Графики показывают, что перемещение заготовки происходит прямо пропорционально перемещению пил. Это хорошо подтверждается уравнением относительного движения зуба в пропиле:

$$x_1 = \frac{S_o}{4} \frac{y-t}{R-t}. \quad (6.45)$$

Траектория соседнего нижнего зуба пилы относительно плоскости пропила определится по формуле:

$$x_2 = \frac{S_o}{4} \frac{y-2t}{R-t} - \frac{S_o t}{4R}. \quad (6.46)$$

Тогда подача на зуб определится по выражению:

$$S_z = \frac{S_o t}{4(R-t)} + \frac{S_o t}{4R}. \quad (6.47)$$

Формула (6.47) показывает, что подача на зуб на участке резания является величиной постоянной (см. рис. 6.3б), но на 7,7% больше, чем ее среднее значение (для указанных выше условий пиления). Из рис. 6.3б видно, что резание начинается с некоторым за-

паздыванием, т. е. наблюдается потеря рабочего хода. Это и вызывает увеличение подачи на зуб. В конце рабочего хода подача на зуб приближается к нулевому значению.

Здесь также возможны варианты подачи заготовки с опережением (см. рис. 2.2o) и с запаздыванием (см. рис. 2.2n). При подаче заготовки с опережением не будет наблюдаться скобление зубьями пилы дна пропила, так как на дне пропила в конце рабочего хода не будут образованы ступеньки. Ступеньки на дне пропила будут срезаны и, следовательно, не окажут сопротивление зубьям при движении пил вверх и одновременном перемещении заготовки.

Резание древесины будет наблюдаться с начала рабочего хода. Поэтому теоретически потери рабочего хода нет, а в конце рабочего хода на участке $y = t$ будет наблюдаться срезание слоя древесины зубом пилы толщиной, приближающейся к половине среднего значения подачи на зуб.

При подаче заготовки с запаздыванием также будет наблюдаться скобление зубьями пилы дна пропила, так как на дне пропила в конце рабочего хода будут образованы наклонные ступеньки, которые окажут препятствие движению пил вверх, хотя при этом перемещение заготовки не происходит. В данном случае будет наблюдаться еще большая потеря хода, чем при отсутствии опережения или запаздывания (см. рис. 6.3б). Следовательно, данный вариант подачи удовлетворяет требованиям при строгом согласовании движений резания и подачи, т. е. необходимо осуществлять подачу заготовки без опережения или запаздывания.

Рассмотрим движение заготовки с двумя возвратными перемещениями. Математическое описание такого перемещения заготовки можно представить в виде:

$$x_g = \frac{S_o}{4} m(1 - \cos\alpha) - \frac{S_o}{4} n\alpha. \quad (6.48)$$

Скорости и ускорения заготовки в этом случае определяются по формулам:

$$x'_g = \frac{S_o}{4} \omega \sin\alpha - \frac{S_o}{4} n\omega, \quad (6.49)$$

$$x''_g = \frac{S_o}{4} \omega^2 \cos\alpha. \quad (6.50)$$

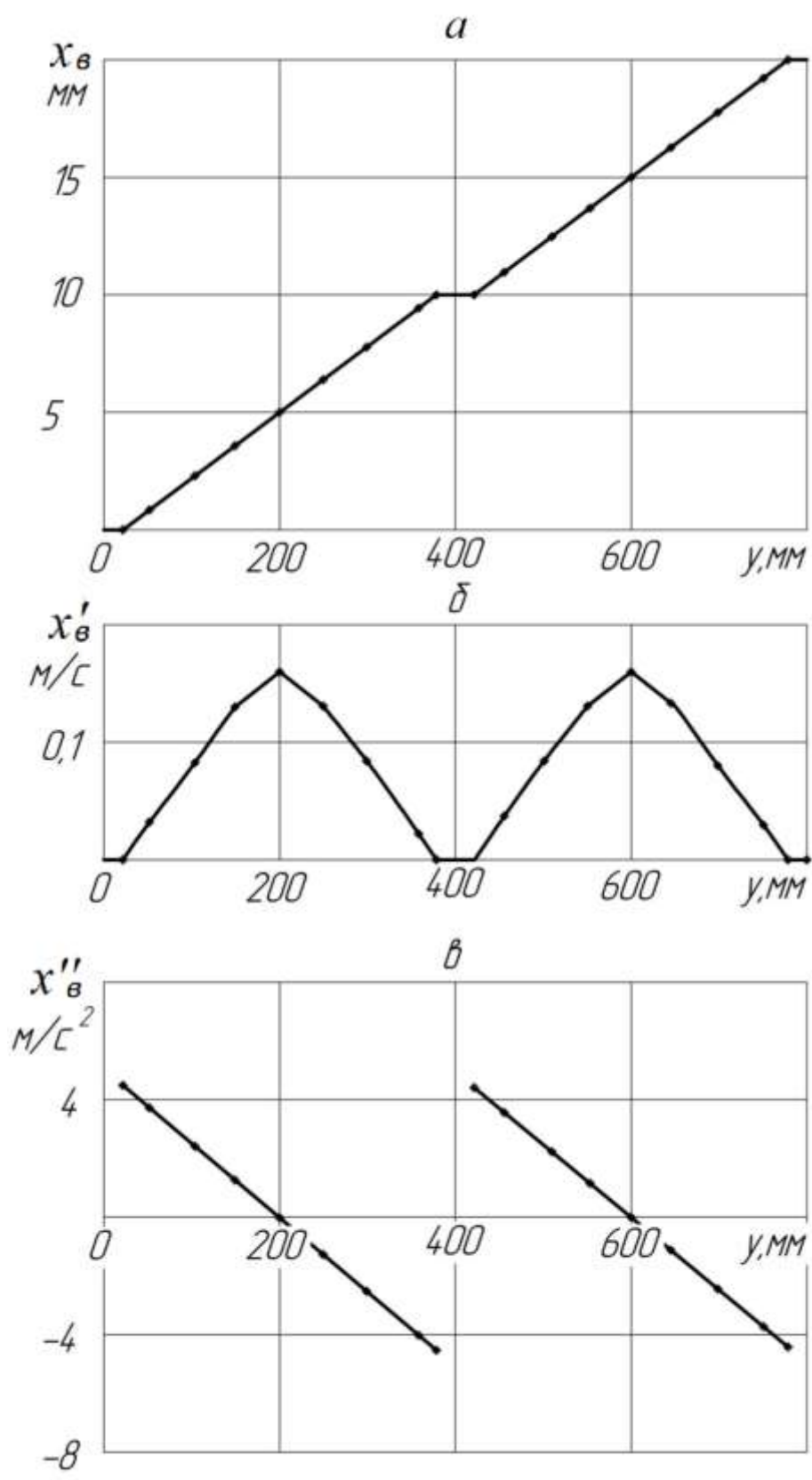


Рис. 6.6. Графики перемещений (*a*), скоростей (*б*) и ускорений (*в*) с двумя остановками заготовки от изменения положений пил

Определение коэффициента m в этих формулах производим исходя из условия, что при $\alpha = \pi$, $x_e = S_o/2$. Подставив эти значения в формулу (6.48), получим:

$$m = 1 + \frac{\pi}{2}n. \quad (6.51)$$

Определение значения коэффициента m производим исходя из условия отсутствия скобления зубьями пилы дна пропила. Для этого вначале напишем уравнение для траектории относительного движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода пил, а затем напишем уравнение для траектории относительного движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода пил. Траектория относительного движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется следующей системой уравнений (начало координат в ВМТ):

$$\begin{cases} x_p = \frac{S_o}{4} \left(1 + \frac{\pi}{2}n\right) (1 - \cos\alpha) - \frac{S_o}{4}n\alpha. \\ y = R(1 - \cos\alpha) \end{cases} \quad (6.52)$$

Решая эту систем уравнений, получим:

$$x_p = \frac{S_o}{4} \left(1 + \frac{\pi}{2}n\right) \frac{y}{R} - \frac{S_o}{4}n \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (6.53)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода опишется таким же уравнением (6.53), но отсчет нуля при этом необходимо производить от НМТ. Для приведения этих уравнений к одному началу координат (НМТ) необходимо в уравнение движения заготовки во время рабочего хода сделать следующую подстановку $y' = 2R - y$.

После преобразования получим:

$$x_p = \frac{S_o}{4} \left(1 + \frac{\pi}{2}n\right) \frac{2R - y}{R} - \frac{S_o}{4}n \left(\pi - \arccos \frac{R - y}{R}\right). \quad (6.54)$$

Тогда глубина вдавливания зубьев пилы в древесину в начале холостого хода определится по формуле:

$$\delta = \frac{S_o y}{2R} + \frac{S_o \pi}{4R} n y - \frac{S_o}{2} n \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (6.55)$$

Максимального значения глубина вдавливания зуба пилы в древесину достигает при $y = t$ (зубья плющенные). Тогда значение коэффициента определится по выражению:

$$n = \frac{t}{R \left(\arccos \frac{R-t}{R} - \frac{\pi t}{2R} \right)}. \quad (6.56)$$

Подставив данные в эти формулы, получим следующие графики перемещений (a), скоростей (b) и ускорений ($в$) (см. рис. 6.7).

Величина коэффициента m (6.51) зависит от радиуса кривошипа и шага зубьев пилы (см. рис. 6.8). С увеличением радиуса кривошипа величина коэффициента уменьшается, а с увеличением шага зубьев пилы возрастает. Изменение этого коэффициента происходит в значительных пределах 2,0–1,4.

Важно знать, как при этом изменяется подача на зуб. Для этого определим траекторию относительного движения нижнего соседнего зуба пилы в пропиле из системы уравнений:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_0}{4} m(1 - \cos \alpha) - \frac{S_0}{4} n \alpha - \frac{S_0 t}{4R}. \\ y = R(1 - \cos \alpha) + t. \end{cases} \quad (6.57)$$

Решая систему уравнений (6.57), получим:

$$x_2 = \frac{S_0}{4} m \frac{y - t}{R} - \frac{S_0}{4} n \arccos \frac{R + t - y}{R} - \frac{S_0 t}{4R}. \quad (6.58)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0 t}{4R} (m + 1) - \frac{S_0}{4} n \left(\arccos \frac{R - y}{R} - \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) + \frac{S_0 t}{4R}. \quad (6.59)$$

Подставив данные в формулу (6.59), получим график изменения подачи на зуб (см. рис. 6.4б). График показывает, что максимального значения подача на зуб достигает в середине хода пил, а величина его на 11,5% больше среднего значения.

В этом варианте (см. рис. 2.2к) возможны случаи подачи заготовки с опережением (см. рис. 2.2л) и с запаздыванием (см. рис. 2.2м).

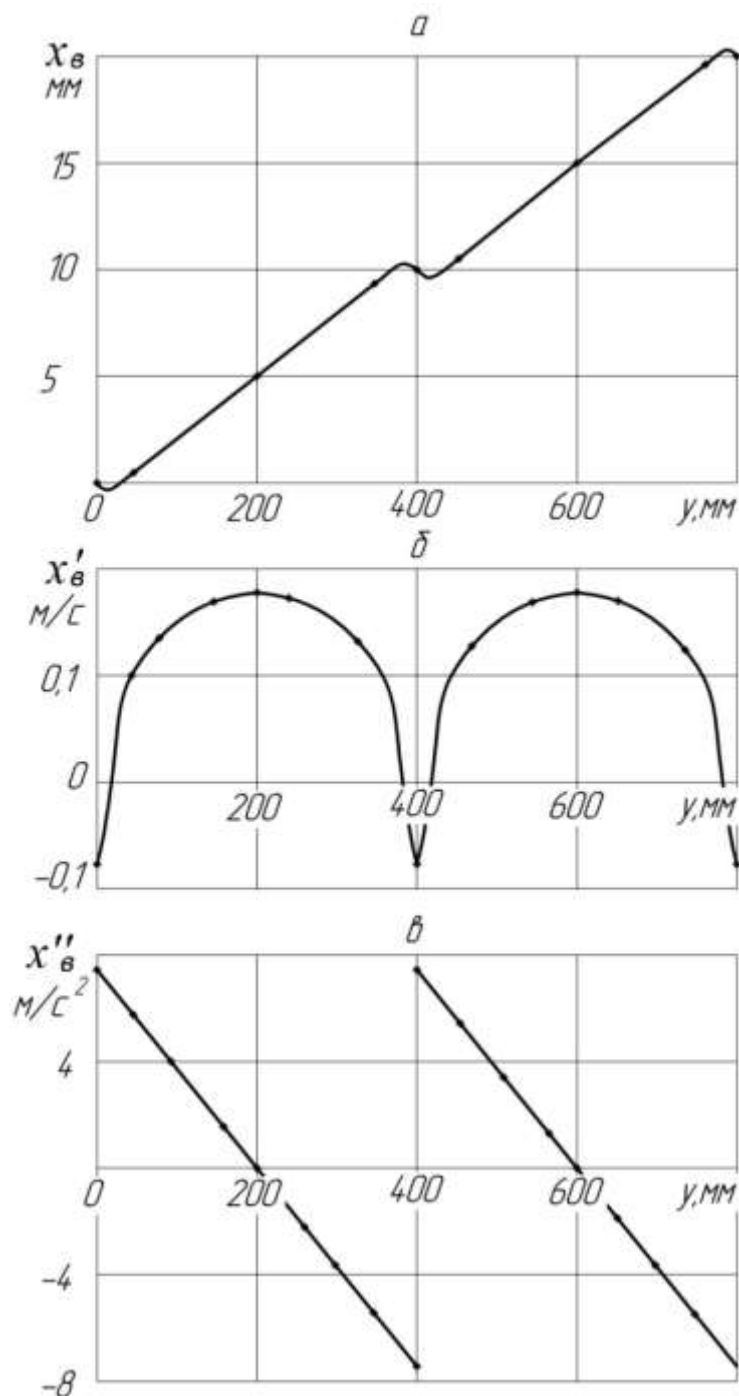


Рис. 6.7. Графики перемещений (а), скоростей (б) и ускорений (в) с двумя возвратами заготовки в функции перемещения пил

При подаче заготовки с опережением скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода наблюдаться не будет, так как в конце рабочего хода осуществляется подача заготовки в обратном направлении, за счет чего происходит срезание ступеньки на дне пропила. Следовательно, подача на зуб в конце рабочего хода может достигнуть значения равного нулю.

Характер изменения подачи на зуб будет иным по сравнению с рис. 6.4б. В этом варианте максимальное значение подачи на зуб, по

сравнению с рис. 6.4б, переместится с середины рабочего хода к его начальному периоду.

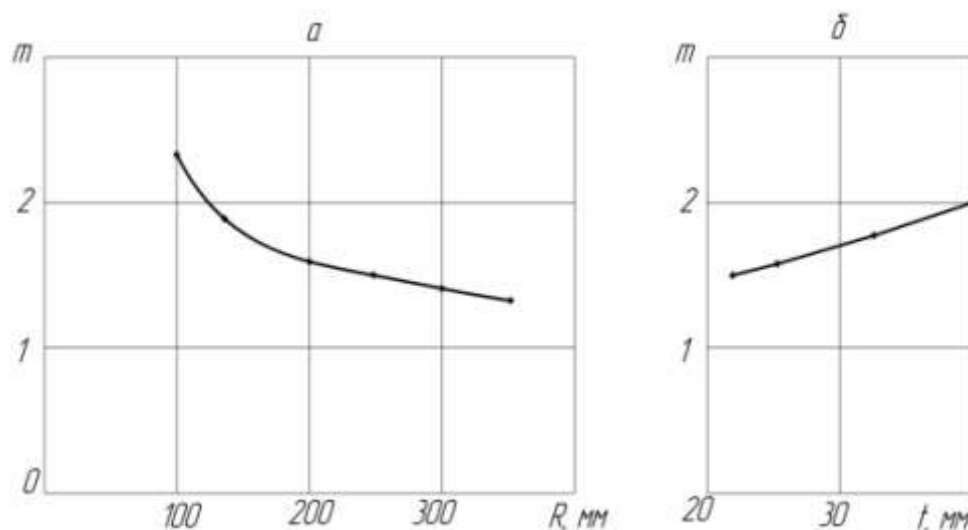


Рис. 6.8. Влияние радиуса кривошипа (*a*) и шага зубьев пилы (*б*) на параметр m с двумя возвратами заготовки

При подаче заготовки с запаздыванием скобление зубьями пилы дна будет также отсутствовать, так как в начальный период холостого хода происходит попятное (обратное) движение заготовки и дно пропила отходит от зубьев пилы. Мгновенная подача на зуб во время рабочего хода изменится по сравнению с рис. 6.4б, ее максимальное значение переместится во вторую половину хода, а в конце его текущее значение подачи на зуб может быть равно ее среднему значению.

Следовательно, при подаче заготовки с двумя возвратными перемещениями как с опережением, так и с запаздыванием обеспечивается исключение скобления зубьями пилы дна пропила, что весьма положительно.

Рассмотрим подачу заготовки с одним обратным движением в конце рабочего и в начале холостого ходов. Скорость движения заготовки во время рабочего хода математически можно выразить так:

$$x'_p = \frac{S_0}{4} \omega m \sin(n\alpha). \quad (6.60)$$

Скорость движения заготовки во время холостого хода математически можно выразить так:

$$x'_x = \frac{S_0}{4} \omega m \sin[n(\alpha - \alpha_0)]. \quad (6.61)$$

Тогда перемещения заготовки во время рабочего и холостого ходов определяются по формулам:

– во время рабочего хода:

$$x_{\text{вр}} = \frac{S_o}{4} m [1 - \cos(n\alpha)], \quad (6.62)$$

– во время холостого хода:

$$x_{\text{ох}} = \frac{S_o}{4} m \{ \cos(n\alpha_o) - \cos[n(\alpha - \alpha_o)] \}. \quad (6.63)$$

Значение коэффициентов m и n определим следующим образом. При $\alpha = \pi$ скорость заготовки в конце холостого хода будет равна нулю. Тогда:

$$n = \frac{\pi}{\pi - \alpha_o}. \quad (6.64)$$

При $\alpha = \pi$ перемещение заготовки во время рабочего хода составит $S_o/2$. Тогда величину коэффициента m можно определить по формуле:

$$m = \frac{2}{1 - \cos(n\pi)} = \frac{2}{1 - \cos \frac{\pi^2}{\pi - \alpha_o}}. \quad (6.65)$$

Подставив выражения (6.64) и (6.65) в формулы (6.62) и (6.63), получим:

$$x_{\text{вр}} = \frac{S_o}{2} \frac{1}{1 - \cos \frac{\pi^2}{\pi - \alpha_o}} \left(1 - \cos \frac{\pi\alpha}{\pi - \alpha_o} \right), \quad (6.66)$$

$$x_{\text{ох}} = \frac{S_o}{2} \frac{1}{1 - \cos \frac{\pi^2}{\pi - \alpha_o}} \left[\cos \frac{\pi\alpha_o}{\pi - \alpha_o} - \cos \frac{\pi}{\pi - \alpha_o} (\alpha - \alpha_o) \right]. \quad (6.67)$$

Значение угла α_o определим из условия отсутствия скобления зубьями пилы дна пропила. Для этого определяем траектории относительного движения зуба пилы во время рабочего и холостого ходов по следующим выражениям.

Во время рабочего хода:

$$x_p = \frac{S_o}{2 - 2\cos\frac{\pi^2}{\pi - \alpha_o}} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{\pi - \alpha_o} \arccos\frac{R - y}{R}\right) \right]. \quad (6.68)$$

Во время холостого хода:

$$x_x = \frac{S_o}{2 - 2\cos\frac{\pi^2}{\pi - \alpha_o}} \left\{ \cos\frac{\pi\alpha_o}{\pi - \alpha_o} - \cos\left[\frac{\pi}{\pi - \alpha_o} \left(\arccos\frac{R - y}{R} - \alpha_o\right)\right] \right\}. \quad (6.69)$$

Перемещение зуба пилы относительно пропила во время рабочего хода определяется от ВМТ, а во время холостого хода – от НМТ. Приводим уравнения к одной системе координат (НМТ). Для этого в формулу (6.68) сделаем подстановку $y' = 2R - y$. Тогда получим формулу для определения траектории движения зуба пилы во время рабочего хода с началом отсчета координат в НМТ:

$$x_p = \frac{S_o}{2 - 2\cos\frac{\pi^2}{\pi - \alpha_o}} \times \\ \times \left\{ 1 - \cos\left[\frac{\pi}{\pi - \alpha_o} \left(\pi - \arccos\frac{R - y}{R}\right)\right] \right\}. \quad (6.70)$$

Глубина вдавливания зуба пилы в древесину в начале холостого хода определится по формуле:

$$\delta = \frac{S_o}{2 - 2\cos\frac{\pi^2}{\pi - \alpha_o}} \left\{ \cos\frac{\pi\alpha_o}{\pi - \alpha_o} - \cos\left[\frac{\pi}{\pi - \alpha_o} \left(\arccos\frac{R - y}{R} - \alpha_o\right)\right] \right\} - \\ - \frac{S_o}{2 - 2\cos\frac{\pi^2}{\pi - \alpha_o}} \left\{ 1 - \cos\left[\frac{\pi}{\pi - \alpha_o} \left(\pi - \arccos\frac{R - y}{R}\right)\right] \right\} + \frac{S_o}{2}. \quad (6.71)$$

Согласно исследованиям автора [17], максимального значения глубина вдавливания достигает при $y = t$. Для этого условия и ранее приведенных данных для одноэтажных лесопильных рам определяем значение искомого угла. Оно будет равно $\alpha_o = 14,6^\circ$. Для вышеуказанных условий определяем графики перемещений, скоро-

стей и ускорений (см. рис. 6.9). Ускорения заготовки за рабочий ход и холостой ход определяются по формулам:

$$x''_{ep} = \frac{S_o}{4} \omega^2 mn^2 \cos(n\alpha), \quad (6.72)$$

$$x''_{ex} = \frac{S_o}{4} \omega^2 mn^2 \cos[n(\alpha - \alpha_o)]. \quad (6.73)$$

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что такой вариант перемещения заготовки вполне приемлем с точки зрения кинематики процесса пиления древесины рамными пилами, так как ускорения заготовки при этом практически не возрастают по сравнению с первым вариантом перемещения заготовки.

Важно знать при этом способе перемещения заготовки изменение толщины стружки во время рабочего хода. Для этого составим уравнения относительного движения в пропиле двух соседних зубьев пилы. Перемещение первого зуба в пропиле определится по формуле (6.67). Движение нижнего соседнего зуба пилы в пропиле определится следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_o}{4} m [1 - \cos(n\alpha)] - t \sin \varphi, \\ y = R(1 - \cos \alpha) + t. \end{cases} \quad (6.74)$$

Решая эту систему уравнений, получим:

$$x_2 = \frac{S_o}{4} m \left[1 - \cos \left(\arccos \frac{R + t - y}{R} \right) \right] - t \sin \varphi - \frac{S_o t}{4R}. \quad (6.74a)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$\begin{aligned} S_z = \frac{S_o}{4} \left[m \cos \left(\arccos \frac{R + t - y}{R} \right) - \right. \\ \left. - \cos \left(\arccos \frac{R - y}{R} \right) \right] + \frac{S_o t}{4R}. \end{aligned} \quad (6.75)$$

Максимального значения подача на зуб (см. рис. 6.4a) достигает в начальный период движения пил ($y = t$), а его величина на 10% больше среднего значения.

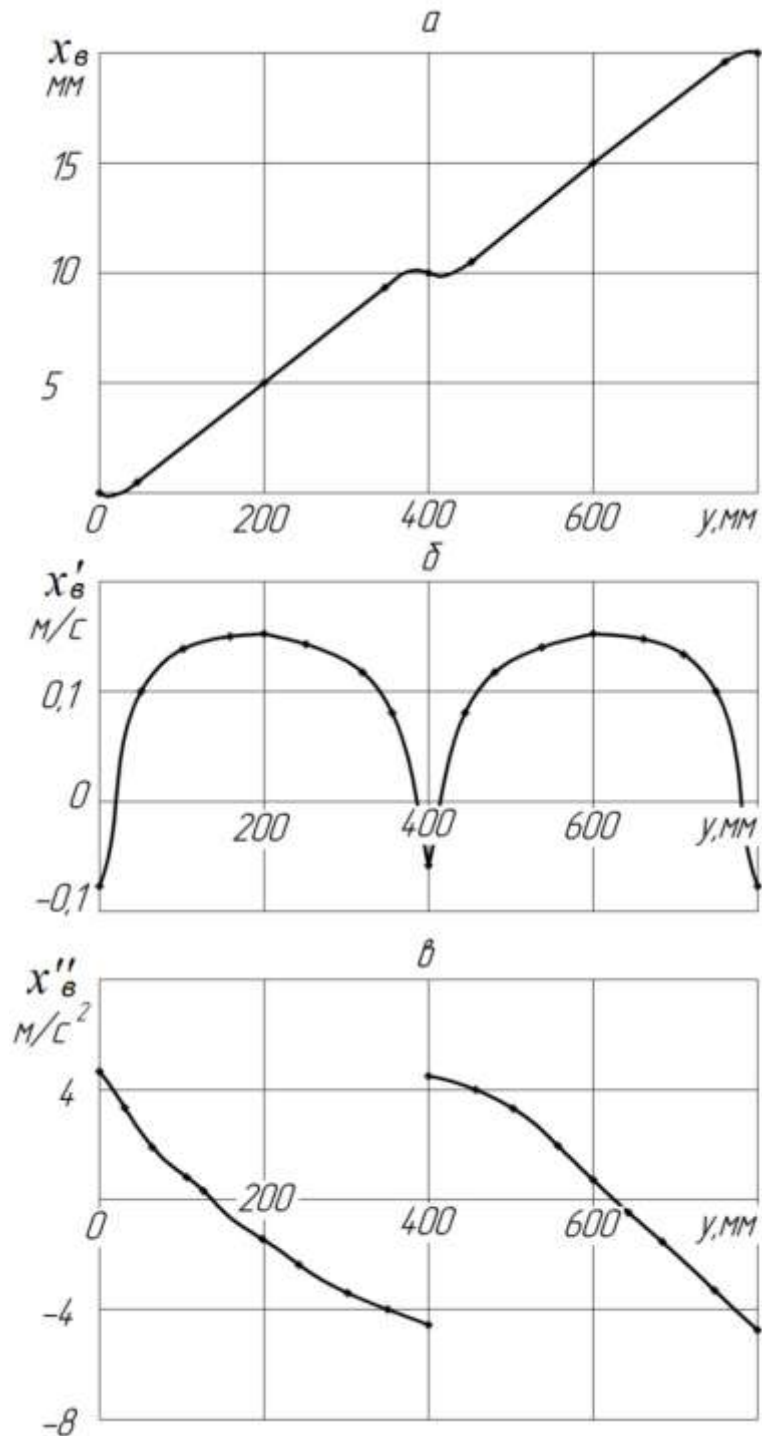


Рис. 6.9. Графики перемещений (а), скоростей (б) и ускорений (в) с двумя возвратами заготовки в функции перемещения пил

Рассмотренный вариант подачи заготовки с одним возвратным движением (см. рис. 2.2ж) может также иметь случаи подачи заготовки с некоторым опережением (см. рис. 2.2з) или с запаздыванием (см. рис. 2.2и).

При подаче заготовки с опережением скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода происходить не будет, так как

в конце рабочего хода за счет возвратного перемещения заготовки ступеньки на дне пропила срежутся и пилы могут беспрепятственно перемещаться вверх в начале холостого хода. При этом изменится мгновенная подача на зуб. В начале рабочего хода она несколько возрастет, но в конце рабочего хода ее значение уменьшится и может достигнуть нуля.

При подаче заготовки с запаздыванием скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода также не будет происходить, так как в начале холостого хода за счет возвратного перемещения заготовки дно пропила будет отходить от зубьев пил.

Однако величина перемещения заготовки за рабочий ход несколько больше, чем за холостой ход, и характер изменения подачи на зуб будет также несколько иным. Максимальное значение подачи на зуб переместится к середине рабочего хода, а в конце рабочего хода подача на зуб будет приближаться к среднему ее значению.

Следовательно, при движении заготовки с одним возвратным перемещением с опережением или с запаздыванием обеспечивается исключение скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода, что является весьма положительным моментом.

Рассмотрим вариант подачи заготовки с циклом за оборот с симметричным возвратом в конце рабочего и в начале холостого ходов. Величину угла поворота коленчатого вала лесопильной рамы для возврата подачи заготовки в период каждого хода пильной рамки с достаточной для практики точностью можно определить по выражению:

$$\alpha_0 = \arccos \frac{R - t}{2R}.$$

В этом варианте скорость движения заготовки можно описать выражением:

$$x'_g = m \frac{S_0}{4} \omega \left(\sin \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha_0}{2} \right), \quad (6.76)$$

где m – параметр, учитывающий увеличение скорости подачи заготовки относительно его среднего значения за оборот, так как имеет место возвратное перемещение.

Произведя интегрирование выражения (6.76), получим формулу для определения перемещения заготовки:

$$x_g = \frac{S_o}{2} m \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right). \quad (6.77)$$

За один ход пильной рамки необходимо осуществить подачу заготовки на величину $S_o/2$. Полагая в последней формуле $x_g = S_o/2$ и $\alpha = \pi$, получим:

$$m = \frac{1}{1 - \frac{\pi}{2} \sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R-t}{R} \right)}. \quad (6.78)$$

Параметр m зависит от радиуса кривошипа и шага зубьев пилы. Анализ показывает, что с увеличением радиуса кривошипа (рис. 6.10а) параметр m уменьшается, причем при меньших значениях радиуса кривошипа этот параметр с изменением радиуса кривошипа изменяется более значительно, чем при больших радиусах кривошипа. С увеличением шага зубьев пилы (рис. 6.10б) параметр m изменяется в пределах от 1,4 до 2,3.

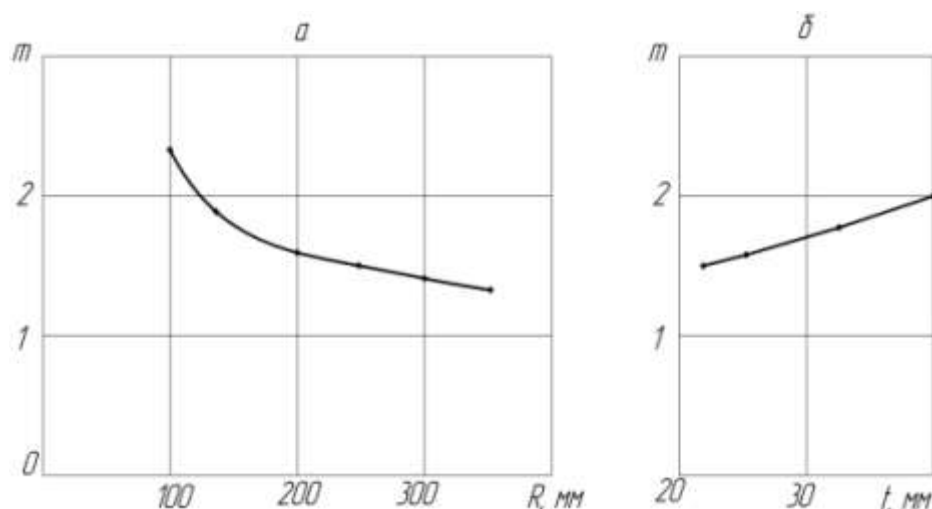


Рис. 6.10. Влияние радиуса кривошипа (а) и шага зубьев пилы (б) на параметр m с одним возвратом заготовки

Учитывая выражение (6.78), можно написать:

$$x_g = \frac{S_o \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 - \pi \sin \frac{\alpha_o}{2}}. \quad (6.79)$$

Это уравнение описывает движения заготовки начиная с холодного хода, т. е. при движении пил от НМТ.

Необходимо также иметь уравнение движения заготовки с начала рабочего хода, т. е. когда пила начинает движение от ВМТ.

Для этого в уравнение (6.79) сделаем подстановку $\alpha' = \pi - \alpha$, и, зная, что $x_{ер} = x_{ex} - S_o/2$, можно записать:

$$x_{ер} = \frac{S_o \left(\sin \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 \left(1 - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}. \quad (6.80)$$

Для проверки наличия или отсутствия скобления зубьями пи- лы древесины в начале холостого хода в формулу (6.80) сделаем подстановку $\alpha' = \pi - \alpha$. Тогда движение заготовки за рабочий ход при начале координат в НМТ выразится так:

$$x_{ер} = \frac{S_o \left(\cos \frac{\alpha}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 \left(1 - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}. \quad (6.81)$$

Глубина вдавливания зуба пи- лы в древесину определится по выражению:

$$\delta = \frac{S_o \left(2 - 2 \cos \frac{\alpha}{2} - \alpha \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 - \pi \sin \frac{\alpha_o}{2}}. \quad (6.82)$$

Анализ формулы (6.82) показывает, что глубина вдавливания зуба пи- лы в древесину получается величиной отрицательной. Сле- доовательно, требование отсутствия скобления зубьями пи- лы дна пропила в начале холостого хода выполняется.

Определим подачу на зуб. Траектория движения первого зуба пи- лы в пропиле определится следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{S_o \left(\sin \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 - \pi \sin \frac{\alpha_o}{2}}, \\ y = R(1 - \cos \alpha). \end{cases} \quad (6.83)$$

Решая систему уравнений (6.83), получим:

$$x_1 = \frac{S_o \left[\sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R-y}{R} \right) - \frac{1}{2} \arccos \frac{R-y}{R} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right]}{2 - \pi \sin \frac{\alpha_o}{2}}. \quad (6.84)$$

Траектория движения нижнего соседнего зуба пилы в пропиле определится такой системой уравнений:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_o \left(\sin \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 - \pi \sin \frac{\alpha_o}{2}} - t \sin \varphi, \\ y = R(1 - \cos \alpha) + t. \end{cases} \quad (6.85)$$

Решая эту систему, получим:

$$x_2 = \frac{S_o \left[\sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) - \frac{1}{2} \arccos \frac{R+t-y}{R} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right]}{2 - \pi \sin \frac{\alpha_o}{2}} - t \sin \varphi. \quad (6.86)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{\left[\sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R-y}{R} \right) - \sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) - \right.}{2 - \pi \sin \frac{\alpha_o}{2}} \\ \left. - \frac{1}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R-y}{R} - \frac{1}{2} \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) \right]}{2 - \pi \sin \frac{\alpha_o}{2}} + t \sin \varphi. \quad (6.87)$$

Расчеты по формуле (6.87) показывают ($R = 200$ мм, $t = 26$ мм, $S_o = 20$ мм/об), что в начале рабочего хода подача на зуб принимает максимальное значение (см. рис. 6.11а), величина которого в 2,92 раза больше среднего значения подачи на зуб. Такое увеличение подачи на зуб весьма нежелательно, так как вызывает максимальные силы резания и образование зоны на поверхностях пропила с ухудшенной шероховатостью. В конце рабочего хода подача на зуб становится равной нулю и, следовательно, ступеньки на дне пропила будут срезаны.

Скорости движения заготовки определяются по формулам:

– за рабочий ход:

$$x'_e = \frac{S_o \omega}{4 \left(1 - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)} \left(\cos \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha_o}{2} \right), \quad (6.88)$$

– за холостой ход:

$$x'_e = \frac{S_o \omega}{4 \left(1 - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)} \left(\sin \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha_o}{2} \right). \quad (6.89)$$

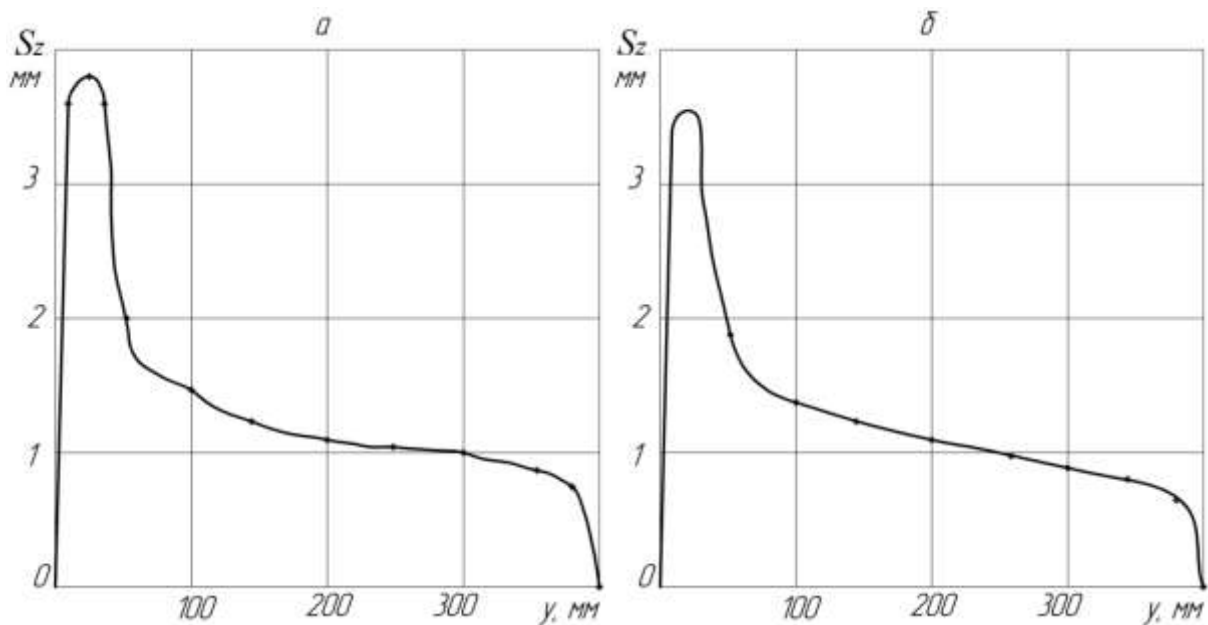


Рис. 6.11. Характер изменения подачи на зуб при подаче заготовки за оборот с симметричным возвратом (а) и с симметричной остановкой (б)

Ускорения заготовки можно определить по формуле:

– за рабочий ход:

$$x''_6 = \frac{S_o \omega^2 \sin \frac{\alpha}{2}}{8 \left(1 - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2}\right)}, \quad (6.90)$$

– за холостой ход:

$$x''_6 = \frac{S_o \omega^2 \cos \frac{\alpha}{2}}{8 \left(1 - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2}\right)}. \quad (6.91)$$

Анализ формул (6.79) – (6.81), (6.88) – (6.91) показывает, что, действительно, в начале холостого хода наблюдается возвратное перемещение заготовки (см. рис. 6.12), которое незначительно и продолжается примерно в течение угла поворота кривошипа от 0 до 60° . В конце рабочего хода происходит также уменьшение перемещения, т. е. за рабочий ход вначале перемещение заготовки происходит на величину несколько больше половины посылки, а затем происходит возврат заготовки, и в общем перемещение заготовки за рабочий ход составляет половину посылки. Это хорошо подтверждается графиком изменения скорости движения заготовки (см. рис. 6.12б). В начале холостого и в конце рабочего ходов скорость движения заготовки отрицательна. Максимального значения скорость движения заготовки дос-

тигает в момент, когда пилы находятся в ВМТ. Ускорение заготовки достигает максимального значения в конце рабочего хода и в начале холостого хода (см. рис. 6.12в), т. е. в момент, когда пилы находятся в НМТ. В момент, когда пилы находятся в ВМТ, ускорение заготовки меняет знак.

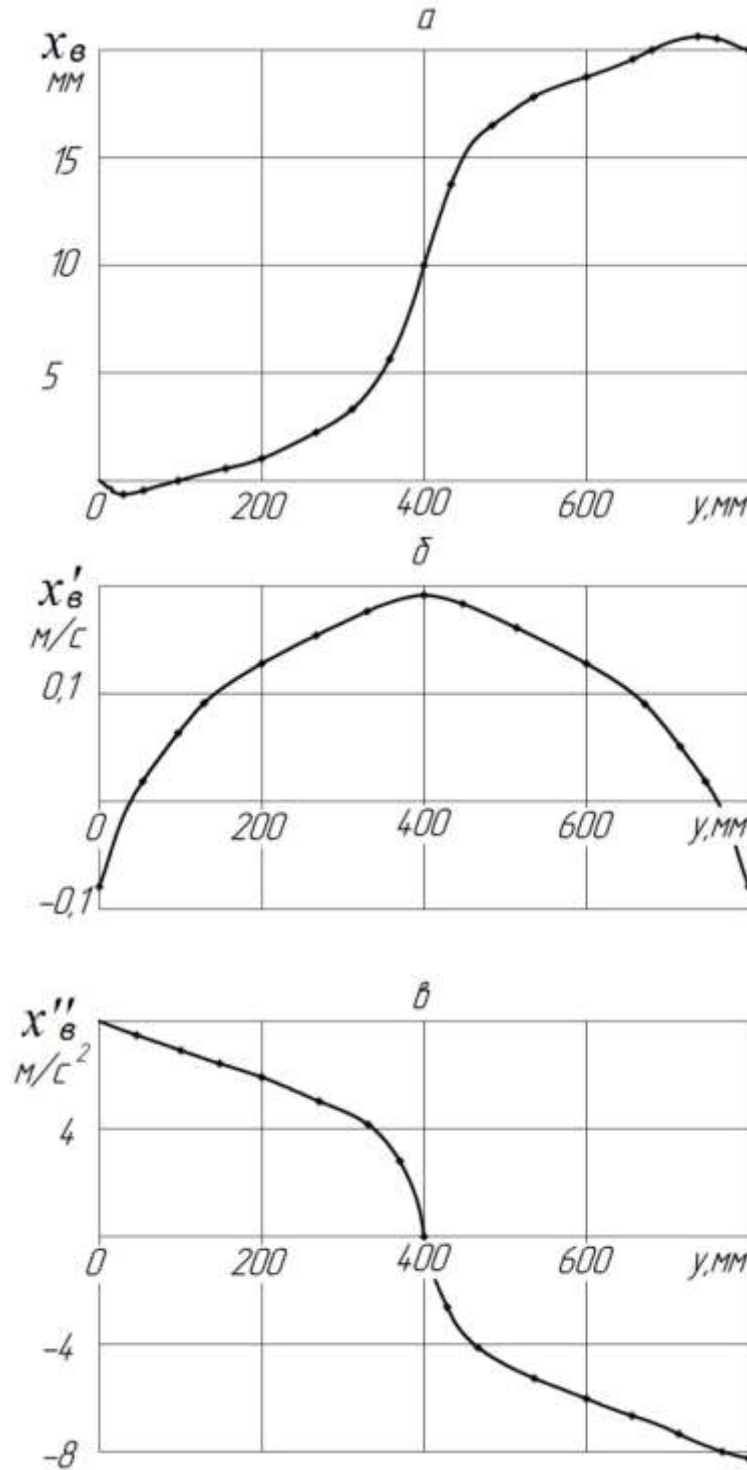


Рис. 6.12. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) заготовки при подаче заготовки за оборот с симметричным возвратом в функции перемещения пилы

При подаче заготовки с опережением (см. рис. 2.3д) в конце рабочего хода за счёт попятного движения будут срезаны выступы и движение пил вверх может осуществляться беспрепятственно. Следовательно, скобления зубьями пилы дна пропила в данном случае происходить не будет. Но величина перемещения за холостой ход будет больше, чем за рабочий, и это повлияет на характер изменения подачи на зуб. При этом возрастёт максимальное значение подачи на зуб в начале рабочего хода, и в конце рабочего хода подача на зуб будет уменьшаться.

При подаче заготовки с запаздыванием (см. рис. 2.3е) возвратное движение заготовки будет происходить в начале холостого хода и будет осуществляться отвод зубьев пилы от дна пропила, возможен вариант исключения скобления зубьями пилы дна пропила. Здесь величина подачи заготовки за рабочий ход больше, чем за холостой, и характер изменения подачи на зуб будет несколько иной, чем на рис. 6.11а. Снизится максимальное значение подачи на зуб в начале рабочего хода, а в конце рабочего хода подача на зуб возрастёт и может быть равна её среднему значению.

Рассмотрим вариант подачи заготовки за оборот с симметричной остановкой в конце рабочего и в начале холостого ходов. Скорость движения заготовки в этом случае можно описать выражением:

$$x'_e = m \frac{S_o \omega}{4} \left(\sin \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha_o}{2} \right). \quad (6.92)$$

Здесь угол поворота кривошипа коленчатого вала изменяется в пределах от α_o до $2\pi - \alpha_o$.

Взяв интеграл, получим:

$$x_e = m \frac{S_o}{2} \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha}{2} \right). \quad (6.93)$$

За один ход пильной рамки необходимо осуществить подачу заготовки на величину половины посылки. Принимая в последней формуле $\alpha = \pi$, получим:

$$m = \frac{1}{\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2}}. \quad (6.94)$$

Анализ формулы (6.94) показывает, что с увеличением радиуса кривошипа (см. рис. 6.10а) параметр m уменьшается. Это, в свою очередь, обуславливает при прочих равных условиях уменьшение максимальной скорости движения заготовки и, следовательно, его ускорения. С увеличением шага зубьев пилы параметр m возрастает (см. рис. 6.10б) практически по прямолинейному закону. Рост шага зубьев пилы вызывает необходимость увеличения максимальной скорости вращения вальца и его ускорений. Параметр m изменяется в пределах 1,4–2,0.

Учитывая выражение (6.94), движение заготовки определится формулой (начало координат в НМТ):

$$x_{ex} = \frac{S_o \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}. \quad (6.95)$$

Движение заготовки с начала рабочего хода определится при условии, когда в уравнение (6.95) сделаем подстановку $\alpha' = \pi + \alpha$ и примем $x_{ep} = x_{ex} - \frac{S_o}{2}$. После подстановки и соответствующих преобразований получим:

$$x_{ep} = \frac{S_o \left(\sin \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}. \quad (6.96)$$

Для проверки наличия или отсутствия скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода необходимо найти уравнение движения заготовки за рабочий ход при отсчёте нуля от НМТ. С этой целью в формулу (6.96) введём подстановку $\alpha' = \pi - \alpha$. После преобразований получим:

$$x_{ep} = \frac{S_o \left(\cos \frac{\alpha}{2} - \frac{\pi - \alpha}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}. \quad (6.97)$$

Подставив в выражение $x_{ep} = x_{ex} - \frac{S_o}{2}$ формулы (6.95) и (6.97) и сделав преобразования, получим:

$$\delta = \frac{S_o \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - 2 \cos \frac{\alpha}{2} + \frac{\pi - \alpha}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)} + \frac{S_o}{2}. \quad (6.98)$$

Зная, что максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину наблюдается при $\alpha = \alpha_o$, получим $\delta = 0$. Следовательно, такой закон движения заготовки исключает скобление зубьями пилы dna пропила в начале холостого хода.

Определим характер изменения подачи на зуб во время рабочего хода. Движение зуба пилы в пропиле определится по формуле:

$$x_1 = \frac{S_o \left[\sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R-y}{R} - \frac{1}{2} \arccos \frac{R-y}{R} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right) \right]}{2 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)} - t \sin \varphi. \quad (6.99)$$

Траектория движения нижнего соседнего зуба пилы в пропиле опишется такой системой уравнений:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{S_o \left(\sin \frac{\alpha}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{2 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)} \\ y = R(1 - \cos \alpha) + t. \end{cases} \quad (6.100)$$

Решая систему уравнений (6.100), получим:

$$x_2 = \frac{S_o \left[\sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) - \frac{1}{2} \arccos \frac{R+t-y}{R} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right]}{2 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)} - t \sin \varphi. \quad (6.101)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$\begin{aligned} S_z = & \frac{S_o \left[\sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R-y}{R} \right) - \sin \left(\frac{1}{2} \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) \right]}{2 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)} - \\ & - \frac{S_o \left[\frac{1}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \left(\arccos \frac{R-y}{R} - \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) \right]}{2 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)} + t \sin \varphi. \end{aligned} \quad (6.102)$$

Расчёты по формуле (6.102) показывают, что подача на зуб в начале рабочего хода принимает максимальное значение (см. рис. 6.11б), величина которого в 2,8 раза превышает её среднее значение. Следовательно, при такой математической модели описания движения заготовки не обеспечивается срезание стружки во время рабочего хода пильной рамки равномерной толщины.

Скорость движения заготовки определится по формуле:
– за рабочий ход:

$$x'_g = \frac{S_o \omega \left(\cos \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{4 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}; \quad (6.103)$$

– за холостой ход:

$$x'_g = \frac{S_o \omega \left(\sin \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}{4 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}. \quad (6.104)$$

Ускорение заготовки можно определить по формуле:
– за рабочий ход:

$$x''_g = \frac{S_o \omega^2 \sin \frac{\alpha}{2}}{8 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}; \quad (6.105)$$

– за холостой ход:

$$x''_g = \frac{S_o \omega^2 \cos \frac{\alpha}{2}}{8 \left(\cos \frac{\alpha_o}{2} + \frac{\alpha_o}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_o}{2} \right)}. \quad (6.106)$$

По формулам (6.95), (6.96), (6.103) – (6.106) построены графики перемещений, скоростей и ускорений заготовки за один оборот коленчатого вала в функции перемещения пил (см. рис. 6.13).

График показывает, что максимальная скорость движения заготовки наблюдается в момент, когда пилы находятся в ВМТ. Перемещение заготовки за рабочий ход равно перемещению заготовки за холостой ход. Максимальные ускорения заготовки наблюдаются в начальный период холостого и конечный период рабочего ходов. Когда пилы находятся в ВМТ, ускорение заготовки равно нулю. За рабочий и холостой ходы ускорение заготовки имеет различные знаки. За холостой ход происходит разгон заготовки, а за рабочий – её торможение.

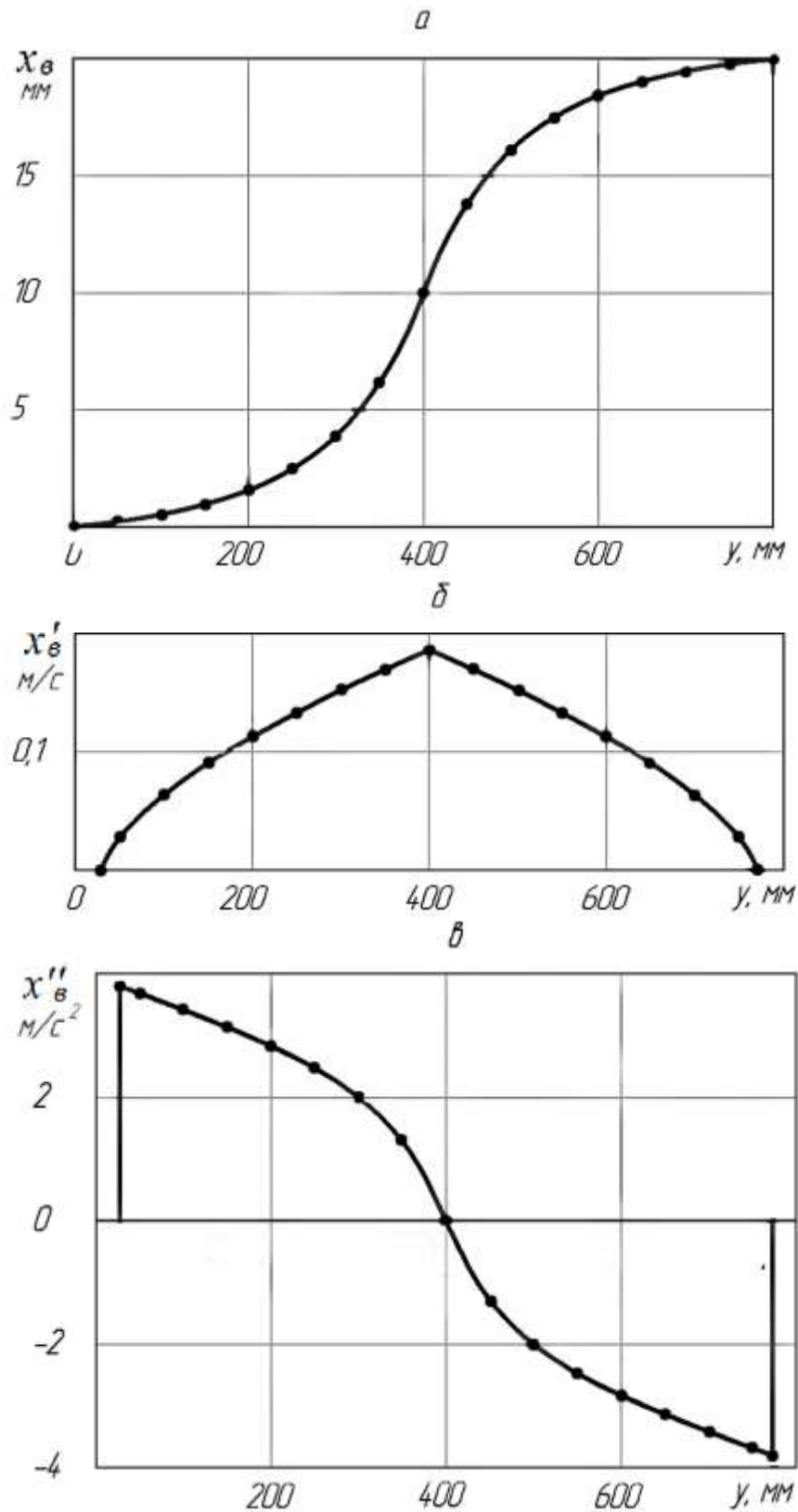


Рис. 6.13. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) вальца при подаче заготовки за оборот с симметричной остановкой в функции перемещения пильной рамки

При подаче заготовки с опережением (см. рис. 2.3з) остановка заготовки будет наблюдаться в конце рабочего хода, и тогда будут образованы уступы с глубиной ступеньки, равной $t \sin \varphi$. Эти ступеньки будут оказывать сопротивление при движении пил вверх в начале холостого хода.

Величина перемещения заготовки за холостой ход будет несколько больше, чем за рабочий. Это повлияет на характер изменения подачи на зуб. Возрастёт максимальное значение подачи на зуб в начале холостого хода.

При подаче заготовки с запаздыванием (см. рис. 2.3к) остановка заготовки будет наблюдаться в начале холостого хода, но в конце рабочего хода на дне пропила будут образованы наклонные ступеньки, которые будут препятствовать продвижению пил вверх в начале холостого хода. Величина перемещения заготовки за рабочий ход несколько больше, чем за холостой, и максимальное значение подачи на зуб в начале рабочего хода снизится, а текущее значение подачи на зуб в конце рабочего хода возрастёт, по сравнению с рис. 6.11б.

6.3. Основные выводы

На основании анализа рассмотренных математических моделей движения заготовки можно сделать следующие основные выводы.

1. Математическая модель движения заготовки, определенная нами теоретическим путём (см. рис. 2.2д), обеспечивает исключение скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода и получение срезания стружки равномерной толщины. Однако на практике такой вариант движения заготовки осуществить довольно трудно, так как математическая модель движения заготовки за рабочий ход существенно отличается от математической модели движения за холостой ход. Кроме того, в начале холостого хода необходимо осуществить возвратное перемещение. Поэтому представляют практический интерес упрощённые варианты движения заготовки.

2. Для оценки рассмотренных упрощённых вариантов подачи распиливаемой заготовки приводим сопоставительный анализ основных кинематических показателей процесса пиления. Данные представлены в таблице 6.1.

3. Наибольшая неравномерность толщины срезаемой стружки во время рабочего хода наблюдается при движении заготовки с воз-

вратом за оборот, причём длина участка рабочего хода с подачей на зуб, отклоняющейся на 10% от его среднего значения, составляет всего 20% и наблюдается в первой половине рабочего хода. Продолжительность участка рабочего хода с величиной подачи на зуб больше $1,1S_{z\text{ ср}}$ составляет 22% и наблюдается в начальный период рабочего хода. На остальных участках рабочего хода (в основном в его второй половине) подача на зуб меньше $0,9S_{z\text{ ср}}$. Максимальное значение подачи на зуб больше среднего его значения в 2,92 раза, что весьма существенно влияет на качество пиломатериалов и силовые показатели процесса. Поэтому этот вид подачи заготовки неперспективен, так как не обеспечивает срезание слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода равномерной толщины.

Таблица 6.1

Основные кинематические показатели процесса пиления

№ п/п	Математическая модель движения заготовки	Показатели процесса резания			
		$\frac{S_{z\text{ max}}}{S_{z\text{ ср}}}$	δ_{max} , мм	Длина участка $\frac{S_{z\text{ max}}}{S_{z\text{ ср}}} = 0,9-1,1$ от хода	Длина участка с $\frac{S_z}{S_{z\text{ ср}}} > 1,1$ от хода
1	С одной остановкой за ход	1,21	0	0,35	0,37
2	С двумя остановками за ход	1,08	0	0,82	–
3	С одним возвратом за ход	1,10	0	0,75	–
4	С двумя возвратами за ход	1,12	0	0,40	0,35
5	С остановкой за оборот	2,80	0	0,20	0,20
6	С возвратом за оборот	2,92	0	0,20	0,22

4. Значительная неравномерность толщины срезаемой стружки наблюдается и при подаче заготовки за оборот с одной остановкой. Здесь также длина участка рабочего хода с мгновенной подачей на зуб, наблюдающейся в пределах $(0,9-1,1)S_{z\text{ ср}}$, составляет всего лишь 20%, причём этот участок наблюдается в первой половине рабочего хода пильной рамки. Подача на зуб более $1,1S_{z\text{ ср}}$ занимает 21% рабочего хода пильной рамки в его начальный пери-

од. Здесь также максимальное значение подачи на зуб больше его среднего значения в 2,8 раза, что значительно больше, чем при равномерной скорости подачи и прямолинейной траектории движения пил. Этот вариант перемещения заготовки также неперспективен, так как не позволяет получить срезание стружки во время рабочего хода равномерной толщины.

5. Наилучшая равномерность толщины срезаемой стружки обеспечивается при движении вальца с двумя остановками за каждый ход пилы. В этом случае подача на зуб во время рабочего хода получается теоретически равномерной и больше его среднего значения всего лишь на 8%. Рост подачи на зуб относительно его среднего значения объясняется тем, что в начале рабочего хода наблюдается небольшая потеря рабочего хода из-за остановки движения заготовки, а в конце рабочего хода подача на зуб уменьшается до его среднего значения.

Однако при опережении или запаздывании увеличивается неравномерность толщины срезаемого слоя древесины каждым зубом пилы и наблюдается скобление зубьями пилы дна пропила. Такой вариант движения заготовки не является перспективным.

6. Движение заготовки с одним возвратом при циклическом изменении скорости за каждый ход пилы позволяет на длине участка рабочего хода, равного $1,75R$, получить изменение подачи на зуб от его среднего значения в пределах 0,9–1,1. Участки с $S_z/S_{z\text{ ср}}$ больше 1,1 в этом варианте перемещения заготовки отсутствуют. Кроме того, при опережении или запаздывании подачи заготовки обеспечивается исключение скобления зубьями пилы дна пропила.

Следовательно, этот вариант движения заготовки вполне приемлем и может быть рекомендован для использования в промышленности.

7. Движение заготовки при циклическом изменении скорости подачи за каждый ход пилы с двумя возвратными движениями позволяет получить на длине участка 0,40 от рабочего хода пилы изменение подачи на зуб относительно её среднего значения в пределах 0,9–1,1. На протяжении 0,35 хода пилы подача на зуб превышает $1,1S_{z\text{ ср}}$ всего лишь на 2%, что незначительно. Ввиду этого данный вид подачи заготовки также может быть рекомендован для реализации в промышленности. Опережение или запаздывание подачи заготовки не обуславливает появления момента скобления

зубьями пилы дна пропила. Следует подчеркнуть, что такой способ движения заготовки более прост в осуществлении, чем другие виды, так как способы движения заготовки за рабочий и холостой ходы одинаковы.

8. Движение заготовки при циклическом изменении скорости за каждый ход и с одной остановкой в течение двух ходов обуславливает появление небольшого максимального значения подачи на зуб в начале рабочего хода, величина которого на 21% больше средней подачи на зуб. Длина участка с отклонением от средней подачи на зуб в пределах 0,9–1,1 составляет 0,35 от рабочего хода пилы, а длина участка с подачей на зуб больше, чем $1,1S_{z\text{ ср}}$, составляет 0,37 рабочего хода пилы. Остальная часть рабочего хода имеет подачу на зуб меньше $0,9S_{z\text{ ср}}$. При опережении или запаздывании подачи заготовки оказалось, что будет наблюдаться скопление зубьями пилы дна пропила.

9. Приведённый анализ показывает, что из рассмотренных упрощённых способов перемещения заготовки более целесообразными с точки зрения улучшения кинематики процесса резания являются следующие виды (список приведён в порядке предпочтения):

- с одним возвратом за ход;
- с двумя возвратами за ход;
- с двумя остановками за ход;
- с одной остановкой за ход.

Таким образом, рассмотрены предложенные математические модели описания наиболее характерных вариантов перемещения распиливаемой заготовки при условии согласования движений резания и подачи путём изменения способа движения заготовки и приведены методики для определения основных параметров для разных вариантов перемещений.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОВЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПИЛ ПРИ РАВНОМЕРНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ

7.1. Математическое описание теоретической траектории движения пил

Для разработки механизмов резания лесопильных рам с качающейся пильной рамкой прежде всего необходимо знание уравнения траектории движения пил, обеспечивающего наилучшие условия пиления [17].

Анализируя работы в этом направлении, можно констатировать, что до сих пор не был теоретически обоснован выбор и не определены параметры траектории движения пил. Для определения теоретической траектории движения пил весь цикл пиления рамными пилами разделён нами на три части (см. рис. 7.1):

- участок резания – рабочий ход;
- участок скобления зубьями пилы дна пропила – начальный период холостого хода;
- участок свободного движения пил – середина и конец холостого хода.

При определении траектории движения пильной рамки с отводящим (согласующим) механизмом сформулированы следующие основные технологические требования, которые выбраны параметрами критериями оптимизации:

- исключение скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода, $\delta = 0$;
- обеспечение срезания слоя древесины зубом пилы равномерной толщины, $S_z = const$.

Уравнение траектории движения пильной рамки на первом участке (см. рис. 7.1) определяется из условия обеспечения срезания слоя древесины зубом пилы равномерной толщины следующим образом.

Зададимся уравнением движения зуба пилы относительно плоскости пропила с таким расчётом, чтобы траектории движения зубьев пилы в пропиле представляли собой прямые линии, а перемещение за один ход пилы составляло бы половину посылки $\left(\frac{S_0}{2}\right)$.

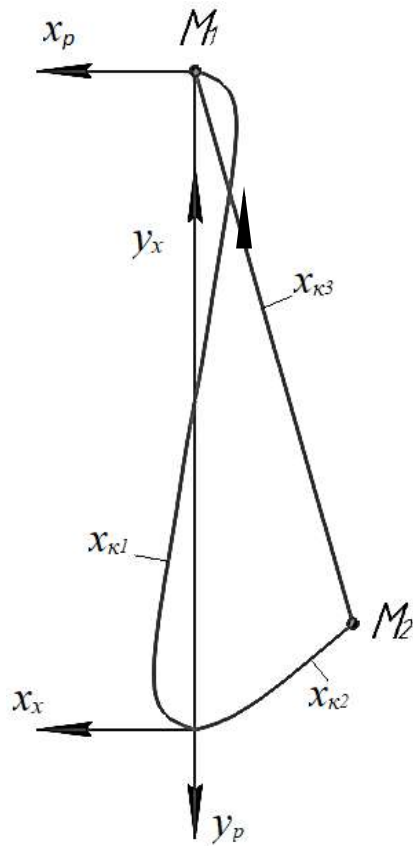


Рис. 7.1. Начало координат при выводе уравнений движения пил на участках рабочего и холостого ходов

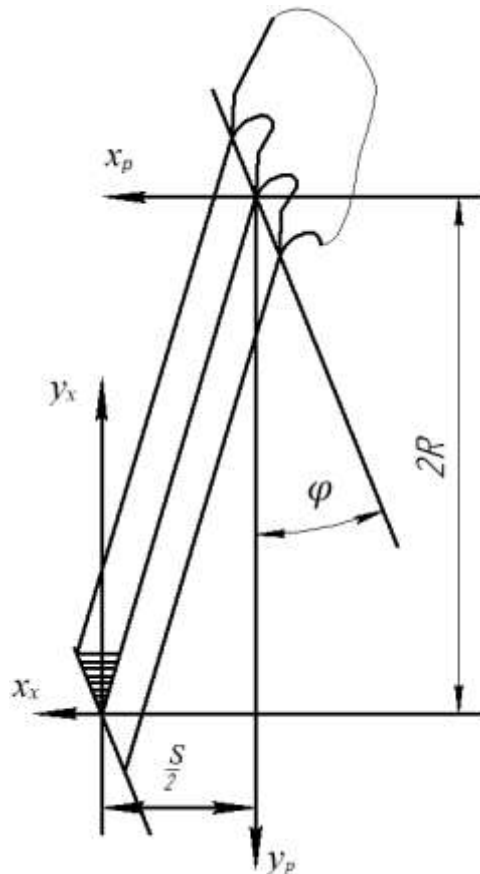


Рис. 7.2. Траектории движения зубьев пилы в пропиле

Для выполнения этих условий необходимо прежде всего, чтобы математическая модель описания движения зуба пилы в пропиле по горизонтали строго совпадала с математической моделью описания движения инструмента по вертикали. Тогда траектория движения зуба в пропиле опишется уравнением:

$$x_1 = \frac{S_o}{2}(1 - \cos\alpha). \quad (7.1)$$

Уравнение траектории движения пильной рамки можно получить путём вычитания из уравнения движения зуба пилы в пропиле (7.1) уравнения движения заготовки, осуществляемого с равномерной скоростью:

$$x_{к1} = \frac{S_o}{2} \left(\frac{1 - \cos\alpha}{2} - \frac{\alpha}{\pi} \right). \quad (7.2)$$

Анализ уравнения (7.2) показывает, что пильная рамка во время рабочего хода движется по кривой, представляющей собой половину восьмёрки (см. рис. 7.1).

Подачу на зуб можно определить, зная траектории движения двух соседних зубьев пилы, по выражению $S_z = x_1 - x_2$.

Траектория верхнего соседнего зуба пилы в пропиле определится по выражению:

$$x_1 = \frac{S_o y}{4R}.$$

Траектория нижнего соседнего зуба пилы в пропиле определится по выражению:

$$x_2 = \frac{S_o y}{4R} - \frac{S_o t}{2R}.$$

Тогда подача на зуб будет равна:

$$S_z = \frac{S_o t}{2R}. \quad (7.3)$$

Таким образом, выражение (7.3) показывает, что во время рабочего хода обеспечивается равномерная подача на зуб (см. рис. 7.2). Если теперь движение пил во время холостого хода

обеспечить также по уравнению (7.2) (отсчёт нуля от НМТ), то необходимо проверить отсутствие скобления зубьями пилы дна пропила. Глубина вдавливания зуба пилы в древесину определится по выражению:

$$\delta = x_x - x_p + \frac{S_o}{2}.$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле за холостой ход:

$$x_x = \frac{S_o y}{4R}. \quad (7.4)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода:

$$x_p = \frac{S_o}{2} - \frac{S_o y}{4R}. \quad (7.5)$$

Тогда глубина вдавливания зуба пилы в древесину будет равна:

$$\delta = \frac{S_o y}{2R}. \quad (7.6)$$

Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину наблюдается при $y = t$ и будет равна:

$$\delta_{max} = \frac{S_o t}{2R}. \quad (7.7)$$

Таким образом, при перемещении пил во время холостого хода по уравнению (7.2) не обеспечивается исключение скобления зубьями пилы дна пропила. В конце рабочего хода на дне пропила образуются выступы (см. рис. 7.2), которые оказывают препятствие перемещению зубьев пилы в начале холостого хода. Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода равна подаче на зуб.

Вывод уравнения траектории движения пил на втором участке производим с учётом исключения скобления зубьями пилы дна пропила. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы пилы дополнительно отходили от дна пропила на величину, равную глубине вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода.

Тогда движение пил на этом участке должно осуществляться по уравнению (начало координат в НМТ):

$$x_{к2} = x_1 - \delta. \quad (7.8)$$

Подставив в выражение (7.8) формулы (7.1) и (7.6), получим:

$$x_{к2} = -\frac{S_o}{2\pi}\alpha - \frac{S_o}{4}(1 - \cos\alpha). \quad (7.9)$$

Второй участок наблюдается при перемещении пил по вертикали от 0 до t (от НМТ), и завершение этого участка соответствует углу поворота кривошипа, определяемому по выражению (3.36).

На третьем участке перемещение пил происходит от t до $2R$ (от НМТ). Так как наблюдается зона свободного хода пил, то перемещение (возврат) пильной рамки в исходное положение (в верхнюю мёртвую точку) целесообразно произвести по прямой линии (см. рис. 7.1) через крайние точки $M_1(x_1 = 0; y_1 = 2R)$ и $M_2(x_2 = -\frac{S_o}{2\pi}\arccos\frac{R-t}{R} - \frac{S_o}{4R}; y_2 = t)$. Пользуясь уравнением прямой, проходящей через две точки, можно написать:

$$x_{к3} = \frac{y - 2R}{2R - t} \left(\frac{S_o}{2\pi}\arccos\frac{R-t}{R} + \frac{S_o t}{4R} \right) - \quad (7.10)$$

или

$$x_{к3} = \frac{R(1 + \cos\alpha)}{2R - t} \left(\frac{S_o}{2\pi}\arccos\frac{R-t}{R} + \frac{S_o t}{4R} \right). \quad (7.11)$$

При проектировании отводящих механизмов необходимо знать скорости и ускорения при качании пильной рамки.

Скорости поперечного движения пильной рамки определяем как первую производную от пути по времени. Выполнив действия, получим следующие выражения для определения скорости пильной рамки.

На первом участке:

$$x'_{к1} = \frac{S_o}{2}\omega \left(\frac{\sin\alpha}{2} - \frac{1}{\pi} \right). \quad (7.12)$$

На втором участке:

$$x'_{\kappa 2} = \frac{S_o}{4} \omega \left(-\frac{2}{\pi} - \sin \alpha \right). \quad (7.13)$$

На третьем участке:

$$x'_{\kappa 3} = \omega \frac{R \sin \alpha}{2R - t} \left(\frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{R - t}{R} + \frac{S_o t}{4R} \right). \quad (7.14)$$

Ускорение пильной рамки на соответствующих участках определится по следующим формулам.

На первом участке:

$$x''_{\kappa 1} = \frac{S_o}{4} \omega^2 \cos \alpha. \quad (7.15)$$

На втором участке:

$$x''_{\kappa 2} = -\frac{S_o}{4} \omega^2 \cos \alpha. \quad (7.16)$$

На третьем участке:

$$x''_{\kappa 3} = \frac{R \cos \alpha}{2R - t} \omega^2 \left(\frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{R - t}{R} + \frac{S_o t}{4R} \right). \quad (7.17)$$

Подставив в полученные формулы данные применительно к одноэтажным лесопильным рамам ($R = 200$ мм, $t = 26$ мм, $S_o = 10$ мм, $n = 285$ мин⁻¹), получим графики перемещения, скоростей и ускорений пильной рамки во время рабочего и холостого ходов (см. рис. 7.3 и 7.4).

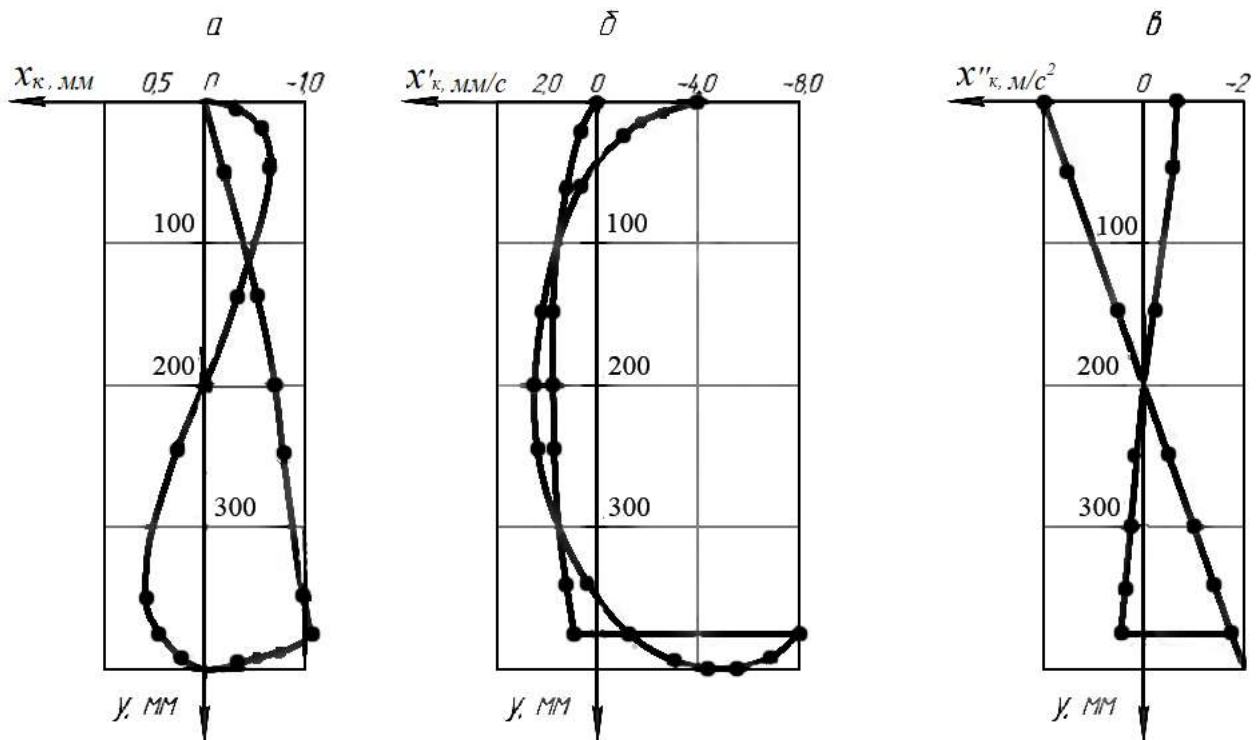


Рис. 7.3. Перемещения (а), скорости (б) и ускорения (в) пил в зависимости от перемещения их по вертикали

Анализ полученных уравнений и графиков позволяет сделать следующие выводы. Амплитуда качания пильной рамки во время рабочего хода сравнительно небольшая и для одноэтажных лесопильных рам составляет 5–6% от посылки. Для более точного определения амплитуды качания пильной рамки во время рабочего хода находим первую производную от уравнения траектории движения пил и приравниваем её к нулю, то есть

$$\frac{S_o}{2} \omega \left(\frac{\sin \alpha}{2} - \frac{1}{\pi} \right) = 0. \quad (7.18)$$

Отсюда найдём значение угла поворота кривошипа, при котором амплитуда качания пильной рамки во время рабочего хода будет наибольшей:

$$\alpha_n = \arcsin \frac{2}{\pi}. \quad (7.19)$$

Формула (7.19) показывает, что угол поворота кривошипа механизма резания лесопильной рамы не зависит от хода пил, посылки и даже не зависит от шага зубьев пилы. Величину этого угла можно принять равной 40° .

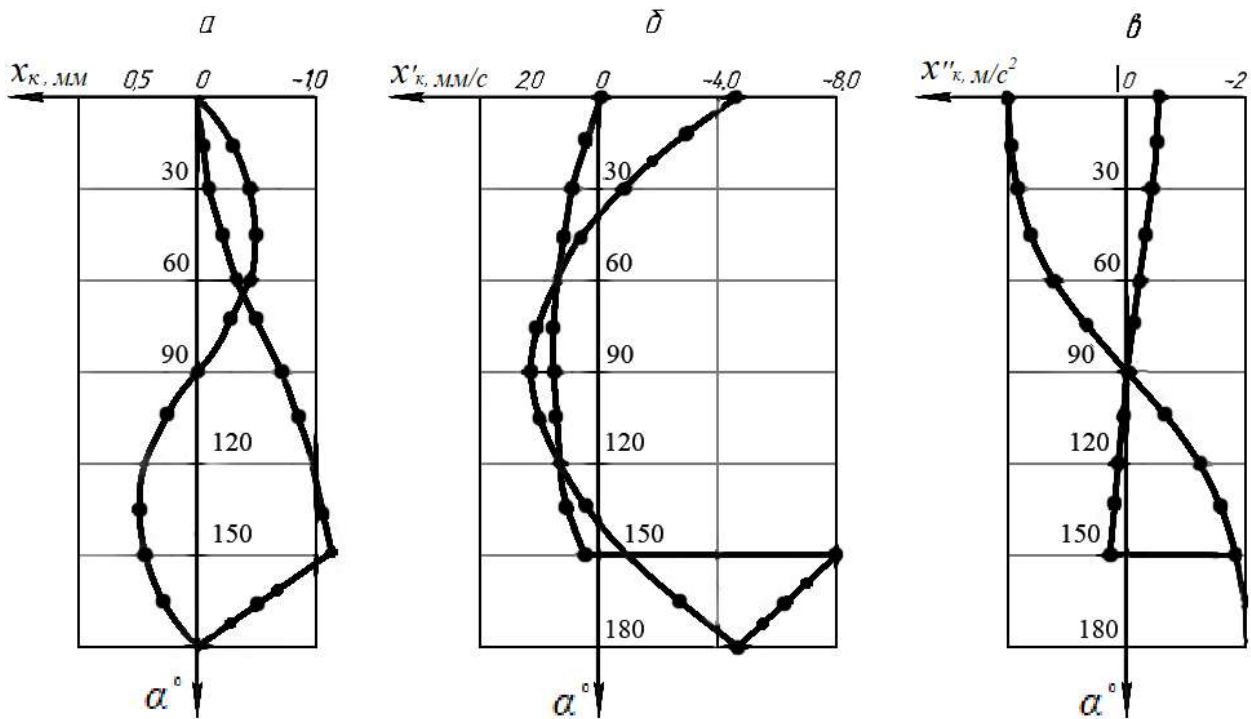


Рис. 7.4. Перемещения (а), скорости (б) и ускорения (в) пильной рамки в зависимости от угла поворота кривошипа

Подставив выражение (7.19) в уравнение, описывающее траекторию движения пильной рамки во время рабочего хода (7.2), получим формулу для определения максимальной амплитуды качания пил:

$$A_p = \frac{S_o}{4} \left(1 - \cos \arcsin \frac{2}{\pi} - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{2}{\pi} \right). \quad (7.20)$$

Из формулы (7.20) делаем вывод, что максимальное значение амплитуды качания пил во время рабочего хода зависит лишь от посылки. Важно знать отношение амплитуды качания пил к посылке. Оно будет равно:

$$A_{p0} = \frac{1}{4} \left(1 - \cos \arcsin \frac{2}{\pi} - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{2}{\pi} \right). \quad (7.21)$$

Отношение максимального значения амплитуды качания пил во время рабочего хода к посылке, вычисленное по формуле (7.21), будет составлять 0,0526, т. е. 5,3%.

Во время холостого хода отвод пил от вертикали необходимо производить примерно в два раза больше, чем при рабочем ходе. При этом угол поворота кривошипа, при котором наблюдается

максимальная амплитуда качания пил во время холостого хода, определится по выражению (7.19).

Максимальная амплитуда качания пил во время холостого хода определится по выражению:

$$A_x = \frac{S_o}{2\pi} \arccos \frac{R-t}{R} + \frac{S_o t}{4R}. \quad (7.22)$$

Из формулы (7.22) усматриваем, что амплитуда качания пил во время холостого хода зависит от посылки, шага зубьев пилы и хода пильной рамки. Отношение амплитуды качания пил во время холостого хода к посылке определится по выражению:

$$A_{ox} = \frac{1}{2\pi} \arccos \frac{R-t}{R} + \frac{t}{4R}. \quad (7.23)$$

Отношение амплитуды качания пил во время холостого хода к посылке, вычисленное по формуле (7.23) для нашего примера, составит 0,0803 или 8,03%.

При проектировании механизмов качания пильных рамок лесопильных рам принято определять размах качания пил. На основании приведённого анализа можно сделать вывод, что размах качания пил в нижней половине хода пильной рамки должен быть значительно больше, чем в первой половине рабочего хода пильной рамки, принимая отсчёт нуля от верхней мёртвой точки.

Анализ формул, описывающих скорости и ускорения пил и их графиков, показывает, что наибольшая скорость перемещения пильной рамки наблюдается при угле поворота кривошипа, определяемом по выражению (7.19), а максимальные ускорения пильной рамки наблюдаются в нижней и верхней мёртвых точках.

Таким образом, впервые аналитическим путём определена математическая модель, описывающая теоретическую траекторию движения пил, которая обеспечивает срезание слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода равномерной толщины и исключение скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода. В общем случае математическая модель траектории движения пил представляет собой замкнутую самопересекающуюся кривую, описываемую уравнениями (7.2), (7.9) и (7.11).

Следует отметить, что математическая модель качания пил содержит три уравнения:

В начале рабочего хода пильную рамку необходимо отводить от дна пропила. Затем, в середине первой половины рабочего хода, скорость движения пил по вертикали возросла и продолжает увеличиваться. В этот период пильную рамку необходимо надвигать на заготовку, а в конце рабочего хода, когда скорость движения пил уменьшается, пильную рамку необходимо отводить от дна пропила заготовки. В начале холостого хода пильную рамку необходимо также отводить от дна пропила на величину подачи на зуб на пути перемещения пил, равном шагу зубьев пилы. Далее пильную рамку следует переместить в верхнее крайнее положение хода пил (ВМТ).

Такая математическая модель описания перемещений пильной рамки за рабочий и холостой ходы обеспечивает синхронизацию главного движения инструмента и движения подачи (заготовки). Полученную математическую модель перемещения пил в плоскости перемещения заготовки можно назвать теоретической. Однако, анализируя эти три уравнения, следует отметить, что выполнить их на практике довольно сложно. Кроме того, во время холостого хода имеется точка перегиба. Поэтому необходимо математическую модель перемещения пил в горизонтальной плоскости упростить и точку перегиба перемещения пил во время холостого хода исключить.

Анализ существующих механизмов качания пил на лесопильных рамах показывает, что известные механизмы в технике не удовлетворяют этим условиям, следовательно, до сих пор нет лесопильных рам с механизмами резания, обеспечивающими движение пил на соответствующих участках по кривым, описываемым уравнениями (7.2), (7.9) и (7.11).

Анализ полученных аналитических уравнений показывает, что на траекторию движения зуба пилы в пропиле оказывает влияние величина посылки, радиус кривошипа, шаг зубьев пилы. Для строгого согласования работы механизмов резания и подачи необходимо производить изменение амплитуды качания пил в зависимости от изменения скорости подачи (посылки).

7.2. Определение математической модели идеальной траектории движения пил

Исследования автора показали, что для улучшения условий работы рамных пил необходимо их в начале и в конце рабочего хода, а также в начале холостого хода отводить от дна пропила.

Тем самым будет обеспечиваться срезание слоя древесины зубом пилы более равномерной толщины и уменьшение скобления зубьями пилы дна пропила. Для обеспечения срезания слоя древесины зубом пилой равномерной толщины необходимо, чтобы пилы перемещались по траектории, описываемой уравнением (7.2).

Уравнение (7.2) представляет собой замкнутую самопересекающуюся кривую с двумя осями симметрии.

Если движение пил во время холостого хода осуществлять по уравнению (7.2), то будет наблюдаться скопление зубьями пилы дна пропила. Для исключения скопления зубьями пилы дна пропила необходимо увеличить амплитуду качания пил, особенно в нижней половине хода пил. Это условие можно математически представить в следующем виде [13, 15]:

$$x_{\kappa} = \frac{S_o}{4} \left(1 - \cos\alpha \pm p \sin\alpha - \frac{2\alpha}{\pi} \right), \quad (7.24)$$

где p – коэффициент дополнительного увеличения амплитуды качения пилы в начале холостого хода.

В формуле (7.24) знак плюс необходимо принимать для движения пил за рабочий ход при начале координат в ВМТ, а знак минус – для движения пил за холостой ход при отсчёте перемещений от НМТ. Определение коэффициента p производим исходя из условия отсутствия скопления зубьями пилы дна пропила. Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода (при отсчёте перемещений от НМТ) определится по формуле:

$$x_p = -\frac{S_o y}{4R}. \quad (7.24a)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода (начало координат в НМТ) определится по формуле:

$$x_x = \frac{S_o y}{4R} - \frac{S_o p}{4} \operatorname{sinarccos} \frac{R - y}{R}. \quad (7.24б)$$

Тогда глубина вдавливания зуба пилы в древесину определится по формуле:

$$\delta = \frac{S_o p}{4} \operatorname{sinarccos} \frac{R - y}{R} - \frac{S_o y}{2R}. \quad (7.24в)$$

Максимальная глубина вдавливания наблюдается при $y = t$. Приняв при этом глубину вдавливания, равной нулю, можно написать:

$$p \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R} - \frac{2t}{R} = 0.$$

Решив это тождество относительно коэффициента p , получим:

$$p = \frac{2t}{\sqrt{2Rt - t^2}}. \quad (7.25)$$

Подставив выражение (7.25) в формулу (7.24), получим уравнение, описывающее участок траектории движения пил за холостой ход, обеспечивающее исключение скобления зубьями пилы дна пропила:

$$x_{k2} = \frac{2S_0 t}{\sqrt{Rt - t^2}} \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} - \frac{S_0 y}{2R}. \quad (7.24z)$$

Таким образом, движение пил за рабочий ход необходимо осуществлять по траектории, описываемой уравнением (7.2). В этом случае будет обеспечиваться срезание слоя древесины зубом пилы равномерной толщины. Для исключения скобления зубьями пилы дна пропила пильную рамку во время холостого хода необходимо перемещать по формуле (7.24). Следовательно, впервые получено математическое описание траектории движения пил, которую можно назвать идеальной траекторией, так как обеспечивается выполнение заданных требований, при которых условия работы рамных пил будут наиболее благоприятными.

Значение коэффициента p в формуле (7.25) зависит от шага зубьев пилы (см. рис. 7.5а) и радиуса кривошипа (см. рис. 7.5б). Анализ этих рисунков показывает, что с увеличением шага зубьев пилы амплитуда качания пильной рамки возрастает, а с увеличением радиуса кривошипа – уменьшается.

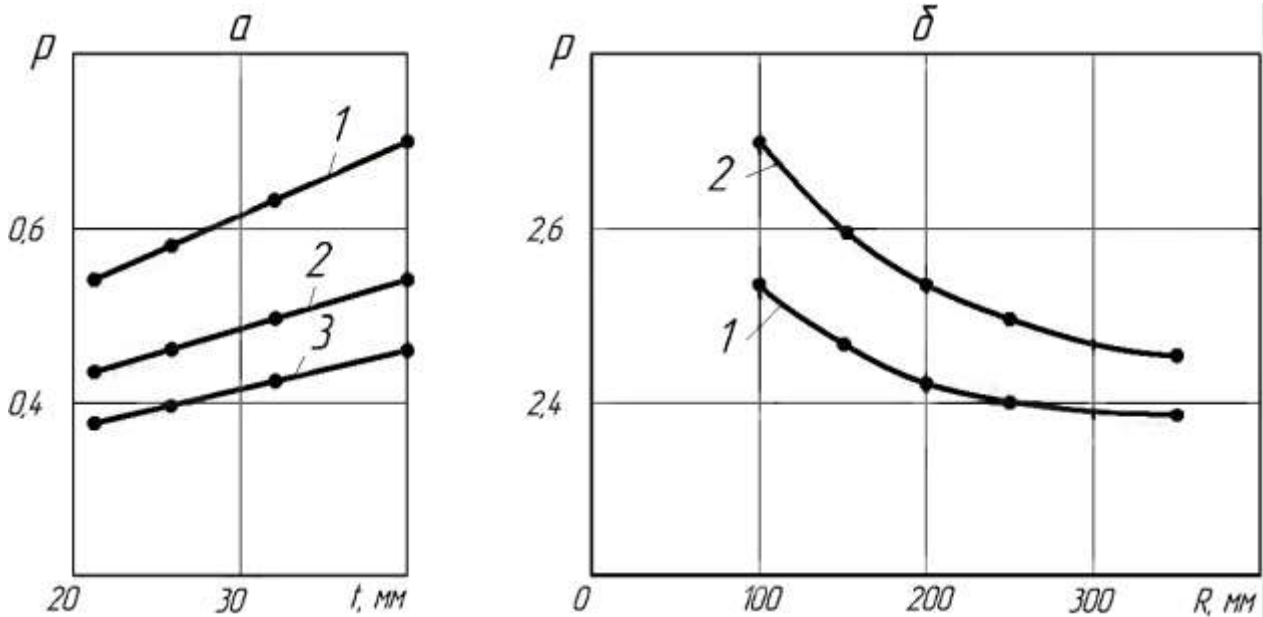


Рис. 7.5. Влияние шага зубьев пилы (а) и радиуса кривошипа (б) на величину параметра p : а – 1 – $R = 100$ мм; 2 – $R = 200$ мм; 3 – $R = 350$ мм; б – 1 – $t = 40$ мм; 2 – $t = 22$ мм

Идеальная траектория движения пил (рис. 7.6) представляет собой самопересекающуюся кривую, у которой ветви за рабочий и холостой ходы различны между собой, а размах качания пил в нижней половине хода пильной рамки больше, чем в верхней половине её хода. За рабочий ход траектория качания пильной рамки представляет собой половину восьмерки, а за холостой ход пильную рамку необходимо перемещать по кривой типа половины «капли».

Максимальная амплитуда качания пил будет наблюдаться при угле поворота кривошипа:

– за рабочий ход:

$$\alpha = \arcsin \frac{2}{\pi};$$

– за холостой ход:

$$\alpha = \arccos \frac{-2p + \sqrt{4p^2 + (1 + p^2)(\pi^2 - 4)}}{\pi(1 + p^2)};$$

ИЛИ

$$\alpha = \arccos \frac{2 + \sqrt{4 + (1 + p^2)(\pi^2 p^2 - 4)}}{\pi(1 + p^2)}.$$

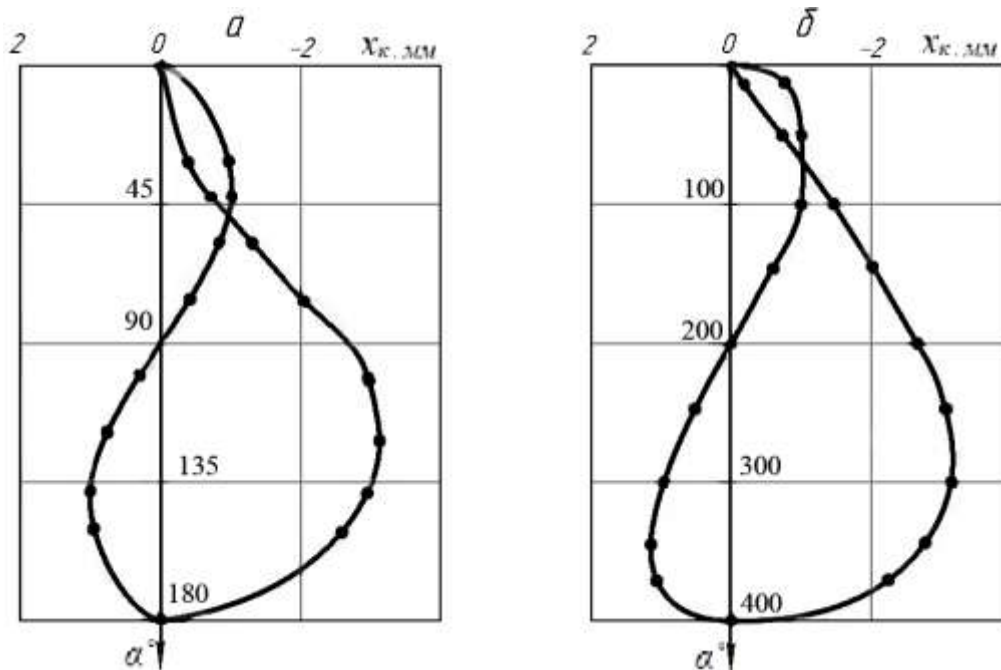


Рис. 7.6. Траектория движения пильной рамки в зависимости от угла поворота кривошипа (а) и перемещения пильной рамки по вертикали (б)

Подставив эти выражения соответственно в уравнения (7.2) и (7.24), получим максимальные относительные амплитуды качания пильной рамки:

– за рабочий ход:

$$A_o = \frac{1}{4} \left(1 - \cos \arcsin \frac{2}{\pi} - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{2}{\pi} \right), \quad (7.26)$$

– за холостой ход:

$$A_o = \frac{1}{4} \left(1 + \frac{2p - \sqrt{4p^2 + (1+p^2)(\pi^2 - 4)}}{\pi(1+p^2)} \right) -$$

$$- \frac{1}{4} \left(\frac{2p + p\sqrt{4 + (1+p^2)(\pi^2 p^2 - 4)}}{\pi(1+p^2)} \right) -$$

$$- \frac{1}{4} \left(\frac{2}{\pi} \arccos \frac{-2p + \sqrt{4p^2 + (1+p^2)(\pi^2 - 4)}}{\pi(1+p^2)} \right). \quad (7.27)$$

Расчёты показали, что с увеличением радиуса кривошипа относительная амплитуда качания пил уменьшается, а с увеличением шага зубьев пилы – возрастает, причём относительная амплитуда изменяется при этом в пределах 0,27–0,12 от величины посылки.

Скорости поперечного движения пил определяются по формулам:
– за рабочий ход:

$$x'_k = \frac{S_o}{4} \omega \left(\sin \alpha - \frac{2}{\pi} \right); \quad (7.28)$$

– за холостой ход:

$$x'_k = \frac{S_o}{4} \omega \left(\sin \alpha - p \cos \alpha - \frac{2}{\pi} \right). \quad (7.29)$$

Ускорения движения пил при этом определяются по формулам:
– за рабочий ход:

$$x''_k = \frac{S_o}{4} \omega^2 \cos \alpha; \quad (7.30)$$

– за холостой ход:

$$x''_k = \frac{S_o}{4} \omega^2 (\cos \alpha + p \sin \alpha). \quad (7.31)$$

Приравняв ускорения к нулю, найдём углы поворота кривошипа, при которых скорости принимают максимальные значения:

– за рабочий ход $\alpha = \frac{\pi}{2}$;

– за холостой ход (от НМТ):

$$\alpha = \arcsin \sqrt{\frac{1}{1+p^2}}, \quad \alpha = \arccos p \sqrt{\frac{1}{1+p^2}}. \quad (7.32)$$

Подставив последние выражения в формулы скоростей движения пил, получим их максимальные значения:

– за рабочий ход:

$$x'_{км} = \frac{S_o}{4} \omega \left(1 - \frac{2}{\pi} \right); \quad (7.33)$$

– за холостой ход:

$$x'_{км} = \frac{S_o}{4} \omega \left[(1+p^2) \sqrt{\frac{1}{1+p^2}} - \frac{2}{\pi} \arccos p \sqrt{\frac{1}{1+p^2}} \right]. \quad (7.34)$$

Эти формулы показывают, что за рабочий ход максимальная скорость качания пил зависит только лишь от посылки и угловой скорости вращения коленчатого вала, а за холостой максимальная скорость качания пил, кроме того, зависит от параметра « p », который, как показано выше, является функцией радиуса кривошипа и шага зубьев пилы. Скорость поперечного качания пил за рабочий ход изменяется симметрично середины хода (см. рис. 7.7), а за холостой ход – максимум смещён в сторону мертвой точки.

Для отыскания максимальных значений ускорений пил необходимо определить углы поворота кривошипа, при которых наблюдаются максимальные ускорения. Для этого возьмём первые производные от их функций и приравняем к нулю. Получим следующие уравнения:

- за рабочий ход $\sin\alpha = 0$;
- за холостой ход $p\cos\alpha - \sin\alpha = 0$.

Решив последнее уравнение, получим формулу для определения угла поворота, на котором наблюдается максимальное ускорение качания пильной рамки:

$$\alpha = \arccos \left[\pm \sqrt{\frac{1}{1+p^2}} \right], \quad \alpha = \arcsin p \sqrt{\frac{1}{1+p^2}}.$$

Подставив эти выражения в формулу ускорений поперечного движения пил, получим:

$$x''_{км} = \frac{S_0}{4} \omega^2 (1+p^2) \sqrt{\frac{1}{1+p^2}}. \quad (7.35)$$

Ускорения движения пил за холостой ход имеют большее значение во второй половине хода при начале координат в ВМТ (см. рис. 7.8). При рабочем ходе ускорения движения пил изменяются практически прямо пропорционально перемещению пил по вертикали и достигают максимального значения в НМТ.

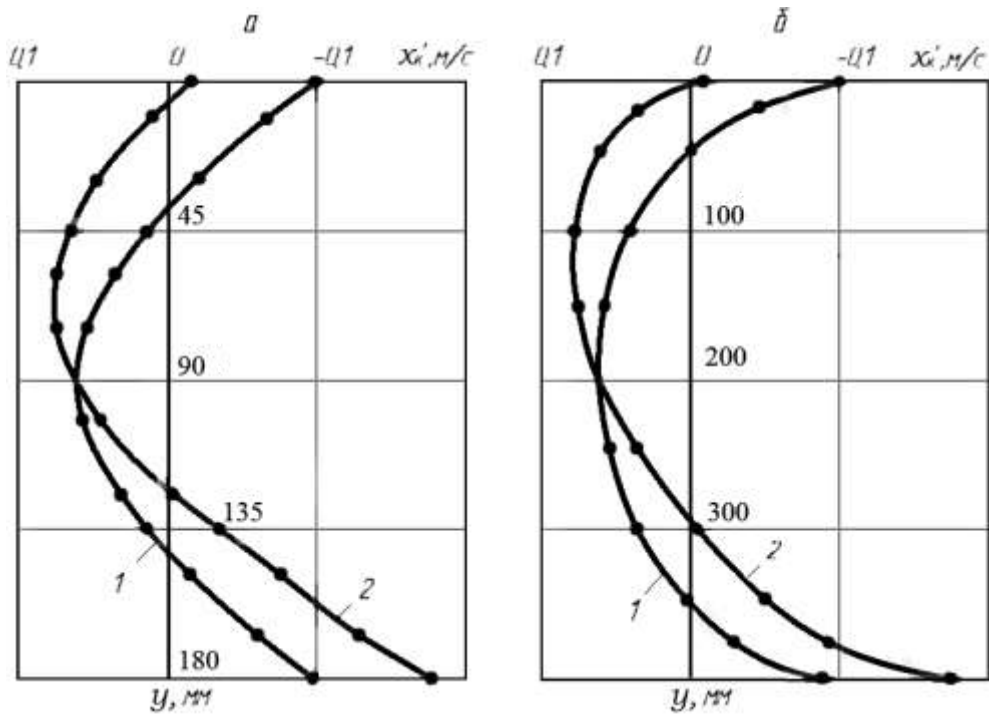


Рис. 7.7. Изменение скорости поперечного качания пильной рамки в зависимости от угла поворота кривошипа (а) и перемещения пильной рамки по вертикали (б): 1 – за рабочий ход, 2 – за холостой ход

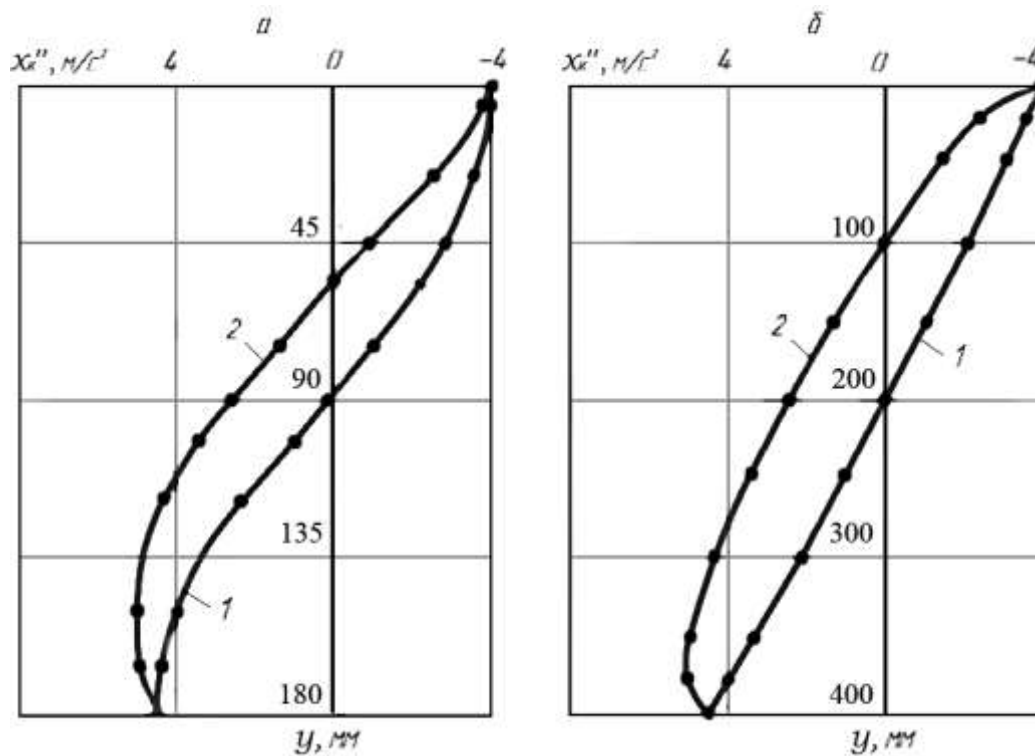


Рис. 7.8. Изменение ускорения при поперечном качании пильной рамки в зависимости от угла поворота кривошипа (а) и перемещения пильной рамки по вертикали (б): 1 – за рабочий ход, 2 – за холостой ход

7.3. Определение математической модели упрощённой траектории движения пил

Ранее была определена теоретическая идеальная траектория движения пил. Однако создание механизмов резания лесопильных рам с такой траекторией движения пильной рамки довольно сложно, так как такая самопересекающаяся идеальная траектория движения пильной рамки на практике трудно выполнима. Таких механизмов в технике пока не имеется.

Обычно механизмы более просты конструктивно и хорошо работают тогда, когда движение осуществляется по симметричным и плавным кривым. Поэтому возникает вопрос определения математической модели, описывающей траекторию движения пил, которую можно реально осуществить на лесопильных рамах, применяя известные механизмы.

Решение данной задачи необходимо производить с учетом анализа процесса пиления древесины рамными пилами. Ранее было установлено, что для получения во время рабочего хода пил постоянной равномерной подачи на зуб качание пил необходимо осуществлять по траектории, описываемой уравнением (7.2).

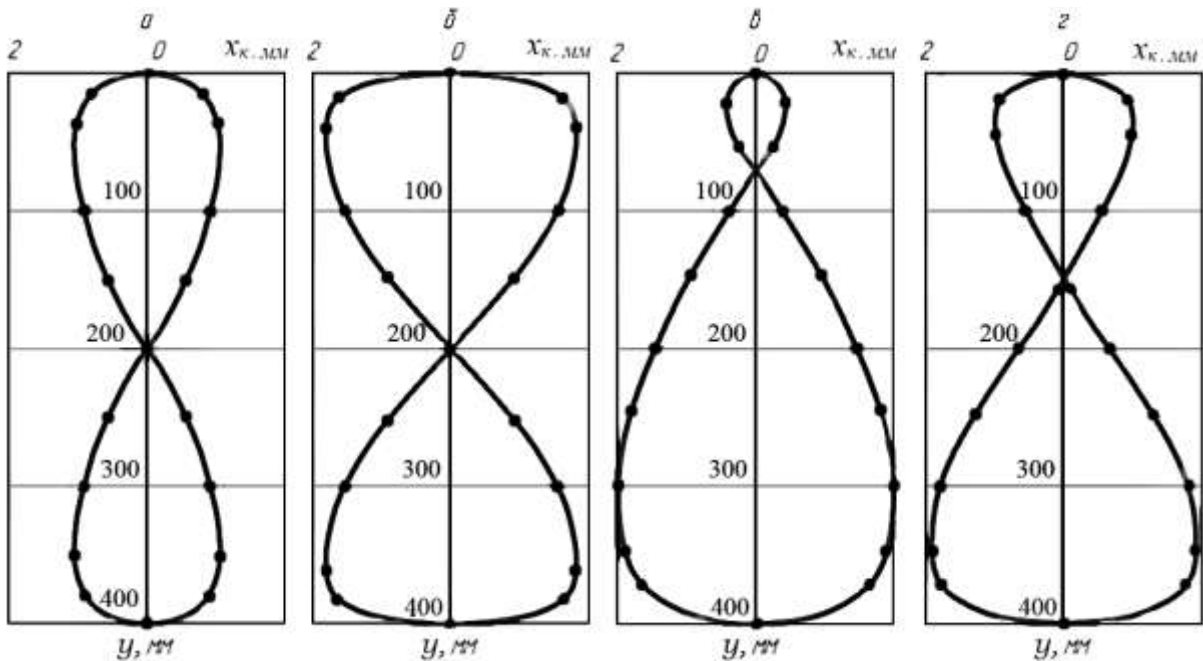


Рис. 7.9. Траектория движения пил: *a* – обеспечивающая равномерную подачу на зуб; *b* – с увеличенной амплитудой качания, исключающей скобление зубьями пилы дна пропила; *v* – с увеличенной амплитудой качания в нижней половине хода и уменьшенной амплитудой в верхней половине их хода; *z* – с увеличенной амплитудой качания в нижней половине хода пил и сохранения амплитуды качания в верхней половине их хода

Уравнение (7.2) представляет собой замкнутую самопересекающуюся плавную кривую с двумя осями симметрии (см. рис. 7.9а). Подобный вид движения пил практически можно осуществить в лесопильных рамах нового типа. Поэтому эту математическую модель качания пил принимаем за основу. Однако в конце рабочего хода на дне пропила будут образованы уступы (см. рис. 7.2), которые препятствуют продвижению пил в начале холостого хода. Следовательно, будет наблюдаться скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода.

Анализ показывает, что исключить скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода возможно следующим путём [22]:

- прямо пропорциональным увеличением амплитуды качания пил;
- увеличением амплитуды качания в нижней половине хода пил и уменьшением амплитуды качания в верхней половине хода;
- увеличением амплитуды качания в нижней половине хода пил и сохранением амплитуды качания в верхней половине хода.

Рассмотрим возможность математического описания упрощённых моделей движения пил и проведём сравнительный анализ предлагаемых траекторий качания пил с определением их параметров.

При увеличении амплитуды качания пил как в верхней, так и в нижней половине хода пильной рамки траекторию движения пил математически можно представить в виде

$$x_k = S_o m \left(\frac{1 - \cos\alpha}{4} - \frac{\alpha}{2\pi} \right), \quad (7.36)$$

где m – коэффициент увеличения амплитуды качания пил.

Значение коэффициента m можно определить из условия отсутствия скобления зубьями пилы дна пропила. Для этого определяем траектории относительного движения пил во время рабочего и холостого ходов. Во время рабочего и холостого ходов пильной рамки движение зуба пилы в пропиле опишется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x_k = \frac{S_o}{4} m \left(1 - \cos\alpha - \frac{2\alpha}{\pi} \right), \\ y = R(1 - \cos\alpha), \\ x_g = \frac{S_o}{2\pi} \alpha. \end{cases} \quad (7.37)$$

Решая систему уравнений (7.37), получим формулу для определения траектории движения зуба пилы в пропиле (начало координат в ВМТ) за рабочий ход:

$$x_p = S_o m \frac{y}{R} - \frac{S_o}{2\pi} (m - 1) \arccos \frac{R - y}{R}. \quad (7.38)$$

Так как скобление зубьями пилы дна пропила наблюдается в начале холостого хода, а траектории движения пил за рабочий и холостой ходы математически описаны от различных начал координат, то необходимо начало координат для траектории движения зуба пилы в пропиле за рабочий ход (ВМТ) привести к началу координат траектории движения зуба пилы в пропиле за холостой ход (НМТ). Для этого в формулу (7.38) необходимо ввести подстановку $y' = 2R - y$, тогда получим:

$$x_x = \frac{S_o m}{2} \left(1 - \frac{y}{2R}\right) - \frac{S_o}{2\pi} (m - 1) \left(\pi - \arccos \frac{R - y}{R}\right). \quad (7.39)$$

Пользуясь методикой, описанной в третьей главе, глубину вдавливания зуба пилы в древесину в данном случае можно определить по выражению:

$$\delta = S_o \left[\frac{my}{2R} - \frac{m - 1}{2\pi} \arccos \frac{R - y}{R} \right]. \quad (7.40)$$

На максимальную глубину зуб пилы вдавливается в древесину при положении пильной рамки от НМТ на расстоянии шага зубьев пилы ($y = t$). Принимая при этом глубину вдавливания зуба пилы в древесину равной нулю, значение коэффициента m определим по выражению:

$$m = \frac{\arccos \frac{R-t}{R}}{\arccos \frac{R-t}{R} - \frac{\pi t}{2R}}. \quad (7.41)$$

Величина коэффициента m зависит только от шага зубьев и хода пильной рамки. С увеличением шага зубьев (см. рис. 7.10а) коэффициент m возрастает, причём для меньших радиусов кривошипа этот рост более значителен. С увеличением радиуса кривошипа коэффициент m уменьшается (см. рис. 7.10б). Эти графики

показывают, что с уменьшением шага зубьев и с увеличением хода пильной рамки амплитуда качания уменьшается.

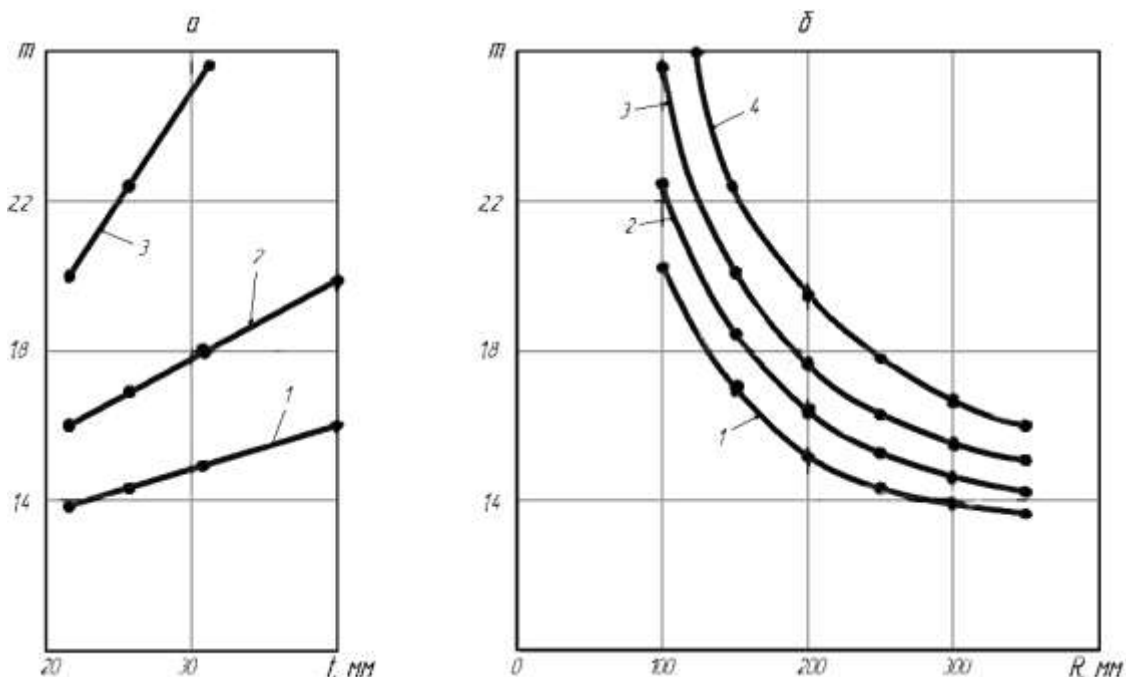


Рис. 7.10. Изменение коэффициента m от шага зубьев пилы (а) (при 1 – $R = 350$ мм; 2 – $R = 200$ мм; 3 – $R = 100$ мм) и радиуса кривошипа (б) (при 1 – $t = 22$ мм; 2 – $t = 26$ мм; 3 – $t = 32$ мм; 4 – $t = 40$ мм)

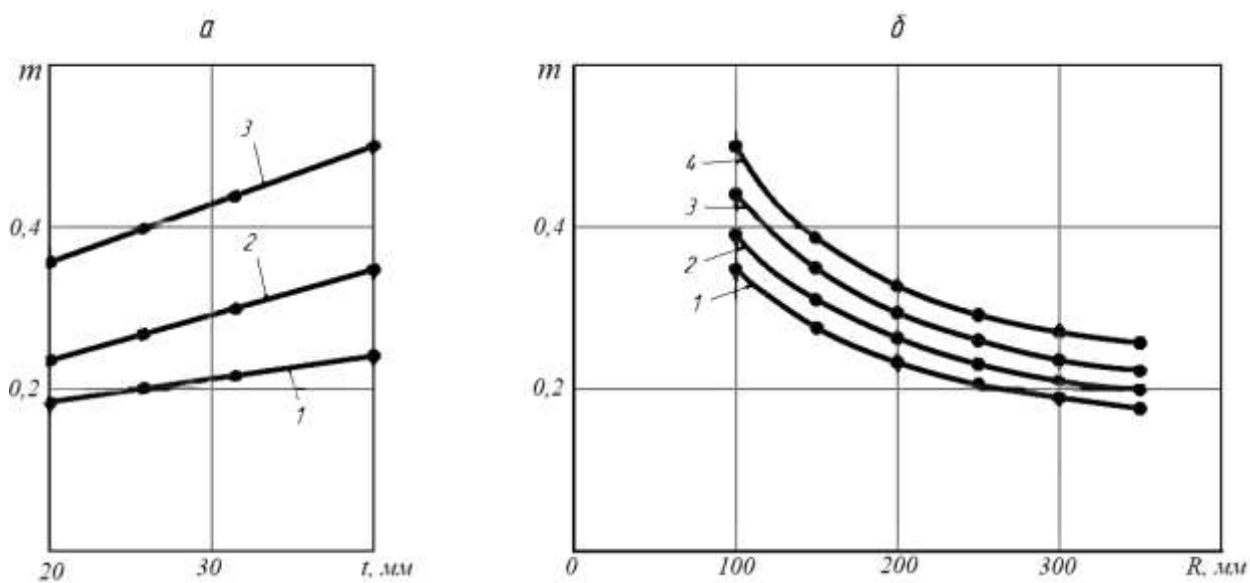


Рис. 7.11. Влияние шага зубьев пилы (а – при 1 – $R = 350$ мм; 2 – $R = 200$ мм; 3 – $R = 100$ мм) и радиуса кривошипа (б – при 1 – $t = 22$ мм; 2 – $t = 26$ мм; 3 – $t = 32$ мм; 4 – $t = 40$ мм) на величину коэффициента m

Применительно к одноэтажным лесопильным рамам ($R = 200$ мм, $t = 26$ мм) величина коэффициента m равна 1,656.

Следовательно, необходимо на такую величину увеличить амплитуду качания пильной рамки по сравнению с амплитудой качания, описываемой уравнением (7.2). Такая кривая представлена на рис. 7.9б. На величину коэффициента m возрастут скорости и ускорения, что хорошо видно из формул:

$$x'_k = \frac{S_0}{4} m \omega \left(\sin \alpha - \frac{2}{\pi} \right), \quad (7.42)$$

$$x''_k = \frac{S_0}{4} m \omega^2 \cos \alpha. \quad (7.43)$$

При $R = 200$ мм и числе двойных ходов в минуту, равном 285, графики скоростей и ускорений имеют вид, представленный на рис. 7.12 и 7.13. Скорость движения пил меняет свой знак и принимает максимальные значения в верхних и нижних мёртвых положениях, а также в середине хода пильной рамки. Ускорение пильной рамки наибольшего значения достигает в верхнем и нижнем мёртвых положениях, а в середине хода пил равно нулю. Вторым вариантом траектории пил обуславливает рост ускорений в верхней и нижней мёртвых точках на 67% по сравнению с первым вариантом траектории (см. рис. 7.9а).

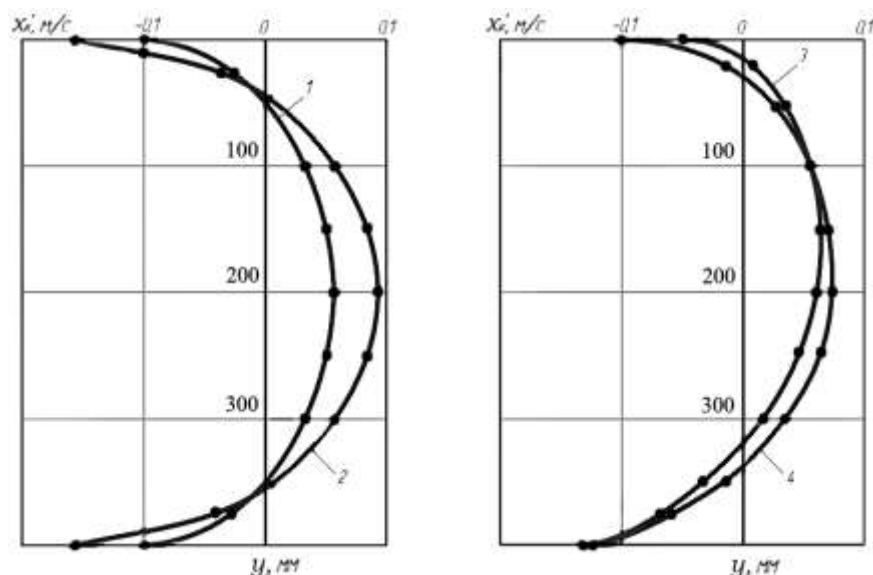


Рис. 7.12. Скорости поперечного перемещения пил:

1 – при равномерной подаче на зуб; 2 – при прямо пропорциональном увеличении амплитуды качания до исключения скобления; 3 – при увеличенной амплитуде качания в нижней половине их хода; 4 – при увеличенной амплитуде качания в нижней половине хода пил и примерном сохранении амплитуды качания в верхней половине их хода

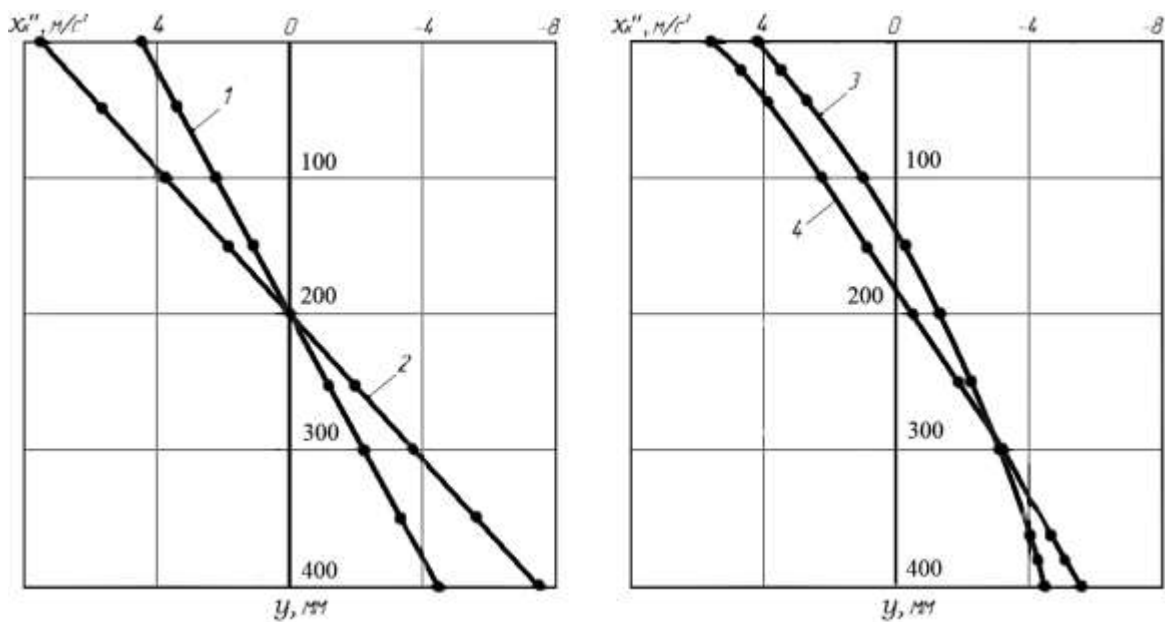


Рис. 7.13. Ускорения при качании пил:

1 – при равномерной подаче на зуб; 2 – при прямо пропорциональном увеличении амплитуды качания, исключая скобление; 3 – при увеличенной амплитуде качания в нижней половине хода пил и уменьшении амплитуды в верхней половине их хода; 4 – при увеличенной амплитуде качания в нижней половине хода пил и сохранении амплитуды качания в верхней половине их хода

Важно знать, каким образом прямо пропорциональное увеличение амплитуды качания пильной рамки повлияло на характер изменения подачи на зуб во время рабочего хода. Траектория зуба пилы в пропиле во время рабочего хода (отсчёт перемещений от ВМТ) опишется уравнением (7.38). Траектория нижнего соседнего зуба пилы в пропиле опишется системой уравнений (отсчёт перемещений от ВМТ):

$$\begin{cases} x_k = \frac{S_0}{4} m \left(1 - \cos \alpha - \frac{2\alpha}{\pi} \right), \\ y = R(1 - \cos \alpha) + t, \\ x_g = \frac{S_0}{2\pi} \alpha - \frac{S_0 t}{4R}. \end{cases} \quad (7.44)$$

Решая систему уравнений (7.44), получим:

$$x_2 = S_0 m \frac{y - t}{4R} - \frac{S_0}{2\pi} (m - 1) \arccos \frac{R + t - y}{R} - \frac{S_0 t}{4R}. \quad (7.45)$$

Пользуясь методикой, описанной в главе 3, подачу на зуб определим по формуле:

$$S_z = (m + 1) \frac{S_o t}{4R} - \frac{S_o}{2\pi} (m - 1) \left(\arccos \frac{R - y}{R} \arccos \frac{R + t - y}{R} \right). \quad (7.46)$$

Характер изменения подачи на зуб во время рабочего хода (применительно к одноэтажным лесопильным рамам) представлен на рис. 7.14. Подача на зуб в начале рабочего хода интенсивно возрастает, затем замедляется к середине рабочего хода. От середины рабочего хода подача на зуб вначале незначительно, а затем интенсивно уменьшается до значения, равного половине средней подачи на зуб.

В этом случае подача на зуб достигает максимального значения в середине хода, величина которой определится по формуле:

$$S_{z \max} = \frac{S_o t}{4R} (m + 1) - \frac{S_o t}{2\pi} (m - 1) \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{t}{R} \right), \quad (7.47)$$

где m – коэффициент изменения скорости подачи заготовки.

Максимальное значение подачи на зуб на 12% больше ее среднего значения, и по этому технологическому требованию траектория движения пил вполне удовлетворяет. Однако при этом значительно возрастают скорости и ускорения пил (см. рис. 7.12 и 7.13), что явно нежелательно. Так, для одноэтажных лесопильных рам ускорение пил возрастает на 67% по сравнению с первым вариантом. Поэтому необходимо рассмотреть другие виды математической модели качания пил.

Увеличение амплитуды качания пил в нижней половине их хода с соответствующим уменьшением амплитуды качания в верхней половине хода математически можно представить в следующем виде:

$$x_k = \frac{S_o}{4} \left(1 - \cos \alpha \pm n \sin \alpha - \frac{2}{\pi} \alpha \right), \quad (7.48)$$

где n – коэффициент уменьшения амплитуды качания пил в верхней половине рабочего хода.

В уравнении (7.48) знак плюс относится к рабочему ходу (отсчет перемещений от ВМТ), а знак минус – к холостому ходу (отсчет перемещений от ВМТ). Определение коэффициента n производим также из условия отсутствия скобления зубьями пилы дна пропила. Траектория зуба пилы в пропиле определится по формуле:

$$x_k = \frac{S_o}{4} \left(\frac{y}{R} \pm n \sin \arccos \frac{R - y}{R} \right). \quad (7.49)$$

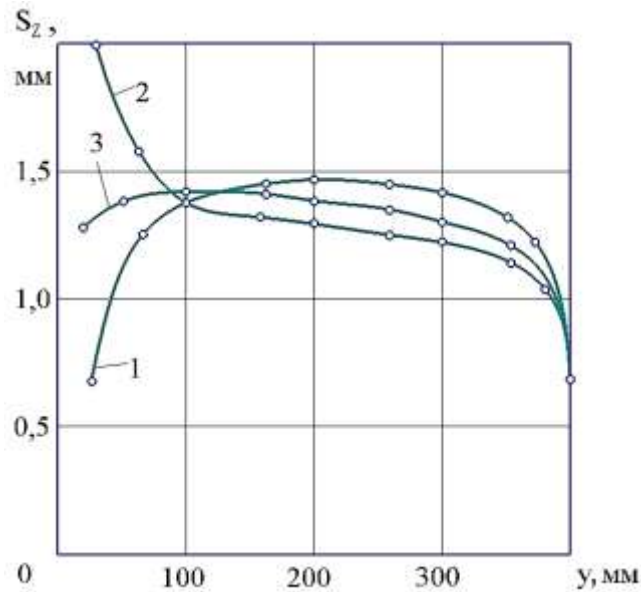


Рис. 7.14. Характер изменения подачи на зуб:

1 – при прямо пропорциональном увеличении амплитуды качания пил до исключения скобления; 2 – при увеличенной амплитуде качания в нижней половине хода пил и уменьшении амплитуды качания в верхней половине хода их; 3 – при увеличенной амплитуде качания в нижней половине хода пил и примерном сохранении амплитуды качания в верхней половине хода

Траектория зуба пилы в пропиле во время рабочего хода при отсчете от НМТ:

$$x_p = \frac{S_o}{4} \left(2 - \frac{y}{R} + n \operatorname{sinarccos} \frac{R - y}{R} \right). \quad (7.50)$$

Тогда глубина вдавливания зуба пилы в древесину определится по формуле:

$$\delta = \frac{S_o n}{2} \operatorname{sinarccos} \frac{R - y}{R} - \frac{S_o y}{2R}. \quad (7.51)$$

Максимального значения глубина вдавливания достигает при $y = t$. Принимая при этом глубину вдавливания зуба пилы в древесину равной нулю, значение коэффициента n определим по формуле:

$$n = \frac{t}{\sqrt{2Rt - t^2}}. \quad (7.52)$$

Значения коэффициента n зависят от шага зубьев пилы и радиуса кривошипа (см. рис. 7.11). С увеличением шага зубьев пилы величина коэффициента n возрастает, а с увеличением хода пильной

рамки – уменьшается. Из этих графиков можно сделать вывод, что при меньших шагах зубьев пилы и больших радиусах кривошипа увеличивать амплитуду качания пил необходимо меньше, чем при пилении древесины пилами с большим шагом зубьев и на лесопильных рамах с малыми ходами пильной рамки.

Траектория движения пил будет иметь вид, представленный на рис. 7.10в, а скорости и ускорения движения пил определятся по формулам:

$$x'_k = \frac{S_o}{4} \omega \left(\sin\alpha \pm n \cos\alpha - \frac{2}{\pi} \right), \quad (7.53)$$

$$x''_k = \frac{S_o}{4} \omega^2 (\cos\alpha \pm n \sin\alpha). \quad (7.54)$$

Эти формулы показывают, что скорости движения пил в начале рабочего хода уменьшаются, а в конце его возрастают по сравнению с первым вариантом движения пил (см. рис. 7.12). Максимальные ускорения движения пил при этом равны, хотя в середине хода пильной рамки незначительно отличаются между собой (см. рис. 7.13).

Важно знать, каким образом при этом изменится подача на зуб. Траекторию движения первого зуба в пропиле можно определить по формуле (7.49).

Траекторию нижнего соседнего зуба пилы в пропиле можно описать в параметрической форме так:

$$\begin{cases} x_k = \frac{S_o}{4} \left(1 - \cos\alpha + n \sin\alpha - \frac{2}{\pi} \alpha \right), \\ y = R(1 - \cos\alpha) + t, \\ x_s = \frac{S_o}{2\pi} \alpha - \frac{S_o t}{4R}. \end{cases} \quad (7.55)$$

Решая эту систему уравнений, получим:

$$x_2 = \frac{S_o}{4} \left(\frac{y}{R} + n \sin \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) - \frac{S_o t}{4R}. \quad (7.56)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_o n}{4} \left(\sin \arccos \frac{R-y}{R} - \sin \arccos \frac{R+t-y}{R} \right) + \frac{S_o t}{4R}. \quad (7.57)$$

Характер изменения подачи на зуб, представленный на рис. 7.14, показывает, что в начале рабочего хода наблюдается максимальное значение подачи на зуб. Это говорит о том, что в начале рабочего хода пильной рамки от ВМТ отвод пил недостаточен. Подача на зуб во время рабочего хода, начиная от верхнего положения пильной рамки, находящейся на расстоянии более шага зубьев пилы от ВМТ, с увеличением перемещения пилы уменьшается. При этом уменьшение подачи на зуб в начале и в конце рабочего хода пильной рамки происходит интенсивно, а в середине хода медленно. В конце рабочего хода подача на зуб достигает половины ее среднего значения. График показывает, что такой вариант качания пильной рамки неприемлем для промышленности, так как наблюдается значительная неравномерность толщины срезаемого слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода.

Траекторию движения пил при увеличении амплитуды качания в нижней половине хода и примерном сохранении амплитуды в верхней половине хода можно задать уравнением:

$$x_k = \frac{S_o}{4} \left[m(1 - \cos\alpha) \pm n \sin\alpha - \frac{2}{\pi} m\alpha \right]. \quad (7.58)$$

Определение коэффициентов m и n производим с учетом двух условий:

- исключения скобления зубьями пилы дна пропила;
- незначительного изменения подачи на зуб в начале и середине рабочего хода пил, для чего принимаем требование равенства подачи на зуб при положениях пильной рамки $y = t$, $y = R$ (отсчет перемещений от ВМТ).

Движение зуба пилы в пропиле во время рабочего хода (отсчет перемещений от ВМТ) определится по формуле:

$$x = \frac{S_o}{4} \left(\frac{y}{R} m + n \sin \arccos \frac{R-y}{R} \right) - \frac{S_o}{2\pi} (m-1) \arccos \frac{R-y}{R}. \quad (7.59)$$

Движение зуба пилы в пропиле во время холостого хода (отсчет перемещений от НМТ) определится по формуле:

$$x_x = \frac{S_o}{4} \left(\frac{y}{R} m - n \sin \arccos \frac{R-y}{R} \right) - \frac{S_o}{2\pi} (m-1) \arccos \frac{R-y}{R}. \quad (7.60)$$

Для приведения этих уравнений к одной системе координат (НМТ) необходимо в формуле (7.59) сделать подстановку $y' = 2R - y$. После преобразований получим:

$$x_p = \frac{S_o}{4} \left(2m - \frac{y}{R} m + n \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} \right) - \frac{S_o}{2\pi} (m-1) \left(\pi - \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} \right). \quad (7.61)$$

Тогда глубину вдавливания зуба пилы в древесину можно определить по формуле:

$$\delta = \frac{S_o n}{2} \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} + S_o \frac{(m-1)}{2\pi} \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} - \frac{S_o m y}{2R}. \quad (7.62)$$

Максимальная глубина вдавливания зуба пилы в древесину наблюдается при $y = t$. Принимая при этом глубину вдавливания зуба пилы в древесину равной нулю, определим значение коэффициента n :

$$n = \frac{\frac{mt}{R} - 2 \frac{m-1}{\pi} \operatorname{arccos} \frac{R-t}{R}}{\operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R}}. \quad (7.63)$$

Для определения подачи на зуб необходимо выразить траекторию нижнего соседнего зуба пилы в пропиле. Она определится по формуле:

$$x_2 = \frac{S_o}{4} \left[\frac{m}{y} (y-t) + n \operatorname{sinarccos} \frac{R+t-y}{R} \right] - \frac{S_o}{2\pi} (m-1) \operatorname{arccos} \frac{R+t-y}{R} - \frac{S_o t}{4R}. \quad (7.64)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_o n}{4} \left(\operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} - \operatorname{sinarccos} \frac{R+t-y}{R} \right) - \frac{S_o (m-1)}{2\pi} \left(\operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} - \operatorname{arccos} \frac{R+t-y}{R} \right) + \frac{S_o t}{4R} (m-1). \quad (7.65)$$

При $y = t$ подача на зуб будет равна:

$$S_{zt} = \frac{S_0 n}{4} \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R} - \frac{S_0(m-1)}{2\pi} \operatorname{arccos} \frac{R-t}{R} + \frac{S_0 t}{4R} (m+1). \quad (7.66)$$

При $y = R$ подача на зуб будет равна:

$$S_{ZR} = \frac{S_0 n}{4} \left(1 - \operatorname{sinarccos} \frac{t}{R} \right) - \frac{S_0(m-1)}{2\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arccos} \frac{t}{R} \right) + \frac{S_0 t}{4R} (m+1). \quad (7.67)$$

Принимая $S_{Zt} = S_{ZR}$ и учитывая формулу (7.63), значение коэффициента m определим по формуле:

$$m = \frac{A \cdot B + C}{C + DB}, \quad (7.68)$$

где $A = \frac{1}{\pi} \operatorname{arccos} \frac{R-t}{R}$;

$$B = \frac{1}{2} - \frac{1 - \operatorname{sinarccos} \frac{t}{R}}{2 \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R}};$$

$$C = \frac{1}{2\pi} \left(\operatorname{arccos} \frac{R-t}{R} - \frac{\pi}{2} + \operatorname{arccos} \frac{t}{R} \right);$$

$$D = A - \frac{t}{2R}.$$

Анализ формулы (7.68) показывает, что с увеличением шага зубьев пилы значение коэффициента m возрастает (см. рис. 7.15а), а с увеличением радиуса кривошипа значение этого коэффициента уменьшается (см. рис. 7.15б). Следовательно, с увеличением шага зубьев пилы амплитуду качания пил необходимо увеличивать, а с увеличением хода пильной рамки – уменьшать.

Определив значение коэффициента m по формуле (7.68), можно определить значение коэффициента n , который также зависит от шага зубьев пилы и радиуса кривошипа. С увеличением шага зубьев

значение коэффициента n возрастает (см. рис. 7.16а), а с увеличением радиуса кривошипа – уменьшается (см. рис. 7.16б).

Взаимосвязь коэффициентов m и n показана на рис. 7.17. Из рис. 7.17 видно, что с увеличением коэффициента n значение коэффициента m уменьшается. Оптимальные условия пиления будут наблюдаться при изменении коэффициентов m и n по линии 5 этого рисунка. После определения коэффициентов m и n можно определить по формуле (7.65) характер изменения подачи на зуб (см. рис. 7.14). Подача на зуб незначительно изменяется в диапазоне перемещения пильной рамки от t до $1,5R$, а затем уменьшается до значения, равного половине средней подачи на зуб. Характер изменения подачи на зуб показывает, что ее максимальное значение незначительно превышает среднее значение подачи на зуб, и с этой точки зрения такая траектория вполне удовлетворяет требованиям неравномерности толщины срезаемого слоя древесины зубом пилы.

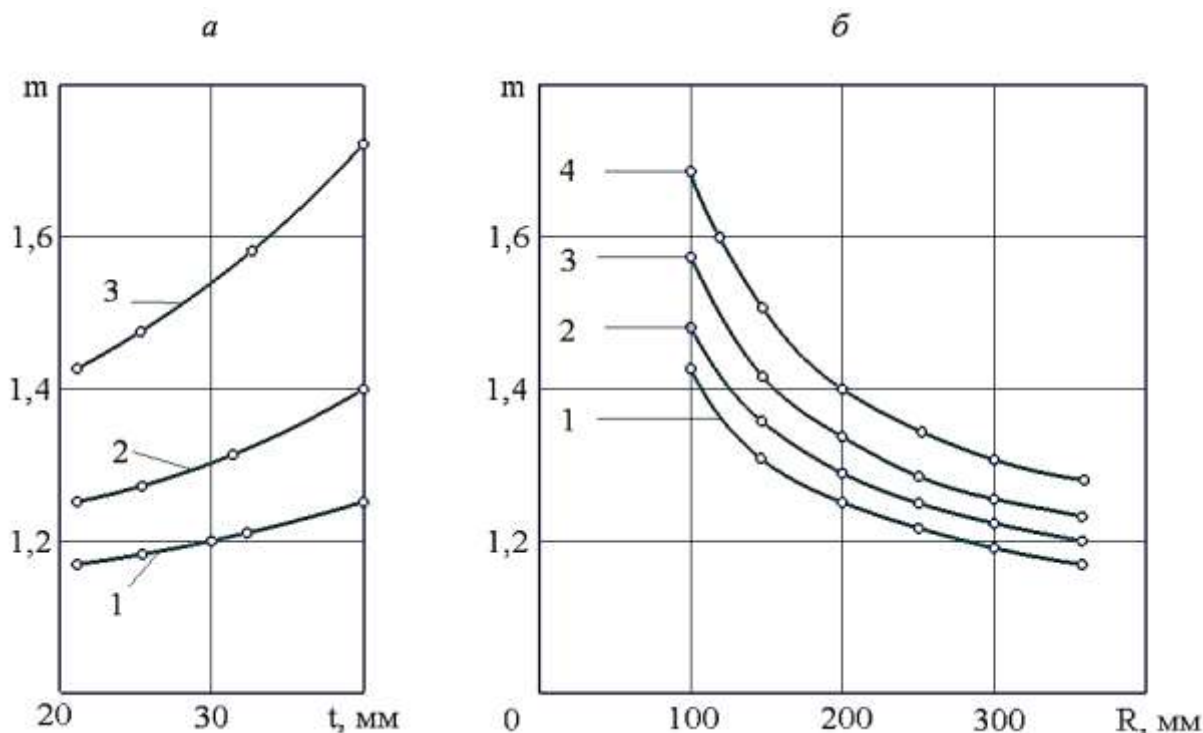


Рис. 7.15. Изменение коэффициента m от шага зубьев пилы (а – при 1 – $R = 350$ мм; 2 – $R = 200$ мм; 3 – $R = 100$ мм) и радиуса кривошипа (б – при 1 – $t = 22$ мм; 2 – $t = 26$ мм; 3 – $t = 32$ мм; 4 – $t = 40$ мм)

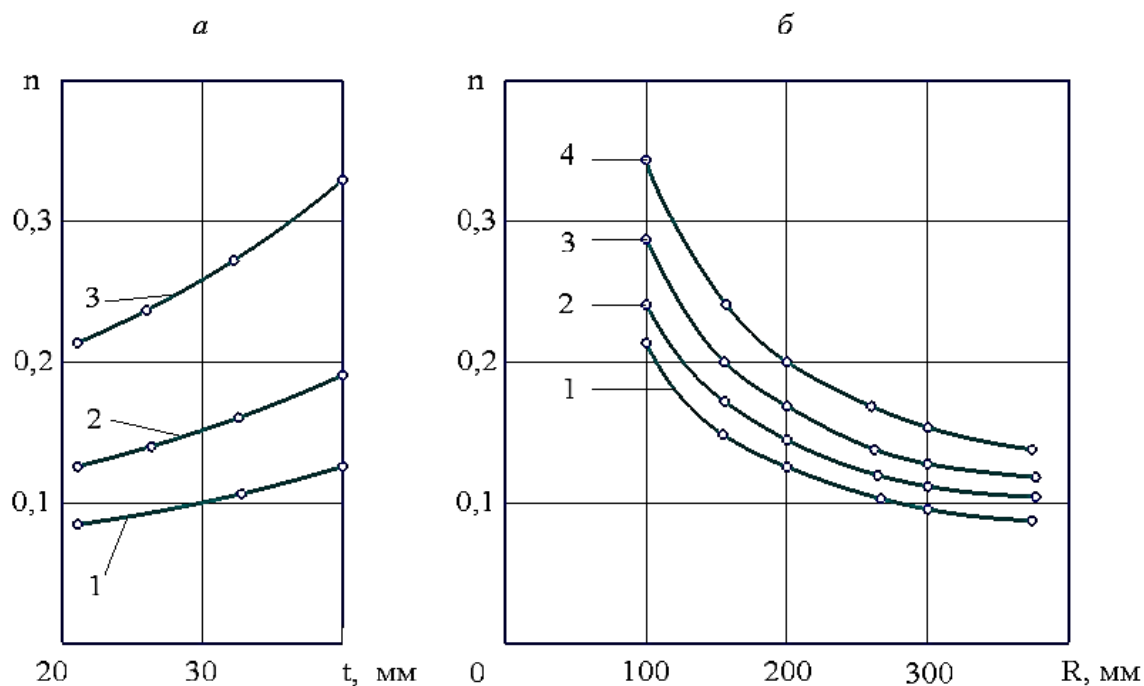


Рис. 7.16. Влияние шага зубьев пилы (*a* – при 1 – $R = 350$ мм; 2 – $R = 200$ мм; 3 – $R = 100$ мм) и радиуса кривошипа (*б* – при 1 – $t = 22$ мм; 2 – $t = 26$ мм; 3 – $t = 32$ мм; 4 – $t = 40$ мм) на величину коэффициента n

Скорости (см. рис. 7.12) и ускорения (см. рис. 7.13) незначительно отличаются от первого варианта. Максимальные ускорения пил в этом случае возрастут не более чем на 30% по сравнению с первым вариантом.

Таким образом, этот вариант траектории движения пил (см. рис. 7.9*з*) позволяет незначительно изменить равномерность толщины срезаемого слоя древесины во время рабочего хода и не столь значительно увеличить ускорение пильной рамки по сравнению с другими вариантами. Поэтому данный вид траектории является наиболее рациональным и вполне осуществим на практике. Следовательно, рациональная траектория движения пил представляет собой замкнутую самопересекающуюся кривую, у которой узловая точка смещена относительно середины хода в сторону верхней мертвой точки.

Важной характеристикой траектории движения пил является расположение точки пересечения (узловой точки). Для отыскания ее оптимального расположения по вертикали воспользуемся уравнением (7.58), которое составим отдельно для рабочего и холостого ходов.

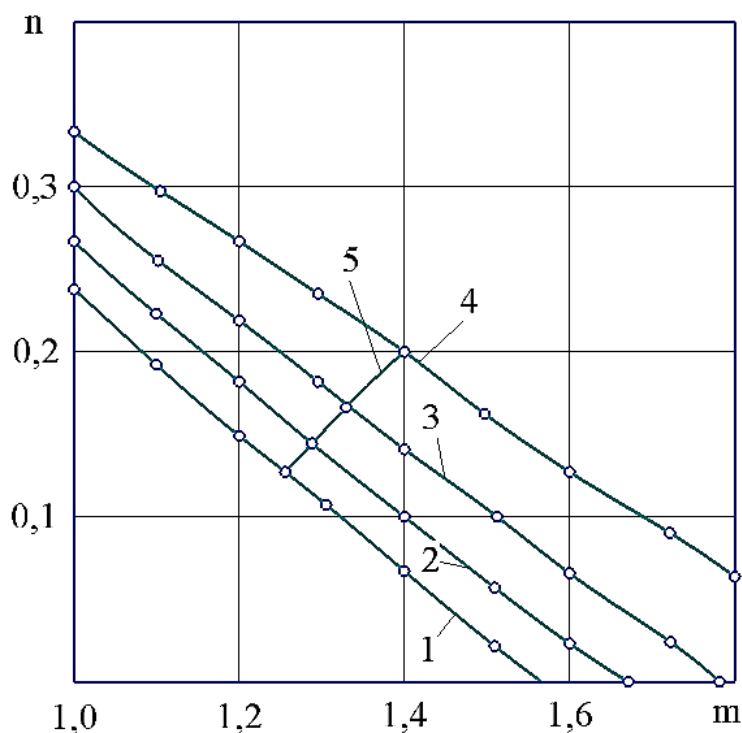


Рис. 7.17. Взаимосвязь коэффициентов m и n для $R = 200$ мм и различных шагов зубьев пилы: 1 – $t = 22$ мм; 2 – $t = 26$ мм; 3 – $t = 32$ мм; 4 – $t = 40$ мм; 5 – линия оптимума

В уравнение для рабочего хода сделаем подстановки

$$\sin\alpha = \sqrt{1 - \cos^2\alpha}, \quad \alpha = \arccos \frac{R - y}{R}$$

и приравняем его нулю. Тогда получим:

$$\frac{my}{4R} + \frac{n}{4} \sqrt{1 - \left(\frac{R - y}{R}\right)^2} - \frac{m}{2\pi} \arccos \frac{R - y}{R} = 0. \quad (7.69)$$

Тождество (7.69) представляет собой трансцендентное уравнение, которое решаем методом итерации. Решая это уравнение, получим величину $y = b$, которая представляет собой расстояние узловой точки (пересечение траекторий) за рабочий и холостой ходы от ВМТ. Расчеты показывают, что с увеличением радиуса кривошипа относительное смещение узловой точки от ВМТ возрастает (см. рис. 7.18а), а с увеличением шага зубьев – уменьшается (см. рис. 7.18б). Для существующих в нашей стране моделей лесопильных рам узловая точка должна быть смещена от середины хода пильной рамки в направле-

нии к ВМТ на расстоянии 0, 1–0,2 от величины хода пильной рамки, причем меньшие значения следует брать для лесопильных рам с большим ходом пильной рамки и меньшим шагом зубьев пилы. Рекомендуемая величина смещения (e) узловой точки от середины хода пильной рамки должна назначаться в следующих пределах:

$$\begin{aligned} R = 100 \text{ мм}; & \quad e/2R = 0,18-0,20; \\ R = 200 \text{ мм}; & \quad e/2R = 0,15-0,18; \\ R = 350 \text{ мм}; & \quad e/2R = 0,12-0,15. \end{aligned}$$

Для определения экстремальных значений амплитуды качания пил возьмем первую производную по времени от уравнения движения пильной рамки (7.58) и приравняем ее нулю. После некоторых преобразований получим:

$$m \sin \alpha + n \cos \alpha = \frac{2m}{\pi}. \quad (7.70)$$

В тождестве (7.70) сделаем замену $\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$. После преобразования получим:

$$m \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \frac{2m}{\pi} - n \cos \alpha.$$

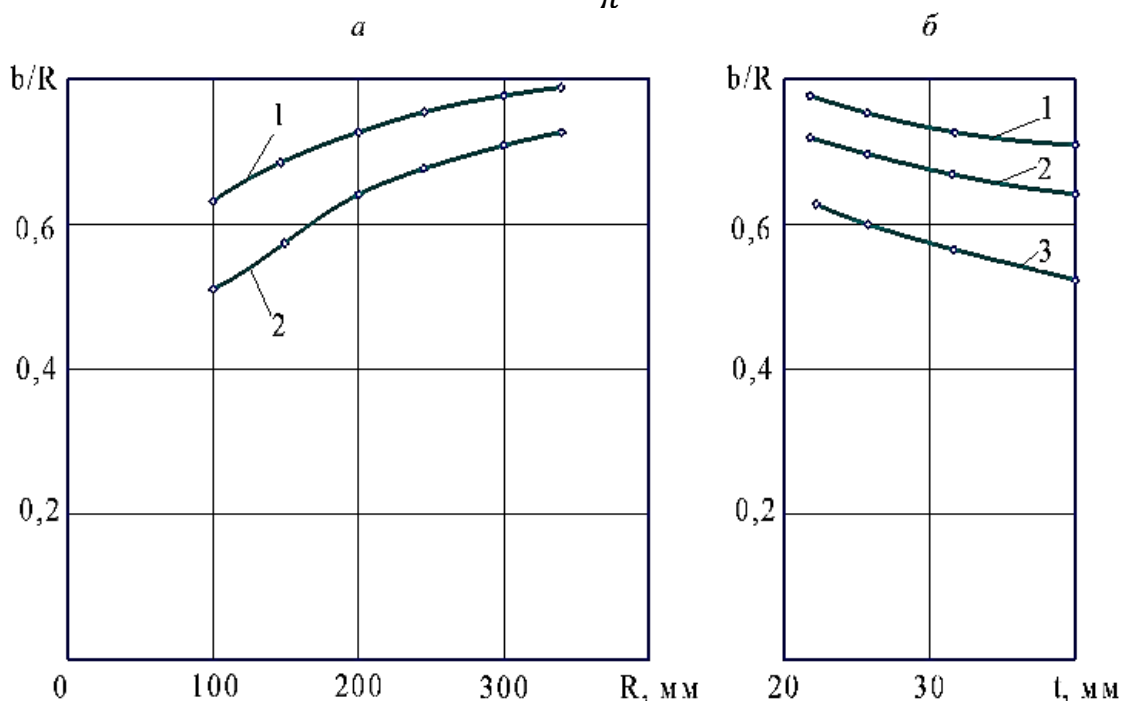


Рис. 7.18. Влияние радиуса кривошипа (a – при 1 – $t = 22$ мм; 2 – $t = 40$ мм) и шага зубьев пилы (b – при 1 – $R = 350$ мм; 2 – $R = 200$ мм; 3 – $R = 100$ мм) на величину относительного смещения узловой точки от ВМТ

Возведем обе части тождества в квадрат:

$$(m^2 + n^2)\cos^2\alpha - \frac{4mn}{\pi}\cos\alpha + m^2\left(\frac{4}{\pi^2} - 1\right) = 0. \quad (7.71)$$

Решая это уравнение, определим угол поворота кривошипа, при котором наблюдаются экстремальные значения амплитуды качания пил:

$$\alpha_{1,2} = \arccos \frac{\frac{4mn}{\pi} \pm \sqrt{\frac{16m^2n^2}{\pi^2} + 4m^2(m^2 + n^2)\left(1 - \frac{4}{\pi^2}\right)}}{2(m^2 + n^2)}. \quad (7.72)$$

Анализ этой формулы показывает, что угол поворота кривошипа, при котором наблюдается первое экстремальное значение (отсчет от ВМТ), с увеличением радиуса кривошипа незначительно возрастает (рис. 7.19а), а с ростом шага зубьев пилы – уменьшается (рис. 7.19б). В то же время угол поворота кривошипа, при котором наблюдается экстремальное значение амплитуды качания (отсчет нуля от НМТ), с ростом радиуса кривошипа уменьшается (см. рис. 7.20а), а с увеличением шага зубьев пилы – возрастает (см. рис. 7.20б). Расчеты также показывают, что величины этих углов не равны между собой.

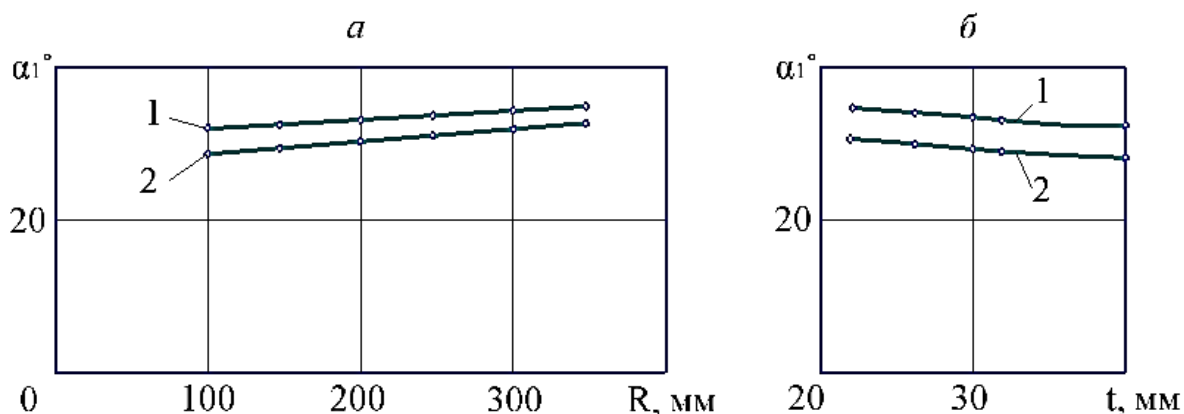


Рис. 7.19. Влияние радиуса кривошипа (а – при 1 – $t = 22$ мм; 2 – $t = 40$) и шага зубьев пилы (б – при 1 – $R = 100$ мм; 2 – $R = 350$ мм) на величину угла поворота кривошипа, при котором наблюдается первое экстремальное значение амплитуды качания пил (отсчет от ВМТ)

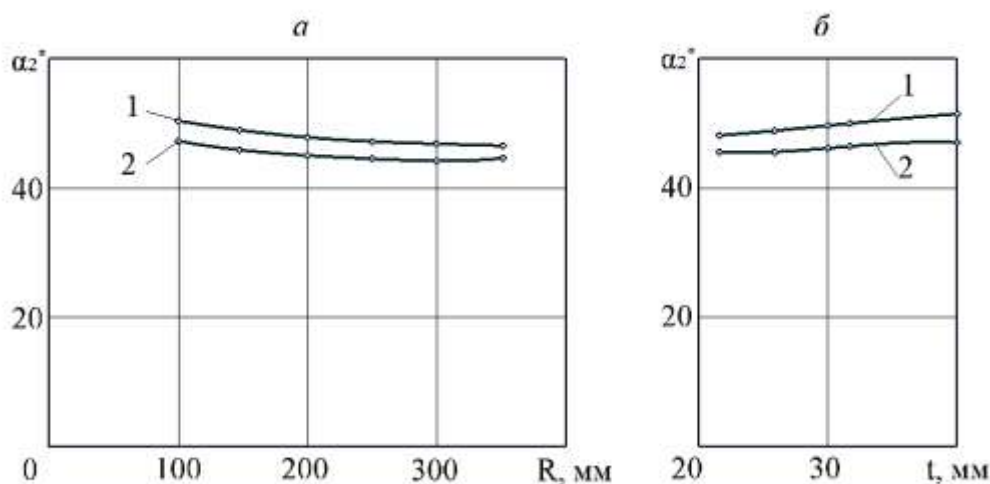


Рис. 7.20. Влияние радиуса кривошипа (*a* – при 1 – $t = 40$ мм; 2 – $t = 22$ мм) и шага зубьев пилы (*б* – при 1 – $R = 100$ мм; 2 – $R = 350$ мм) на величину угла поворота кривошипа, при котором наблюдается второе экстремальное значение амплитуды качания пил (отсчет от НМТ)

Подставив выражение (7.72) в формулу (7.68), получим первое и второе экстремальные значения амплитуды качания пил. Первый экстремум при движении пил во время рабочего хода представляет собой отрицательное значение, и его можно назвать минимумом функции. Вторым экстремум, наблюдающийся во время рабочего хода, положителен, и его следует именовать максимумом функции. Первое экстремальное значение амплитуды качания пил относительно посылки с увеличением радиуса кривошипа незначительно возрастет (рис. 7.21*a*), а с изменением шага зубьев пил – практически сохраняет свою величину (рис. 7.21*б*).

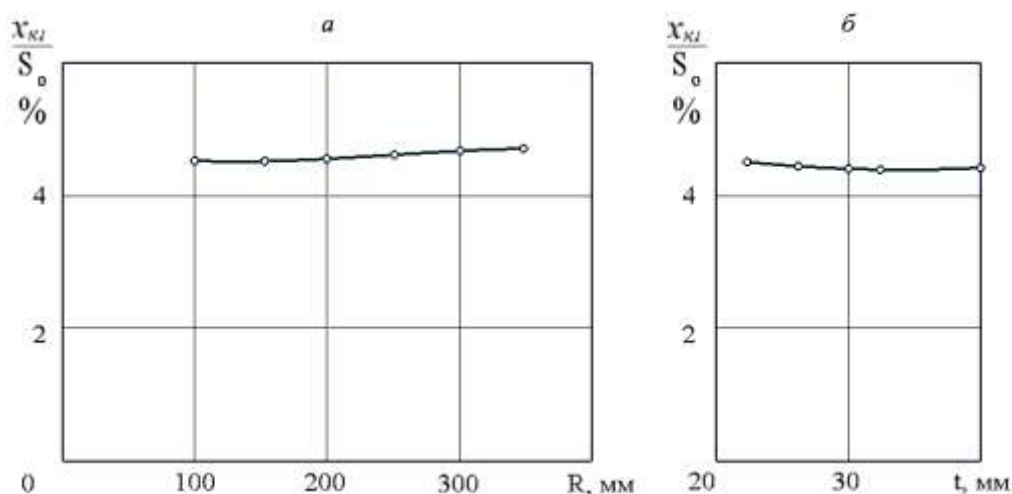


Рис. 7.21. Изменение экстремальной относительной амплитуды качания пил в первой половине рабочего хода от радиуса кривошипа (*a*) и шага зубьев пилы (*б*)

Второе экстремальное значение амплитуды качания пил относительно посылки с увеличением радиуса кривошипа уменьшается (рис. 7.22а), а с увеличением шага зубьев пилы – возрастает практически прямо пропорционально (рис. 7.22б). Наши расчеты показали, что первое значение амплитуды качания изменяется в пределах 0,045–0,048 от посылки, а второе – в пределах 0,076–0,150 от посылки. Следовательно, первое экстремальное значение амплитуды качания ($x_{к1}$) может быть выбрано независимо от радиуса кривошипа и шага зубьев пилы, а второе экстремальное значение амплитуды качания пил ($x_{к2}$) необходимо выбирать с учетом радиуса кривошипа и шага зубьев пилы. В выборе траектории движения пил необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

для $R = 100$ мм $x_{к2}/S_0 = 0,1-0,12$;
 $R = 200$ мм $x_{к2}/S_0 = 0,09-0,11$;
 $R = 350$ мм $x_{к2}/S_0 = 0,08-0,09$.

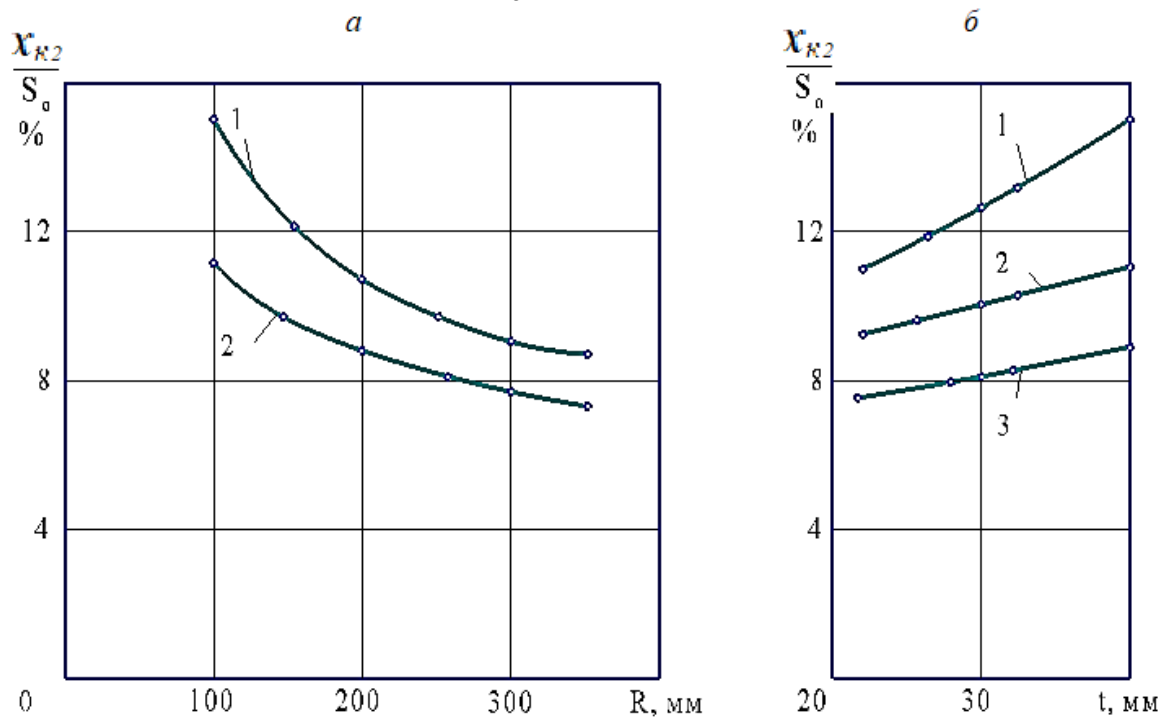


Рис. 7.22. Изменение экстремальной относительной амплитуды качания пил во второй половине рабочего хода от радиуса кривошипа (а – при 1 – $t = 22$ мм; 2 – $t = 40$) и шага зубьев пилы (б – при 1 – $R = 100$ мм; 2 – $R = 200$ мм; 3 – $R = 350$ мм)

Таким образом, впервые определена математическая модель траектории движения пил, которая реально выполнима более простыми механизмами, выявлены факторы, от которых зависит математическая модель траектории движения пил, и дана количест-

венная оценка влияния факторов. Траектория движения пил (7.58) представляет собой замкнутую самопересекающуюся плавную кривую, у которой узловая точка смещена от середины хода пильной рамки в направлении от кривошипного вала в сторону верхней мертвой точки, а амплитуда качания в верхней половине хода пильной рамки меньше, чем амплитуда качания в нижней половине ее хода. Амплитуда качания пил и положение узловой точки зависят от посылки, шага зубьев, хода пильной рамки и уклона пил. Параметры траектории движения пил выбираются согласно приведенным формулам и методикам расчетов [15, 18].

7.4. Основные выводы

По данной главе можно сделать следующие основные выводы.

1. Для равномерной скорости перемещения заготовки определена теоретическая математическая модель перемещения рамных пил, при которой обеспечивается срезание слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода равномерной толщины, а во время холостого хода пил исключается скобление зубьями пилы дна пропила. Траектория перемещения пил во время рабочего хода представляет собой половину восьмерки, а во время холостого хода – ряд кривых, одна из которых описывает отвод пил от дна пропила в начале холостого хода, а другая – описывает перемещение пил в верхнее крайнее положение (ВМТ). Такой способ перемещения пил на практике выполнить невозможно. Но такой идеальный способ перемещения пил позволяет правильно понять синхронизацию двух движений на лесопильных рамах.

2. Для срезания слоя древесины во время рабочего хода пилы равномерной толщины необходимо пилы отводить от дна пропила как в начале, так и в конце рабочего хода. С целью исключения скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода пилы необходимо также отводить от дна пропила, а затем пилы необходимо далее, во время холостого хода, переместить в верхнее крайнее положение (ВМТ).

3. Определена идеальная математическая модель перемещения пил при равномерной скорости движения заготовки, которая представляет собой во время рабочего хода траекторию в виде половины восьмерки, а во время холостого хода – в виде половины

каплевидной траектории. Такой способ перемещения пил на практике выполнить трудно, но в принципе возможно.

Таким образом, идеальная математическая модель перемещения пил при равномерной скорости перемещения заготовки во время рабочего хода существенно отличается от математической модели перемещения пил во время холостого хода.

4. Рассмотрены варианты определения упрощенной математической модели перемещения пил при равномерной скорости подачи заготовки. При этом были сформулированы новые требования, допускающие небольшую неравномерность толщины срезаемого слоя древесины зубьями пилы во время рабочего хода. Траектория перемещения пил во время рабочего хода была определена из условия равенства толщины срезаемого слоя древесины в начале и в середине рабочего хода пил, $S_{zt} = S_{zR}$. С учетом этого требования математическая модель перемещения пил представляет собой замкнутую самопересекающуюся кривую, у которой размах качания в нижней половине хода пил примерно в два раза больше, чем в верхней части хода пил, а узловая точка смещена от середины хода пил в направлении ВМТ.

5. В упрощенной математической модели перемещения пил величина смещения узловой точки от середины хода пил зависит от хода пильной рамки и шага зубьев пилы и колеблется в пределах 0,1–0,2 от хода пил.

6. В упрощенной математической модели перемещения пил амплитуда качания пильной рамки в нижней половине хода пил также зависит от шага зубьев и хода пильной рамки и составляет 0,08–0,12 от величины посылки.

7. Таким образом, впервые автором данной работы была получена упрощенная математическая модель перемещения рамных пил, при которой исключается скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода, но допускается незначительная неравномерность толщины срезаемого слоя древесины во время рабочего хода. Такой вариант перемещения (качания) пил вполне выполним в промышленных условиях.

8. АНАЛИЗ СИНХРОНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЙ РЕЗАНИЯ И ПОДАЧИ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИЗМЕНЕНИИ СПОСОБОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПИЛ И ЗАГОТОВКИ

8.1. Движение пильной рамки по замкнутой самопересекающейся кривой с двумя осями симметрии

Рассмотрим вариант, когда согласование работы двух механизмов осуществляется одновременно путем использования механизма подачи с переменной скоростью и применения механизма резания с качанием пильной рамки. В этом случае движение заготовки можно описать следующим выражением:

$$x_6 = c \frac{S_0}{4} (1 - \cos\alpha) + (1 - c) \frac{S_0}{2\pi} \alpha, \quad (8.1)$$

где c – коэффициент, учитывающий величину перемещения заготовки за счет переменной скорости подачи.

В этом выражении первое слагаемое учитывает перемещение заготовки за счет переменной скорости, а второе – за счет равномерной скорости.

Скорость движения заготовки определится по формуле:

$$x'_6 = \frac{S_0}{4} \omega \left[c \sin\alpha + (1 - c) \frac{2}{\pi} \right]. \quad (8.2)$$

Ускорение движения заготовки определится выражением:

$$x''_6 = \frac{S_0}{4} c \omega^2 \cos\alpha. \quad (8.3)$$

Анализ выражения (8.3) показывает, что ускорение заготовки достигает максимальных значений при углах поворота кривошипа равных нулю и π радиан. Величина максимального ускорения заготовки определится по выражению:

$$x''_6 = \frac{S_0}{4} c \omega^2. \quad (8.4)$$

Согласованность движений резания (инструмента) и подачи (заготовки) зависит от математической модели движения заготовки,

а также от математической модели перемещения пил. В соответствии с классификацией механизмов качания рассматриваем следующие математические модели движения пил по самопересекающейся замкнутой кривой:

- с двумя осями симметрии;
- с одной вертикальной осью симметрии;
- за рабочий ход по кривой с двумя осями симметрии, а за холостой ход – по каплевидной траектории.

Рассмотрим вариант движения пил по самопересекающейся замкнутой кривой с двумя осями симметрии.

Движение пил в этом случае определится по формуле:

$$x_k = \frac{S_o}{4} m(1 - \cos\alpha) - \frac{2}{\pi} \alpha. \quad (8.5)$$

Движение зуба пилы в пропиле во время рабочего хода определится по формуле (отсчет от ВМТ):

$$x_1 = \frac{S_o}{4} \left[(m + c) \frac{y}{R} - \frac{2}{\pi} (m + c - 1) \arccos \frac{R - y}{R} \right]. \quad (8.6)$$

Движение соседнего нижнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода определится следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x_k = \frac{S_o}{4} m \left(1 - \cos\alpha - \frac{2}{\pi} \alpha \right), \\ y = R(1 - \cos\alpha) + t, \\ x_6 = \frac{S_o}{4} [c(1 - \cos\alpha) + (1 - c)] \frac{2}{\pi} \alpha. \end{cases} \quad (8.7)$$

Решая систему уравнений (8.7), получим:

$$x_2 = \frac{S_o}{4} \left[(m + c) \frac{y - t}{R} - \frac{2}{\pi} (m + c - 1) \arccos \frac{R + t - y}{R} \right] - \frac{S_o t}{4R}. \quad (8.8)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_o}{4} \left[(m + c + 1) \frac{t}{R} - \frac{2}{\pi} (m + c - 1) \left(\arccos \frac{R - y}{R} - \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) \right]. \quad (8.9)$$

Для исключения скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода необходимо, чтобы в конце рабочего хода подача на зуб была равна половине среднего значения подачи на зуб за рабочий ход.

Подставляя в формулу (8.9) $y = 2R$ и приравнивая ее к равенству $S_0 \cdot t/4R$, получим:

$$m = \frac{c \frac{t}{R} + \frac{2}{\pi} (1 - c) \arccos \frac{R-t}{R}}{\frac{2}{\pi} \arccos \frac{R-t}{R} - \frac{t}{R}}. \quad (8.10)$$

Расчеты по формуле (8.10) показывают, что с увеличением коэффициента c значение коэффициента m уменьшается по прямой линии (рис. 8.1). При определенном значении c величина коэффициента m становится равной нулю.

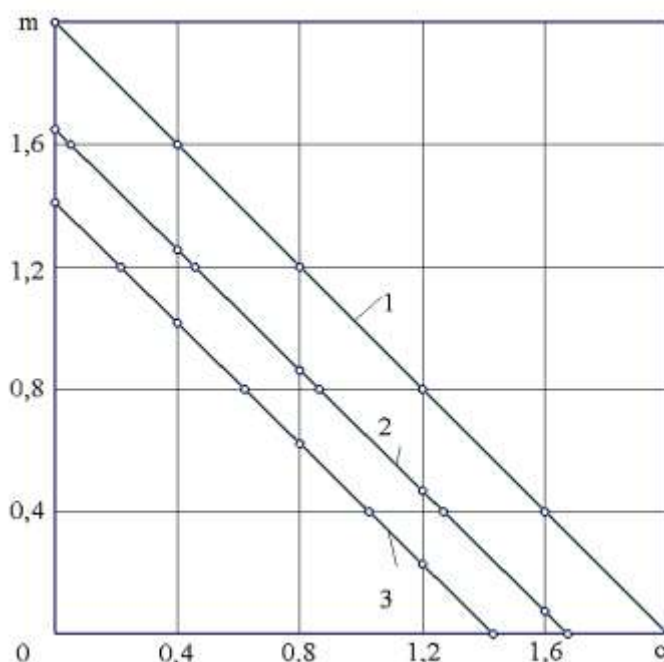


Рис. 8.1. Взаимосвязь коэффициентов m и c для различных радиусов кривошипа и шагов зубьев пил: 1 – $R = 100$ мм, $t = 22$ мм; 2 – $R = 200$ мм, $t = 26$ мм; 3 – $R = 350$ мм, $t = 26$ мм

Это значит, что качание пил производить не следует, а согласование работы двух механизмов резания и подачи происходит только за счет переменной скорости подачи.

Величину коэффициента c , при котором значение $m = 0$, можно определить по формуле:

$$c = \frac{\frac{2}{\pi} \arccos \frac{R-t}{R}}{\frac{2}{\pi} \arccos \frac{R-t}{R} - \frac{t}{R}} \quad (8.11)$$

Согласно формуле (8.11), значение коэффициента c с увеличением радиуса кривошипа уменьшается (рис. 8.2а), а с увеличением шага зубьев пилы – возрастает (рис. 8.2б). Величина этого коэффициента для современных лесопильных рам должна находиться в пределах 1,4–2,1.

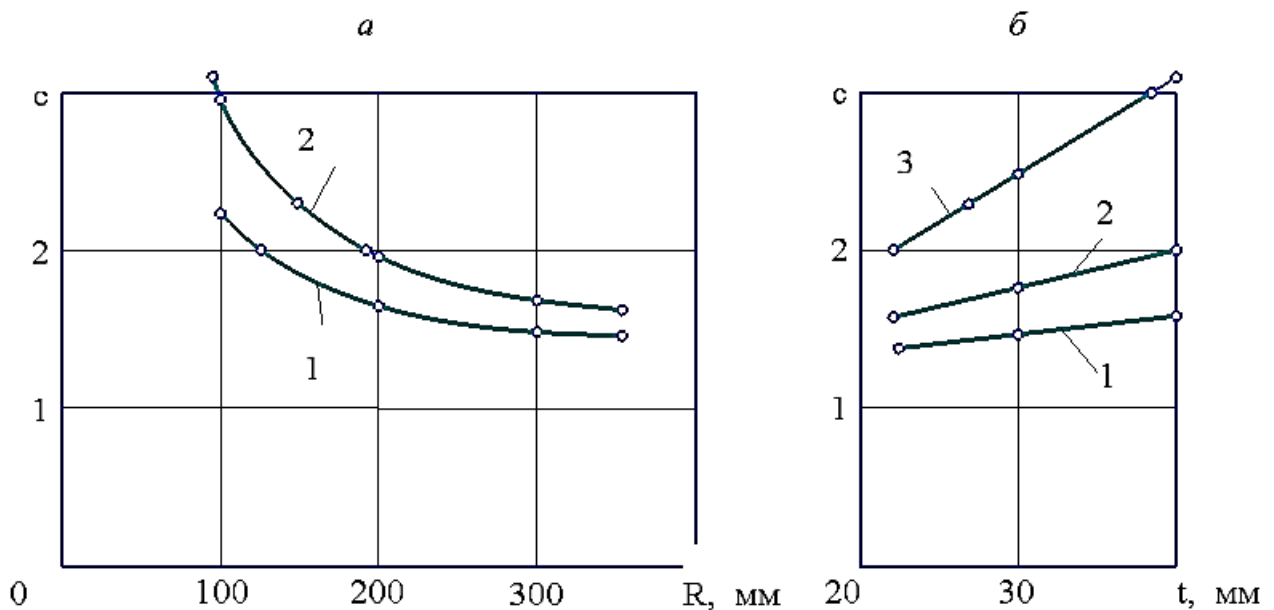


Рис. 8.2. Зависимость коэффициента c от радиуса кривошипа (а – при 1 – $t = 26$ мм; 2 – $t = 40$) и от шага зубьев пилы (б – при 1 – $R = 350$ мм; 2 – $R = 200$ мм; 3 – $R = 100$ мм)

Скорость и ускорение заготовки определяются по формулам:

$$x'_g = \frac{S_0}{4} \omega \left[c \sin \arccos \frac{R-y}{R} + (1-c) \frac{2}{\pi} \right], \quad (8.12)$$

$$x''_g = \frac{S_0}{4} c \omega^2 \cos \frac{R-y}{R}. \quad (8.13)$$

Скорость и ускорение пильной рамки определяются по формулам:

$$x'_k = \frac{S_0}{4} \omega t \left[c \sin \arccos \frac{R-y}{R} + (1-c) \frac{2}{\pi} \right], \quad (8.14)$$

$$x_k'' = \frac{S_0}{4} m \omega^2 \frac{R - y}{R}. \quad (8.15)$$

Характер изменения перемещений, скоростей и ускорений заготовки за оборот коленчатого вала в зависимости от вертикального перемещения пильной рамки для различных значений коэффициента c представлен на рис. 8.3. Анализ формул (8.13) и (8.15) показывает, что с увеличением коэффициента c ускорение пил уменьшается по прямой линии, а ускорение заготовки возрастает по прямой линии (см. рис. 8.4).

С увеличением коэффициента c неравномерность движения заготовки возрастает, и вместе с этим значение коэффициента m уменьшается. Это условие связано со следующим математическим выражением:

$$m = m_0 - c, \quad (8.16)$$

где m_0 – значение коэффициента m при $c = 0$.

Из выражения (8.16) видно, что при $m = 0$ $c = m_0$.

В этом случае ($c = m_0$) качание пил производить не следует, а движение заготовки происходит с возвратным перемещением (см. рис. 8.4). Будет наблюдаться момент, когда скорость движения заготовки меняет свой знак и, следовательно, принимает нулевое значение. Величину угла поворота кривошипа, при котором скорость движения заготовки равна нулю, можно определить по выражению:

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{c} \right) \right]. \quad (8.17)$$

Расчеты по формуле (8.17) показывают, что величина этого угла с увеличением радиуса кривошипа уменьшается (см. рис. 8.5а), а с увеличением шага зубьев пилы – возрастает (см. рис. 8.5б), причем величина этого угла примерно равна половине угла поворота кривошипа, при котором наблюдается максимальная подача на зуб в начале рабочего хода, когда движение пил осуществляется по прямой линии, а движение заготовки – с равномерной скоростью. Иными словами, время возвратного перемещения заготовки в сумме за рабочий и холостой ходы равно времени перемещения пильной рамки от верхней мертвой точки до величины равной шагу зубьев пилы.

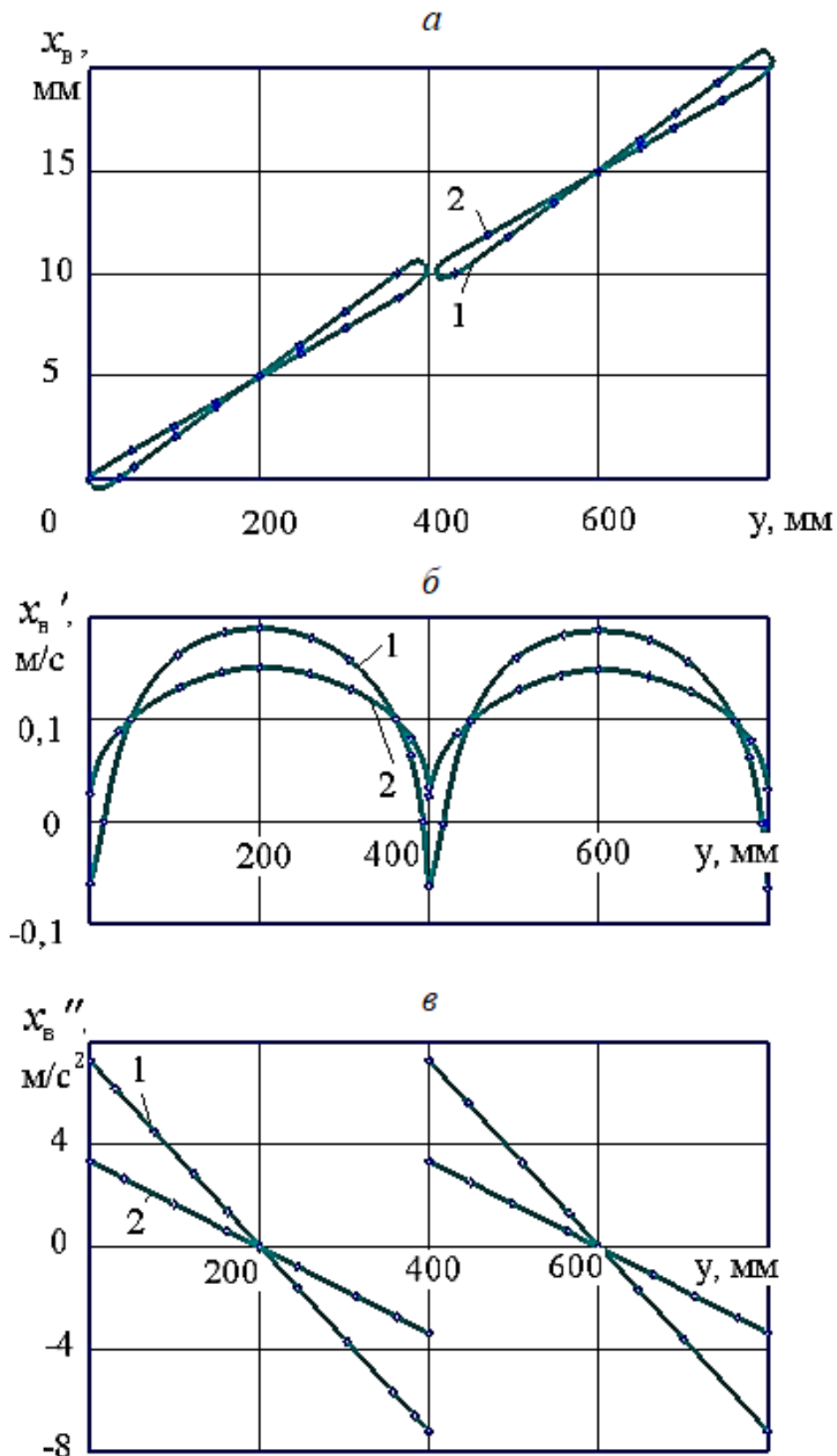


Рис. 8.3. Перемещение (*a*), скорость (*б*) и ускорение (*в*) заготовки в зависимости от вертикального перемещения пил при:

$$1 - c = m_0 = 1,656; 2 - c = m_0/2 = 0,828$$

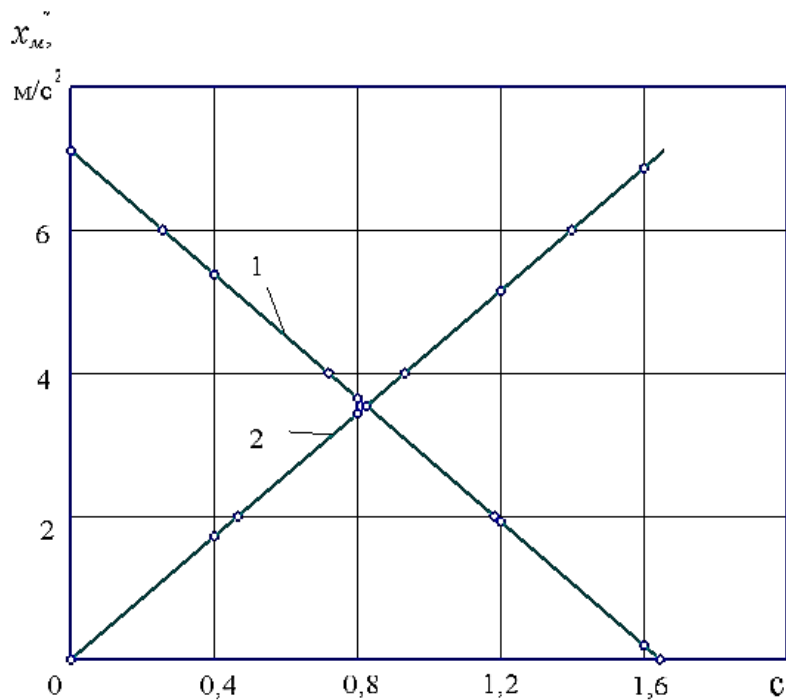


Рис. 8.4. Влияние коэффициента c на максимальные ускорения пильной рамки (1) и максимальные ускорения заготовки (2)

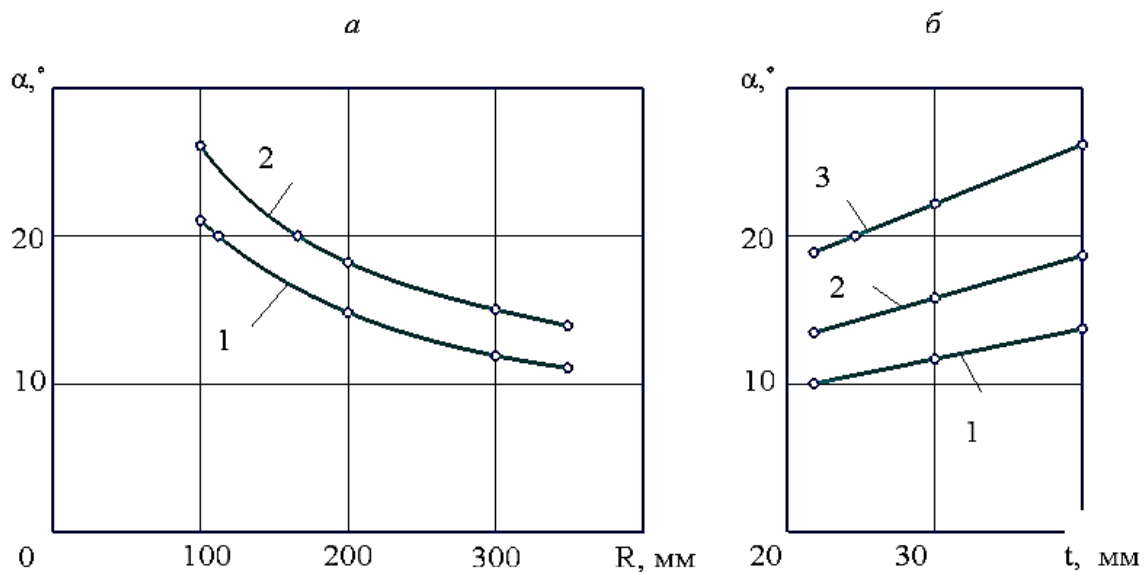


Рис. 8.5. Зависимость угла поворота кривошипа, при котором скорость движения заготовки равна нулю, от радиуса кривошипа (а) (при 1 – $t = 26$ мм; 2 – $t = 40$) и от шага зубьев пилы (б) (при 1 – $R = 350$ мм; 2 – $R = 200$ мм; 3 – $R = 100$ мм)

Характер изменения перемещений, скоростей и ускорений пильной рамки в зависимости от перемещения пильной рамки представлен на рис. 8.6. С увеличением коэффициента c размах качания пил уменьшается. Уменьшаются также максимальные значения скоростей и ускорений пил. При $c = 1$ (см. рис. 8.6) необходимо

производить качание пил, тогда как ранее исследователями полагалось, что если движение заготовки производить по математической модели, в которой $c = 1$, то даже при отсутствии качания пил происходит согласование движений резания и подачи. Это утверждение оказывается ошибочным.

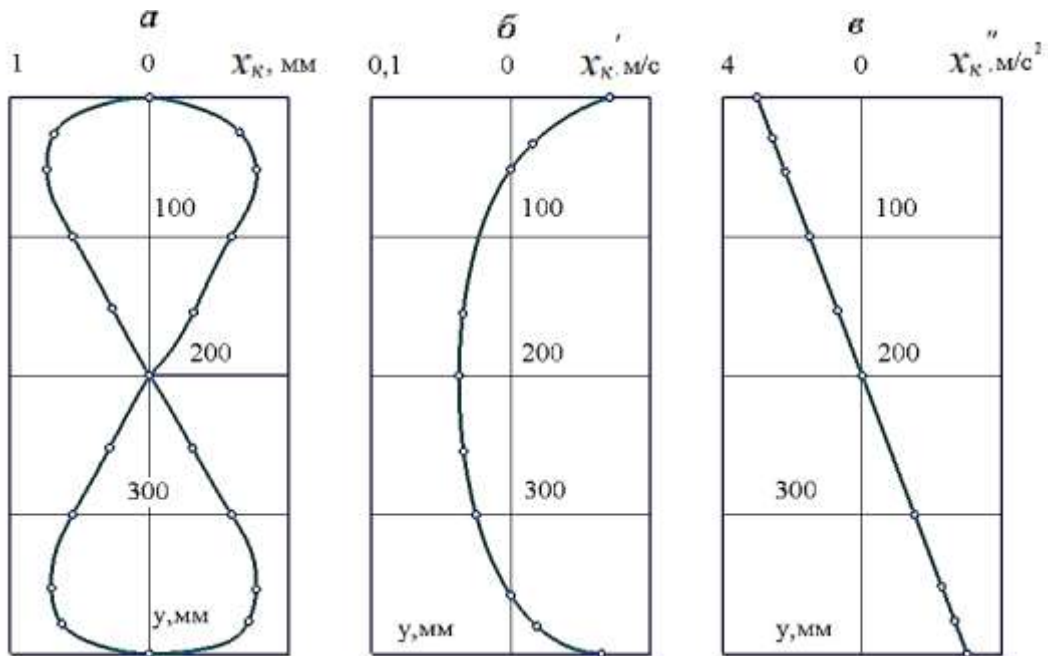


Рис. 8.6. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) пильной рамки в горизонтальной плоскости в зависимости от ее вертикального перемещения при $c = 1$

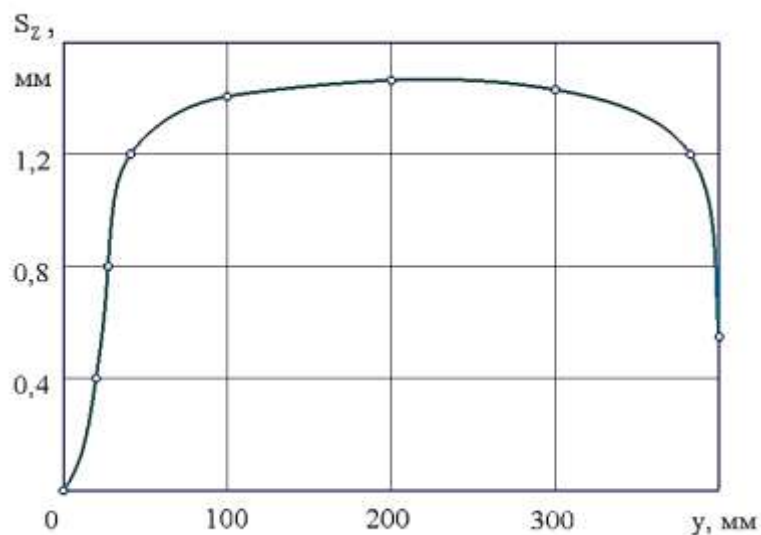


Рис. 8.7. Характер изменения подачи на зуб во время рабочего хода

При $c = 0,828$; $R = 200$ мм; $t = 26$ мм происходит совместное равновеликое согласование двух движений как за счет качания пил, так и за счет переменного движения бруса. Таким образом, с увели-

чением коэффициента c величина качания пил уменьшается, а неравномерность движения заготовки возрастает. При $c = m_0$ движение пил необходимо производить по прямой линии, а при $c = 0$ движение заготовки происходит с равномерной скоростью. Если $c = m_0$, согласование двух движений происходит только за счет переменного движения заготовки, а если $c = 0$, то согласование двух движений происходит только за счет качания пил. При этом перемещение, скорости и ускорения пил необходимо производить в два раза больше, чем при $c = 0,828$. Для этого варианта движения заготовки и пил подача на зуб будет изменяться по сложному закону (рис. 8.7). Примерно в середине рабочего хода подача на зуб достигает максимального значения, величина которого на 12% выше среднего значения подачи на зуб за рабочий ход. При $y = t$ и $y = 2R$ подача на зуб равна половине его среднего значения за ход. На участке движения пильной рамки, равном почти 90%, обеспечивается отклонение подачи на зуб от его среднего значения всего лишь на $\pm 12\%$. Такой характер изменения подачи на зуб вполне приемлем для практики, так как вносит не столь значительные изменения в качественные и силовые показатели процесса резания [17].

8.2. Движение пильной рамки по замкнутой самопересекающейся кривой с одной осью симметрии

В этом случае движение пильной рамки можно представить уравнением:

$$x_k = \frac{S_o}{4} \left[m(1 - \cos\alpha) \pm nsin\alpha - \frac{2m\alpha}{\pi} \right]. \quad (8.18)$$

Движение зуба пилы в пропиле во время рабочего хода определится по формуле (отсчет от ВМТ):

$$x_1 = \frac{S_o}{4} \left[(m + c) \frac{y}{R} + nsinarccos \frac{R - y}{R} + (1 - m - c) \frac{\pi}{2} arccos \frac{R - y}{R} \right]. \quad (8.19)$$

Движение соседнего нижнего зуба пилы в пропиле определится при решении такой системы уравнений:

$$\begin{cases} x_k = \frac{S_o}{4} \left[m(1 - \cos\alpha) + n\sin\alpha - \frac{2m\alpha}{\pi} \right], \\ y = R(1 - \cos\alpha) + t, \\ x_e = \frac{S_o}{4} c(1 - \cos\alpha) + (1 - c) \frac{S_o}{2\pi} \alpha - t\sin\varphi. \end{cases} \quad (8.20)$$

Решая систему уравнений (8.20), получим:

$$\begin{aligned} x_2 = \frac{S_o}{4} \left[(m + c) \frac{y - t}{R} + n\operatorname{sinarccos} \frac{R + t - y}{R} + \right. \\ \left. + (1 - m - c) \frac{2}{\pi} \operatorname{arccos} \frac{R + t - y}{R} \right] - \frac{S_o t}{4R}. \end{aligned} \quad (8.21)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$\begin{aligned} S_z = \frac{S_o}{4} \left[(m + c) \frac{t}{R} + n \left(\operatorname{sinarccos} \frac{R - y}{R} - \operatorname{sinarccos} \frac{R + t - y}{R} \right) + \right. \\ \left. + \frac{2}{\pi} (1 - m - c) \left(\operatorname{arccos} \frac{R - y}{R} - \operatorname{arccos} \frac{R + t - y}{R} \right) \right] + \frac{S_o t}{4R}. \end{aligned} \quad (8.22)$$

При $y = R$ подача на зуб определится по формуле:

$$\begin{aligned} S_{zR} = \frac{S_o}{4} \left[(m + c + 1) \frac{t}{R} + n \left(1 - \operatorname{sinarccos} \frac{t}{R} \right) + \right. \\ \left. + \frac{2}{\pi} (1 - m - c) \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arccos} \frac{t}{R} \right) \right]. \end{aligned} \quad (8.23)$$

При $y = t$ подача на зуб определится по формуле:

$$S_{zt} = \frac{S_o}{4} \left[(m + c + 1) \frac{t}{R} + n\operatorname{sinarccos} \frac{R - t}{R} + \frac{2}{\pi} (1 - m - c) \operatorname{arccos} \frac{t}{R} \right] \quad (8.24)$$

Приравнивая формулы (8.23) и (8.24) между собой и сделав соответствующие преобразования, получим:

$$\frac{S_o}{4} \left[n \left(\operatorname{sinarccos} \frac{R - t}{R} - 1 + \operatorname{sinarccos} \frac{t}{R} \right) + \right.$$

$$+\frac{2}{\pi}(1-m-c)\left(\arccos\frac{R-t}{R}-\frac{\pi}{2}+\arccos\frac{t}{R}\right)\Big]=0. \quad (8.25)$$

В последнем уравнении два неизвестных: m и n , следовательно, для его решения необходимо получить еще одно уравнение. Второе уравнение получаем из условия отсутствия скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода. Движение зуба пилы в пропиле за холостой ход относительно распиливаемой заготовки имеет вид (отсчет от НМТ):

$$x_x = \frac{S_o}{4} \left[\frac{y(m+c)}{R} - n \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} - 2 \frac{m+c-1}{\pi} \arccos \frac{R-y}{R} \right]. \quad (8.26)$$

Движение зуба пилы в пропиле за рабочий ход относительно распиливаемого материала имеет вид (отсчет от НМТ):

$$x_p = \frac{S_o}{4} \left[n \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} - \frac{m+c}{R} y + \frac{2}{\pi} (m+c-1) \arccos \frac{R-y}{R} \right]. \quad (8.27)$$

Тогда глубина вдавливания зубьев пилы в древесину во время холостого хода определится по формуле:

$$\delta = \frac{S_o}{2} \left[n \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} - \frac{m+c}{R} y + \frac{2}{\pi} (m+c-1) \arccos \frac{R-y}{R} \right]. \quad (8.28)$$

Принимая условие отсутствия скобления зубьями пилы дна пропила и зная, что максимальная глубина вдавливания зубьев пилы в древесину наблюдается при $y = t$, можно из формулы (8.28) выразить коэффициент n :

$$n = \frac{\frac{m+c}{R} t + \frac{R}{\pi} (1-m-c) \arccos \frac{R-t}{R}}{\operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R}}. \quad (8.29)$$

Выражение (8.29) можно представить и в таком виде:

$$n = \frac{(c+m)t - \frac{R^2}{\pi} (m+c-1) \arccos \frac{R-t}{R}}{\sqrt{2Rt - t^2}}. \quad (8.30)$$

Подставим выражение (8.29) в уравнение (8.25). После преобразований получим:

$$m = \frac{\frac{2}{\pi}(1-c)\left(2AB + A\mathcal{D} - A + BE - \frac{\pi}{2}B\right) + \frac{ct}{R}(B + \mathcal{D} - 1)}{\frac{2}{\pi}\left(2AB + A\mathcal{D} - A + BE - \frac{\pi}{2}B\right) - \frac{t}{R}(B + \mathcal{D} - 1)}, \quad (8.31)$$

где $A = \arccos \frac{R-t}{R}$; $B = \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R}$;

$$E = \arccos \frac{t}{R}; \quad \mathcal{D} = \operatorname{sinarccos} \frac{t}{R}.$$

Расчеты по формулам (8.29) и (8.31) показали, что с увеличением коэффициента c значение коэффициента m уменьшается прямо пропорционально, при этом значение коэффициента n остается величиной постоянной (см. рис. 8.8). Этот вывод справедлив и для разных параметров лесопильных рам (см. рис. 8.9), хотя при этом значения коэффициентов m и n будут совершенно другой величины. Следовательно, коэффициенты m и c связаны между собой равенством (8.16).

Скорости поперечного перемещения пил и движения заготовки в зависимости от угла поворота коленчатого вала лесопильной рамы определяются по формулам:

$$x'_k = \frac{S_o}{4} \omega \left(m \sin \alpha \pm n \cos \alpha - \frac{2}{\pi} m \right), \quad (8.32)$$

$$x'_g = \frac{S_o}{4} \omega \left[c \sin \alpha + (1-c) \frac{2}{\pi} \right]. \quad (8.33)$$

Скорости поперечного перемещения пил и движения заготовки в зависимости от вертикального перемещения пильной рамки определяются по формулам:

$$x'_k = \frac{S_o}{4} \omega \left(m \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} \pm n \frac{R-y}{R} - \frac{2}{\pi} m \right), \quad (8.34)$$

$$x'_g = \frac{S_o}{4} \omega \left[c \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} + (1-c) \frac{2}{\pi} \right]. \quad (8.35)$$

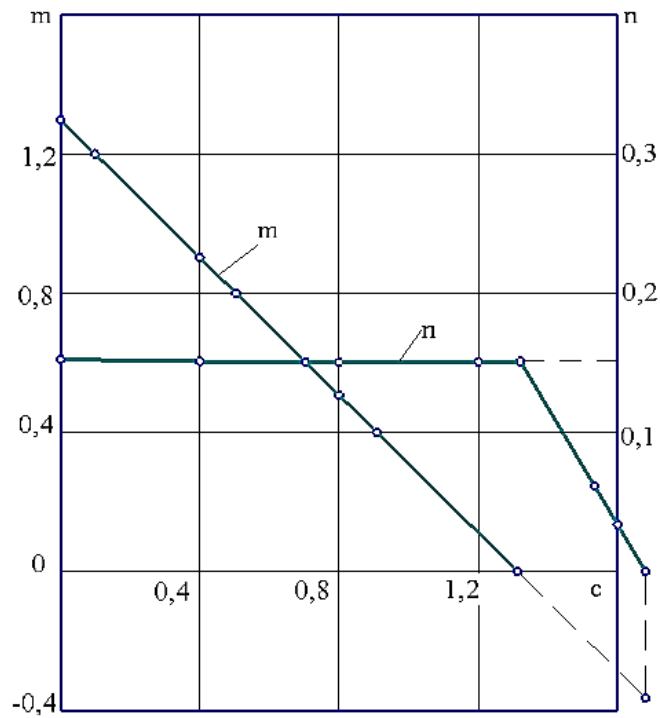


Рис. 8.8. Взаимосвязь коэффициентов m , n и c при $R = 200$ мм и $t = 26$ мм

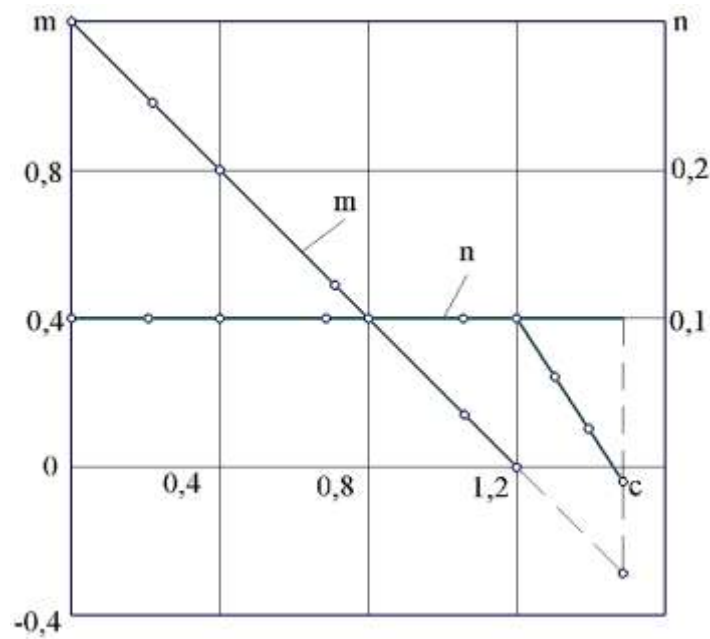


Рис. 8.9. Взаимосвязь коэффициентов m , n и c при $R = 350$ мм и $t = 26$ мм

Ускорения при поперечном движении пил и переменной скорости движения заготовки в зависимости от угла поворота коленчатого вала определяются по выражениям:

$$x''_k = \frac{S_0}{4} \omega^2 (m \cos \alpha \mp n \sin \alpha), \quad (8.36)$$

$$x''_e = \frac{S_0}{4} \omega^2 c \cos \alpha. \quad (8.37)$$

Ускорения при поперечном качании пил и переменной скорости движения заготовки в зависимости от вертикального перемещения пильной рамки определяются по выражениям:

$$x''_k = \frac{S_0}{4} \omega^2 \left(m \frac{R-y}{R} \mp n \sin \arccos \frac{R-y}{R} \right), \quad (8.38)$$

$$x''_e = \frac{S_0}{4} \omega^2 c \frac{R-y}{R}. \quad (8.39)$$

Расчеты по формулам и анализ расчетных данных позволяют отметить, что при перемещении заготовки с равномерной скоростью ($c = 0$) согласование работы двух механизмов производится за счет механизма резания. В этом случае перемещение, скорость и ускорение пил в зависимости от вертикального перемещения пильной рамки имеют вид, представленный на рис. 8.10. Действительно, траектория движения пил в горизонтальной плоскости представляет собой самопересекающуюся замкнутую кривую, у которой узловая точка смещена от середины хода пильной рамки в сторону верхней мертвой точки на величину равную примерно 0,15 от величины хода пильной рамки. Следует иметь в виду, что такой вывод о величине смещения узловой точки справедлив только для данного типа лесопильных рам с ходом пильной рамки 400 мм. Для других типов лесопильных рам величина смещения узловой точки от середины хода пильной рамки будет другой. Скорости и ускорения за рабочий и холостой ходы по величине равны. С увеличением параметра c размах качания пильной рамки уменьшается, и при $c = 1,29$, когда коэффициент m становится равным нулю, качание пильной рамки определится по выражению:

$$x_k = \pm \frac{S_0}{4} n \sin \alpha. \quad (8.40)$$

Скорость и ускорения пильной рамки в этом случае определяются по выражениям:

$$x'_k = \pm \frac{S_0}{4} \omega n \cos \alpha, \quad (8.41)$$

$$x''_k = \mp \frac{S_0}{4} \omega^2 n \sin \alpha. \quad (8.42)$$

Таким образом, траектория движения пил при $c = m_0 = 1,29$ будет представлять собой замкнутую не самопересекающуюся кривую, а кривую, имеющую вид эллипса (см. рис. 8.11). В этом случае вместо отвода зубьев пилы от древесины в начале рабочего хода, как это имеет место при меньших значениях c , происходит надвигание зубьев пил на распиливаемый материал, и таким путем поддерживается условие равенства величины подачи на зуб в начале (S_{zt}) и в середине (S_{zR}) рабочего хода. Ускорение пил в мертвых точках равно нулю и достигает максимального значения в середине хода.

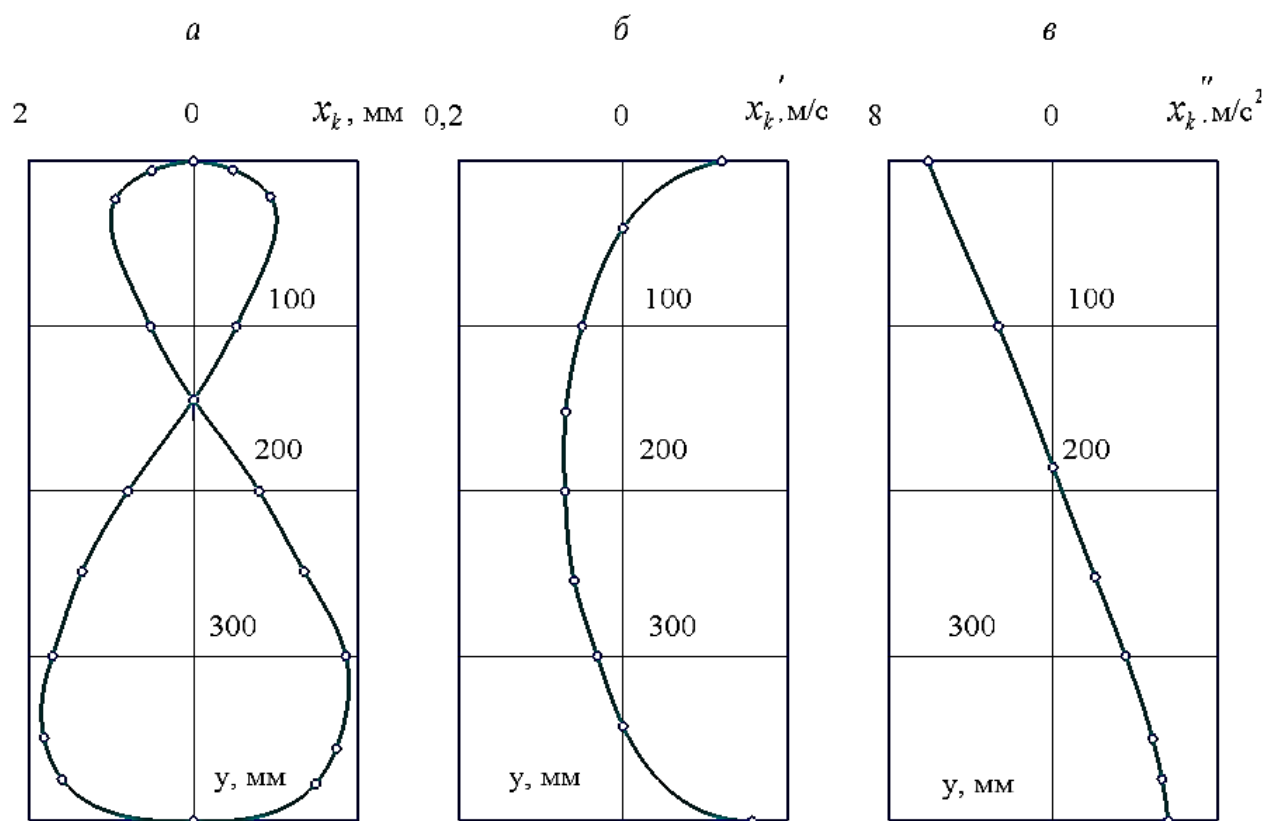


Рис. 8.10. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) пил в горизонтальном направлении, когда $c = 0$, в зависимости от их вертикального перемещения

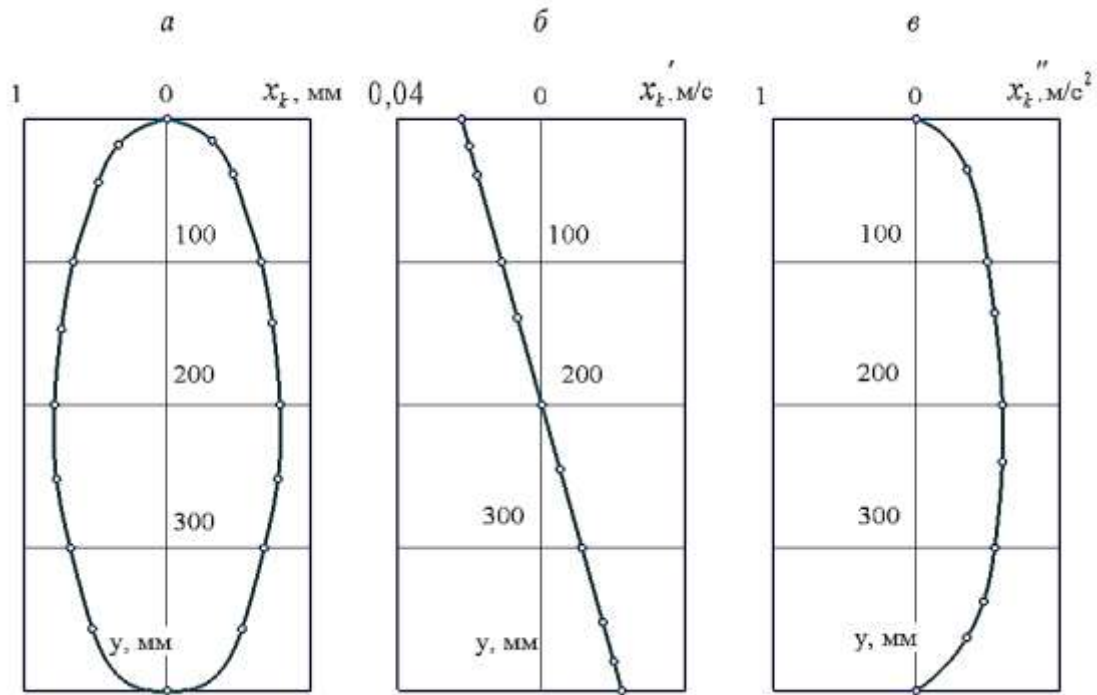


Рис. 8.11. Перемещение (*a*), скорость (*б*) и ускорение (*в*) пил в горизонтальном направлении, когда $c = 1,29$, в зависимости от их вертикального перемещения

При дальнейшем увеличении коэффициента c коэффициент m принимает отрицательное значение. Желательно, чтобы при некотором отрицательном значении коэффициента m , при условии $n = const$, траектория движения пильной рамки представляла собой прямую линию. Для определения значения коэффициента m , при котором движение пильной рамки происходило бы прямолинейно, необходимо формулу (8.18) приравнять нулю. Сделав преобразования, получим:

$$m = \pm \frac{n \sin \alpha}{1 - \cos \alpha - \frac{2}{\pi} \alpha}. \quad (8.43)$$

Анализ последней формулы показывает, что при изменении угла поворота кривошипа и, следовательно, перемещения пил по вертикали значение коэффициента m изменяется от нуля до бесконечности. Следовательно, в этом случае при $n = const$ невозможно получить траекторию движения пильной рамки в виде прямой линии. Если даже значение параметра c принять равным m_0 , в случае, когда движение пильной рамки задавалось уравнением с двумя осями симметрии (продольное и поперечное), то тогда значение коэф-

коэффициента m будет равно $-0,366$ и траектория движения пил будет представлять повернутую на 180° каплевидную кривую (см. рис. 8.12). В этом случае ускорения в верхних мертвых точках вновь возрастают по сравнению с вариантом, когда $c = 1,29$. Таким образом, анализ взаимосвязи трех коэффициентов показывает, что при изменении параметра c коэффициент n остается величиной постоянной, а коэффициент m уменьшается и при условиях $c > m_0$ коэффициент m принимает отрицательное значение. При условии $c > m_0$ значение коэффициента n также сохраняет прежнюю величину, что отражено на рис. 8.8 и 8.9 пунктирными линиями. При отрицательных значениях коэффициента m невозможно получить прямолинейную траекторию движения пил.

Для обеспечения прямолинейного перемещения пил необходимо, чтобы оба коэффициента m и n одновременно принимали нулевое значение. С этой целью рассмотрим зависимость $n = f(c)$, когда $c > m_0$ и при этом значение коэффициента m равно нулю.

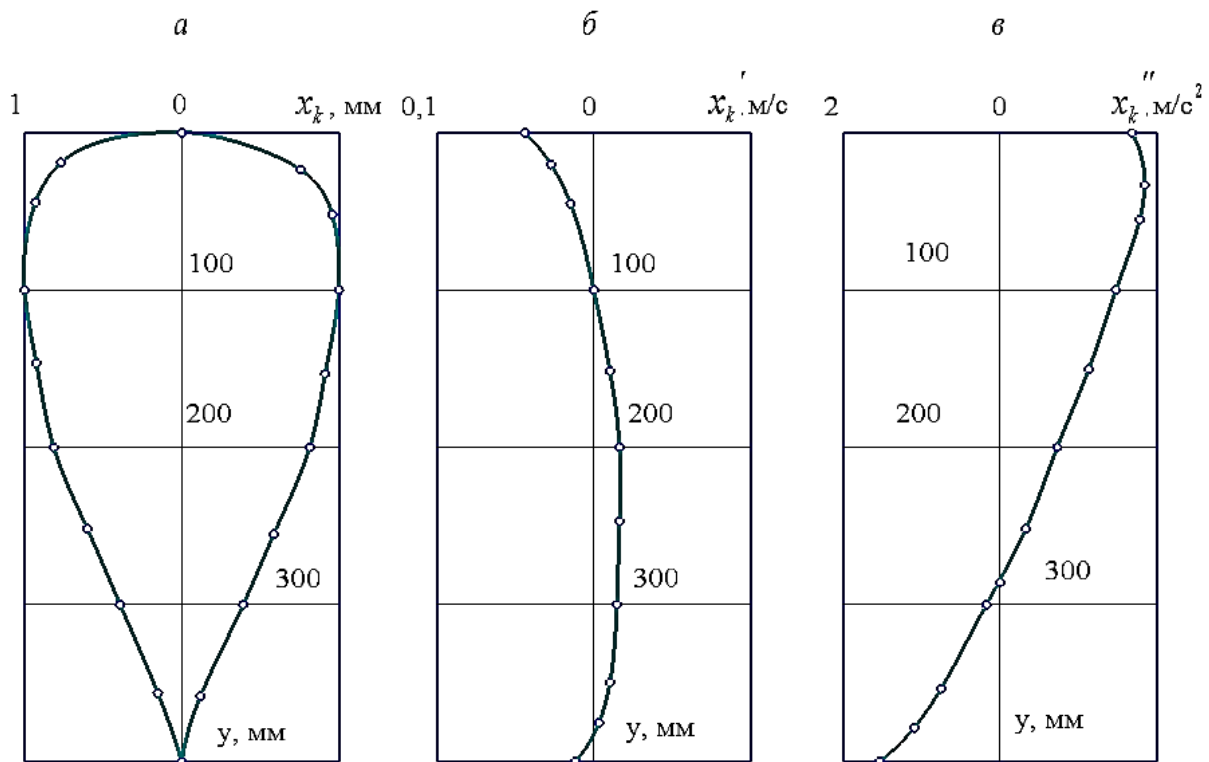


Рис. 8.12. Перемещение (*a*), скорость (*б*) и ускорение (*в*) поперечного движения пил в зависимости от их вертикального перемещения при $c = 1,656$

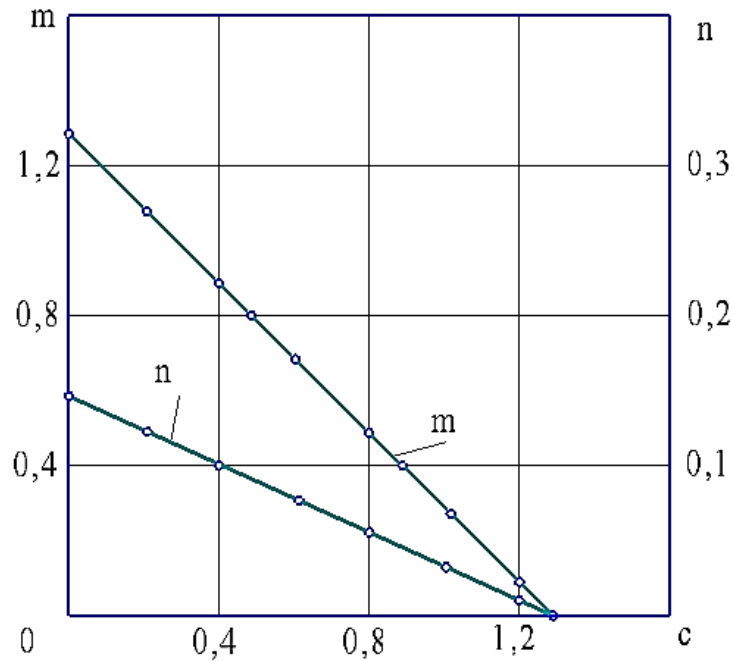


Рис. 8.13. Взаимосвязь коэффициентов m , n и c при радиусе кривошипа равном 200 мм и шаге зубьев 26 мм

Подставив в формулу (8.29) $m = 0$, получим:

$$n = \frac{\frac{ct}{R} - 2(c-1)\arccos[(R-t)/R]/\pi}{\sin\arccos[(R-t)/R]} \quad (8.44)$$

Анализ формулы (8.44) показывает, что при дальнейшем увеличении c значение коэффициента n уменьшается по прямой линии и при определенном значении c коэффициент n принимает нулевое значение (см. рис. 8.8 и 8.9). Величину c , при которой m и n равны нулю, можно определить по формуле:

$$c = \frac{\arccos[(R-t)/R]}{\arccos\left[\frac{R-t}{R}\right] - \pi t/2R} \quad (8.45)$$

В расчетах лучше пользоваться вторым вариантом, когда при увеличении параметра c вначале до значения равного m , величину коэффициента n принимать постоянной, а затем, принимая $m = 0$, значение коэффициента n определять по формуле (8.44), согласно которой значение этого коэффициента уменьшается. Тогда возникает условие, когда оба коэффициента одновременно принимают нулевое значение и движение пильной рамки происходит по прямой линии.

Чтобы значение коэффициента m не было отрицательным при $x_k = 0$, а коэффициент n также уменьшался при увеличении параметра c , рассмотрим вариант задания функции качания пильной рамки и движение заготовки таким образом, чтобы при определенных значениях c траектория движения пильной рамки представляла бы прямую линию, т. е. одновременно должно выполняться условие $m = 0$ и $n = 0$ при одном значении параметра c . Это условие выполнимо при следующем уравнении траектории движения пильной рамки и заготовки:

$$x_k = \frac{S_0}{4} \left[m(1 - \cos\alpha) \pm n \cdot \sin\alpha - \frac{2}{\pi} m\alpha \right], \quad (8.46)$$

$$x_e = \frac{S_0}{4} c(1 - \cos\alpha) \pm \frac{S_0}{4} c \frac{n_0}{m_0} \sin\alpha + (1 - c) \frac{S_0}{2\pi} \alpha, \quad (8.47)$$

где n_0 – значение коэффициента n при $c = 0$;
 m_0 – значение коэффициента m при $c = 0$.

Тогда траектория движения верхнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода определится по формуле (отсчет от ВМТ):

$$x_1 = \frac{S_0}{4} (m + c) \frac{y}{R} + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \operatorname{sinarccos} \frac{R - y}{R} - \\ - (m + c - 1) \frac{2}{\pi} \operatorname{arccos} \frac{R - y}{R}. \quad (8.48)$$

Траектория нижнего соседнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода определится по формуле:

$$x_2 = \frac{S_0}{4} \left[(m + c) \frac{y - t}{R} + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \operatorname{sinarccos} \frac{R + t - y}{R} - \right. \\ \left. - \frac{2}{\pi} (m + c - 1) \operatorname{arccos} \frac{R + t - y}{R} \right] - \frac{S_0 t}{4R}. \quad (8.49)$$

Для определения значений коэффициентов m и n составляем формулу для определения глубины вдавливания зуба пилы в древесину в начале холостого хода. Для этого определяем траекторию движения зуба пилы во время холостого хода (отсчет от НМТ):

$$x_x = \frac{S_0}{4} \left[(m+c) \frac{y}{R} + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} - (m+c-1) \frac{2}{\pi} \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} \right]. \quad (8.50)$$

Траектория движения зуба пилы во время рабочего хода описывается уравнением (отсчет от НМТ):

$$x_p = \frac{S_0}{4} \left[(m+c) \frac{2R-y}{R} + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} - 2(m+c) + \frac{2}{\pi} (m+c-1) \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} \right]. \quad (8.51)$$

Тогда глубина вдавливания зуба пилы в древесину определится по формуле:

$$\delta = \frac{S_0}{4} \left[\left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} + \frac{2}{\pi} \cdot (m+c-1) \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} - (m+c)y/R \right]. \quad (8.52)$$

При $y = t$ глубина вдавливания становится максимальной величиной, и, принимая ее значение равным нулю, получим:

$$\left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R} + \frac{2}{\pi} (m+c-1) \operatorname{arccos} \frac{R-t}{R} - \frac{(m+c)t}{R} = 0. \quad (8.53)$$

Решая последнее уравнение, получим:

$$n = \frac{(m+c) \frac{t}{R} - \frac{2}{\pi} (m+c-1) \operatorname{arccos} \frac{R-t}{R} - c \frac{n_0}{m_0} \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R}}{\operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R}}. \quad (8.54)$$

Подача на зуб при $y = R$ будет равна:

$$S_{zR} = \frac{S_0}{4} \left[(m + c + 1) \frac{t}{R} + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \left(1 - \operatorname{sinarccos} \frac{t}{R} \right) - \right. \\ \left. - \frac{2}{\pi} (m + c - 1) \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{t}{R} \right) \right]. \quad (8.55)$$

Подача на зуб при $y = t$ будет равна:

$$S_{zt} = \frac{S_0}{4} \left[(m + c + 1) \frac{t}{R} + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \operatorname{sinarccos} \frac{R - t}{R} - \right. \\ \left. - \frac{2}{\pi} (m + c - 1) \arccos \frac{R - t}{R} \right]. \quad (8.56)$$

Приравняв эти две формулы между собой, получим:

$$\left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \left(\operatorname{sinarccos} \frac{R - t}{R} + \operatorname{sinarccos} \frac{t}{R} - 1 \right) - \\ - \frac{2}{\pi} (m + c - 1) \left(\arccos \frac{R - t}{R} + \arccos \frac{t}{R} - \frac{\pi}{2} \right) = 0. \quad (8.57)$$

Подставив выражение (8.54) в формулу (8.57) и сделав преобразования, получим:

$$m = \frac{\frac{2}{\pi} (1 - c) \left(2AB + A\mathcal{D} - A + CB - \frac{\pi}{2} B \right) + \frac{ct}{R} (B + \mathcal{D} - 1)}{\frac{2}{\pi} \left(2AB + A\mathcal{D} - A + CB - \frac{\pi}{2} B \right) - \frac{t}{R} (B + \mathcal{D} - 1)}. \quad (8.58)$$

где $A = \arccos \frac{R - t}{R}$; $B = \operatorname{sinarccos} \frac{R - t}{R}$;

$$C = \arccos \frac{t}{R}; \quad \mathcal{D} = \operatorname{sinarccos} \frac{t}{R}.$$

Формула (8.58) совпадает с формулой (8.31). Таким образом, при указанном выше изменении математической модели движения заготовки происходит изменение обоих коэффициентов m и n (см. рис. 8.13 и 8.14).

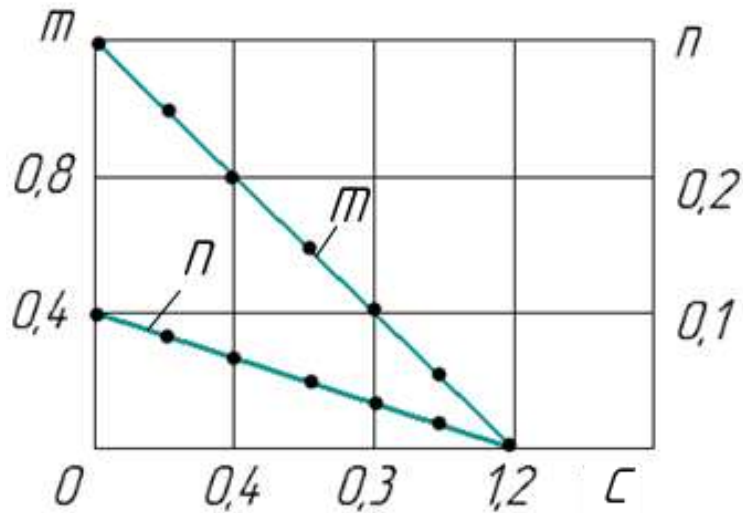


Рис. 8.14. Взаимосвязь коэффициентов m , n и c при радиусе кривошипа равном 350 мм и шаге зубьев 26 мм

В данном варианте оба коэффициента с увеличением c уменьшаются и принимают вместе нулевое значение при $c = m_0$. Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{4} \left[(m + c) \frac{t}{R} + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \cdot \left(\operatorname{sinarccos} \frac{R - y}{R} - \operatorname{sinarccos} \frac{R + t - y}{R} \right) - \frac{2}{\pi} (m + c - 1) \left(\operatorname{arccos} \frac{R - y}{R} - \operatorname{arccos} \frac{R + t - y}{R} \right) \right] + \frac{S_0 t}{4R}. \quad (8.59)$$

Скорости движения пил и заготовки определяются по формулам:
– за рабочий ход:

$$x'_k = \frac{S_0}{4} \omega \left(m \cdot \sin \alpha + n \cdot \cos \alpha - \frac{2}{\pi} m \right), \quad (8.60)$$

$$x'_e = v_s = \frac{S_0}{4} \omega \left[c \cdot \sin \alpha + c \frac{n_0}{m_0} \cos \alpha + (1 - c) \frac{2}{\pi} \right], \quad (8.61)$$

– за холостой ход:

$$x'_k = \frac{S_0}{4} \omega \left(m \cdot \sin \alpha - n \cdot \cos \alpha - \frac{2}{\pi} m \right), \quad (8.62)$$

$$x'_s = v_s = \frac{S_0}{4} \omega \left[c \cdot \sin \alpha - c \frac{n_0}{m_0} \cos \alpha + (1 - c) \frac{2}{\pi} \right]. \quad (8.63)$$

Ускорения движения пильной рамки и заготовки определяются по формулам:

– за рабочий ход:

$$x''_k = \frac{S_0}{4} \omega^2 (m \cdot \cos \alpha - n \cdot \sin \alpha), \quad (8.64)$$

$$x''_s = v'_s = \frac{S_0}{4} \omega^2 \left(c \cdot \cos \alpha - c \frac{n_0}{m_0} \cdot \sin \alpha \right), \quad (8.65)$$

– за холостой ход:

$$x''_k = \frac{S_0}{4} \omega^2 (m \cdot \cos \alpha + n \cdot \sin \alpha), \quad (8.66)$$

$$x''_s = v'_s = \frac{S_0}{4} \omega^2 \left(c \cdot \cos \alpha + c \frac{n_0}{m_0} \cdot \sin \alpha \right). \quad (8.67)$$

Анализ последних формул и расчеты по ним показывают, что при $c = 0$ качание пил происходит так же, как показано на рис. 8.10. С увеличением параметра c размах качания, а также скорости и ускорения пил уменьшаются, а характер их изменения сохраняется прежним (рис. 8.15).

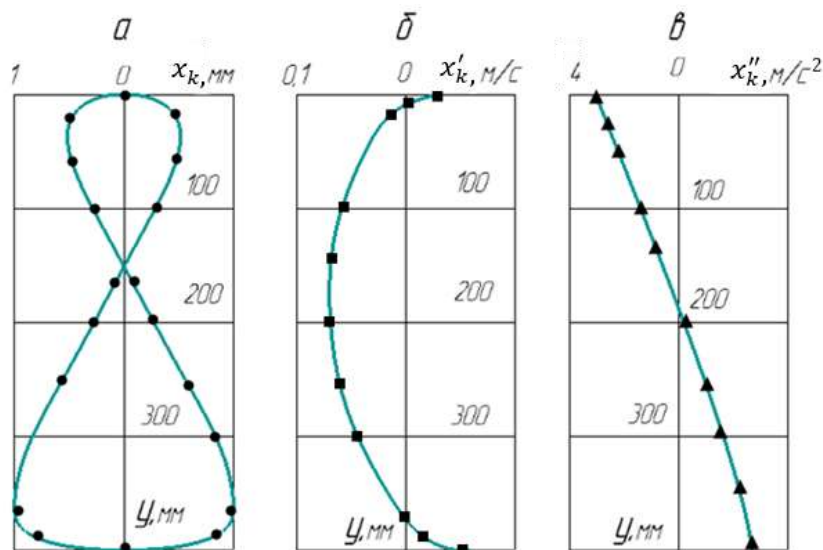


Рис. 8.15. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) поперечного движения (качания) пил в зависимости от продольного (вертикального) перемещения их при $c = 0,645$

Существенно изменяется характер движения заготовки. Скорость движения заготовки при $c = 1,29$ в начале рабочего хода несколько больше скорости движения заготовки в конце его (см. рис. 8.16). При $c = 1$ обычно скорости движения заготовки в конце и в начале ходов пил равны нулю. В данном же случае при $c = 1$ скорость движения заготовки в начале рабочего хода получается положительной величиной, а в конце этого хода – отрицательной. Во время холостого хода изменение скорости движения заготовки происходит наоборот: в начале хода скорость движения заготовки меньше, чем в конце его. Максимального значения скорость движения заготовки достигает не в середине рабочего и холостого ходов. Во время рабочего хода скорость движения заготовки принимает максимальное значение несколько раньше половины хода, а во время холостого хода, наоборот, несколько позже половины хода. Однако следует заметить, что характер изменения движения заготовки имеет ось симметрии в нижней мертвой точке. При $c > 1$ в нижнем положении пил наблюдается попятное (возвратное) движение заготовки. С увеличением параметра c ускорение движения заготовки прямо пропорционально возрастает, а ускорение пил при этом уменьшается.

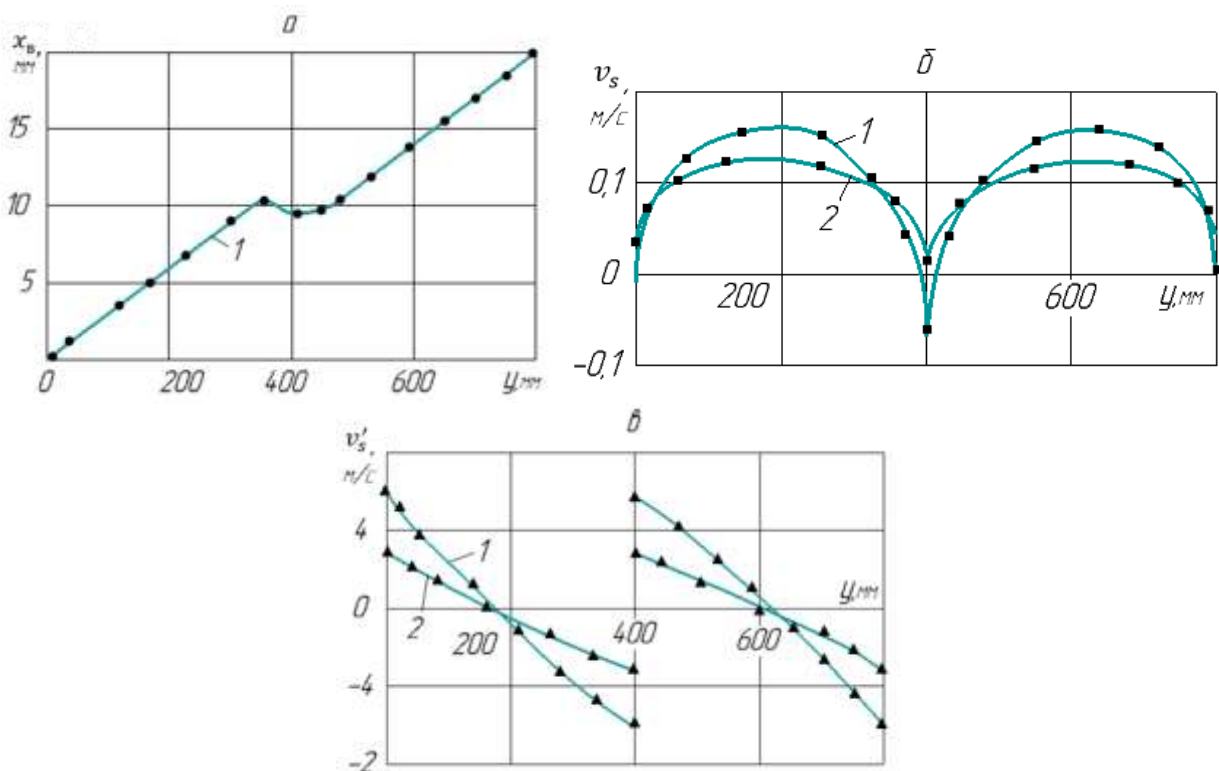


Рис. 8.16. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) движения заготовки в зависимости от перемещения пильной рамки по вертикали

при 1 – $c = m_0 = 1,29$; 2 – $c = \frac{m_0}{2} = 0,645$

8.3. Движение пильной рамки за рабочий ход по кривой с двумя осями симметрии, а за холостой ход – по каплевидной траектории

Для определения движения пильной рамки задаемся уравнением, описывающим траекторию движения зуба пилы в пропиле, которая складывается из движения заготовки и движения пил. Уравнение относительной траектории движения зуба пилы в пропиле составляется из условия получения траекторий движения пил в пропиле в виде прямых наклонных линий, в этом случае получается равномерная подача на зуб на протяжении всего рабочего хода. Это условие можно записать так:

$$x_c = x_k + x_e = \frac{S_0}{4}(1 - \cos\alpha). \quad (8.68)$$

Подставив в формулу (8.68) выражение (8.1) и сделав группировки, получим:

$$x_k = \frac{S_0}{4}(1 - c) \left(1 - \cos\alpha - \frac{2}{\pi}\alpha \right). \quad (8.69)$$

Выражение (8.69) описывает траекторию движения пил во время рабочего хода. Скорость перемещения пил определится по выражению:

$$x'_k = \frac{S_0}{4}\omega(1 - c) \left(\sin\alpha - \frac{2}{\pi} \right). \quad (8.70)$$

Ускорение пил определится по выражению:

$$x''_k = \frac{S_0}{4}\omega^2(1 - c)\cos\alpha. \quad (8.71)$$

Анализ уравнений (8.4) и (8.71) показывает, что с увеличением коэффициента c ускорение заготовки прямо пропорционально возрастает, а ускорение пил прямо пропорционально уменьшается.

Анализируя формулы (8.69), (8.70), (8.71), отмечаем, что при $c = 1$ перемещение, скорость и ускорение поперечного движения пил принимают нулевое значение, а заготовка будет перемещаться за рабочий ход, как при двухцикловой переменной подаче.

За холостой ход с учетом исключения скобления зубьями пилы дна пропила уравнение движения пил будет иметь вид:

$$x_k = \frac{S_0}{4}(1 - c) \left(1 - \cos\alpha - \frac{2}{\pi}\alpha \right) - \frac{S_0}{4}p \cdot \sin\alpha, \quad (8.72)$$

где p – параметр, определяющий скобление зубьями дна пропила.

Параметр p определим следующим образом. Траектория движения зуба пилы в пропиле за рабочий ход при условии, когда отсчет перемещений производится от НМТ, определится выражением:

$$x_p = -\frac{S_0 y}{4R}. \quad (8.73)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле за холостой ход определится путем суммирования движений заготовки и пил, т. е. уравнений (8.1) и (8.72). После преобразований получим:

$$x_x = \frac{S_0}{4} \left(\frac{y}{R} - p \frac{1}{R} \sqrt{2Ry - y^2} \right). \quad (8.74)$$

Тогда глубина вдавливания зуба во время холостого хода определится по формуле:

$$\delta = \frac{S_0}{4} \left(p \frac{1}{R} \sqrt{2Ry - y^2} - \frac{2y}{R} \right). \quad (8.75)$$

Максимальная глубина вдавливания зубьев пилы в древесину наблюдается при $y = t$. Введем указанную подстановку в формулу (8.75) и приравняем ее нулю. После преобразований получим:

$$p = \frac{2t}{\sqrt{2Rt - t^2}}. \quad (8.76)$$

Величина параметра p определяется по такой же формуле, полученной и рассмотренной в седьмом разделе, анализ которой выполнен и показан ранее.

Скорость движения пил во время холостого хода определится по формуле:

$$x'_k = \frac{S_0}{4} \omega (1 - c) \left(\sin\alpha - \frac{2}{\pi} \right) - \frac{S_0}{4} \omega p \cdot \cos\alpha. \quad (8.77)$$

Ускорение пил за холостой ход определится по формуле:

$$x_k'' = \frac{S_0}{4} \omega^2 (1 - c) \cos \alpha + \frac{S_0}{4} \omega^2 p \cdot \sin \alpha. \quad (8.78)$$

Для определения максимального ускорения пил при их качании возьмем первую производную от ускорения по времени и приравняем ее нулю. После выполнения этих операций, получим:

$$p \cdot \cos \alpha - (1 - c) \sin \alpha = 0. \quad (8.79)$$

Решая последнее равенство, получим:

$$\alpha = \arccos \frac{1 - c}{\sqrt{p^2 + (1 - c)^2}}, \quad (8.80)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{p}{\sqrt{p^2 + (1 - c)^2}}. \quad (8.81)$$

Тогда максимальное ускорение пильной рамки при ее поперечном качании определится по формуле:

$$x_{k \max}'' = \frac{S_0}{4} \omega^2 \frac{p^2 + (1 - c)^2}{\sqrt{p^2 + (1 - c)^2}}. \quad (8.82)$$

При $c = 1$ максимальное ускорение пильной рамки будет равно:

$$x_{k \max}'' = \frac{S_0}{4} \omega^2 p. \quad (8.83)$$

Перемещение, скорость и ускорение движения заготовки при различном значении коэффициента c показаны на рис. 8.17. При $c = 1$ скорость движения заготовки в момент нахождения пильной рамки в верхней и нижней мертвых точках принимает нулевое значение, а перемещение заготовки происходит прямо пропорционально перемещению пильной рамки. В этом случае качание пил во время рабочего хода осуществлять не следует, так как за счет переменной скорости движения заготовки обеспечивается срезание слоя древесины зубом пилы равномерной толщины. Однако во время холостого хода необходимо осуществлять качание пил (см. рис. 8.18), иначе будет наблюдаться скобление зубьями пилы дна пропила в

начале холостого хода. Перемещение, скорость и ускорение пил во время холостого хода при $c = 1$ определяются по формулам:

$$x_k = \frac{S_0}{4} p \cdot \sin \alpha, \quad (8.84)$$

$$x'_k = \frac{S_0}{4} \omega p \cdot \cos \alpha, \quad (8.85)$$

$$x''_k = \frac{S_0}{4} \omega^2 p \cdot \sin \alpha. \quad (8.86)$$

При величине параметра c менее единицы (см. рис. 8.17) скорость движения заготовки не достигает нулевого значения, ускорение заготовки становится меньше, но характер изменения ускорения за рабочий и холостой ходы сохраняется. В этом случае необходимо осуществлять качание пил не только за холостой, но и за рабочий ход (см. рис. 8.18). С уменьшением параметра c размах качания пил увеличивается, а скорость и ускорение заготовки уменьшаются.

При $c = 0$ движение заготовки происходит с равномерной скоростью. В этом случае скорости и ускорения движения пил достигают максимальных значений. Характер изменения скорости и ускорения пил с уменьшением параметра c изменяется, причем с увеличением коэффициента c максимальные ускорения заготовки возрастают по закону прямой линии (см. рис. 8.19), а максимальные ускорения пил за рабочий ход уменьшаются также по прямой линии и при $c = 1$ достигают нуля. Максимальные ускорения пил за холостой ход уменьшаются, а угол поворота кривошипа, при котором наблюдается максимальное ускорение пил за холостой ход, возрастает и при $c = 1$ достигает $\pi/2(90^\circ)$ (см. рис. 8.19).

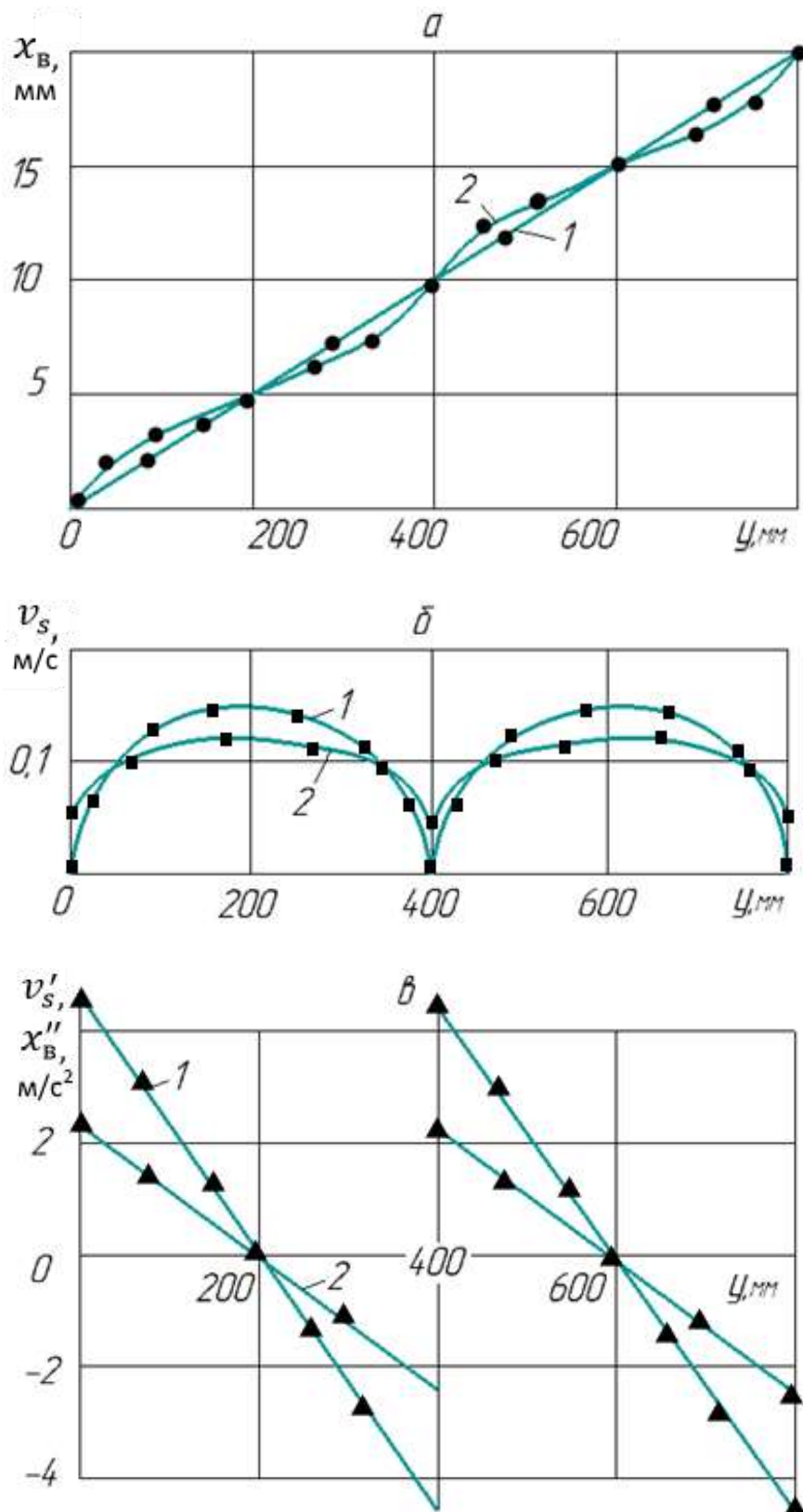


Рис. 8.17. Зависимость перемещения (*a*), скорости (*б*) и ускорения (*в*) движения заготовки от перемещения пил при различном значении параметра c : 1 – $c = 1,0$; 2 – $c = 0,5$

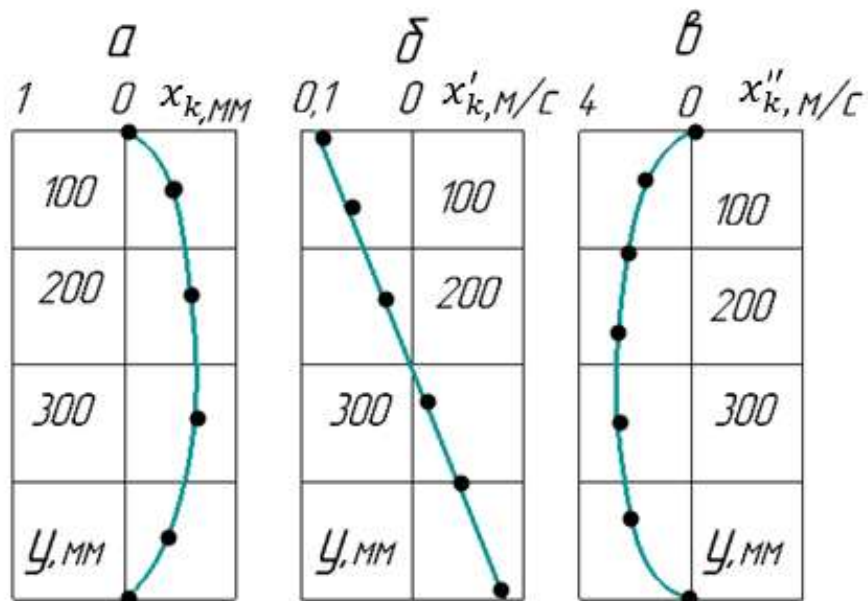


Рис. 8.18. Перемещения (*a*), скорость (*б*) и ускорение (*в*) пил во время холостого хода в зависимости от их вертикального перемещения при $c = 1$

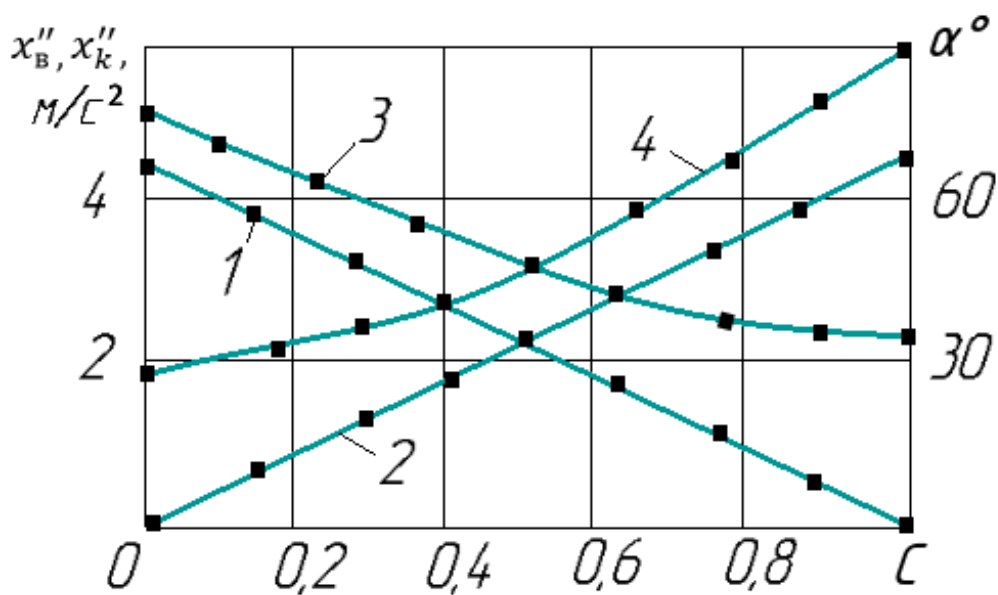


Рис. 8.19. Влияние параметра c :
 на 1 – максимальные ускорения пильной рамки за рабочий ход;
 2 – максимальные ускорения заготовки; 3 – максимальные ускорения пил за холостой ход; 4 – угол поворота кривошипа, при котором наблюдается максимальное ускорение пильной рамки за холостой ход

8.4. Движение заготовки по синусному закону с циклом, равным продолжительности хода пильной рамки

В технике широко распространены механизмы, которые позволяют получить синусный закон движения заготовки. Для согласованной работы механизмов резания и подачи необходимо, чтобы цикл работы механизма подачи был равен циклу одного хода пильной рамки или половине оборота коленчатого вала, иначе максимальные и минимальные значения скоростей движения заготовки не будут совпадать с максимальными и минимальными значениями скоростей движения пил и, следовательно, не будет обеспечиваться согласованная работа механизмов резания и подачи.

Движение заготовки по синусному закону с циклом, равным ходу пильной рамки, можно описать уравнением:

$$x_g = \frac{S_0}{4\pi} (2\alpha - \sin 2\alpha). \quad (8.87)$$

Скорость и ускорение движения заготовки определяются по выражениям:

$$v_s = \frac{S_0}{2\pi} \omega (1 - \cos 2\alpha), \quad (8.88)$$

$$v'_s = \frac{S_0}{\pi} \omega^2 \sin 2\alpha. \quad (8.89)$$

Рассматривая совместное движение заготовки и качание пил, можно написать уравнение движения заготовки с учетом получения различных законов движения его в следующем виде:

$$x_g = \frac{S_0}{4\pi} (2\alpha - c \cdot \sin 2\alpha). \quad (8.90)$$

$$x'_g = v_s = \frac{S_0}{2\pi} \omega (1 - c \cdot \cos 2\alpha), \quad (8.91)$$

$$v'_s = \frac{S_0}{\pi} \omega^2 c \cdot \sin 2\alpha. \quad (8.92)$$

Вначале рассмотрим вопросы согласования движений резания и подачи в случае, когда движение заготовки осуществляется по

указанным выше законам, а движение пил по горизонтали происходит по траектории с двумя осями симметрии. В этом случае траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода определится по формуле (отсчет от ВМТ):

$$x_1 = \frac{S_0}{4} \left[m(1 - \cos\alpha) - \frac{2}{\pi} \alpha(m - 1) - \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha \right], \quad (8.93)$$

или

$$x_1 = \frac{S_0}{4} \left[m \frac{y}{R} - \frac{2}{\pi} (m - 1) \arccos \frac{R - y}{R} - \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{R - y}{R} \right]. \quad (8.94)$$

Траектория движения нижнего соседнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется уравнением:

$$x_2 = \frac{S_0}{4} \left[\frac{y - t}{R} m - \frac{2}{\pi} (m - 1) \arccos \frac{R + t - y}{R} - \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{R + t - y}{R} \right] - \frac{S_0 t}{4R}. \quad (8.95)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{4} \left[(m + 1) \frac{t}{R} - \frac{2}{\pi} (m - 1) \left(\arccos \frac{R - y}{R} - \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) - \frac{c}{\pi} \left(\sin 2 \arccos \frac{R - y}{R} - \sin 2 \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) \right]. \quad (8.96)$$

В этой формуле неизвестными параметрами являются коэффициенты c и m .

Для определения указанных параметров можно воспользоваться выполнением основного требования – исключение скобления зубьями пилы дна пропила во время холостого хода.

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода опишется уравнениями (8.93) и (8.94) (отсчет от НМТ).

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода (начало координат в НМТ) определится уравнением

$$x_p = \frac{S_0}{4} \left[m(1 + \cos\alpha) - 2(m - 1) + \frac{2}{\pi} \alpha(m - 1) + \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha \right] - \frac{S_0}{2}. \quad (8.97)$$

ИЛИ

$$x_p = \frac{S_0}{4} \left[m \frac{2R - y}{R} - 2m + \frac{2}{\pi} (m - 1) \arccos \frac{R - y}{R} + \frac{c}{\pi} \sin \arccos \frac{R - y}{R} \right]. \quad (8.98)$$

Тогда глубина вдавливания зубьев пилы в древесину во время холостого хода определится выражением

$$\delta = \frac{S_0}{2} \left[m \cdot \cos \alpha - m + \frac{2\alpha}{\pi} (m - 1) + \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha \right], \quad (8.99)$$

ИЛИ

$$\delta = \frac{S_0}{2} \left[m \left(-\frac{y}{R} \right) + \frac{2}{\pi} (m - 1) \arccos \frac{R - y}{R} + \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{R - y}{R} \right]. \quad (8.100)$$

Зная, что максимальная глубина вдавливания зубьев пилы в древесину заготовки во время холостого хода наблюдается при $y = t$, и принимая $\delta = 0$, получим:

$$m = \frac{\frac{2}{\pi} \arccos \frac{R-t}{R} - \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{R-t}{R}}{\frac{2}{\pi} \arccos \frac{R-t}{R} - \frac{t}{R}}. \quad (8.101)$$

Расчеты по формуле (8.101) показывают, что с увеличением параметра c величина коэффициента m уменьшается прямо пропорционально (см. рис. 8.20), причем если сравнить с рис. 8.1, то можно отметить, что с таким законом движения заготовки коэффициент m уменьшается быстрее и достигает нулевого значения при меньшей величине параметра c . Величину параметра c , при которой коэффициент m принимает нулевое значение, можно определить по выражению (8.102):

$$c = \frac{2 \arccos \frac{R-t}{R}}{\sin 2 \arccos \frac{R-t}{R}}. \quad (8.102)$$

Выражение (8.102) отличается от выражения (8.11), и поэтому значения параметра c , рассчитанные по этим формулам, не совпадают между собой.

Взаимосвязь коэффициентов m и c представлена на рис. 8.20.

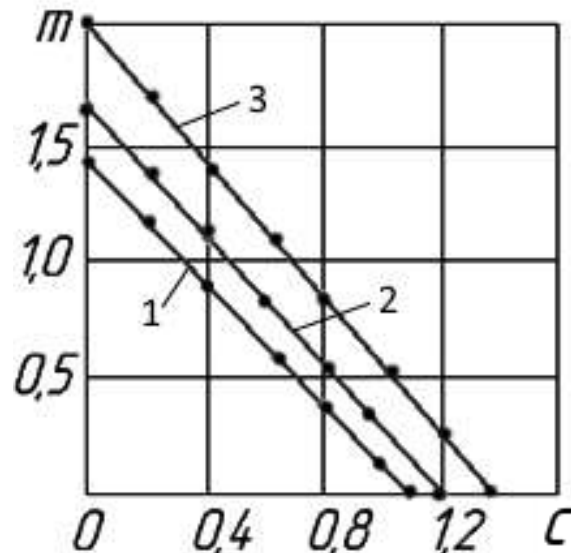


Рис. 8.20. Взаимосвязь коэффициентов m и c :
 при 1 – $R = 350$ мм, $t = 26$ мм; 2 – $R = 200$ мм, $t = 26$ мм; 3 – $R = 100$ мм, $t = 22$ мм

После определения коэффициента m можно по формуле (8.96) рассчитать подачу на зуб. Расчеты показывают, что с увеличением параметра c неравномерность толщины срезаемого слоя древесины возрастает (см. рис. 8.21).

При $y = t$ и $y = 2R$ значение подачи на зуб равно половине ее средней величины независимо от величины параметра c . При увеличении параметра c в начале и в конце рабочего хода пильной рамки мгновенные значения подачи на зуб несколько уменьшаются, а в середине рабочего хода – возрастают, достигая при $c = 1,2$ величины, большей среднего значения подачи на зуб примерно в 1,2 раза. Рост максимального значения подачи на зуб в середине рабочего хода при $c = 1,2$ по сравнению с максимальным значением подачи на зуб при $c = 0$ составит 7,1%. Таким образом, рост неравномерности толщины срезаемого слоя древесины зубом пилы с увеличением параметра c в этих пределах ($c = 0-1,2$) не столь значителен.

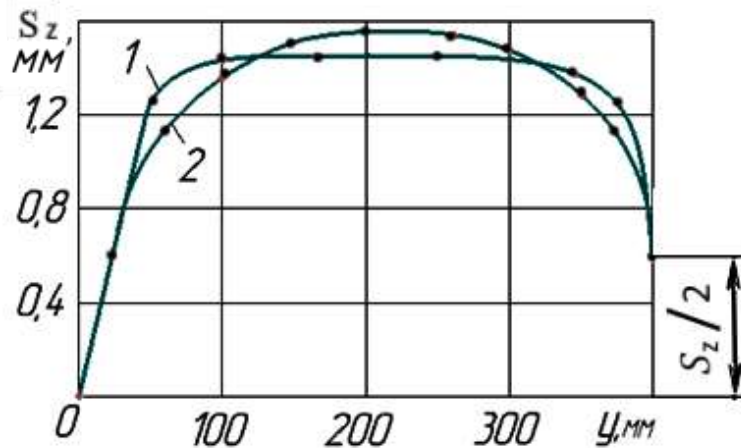


Рис. 8.21. Характер изменения подачи на зуб во время рабочего хода ($R = 200$ мм, $t = 26$ мм) при $1 - c = 0$, $2 - c = 1,2$

Перемещение, скорость и ускорение заготовки в этом случае будут иметь вид, представленный на рис. 8.22. Скорость движения заготовки в районе мертвых точек принимает отрицательное значение, и, следовательно, в этом случае будет наблюдаться небольшое «попятное» (возвратное) движение заготовки. При уменьшении параметра c максимальные значения скоростей и ускорений движения заготовки уменьшаются, и при $c = 0$ скорость становится равномерной, а ускорение заготовки равно нулю.

Рассмотрим вопросы согласования движений резания и подачи, когда движение пил осуществляется по траектории с одной вертикальной осью симметрии. В данном случае траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется уравнением

$$x_1 = \frac{S_0}{4} \left[m(1 - \cos\alpha) + n \cdot \sin\alpha - \frac{2\alpha}{\pi} (m - 1) - \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha \right], \quad (8.103)$$

ИЛИ

$$x_1 = \frac{S_0}{4} \left[m \frac{y}{R} + n \sin \arccos \frac{R - y}{R} - \frac{2}{\pi} (m - 1) \arccos \frac{R - y}{R} - \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{R - y}{R} \right]. \quad (8.104)$$

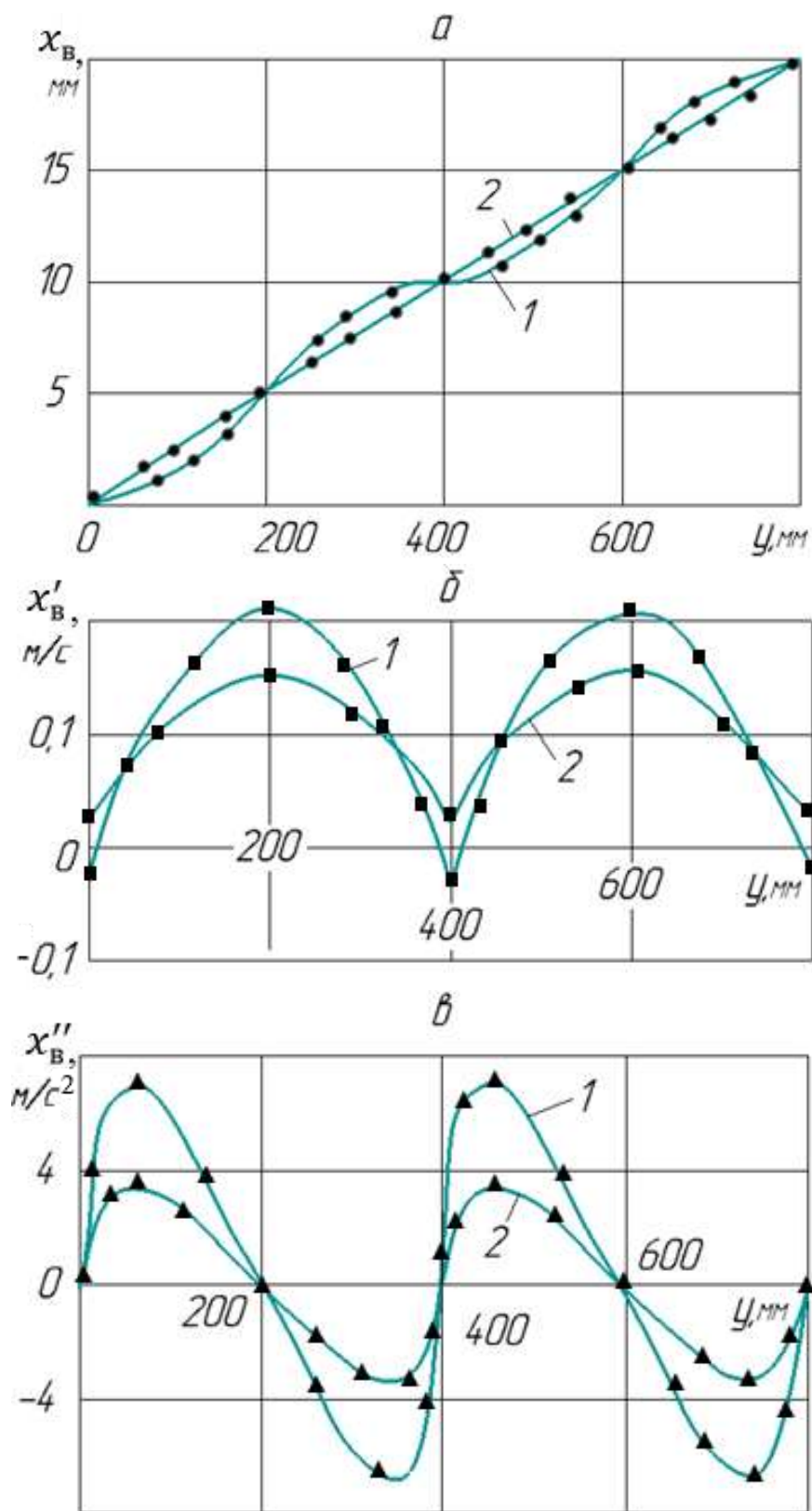


Рис. 8.22. Перемещение (а), скорость (б) и ускорение (в) движения заготовки в зависимости от вертикального перемещения пил:
 1 – $c = 1,2; m = 0$; 2 – $c = 0,6; m = 0,828$

Траектория нижнего соседнего зуба пилы в пропиле опишется уравнением:

$$x_2 = \frac{S_0}{4} \left[m \frac{y-t}{R} - \frac{t}{R} + n \operatorname{sinarccos} \frac{R+t-y}{R} - \frac{2}{\pi} \cdot (m-1) \operatorname{arccos} \frac{R+t-y}{R} - \frac{c}{\pi} \sin 2 \operatorname{arccos} \frac{R+t-y}{R} \right]. \quad (8.105)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{4} \left[(m+1) \frac{t}{R} + n \left(\operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} - \operatorname{sinarccos} \frac{R+t-y}{R} \right) - \frac{2}{\pi} (m-1) \left(\operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} - \operatorname{arccos} \frac{R+t-y}{R} \right) - \frac{c}{\pi} \left(\sin 2 \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} - \sin 2 \operatorname{arccos} \frac{R+t-y}{R} \right) \right]. \quad (8.106)$$

В последней формуле неизвестными являются коэффициенты c , m , n . Для определения этих коэффициентов составим уравнения для определения глубины вдавливания зубьев пилы в древесину во время холостого хода. Траектория движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода опишется уравнением (отсчет от НМТ):

$$x_x = \frac{S_0}{4} \left[m \left(1 - \cos \alpha + \frac{2\alpha}{\pi} (1-m) - \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha - n \cdot \sin \alpha \right) \right]. \quad (8.107)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется уравнением (отсчет нуля от НМТ) :

$$x_p = \frac{S_0}{4} \left[m(1 - \cos \alpha) - \frac{2\alpha}{\pi} (1-m) + \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha + n \cdot \sin \alpha \right]. \quad (8.108)$$

Тогда глубина вдавливания зуба пилы в древесину определится по формуле

$$\delta = \frac{S_0}{2} \left[m(1 - \cos \alpha) - \frac{2\alpha}{\pi} (1-m) + \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha + n \cdot \sin \alpha \right], \quad (8.109)$$

или

$$\delta = \frac{S_0}{2} \left[m \left(-\frac{y}{R} \right) - \frac{2}{\pi} (1-m) \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} + \frac{c}{\pi} \sin 2 \operatorname{arccos} \frac{R-y}{R} + n \cdot \operatorname{sinarccos} \frac{R-y}{R} \right]. \quad (8.110)$$

Принимая в последней формуле $y = t$ и $\delta = 0$, получим:

$$m = \frac{\frac{2}{\pi} \arccos \frac{R-t}{R} - \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{R-t}{R} - n \cdot \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R}}{\frac{2}{\pi} \arccos \frac{R-t}{R} - \frac{t}{R}}. \quad (8.111)$$

Для выполнения расчетов по формуле (8.111) необходимо составить еще одно уравнение из условия равенства подачи на зуб при $y = t$ и при $y = R$. Подача на зуб при $y = t$ определится по выражению:

$$S_{zt} = \frac{S_0}{4} \left[(m+1) \frac{t}{R} + n \cdot \operatorname{sinarccos} \frac{R-t}{R} - \frac{2}{\pi} (m-1) \arccos \frac{R-t}{R} - \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{R-t}{R} \right]. \quad (8.112)$$

Подача на зуб при $y = R$ определится по выражению:

$$S_{zR} = \frac{S_0}{4} \left[(m+1) \frac{t}{R} + n \left(1 - \operatorname{sinarccos} \frac{t}{R} \right) - \frac{2}{\pi} (m-1) \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{t}{R} \right) - \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{t}{R} \right]. \quad (8.113)$$

Приняв условие равенства этих двух формул (8.112) и (8.113), после преобразований получим:

$$n = \frac{\left(\frac{2}{\pi} \alpha_1 - \frac{c}{\pi} \sin 2 \alpha_1 \right) \left[\frac{2}{\pi} (\alpha_1 + \beta_1) - 1 \right] - \left[\frac{2}{\pi} (\alpha_1 + \beta_1) - 1 - \frac{c}{\pi} (\sin 2 \alpha_1 + \sin 2 \beta_1) \right] \left(\frac{2}{\pi} \alpha_1 - \frac{t}{R} \right)}{(\sin \alpha_1 + \sin \beta_1 - 1) \left(\frac{2}{\pi} \alpha_1 - \frac{t}{R} \right) + \sin \alpha_1 \left[\frac{2}{\pi} (\alpha_1 + \beta_1) - 1 \right]} \quad (8.114)$$

$$\text{где } \alpha_1 = \arccos \frac{R-t}{R}; \quad \beta_1 = \arccos \frac{t}{R}.$$

Расчеты по формулам (8.111) и (8.114) показывают (см. рис. 8.23), что с увеличением параметра с коэффициент m уменьшается более интенсивно, чем в предыдущем варианте (см. рис. 8.20), а коэффициент n возрастает прямо пропорционально увеличению параметра c .

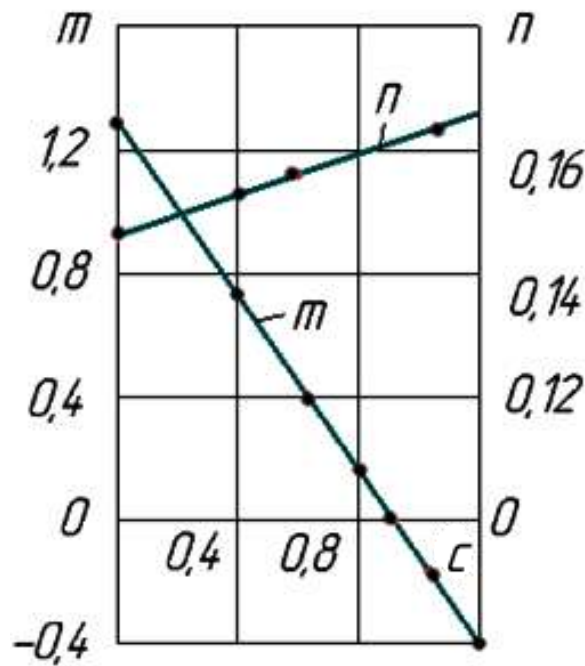


Рис. 8.23. Взаимосвязь коэффициентов m , n и c при $R = 200$ мм и $t = 26$ мм

Это говорит о том, что узловая точка траектории движения пильной рамки за рабочий и холостой ходы при увеличении параметра c перемещается к верхней мертвой точке положения пильной рамки, и ускорение пильной рамки при этом будет уменьшаться по сравнению с предыдущим вариантом.

Движение заготовки может производиться также с асимметричной скоростью относительно середины хода. Для такого случая перемещение, скорость и ускорение движения заготовки математически можно описать следующими выражениями:

$$x_e = \frac{S_0}{4\pi} (2\alpha - c \cdot \sin 2\alpha) \pm \frac{S_0}{4} c \frac{n_0}{m_0} \sin \alpha, \quad (8.115)$$

$$v_s = \frac{S_0}{2\pi} \omega (1 - c \cdot \cos 2\alpha) \pm \frac{S_0}{4} c \frac{n_0}{m_0} \omega \cdot \cos \alpha, \quad (8.116)$$

$$v'_s = \frac{S_0 c}{\pi} \omega^2 \sin 2\alpha \pm \frac{S_0}{4} c \frac{n_0}{m_0} \omega^2 \sin \alpha. \quad (8.117)$$

Тогда траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется следующим выражением (отсчет от ВМТ):

$$x_p = \frac{S_0}{4} \left[\frac{2}{\pi} \alpha (1 - m) + m(1 - \cos \alpha) - \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \sin \alpha \right]. \quad (8.118)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время холостого хода опишется таким уравнением (отсчет от НМТ):

$$x_x = \frac{S_0}{4} \left[\frac{2}{\pi} \alpha (1 - m) + m(1 - \cos \alpha) - \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha - \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \sin \alpha \right]. \quad (8.119)$$

Траектория движения зуба пилы в пропиле во время рабочего хода при отсчете перемещений от НМТ опишется уравнением:

$$x_p = \frac{S_0}{4} \left[2(1 - m) - \frac{2}{\pi} \alpha (1 - m) + m \left(1 + \cos \alpha + \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha \right) + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \sin \alpha \right] - \frac{S_0}{2}. \quad (8.120)$$

Тогда глубина вдавливания зуба пилы в древесину во время холостого хода определится по формуле:

$$\delta = \frac{S_0}{2} \left[\frac{c}{\pi} \sin 2\alpha + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \sin \alpha - \frac{2}{\pi} \alpha (1 - m) - \frac{t}{R} m \right]. \quad (8.121)$$

Зная, что максимальная глубина вдавливания зубьев вилы в древесину наблюдается при $\alpha = \arccos \frac{R-t}{R}$ и принимая $\delta = 0$, определим значение коэффициента n , при котором отсутствует скобление:

$$n = \frac{\frac{t}{R} m + \frac{2}{\pi} \alpha (1 - m) - \frac{c}{\pi} \sin 2\alpha - c \frac{n_0}{m_0} \sin \alpha}{\sin \alpha}. \quad (8.122)$$

В формуле (8.122) неизвестным является коэффициент m .

Для его определения воспользуемся условием равенства подачи на зуб при $y = t$ и при $y = R$.

Траектория движения верхнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода определится по формуле:

$$x_1 = \frac{S_0}{4} \left[\frac{2}{\pi} (1 - m) \arccos \frac{R - y}{R} - \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{R - y}{R} + m \frac{y}{R} + \left(n + c \frac{n_0}{m_0} \right) \sin \arccos \frac{R - y}{R} \right]. \quad (8.123)$$

Траектория нижнего соседнего зуба пилы в пропиле во время рабочего хода опишется уравнением:

$$x_2 = \frac{S_0}{4} \left[\frac{2}{\pi} (1 - m) \arccos \frac{R + t - y}{R} - \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{R + t - y}{R} + \right. \\ \left. + m \frac{y}{R} - \frac{t}{R} (m + 1) + (n + c \frac{n_0}{m_0}) \sin \arccos \frac{R + t - y}{R} \right]. \quad (8.124)$$

Тогда подача на зуб определится по формуле:

$$S_z = \frac{S_0}{4} \left[\frac{2}{\pi} (1 - m) \arccos \frac{R - y}{R} - \arccos \frac{R + t - y}{R} + \frac{t}{R} (m + 1) - \right. \\ \left. - \frac{c}{\pi} \left(\sin 2 \arccos \frac{R - y}{R} - \sin 2 \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) + \right. \\ \left. + (n + c \frac{n_0}{m_0}) \left(\sin \arccos \frac{R - y}{R} - \sin \arccos \frac{R + t - y}{R} \right) \right]. \quad (8.125)$$

Подача на зуб при $y = t$ определится по формуле:

$$S_{zt} = \frac{S_0}{4} \left[\frac{2}{\pi} (1 - m) \arccos \frac{R - t}{R} + \frac{t}{R} (m + 1) - \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{R - t}{R} + \right. \\ \left. + (n + c \frac{n_0}{m_0} \sin \arccos \frac{R - t}{R}) \right]. \quad (8.126)$$

Подача на зуб при $y = R$ определится по формуле:

$$S_{zR} = \frac{S_0}{4} \left[\frac{2}{\pi} (1 - m) \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{t}{R} \right) + \frac{t}{R} (m + 1) + \right. \\ \left. + \frac{c}{\pi} \sin 2 \arccos \frac{t}{R} + (n + c \frac{n_0}{m_0}) \left(1 - \sin 2 \arccos \frac{t}{R} \right) \right]. \quad (8.127)$$

Приравняв формулы (8.126) и (8.127) между собой и подставив в полученное тождество выражение (8.122), получим:

$$m = \frac{\frac{2}{\pi} (\alpha_1 + \beta_1) - 1 + \frac{c}{\pi} (\sin 2\alpha_1 + \sin 2\beta_1) + (2\alpha - c \sin 2\alpha) (\sin \alpha_1 + \sin \beta_1 - 1) \frac{1}{\pi \sin \alpha}}{\frac{2}{\pi} (\alpha_1 + \beta_1) - 1 + \left(\frac{2\alpha}{\pi \sin \alpha} - \frac{t}{R \sin \alpha} \right) (\sin \alpha_1 + \sin \beta_1 - 1)}. \quad (8.128)$$

Расчеты по формулам (8.128) и (8.122) показывают, что с увеличением параметра c коэффициент m уменьшается так же, как и в предыдущем случае (см. рис. 8.23), а значение коэффициента n также уменьшается (см. рис. 8.24).

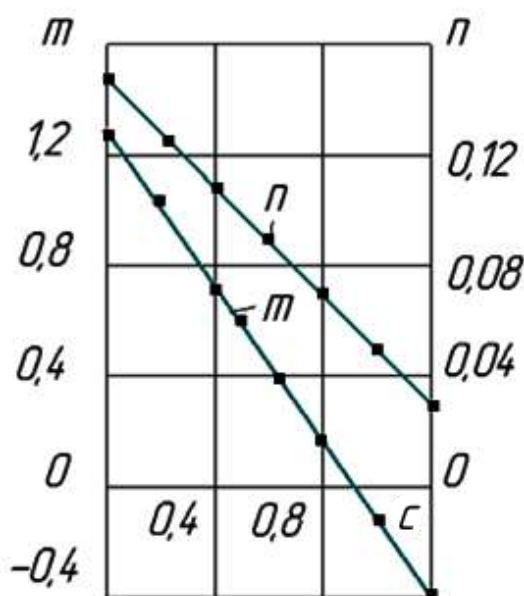


Рис. 8.24. Взаимосвязь коэффициентов m , n и c при $R = 200$ мм и $t = 26$ мм

Следовательно, такой вид изменения скорости движения заготовки также приемлем в сочетании с траекторией движения пил по замкнутой самопересекающейся кривой, узловая точка которой смещена от середины хода пил в сторону верхней мертвой точки положения пильной рамки.

8.5. Основные выводы

На основании проведенного анализа некоторых вариантов совместного движения заготовки с переменной скоростью и качания пил можно сделать следующие выводы.

1. Вполне возможно рассматривать согласование двух движений резания и подачи в лесопильной раме одновременно путем переменной скорости подачи и качания пил.

2. С увеличением неравномерности движения заготовки размах качания пил уменьшается. При этом ускорение заготовки возрастает, а ускорение пил уменьшается.

3. Если скорость движения заготовки изменяется с таким расчетом, что в верхней и нижней мертвых точках она достигает нуле-

вого значения, то для согласования этих двух движений необходимо производить дополнительное качание пил.

4. Если пильная рамка перемещается по прямой линии, то для согласования движений резания и подачи необходимо, чтобы скорость движения заготовки в момент нахождения пил в нижней мертвой точке была отрицательной.

5. Подтверждается правильность ранее сделанных выводов о том, что для согласования движений резания и подачи на лесопильных рамах необходимо движение пил осуществлять по замкнутой самопересекающейся кривой, а движение заготовки с циклом за ход пил.

6. Траектория движения пил со смещенной узловым точкой в сторону ВМТ более рациональна, так как обеспечивает срезание слоя древесины каждым зубом пилы более равномерной толщины и меньшую величину ускорения пил, чем при движении пил по траектории с двумя осями симметрии.

7. Согласование двух движений резания и подачи в лесопильной раме как за счет переменной скорости движения заготовки, так и за счет качания пил позволяет уменьшить ускорения в этих двух механизмах.

8. Синусный закон движения заготовки приемлем для согласования с кривошипно-шатунным механизмом резания лесопильной рамы.

9. Предложенные формулы и методики позволяют определить все необходимые параметры процесса пиления древесины рамными пилами, а также параметры механизмов резания и подачи, работающих в согласованном режиме.

9. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Анализируя результаты данной работы по развитию и совершенствованию процесса пиления на лесопильных рамах, можно сформулировать следующие общие выводы и рекомендации.

1. В середине и во второй половине XX века лесопильная рама занимала ведущую роль и являлась основным (головным) станком в лесопильных линиях производства пиломатериалов. Это объяснялось рядом технологических и экономических преимуществ по сравнению с ленточнопильными и круглопильными станками. Групповой способ распиловки, высокая жесткость и устойчивость рамных пил, сравнительно небольшая толщина рамных пил, а также достаточно высокая производительность лесопильных рам обуславливали экономическое преимущество по сравнению с лесопильными линиями на базе ленточнопильных и круглопильных станков. Поэтому совершенствованию лесопильных рам уделялось первостепенное внимание. Работы по совершенствованию и развитию лесопильных рам выполнялись по следующим направлениям:

- совершенствование способа осуществления процесса пиления древесины рамными пилами;
- уравнивание вращающихся масс лесопильных рам;
- обоснование рациональных параметров рамных пил и режимов их подготовки к работе;
- поиск новых конструкций и совершенствование натяжных устройств для рамных пил;
- обоснование и совершенствование конструктивных параметров основных узлов и механизмов лесопильной рамы;
- разработка режимов пиления древесины рамными пилами для различных условий пиления;
- совершенствование способов раскроя пиловочника и методов составления поставов;
- специализация лесопильных линий в зависимости от объемов, качества и размеров различных пород древесины распиливаемого пиловочника, а также выработка требуемых размеров и качества спецификационных пиломатериалов.

2. В настоящее время в промышленности получил наибольшее распространение способ пиления древесины рамными пилами с прямолинейным перемещением пил и равномерной скоростью по-

дачи заготовки. Такой способ пиления прост в исполнении. Однако анализ показал, что во время рабочего хода подача на зуб изменяется в широких пределах, а в начале холостого хода происходит скобление зубьями пилы dna пропила. Все это негативно влияет на качество обработки, силы резания, условия работы рамных пил. В связи с этим приходится использовать рамные пилы повышенной толщины, что увеличивает потери древесины в опилки, повышает мощность резания и сдерживает повышение производительности станка.

3. Наметились два пути совершенствования способа процесса пиления древесины на лесопильных рамах. Первое направление заключается в том, чтобы рамные пилы дополнительно перемещать в плоскости вектора скорости движения заготовки по эллиптической или по каплевидной траектории. Ранее полагали, что такое сочетание перемещения пил и заготовки позволит получить синхронизацию движений резания и подачи и тем самым создать благоприятные условия пиления для рамных пил. В связи с этим можно улучшить качество поверхности пропила, уменьшить толщину пилы, снизить энергоемкость процесса и тем самым повысить производительность и эффективность лесопильных рам. Анализ таких способов осуществления процесса показал, что предлагаемые варианты перемещения пил не обеспечивают получение положительного эффекта. В этом случае во время рабочего хода наблюдается еще большая неравномерность толщины срезаемого слоя, чем при прямолинейном перемещении рамных пил. Это обуславливает рост максимальных сил резания, что снижает качество распиловки и вызывает необходимость увеличения толщины рамной пилы. Следовательно, улучшение кинематических показателей процесса пиления древесины рамными пилами в этом варианте не обеспечивается.

4. Рассматривалось также второе направление совершенствования способа процесса пиления на лесопильных рамах путем использования переменной скорости подачи заготовки. Предлагалось перемещение заготовки осуществлять с циклом за рабочий ход, с циклом за холостой ход, с циклом за рабочий и холостой ходы, а также с циклом за оборот коленчатого вала лесопильной рамы. Ранее полагали, что при этом также возможно улучшить условия работы рамных пил за счет ликвидации скобления зубьями пилы dna пропила во время холостого хода, а также уменьшить неравномерность срезаемого слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода. Анализ таких вариантов перемещений заготовки показал, что не обеспечивается срезание

слоя древесины зубьями пилы во время рабочего хода равномерной толщины и не исключается скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода. Следовательно, в этих вариантах осуществления способов процесса пиления древесины на лесопильных рамах также не обеспечивается получение положительного эффекта.

5. Наряду с этим осуществляется также поиск механизмов подачи с переменной скоростью. Анализ использования этих технических решений на лесопильных рамах показал, что они не обеспечивают прежде всего исключение скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода. Кроме того, во время рабочего хода не обеспечивается срезание слоя древесины зубом пилы равномерной толщины. Однако следует отметить, что при этом глубина вдавливания зуба пилы в древесину в начале холостого хода уменьшается, а неравномерность толщины срезаемого слоя во время рабочего хода снижается. Следовательно, использование таких механизмов подачи с переменной скоростью перемещения заготовки на лесопильных рамах не позволяет создать хорошие, благоприятные условия для пиления.

6. Параллельно с совершенствованием лесопильных рам и способов пиления заготовок на них производился поиск и развитие нового способа пиления заготовок из древесины полосовыми пилами с круговым движением [37, 57, 76]. Исследования показали, что такой способ хотя и положительно решается, но, по всей вероятности, его использование в наибольшей степени целесообразно для деления заготовок с небольшой толщиной (высотой пропила) заготовки.

7. Поэтому была разработана методика решения совершенствования способа пиления заготовок на лесопильных рамах вначале теоретическим (аналитическим) путем. Ставилась задача определения математической модели перемещения пил или заготовки, при которых обеспечивалось бы выполнение следующих требований:

– срезание слоя древесины зубом пилы во время работы хода равномерной толщины;

– исключение скобления древесины зубьями пилы в начале холостого хода.

8. В результате решения этой проблемы вначале была определена математическая модель теоретической траектории движения пил, при которой исключается скобление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода и обеспечивается срезание слоя древесины во время рабочего хода равномерной толщины. Математическая модель перемещения пил представляет собой траекторию во

время рабочего хода в виде половины восьмёрки, а во время холостого хода – в виде двух уравнений, обеспечивающих отвод пилы от дна пропила в начале холостого хода и возвращение пилы в верхнее крайнее положение (ВМТ). Такой вариант математической модели перемещения (качания) пил на практике практически невыполним.

9. Далее была разработана идеальная математическая модель перемещения пильной рамки, при которой обеспечивается исключение скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода и срезание слоя древесины во время рабочего хода равномерной толщины, которая представляет собой за рабочий ход – половину восьмёрки, а за холостой ход – половину каплевидной кривой. Однако и этот вариант математической модели качания пил трудно выполним на практике.

10. Поэтому была определена упрощенная математическая модель качания пил, при которой исключается скопление зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода пил, но допускается незначительное изменение толщины срезаемого слоя древесины зубьями пилы во время рабочего хода. Такая математическая модель представляет собой самопересекающуюся замкнутую кривую типа восьмёрки, у которой размах качания в нижней половине хода пил примерно в два раза больше, чем в верхней, и узловая точка пересечения смещена в направлении к верхней мертвой точке (ВМТ). Такой вариант математической модели качания пил вполне выполним в промышленности. Разработана методика расчета параметров таких механизмов для любых типов лесопильных рам.

11. В работе также вначале получена теоретическая математическая модель перемещения заготовки с переменной скоростью подачи, которая позволяет обеспечить во время рабочего хода срезание слоя древесины зубом пилы равномерной толщины и исключить скопление зубом пилы дна пропила в начале холостого хода. Оказалось, что в этом варианте математическое описание перемещения заготовки за рабочий ход отличается от математической модели перемещения заготовки за холостой ход. В начале холостого хода заготовку необходимо перемещать в обратном направлении. Такой вариант математической модели перемещения заготовки на практике трудно выполнить.

12. Поэтому рассматривались другие варианты математических моделей перемещения заготовки. После анализа теоретической математической модели перемещения заготовки были выбраны уп-

рощенные модели с остановками и с возвратными перемещениями заготовки в моменты, когда пилы находятся в ВМТ и НМТ.

Для этих условий разработаны методики расчета параметров математических моделей, исключающих скобление зубом пилы дна пропила в начале холостого хода и допускающих незначительное изменение толщины срезаемого слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода. Такие математические модели перемещения заготовки на практике можно реализовать.

13. Впервые рассмотрен также вариант синхронизации двух движений за счет совместного изменения математических моделей одновременно перемещения пил и заготовки. Разработана методика расчета основных кинематических параметров предложенных вариантов исполнения способов осуществления процессов пиления заготовок на лесопильных рамах.

14. Полученные упрощенные математические модели качания пильной рамки рекомендуется использовать при проектировании лесопильных рам нового поколения. Для этого необходимо использовать предлагаемую методику расчета основных кинематических показателей процесса и параметров механизмов резания и подачи лесопильных рам.

15. Полученные математические модели перемещения заготовки с переменной скоростью подачи с остановками и с возвратными перемещениями рекомендуется использовать при разработке новых, более эффективных лесопильных рам. Следует отметить, что переменные скорости подачи заготовки прежде всего следует рассматривать при проектировании лесопильных рам легкого типа, предназначенных для распиловки заготовок небольших размеров.

Таким образом решена проблема синхронизации двух движений на лесопильных рамах. Разработаны новые математические модели для осуществления эффективных способов пиления древесины на лесопильных рамах. Предложенные новые способы перемещения пил и заготовки позволяют:

- повысить производительность,
- снизить энергоемкость процесса,
- улучшить качество поверхности пропила,
- уменьшить потери древесины в опилки.

16. На лесопильных рамах с улучшенным способом пиления заготовок рекомендуется использовать рамные (полосовые) пилы меньшей толщины и с углом резания не более 60° вместо приме-

няемого в настоящее время угла резания зубьев пилы равным 75° . Это дополнительно даёт возможность снизить энергоёмкость процесса пиления, улучшить качество поверхности пропила, уменьшить потери древесины в опилки и повысить производительность лесопильных рам.

17. Для реализации перспективных способов процесса пиления заготовок рамными пилами разработаны и предложены новые варианты технических решений механизмов резания и подачи лесопильных рам и получены авторские свидетельства на изобретение [91–104].

18. По предложению ВятГУ (автор А. И. Агапов) Даниловский ЗДС впервые (в 1984 году) изготовил опытно-промышленный образец одноэтажной лесопильной рамы мод. Р63-6А с качанием пильной рамки по самопересекающейся замкнутой кривой, у которой узловая точка смещена в сторону ВМТ, а размах качания пил в нижней половине хода в два раза больше, чем в верхней части хода пил. Данный вариант лесопильной рамы был апробирован и успешно эксплуатировался в лесопильном цехе Кировского завода «АВИТЕК» с 1985 года.

19. По исходным данным автора этой работы Вологодское ГКБД (Главное конструкторское бюро по проектированию деревообрабатывающего оборудования) разработало проект одноэтажной лесопильной рамы модели Р63-7 с качанием пильной рамки по самопересекающейся замкнутой кривой типа «восьмерки», у которой размах качания пил в нижней половине хода пильной рамки больше, чем размах качания пил в верхней части хода пильной рамки. Тарбагатайский ЗДС (завод деревообрабатывающих станков), расположенный в Читинской области, изготовил опытный образец лесопильной рамы модели Р63-7. Испытания опытного образца Р63-7 показали, что производительность лесопильной рамы возросла в 1,5 раза, а энергоёмкость процесса пиления снизилась на 37%. Выпуск лесопильных рам нового поколения модели Р63-7 Тарбагатайским ЗДС осуществлялся с 1992 по 1998 год и составил свыше 3000 штук.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии решена проблема совершенствования способа пиления заготовок рамными (полосовыми) пилами на лесопильных рамах.

Представлен анализ предлагаемых ранее технических решений по совершенствованию способа пиления заготовок на лесопильных рамах с качанием пил и с переменной скоростью подачи заготовок. Оказалось, что предлагаемые ранее технические решения не обеспечивают получение одновременно срезания слоя древесины зубом пилы во время рабочего хода равномерной толщины и исключения скобления зубьями пилы дна пропила в начале холостого хода.

В связи с этим разработаны новые математические модели перемещения пил и заготовки и предложены методики расчета рациональных параметров лесопильных рам с качанием пил или с перемещением заготовки с переменной скоростью подачи.

Только в этом случае можно при разработке лесопильных рам нового поколения обеспечить получение наилучших условий пиления и достигнуть наиболее эффективных результатов.

Предложены варианты технических решений по реализации предлагаемых способов пиления в промышленности. Предлагаемые математические модели перемещения пил и заготовки частично апробированы в промышленности. Необходимо продолжить реализацию в промышленности этих научных прогрессивных технических решений.

Создание лесопильных рам с предлагаемой новой кинематикой резания позволяет существенно улучшить условия работы рамных пил и тем самым улучшить качество поверхности получаемых пиломатериалов, снизить энергоемкость процесса на 40–50%, а также уменьшить потери древесины в опилки за счет уменьшения толщины пилы и, следовательно, ширины пропила. В результате производительность лесопильных рам нового поколения с улучшенной кинематикой резания можно увеличить в 1,5–2,0 раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов А. И. Основные вопросы кинематики пиления древесины рамными пилами // Сб. трудов ВНИИДрев. – Балабаново, 1969. – Вып. 3. – С. 73–87.
2. Агапов А. И. О характере изменения сил резания за оборот кривошипа при пилении древесины на лесопильных рамах // Науч. тр. / ВНИИДрев. – Балабаново, 1970. – Вып. 4 – С. 71–79.
3. Агапов А. И. Теоретические предпосылки к расчету сил резания при рамном пилении // Материалы второй конф. молодых спец. и ученых / ВНИИДМаш. – М., 1971. – С. 3–17.
4. Агапов А. И. Теоретические положения к расчету сил трения стружки в пропиле при рамном пилении // Науч. тр. / МЛТИ. – М., 1972. – Вып. 46. – С. 62–81.
5. Агапов А. И., Жданов В. Н. Исследование точности согласования механизмов подачи и уклона пильной рамки на двухэтажных лесопильных рамах // Деревообр. пром-сть. – М., 1978. – № 2. – С. 9–10.
6. Агапов А. И. Особенности перемещения стружки при рамном пилении с высотой пропила больше хода пильной рамки / Киров. политехн. ин-т. – Киров, 1979. – 11 с. – Деп. в ВНИПИЭИлеспром 25.11.79.428д.
7. Агапов А. И. Кинематика процесса пиления древесины на лесопильных рамах: Учеб. пособие для студентов / Горьк. гос. ун-т. – Горький: ГГУ, 1981. – 100 с.
8. Агапов А. И. Исследование влияния уклона пил на кинематику процесса пиления древесины на лесопильных рамах // Станки и инструменты деревообр. пр-в: Межвуз. сб. науч. тр. ЛТА. – Л., 1982. – Вып. 9. – С. 42–45.
9. Агапов А. И. Определение траектории движения пильной рамки лесопильной рамы // Деревообр. пром-сть. – М., 1983. – № 10. – С. 7–9.
10. Агапов А. И. Динамика процесса пиления древесины на лесопильных рамах: Учеб. пособие для студ. / Горьк. гос. ун-т. – Горький: ГГУ, 1983. – 100 с.
11. Агапов А. И. Кинематика процесса пиления древесины на лесопильных рамах с отводящим механизмом синусного типа // Оборудование, автоматизация и вопросы механизации процессов деревообработки. Науч. тр. МЛТИ. М., 1983. – Вып. 153. – С. 5–8.

12. Агапов А. И. Анализ использования на лесопильных рамах отводящих механизмов с эллиптической траекторией движения пильной рамки // Киров. политехн. ин-т. – Киров, 1984. – 11 с. – Деп. в ВНИПИЭИлеспром, 26.06.84, № 1312.

13. Агапов А. И. Определение математической модели идеальной траектории движения пильной рамки для лесопильных рам с отводящим механизмом // Оборудование, автоматизация и вопросы механизации процессов деревообработки: Науч. тр. / МЛТИ. – М., 1984. – Вып. 160. – С. 14–17.

14. Агапов А. И. Влияние длины шатуна на параметры отводящих механизмов лесопильных рам // Станки и инструменты деревообраб. пр-в: Межвуз. сб. науч. тр. ЛТА. – Л., 1985. – С. 67–70.

15. Агапов А. И. Определение математической модели реально выполнимой траектории движения пильной рамки на лесопильных рамах с отводящим механизмом // Киров, политехн. ин-т. – Киров, 1985. – 22 с. – Деп. в ВНИПИЭИлеспром, 01.08.85, № 1560.

16. Агапов А. И. Математическое описание модели движения вальца на лесопильных рамах с переменной скоростью подачи // Станки и инструменты деревообраб. пр-в: Межвуз. сб. научн. тр. ЛТА – Л., 1986. – С. 88–93.

17. Агапов А. И. Кинематика лесопильных рам. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 142 с.

18. Агапов А. И. Одноэтажная лесопильная рама с качанием пильной рамки по самопересекающейся замкнутой кривой / Киров. политехн. ин-т. – Киров, 1987. – 37 с. – Деп. в ВНИПИЭИлеспром, 20.04.87, № 1946 – лб87.

19. Агапов А. И. Лесопильная рама с рациональной траекторией движения пил // Деревообраб. пром-сть. – М., 1987. – № 4. – С. 4–6.

20. Агапов А. И. Кинематика тарной лесопильной рамы мод. РТ40 / Киров. политехн. ин-т. – Киров, 1987. – 29 с. – Деп. в ВНИПИЭИлеспром, 20.04.87, № 1945 – лб87.

21. Агапов А. И. Трансформация углов резания при пилении древесины рамными пилами // Деревообр. пром-сть. – М., 1989. – С. 6–7.

22. Агапов А. И. Оптимизация толщины рамных пил // Деревообр. пром-сть. – М., 1989. – № 7. – С. 5–6.

23. Агапов А. И. Влияние неравномерности вращения коленчатого вала на выбор параметров отводящих механизмов лесопиль-

ных рам // Станки и инструменты деревообраб. пр-в: Межвуз. сб. науч. тр. ЛТА. – Л., 1989. – С. 22–23.

24. Агапов А. И. Обоснование параметров одноэтажной лесопильной рамы // Деревообр. пром-сть. – М., 1990. – № 5. – С. 4–5.

25. Агапов А. И. Определение математической модели перемещения рамных пил на лесопильных рамах с равномерной скоростью движения бревна или бруса при полной синхронизации главного движения и движения подачи. – М., 1996. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ РАН № 3093.

26. Агапов А. И. Определение математической модели движения бревна или бруса на лесопильных рамах при прямолинейном перемещении пил и полной синхронизации главного движения и движения подачи. – М., 1996. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ РАН № 3094.

27. Агапов А. И. Перспективное направление совершенствования механизмов резания лесопильных рам // Деревообр. пром-сть. – М., 1996. – С. 4–5.

28. Агапов А. И. Определение и анализ математической модели движения вальцов лесопильной рамы. – М., 1997. – 6 с. – Деп. в ВИНТИ РАН № 1051-В97.

29. Агапов А. И. Механизм резания коротышовой лесопильной рамы модели РК-2 // Сб. науч. тр. ВятГТУ. – Киров, 1998. – № 3. – С. 52–55.

30. Агапов А. И. Пилы для одноэтажных лесопильных рам нового поколения // Сб. науч. тр. ВятГТУ. – Киров, 1998. – № 3. – С. 87–91.

31. Агапов А. И. Силы инерции пильной рамки в горизонтальной плоскости на одноэтажной лесопильной раме от качания пил по самопересекающейся замкнутой кривой // Сб. науч.-техн. конф. ВятГТУ. – Киров, 1998. – Т. 1. – С. 49–50.

32. Аксенов П. П. и др. Технология пиломатериалов: Учеб. для вузов. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 480 с.

33. Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике: Справочник: В 7 т. – Наука. – М., 1979–1981.

34. Батин Н. А. О кинематике лесопильных рам // Механическая обработка древесины. – М., 1939. – № 2. – С. 49–53.

35. Бершадский А. Л., Цветкова Н. И. Резание древесины. – Минск: Высшая школа, 1975. – 303 с.

36. Бершадский А. Л. О переходе на лесопильные рамы с высотой хода 700 мм // Лесн. пром-сть. – М., 1961.

37. Блохин М. А. Исследование, разработка и создание лесопильного оборудования с круговым поступательным движением пильных полотен: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05, 05.21.01. – М., 2015. – 313 с.
38. Богданов Е. А., Остроумов И. П. Подготовка и эксплуатация рамных пил // Лесн. пром-сть. – М., 1986. – 160 с.
39. Боровиков Е. М. Влияние величины подачи на силы резания при распиловке древесины на лесопильных рамах // Известия вузов. Лесн. журн. – 1970. – № 4.
40. Боровиков Е. М. Опытная установка для исследования процесса рамного пиления // Изв. вузов. Лесн. журн. – 1963. – № 3.
41. Боровиков Е. М. Влияние породы древесины на силы резания и отжима при рамном пилении // Изв. вузов. Лесн. журн. – 1973. – С. 101–105.
42. Буэс К. Испытание лесопильной рамы / Пер. с нем. инж. П. П. Шведчикова. – М.: Гослестехиздат, 1937. – 91 с.
43. Войтинский Н. С. Какой должна быть высокопроизводительная лесопильная рама // Лесн. индустрия. – М., 1938. – № 12.
44. Воскресенский С. А. Резание древесины. – М.: Гослесбумиздат, 1956. – 200 с.
45. Воскресенский С. А. Вопросы реологии в теории резания древесины // Науч. труды МЛТИ. – М., 1968. – Вып. 30.
46. Дерягин Р. В. Вибрация лесопильных рам. – Л.: Лесн. пром-сть; М., 1968. – 143 с.
47. Дешевой М. А. Механическая технология дерева: В 2 т. – Т. 1. Л., 1934. – 511 с.; Т. 2. Л., 1936. – 429 с.
48. Калитеевский Р. Е. Лесопиление в XXI веке. Технология. Оборудование. Менеджмент. – 2-е изд., исп. и доп. – СПб.: Проффикс, 2008. – 499 с.
49. Кемов А. С., Леонтьев В. А. Механизм непрерывно-переменной подачи лесопильной рамы // Деревообработ. пром-сть. М., 1961. – № 17. – С. 9–10.
50. Контроль качества в лесопильном производстве / Пер. с англ. В. В. Амалицкого; под ред. Т. Броуна. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 224 с.
51. Коргушов А. С. К вопросу пиления тонкими пилами на тарных лесопильных рамах // Сб. трудов ВНИИЭКиТУ. – 1969. – Вып. 6.
52. Коргушов А. С. Динамика процесса пиления на легких лесопильных рамах: Изв. вузов. Лесн. журн. – 1973. – № 3. – С. 75–78.

53. Коргушов А. С. Взаимосвязь уклона пил с посылкой в лесорамах с непрерывной подачей // Изв. вузов. Лесн. журн. – 1973. – № 6. – С. 96–100.

54. Курицын В. Н. Особенности резания мерзлой древесины // Лесн. пром-сть. – М., 1981. – 105 с.

55. Королев И. Ю. Обоснование основных параметров узла резания лесопильной рамы с нерастянутыми пилами, совершающим движение в направляющих: Дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / Львовский лесотехн. ин-т. – Архангельск, 1986. – 254 с.

56. Лейхтлинг К. А., Сморгон Л. С. К вопросу определения удельной работы пиления и усилий резания на лесопильных рамах // Сб. тр. / СибНИИЛП. – Красноярск, 1967. – № 6.

57. Линьков А. В., Головачев А. П., Шабалин Л. А., Белошейкин В. С. Новая тарная лесопильная рама // Деревообраб. пром-сть. – 1988. – № 2. – С. 3–6.

58. Моисеев А. В. Экспериментальные исследования сил при рамном пилении // Науч. тр. БТИ. Минск, 1963. – Серия МТД. – С. 33–40.

59. Моисеев А. В. Износостойкость дереворежущего инструмента. – М.: Лесн. пром-сть, 1981. – 112 с.

60. Орлов М. Н. Режимы рамного пиления. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1951.

61. Остроумов И. П. Резервы повышения эффективности рамного пиления // Деревообр. пром-сть. – М., 1989. – № 7. – С. 1–3.

62. Остроумов И. П., Дерягин Р. В. Резервы роста производительности рамного пиления // Межвуз. сб. науч. тр. ЛЛТА им. Кирова. Технология и оборудование деревообрабатывающих производств. – Л., 1979. – С. 12–15.

63. Прокофьев Г. Ф. Интенсификация пиления древесины рамными и ленточными пилами. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 240 с.

64. Прокофьев Г. Ф. Пути повышения эффективности рамного пиления. Обзор информ. – М.: ВНИПИЭИлеспром, 1933. – 33 с.

65. Прокофьев Г. Ф., Иванкин И. И., Казанцев В. А. Повышение качества пиления древесины на лесопильных рамах: Монография / Под ред. Г. Ф. Прокофьева; Федеральное агентство по образованию; Архангельский гос. технический ун-т. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. – 191 с.

66. Прокофьев Г. Ф., Иванкин И. И. Повышение эффективности пиления древесины на лесопильных рамах и ленточнопильных

станках: Монография / Под ред. Г. Ф. Прокофьева; Федеральное агентство по образованию; Архангельский гос. технический ун-т. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2009. – 379 с.

67. Прокофьев Г. Ф., Микловцик Н. Ю. Пиление древесины на лесопильных рамах и повышение его эффективности в вопросах и ответах / М-во образования и науки Российской Федерации; Северный (Арктический) федеральный ун-т. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный ун-т, 2011. – 142 с.

68. Руководящие, технические материалы (РТМ) по определению режимов пиления (посылок) бревен и брусьев хвойных и лиственных пород на лесопильных рамах. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1987. – 33 с.

69. Рыкунин С. Н., Кандалина Л. Н. Технология деревообработки: Учеб. – М.: Академия, 2005. – 352 с.

70. Соболев И. В. О взаимосвязи между точностью распиловки и силами, действующими на рамные пилы // Науч. тр. / ЦНИИМОД. – Архангельск. 1968. – Вып. 22. – С. 243–245.

71. Соболев И. В. Статистический контроль качества рамной распиловки. – М.: Лесн. пром-сть. – М., 1971. – 104 с.

72. Суродейкин Н. Н. Кинематика лесопильной рамы / Архангельский лесотехн. ун-т. – Архангельск, 1939.

73. Тимонен С. М. О взаимосвязи износа и затупления зубьев пил от угловых параметров // Лесн. бумаж. и деревообраб. пром-сть. – Киев, 1971. – Вып. 8.

74. Тухерм Д. А., Головачев А. П., Полынский В. В., Гладкий В. И. Исследование влияния различных факторов на показатели работы лесопильной рамы // Тр. Латв. С.-х. акад. – 1978. – № 163. – С. 17–20.

75. Тюрин А. М. Определение основных эксплуатационных показателей лесопильного станка с полосовыми нерастянутыми пилами: Дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. – Архангельск, 2013. – 132 с.

76. Фергин В. Р. Интенсификация процессов пиления древесины. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть. 1988. – 144 с.

77. Филькевич В. Я. Динамика лесопильных рам. – М.: Лесн. пром-сть, 1968. – 244 с.

78. Фонкин В. Ф. Изыскание путей совершенствования конструкции лесопильных рам // Труды ВНИИДМАШ. – 1964. – Вып. 2. – 64 с.

79. Фонкин В. Ф. Лесопильные рамы и околорамное оборудование. – М.: Лесн. пром-сть, 1970. – 200 с.

80. Фонкин В. Ф. Лесопильные станки и линии. – М.: Лесн. пром-сть, 1979. – 320 с.

81. Экспериментальные исследования сил резания в двухэтажных лесопильных рамах серийных конструкций / С. М. Хасдан, В. А. Коновалов, Ф. И. Зыков, Ю. М. Поткин // Труды ЦНИИМОД. – Архангельск, 1965. – Вып. 18.

82. Хасдан С. М., Худокуев З. С. Интенсификация рамного пиления путем синхронизации механизмов резания и подачи // Деревообр. пром-сть. – 1976. – № 1. – С. 5–7.

83. Чебураков М. Н. Новые конструкции лесопильных рам // Деревообр. пром-сть – 1938. – № 9. – С. 2–3.

84. Шабалин Л. А., Виноградов В. Ф., Кливер В. И. и др. Исследование и совершенствование конструкций лесопильных рам // Изв. вузов. Лесн. журн. – 1960. – С. 60–64.

85. Шабалин Л. А. и др. Влияние траектории движения пил на производительность лесопильных рам // Деревообраб. пром-сть. – М., 1986. – № 1. – С. 4–6.

86. Шабалин Л. А., Царев О. Н., Виноградов В. Ф. и др. Двухточечный привод механизма резания // Деревообр. пром-сть. – М., 1990.

87. Тунелл Б. Успехи в изучении процесса резания дерева // Holz als Roh-und Werkstoff. – 1955. – № 1.

88. Кивимаа Е. Усилие резания при пилении на лесопильных рамах / Пер. Саковской. – Рараie ju Рuu. – 1959. – № 1.

89. А.с.982906 СССР, МКИ³ В27В 3/12. Привод лесопильной рамы / А. И. Агапов /СССР/. – № 3291023/29-15; Заявлено 13.05.81. Оpubл. 23.12.82, Бюл. № 47.

90. А.с.1016711 СССР, МКИ³ В27В 5/16. Устройство для измерения сил резания при пилении на лесопильных рамах / А. И. Агапов /СССР/. – № 3262755/18-10; Заявлено 18.03.81; Оpubл. 07.05.83, Бюл. № 17.

91. А.с.1055640, СССР, МКИ³ В27В 3/10. Механизм резания лесопильной рамы / А. И. Агапов /СССР/. – № 3448416 /29-15; Заявлено 03.06.8. Оpubл. 23.11.83, Бюл. № 43.

92. А.с.1068282 СССР, МКИ³ В27В 3/12. Механизм резания лесопильной рамы / А. И. Агапов /СССР/. – № 3463752/29-15; Заявлено 30.04.82; Оpubл. 23.01.84, Бюл. № 3.

93. А.с.1084126 СССР, МКИ³ В27В 3/00. Лесопильная рама / А. И. Агапов /СССР/. – № 3483949/29-15; Заявлено 12.08.82; Оpubл. 07.04.84, Бюл. № 13.

94. А.с.1085814 СССР, МКИ³ В27В 3/00. Лесопильная рама / А. И. Агапов, А. П. Новоселов /СССР/. – № 3503826/29-15; Заявлено 26.10.82; Оpubл. 15.04.84, Бюл. № 14.
95. А.с.1129071 СССР, МКИ³ В27В 3/10. Лесопильная рама А. И. Агапов, А. П. Новоселов /СССР/. – № 3530729/29-15; Заявлено 24.12.82; Оpubл. 15.12.84, Бюл. № 46.
96. А.с.1133087 СССР, МКИ⁴ В27В 3/10. Лесопильная рама / А. И. Агапов /СССР/. – № 3572066/29-15; Заявлено 01.04.83; Оpubл. 07.01.85, Бюл. № 1.
97. А.с.1134367 СССР, МКИ⁴ В27В 3/12. Лесопильная рама / А. И. Агапов /СССР/. Оpubл. 15.01.85, Бюл. № 2.
98. А.с.1140947 СССР, МКИ⁴ В27В 3/10. Лесопильная рама (ее варианты) / А. И. Агапов /СССР/. – № 3637194/3656336/29-15; Заявлено 30.08.83; Оpubл. 23.02.85, Бюл. № 7.
99. А.с.1189679 СССР, МКИ⁴ В27В 3/12. Лесопильная рама / А. И. Агапов /СССР/. – № 3738456/29-15; Заявлено 04.05.84; Оpubл. 07.11.85, Бюл. № 41.
100. А.с.1308469 СССР, МКИ⁴, В27В 3/10. Лесопильная рама / А. И. Агапов /СССР/. – № 3989585/29-15; Заявлено 13.12.85; Оpubл. 07.05.87, Бюл. № 17.
101. А.с.1380942 СССР, МКИ⁴, В27В3/14. Лесопильная рама / А. И. Агапов /СССР/. – № 3989586 /29-15; Заявлено 13.12.85; Оpubл. 15.03.88, Бюл. № 10.
102. А.с.1393638 СССР, МКИ⁴, В27В 3/16. Механизм подачи лесопильной рамы / А. И. Агапов, Ю. П. Шиврин /СССР/. – № 4153853/29-1. Заявлено 28.11.86. Оpubл. 07.05.88, Бюл. № 17.
103. А.с.1518119 СССР, МКИ⁴, В27В 3/12. Лесопильная рама / А. И. Агапов /СССР/. – № 4382414/23-15; Заявлено 23.02.88; Оpubл. 30.10.89, Бюл. № 40.
104. А.с.1556900 СССР, МКИ⁴, В27В 3/30. Натяжное устройство для рамных пил / А. И. Агапов /СССР/. – М342700/23-15; Заявлено 14.12.87; Оpubл. 15.04.90, Бюл. № 14.

Научное издание

Агапов Александр Иванович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ПИЛЕНИЯ
НА ЛЕСОПИЛЬНЫХ РАМАХ

Монография

Корректор *Ю. Н. Болдырева*
Компьютерная верстка *Л. А. Кислицына*

Подписано в печать 02.07.2018 г.

Формат 60×84/16.

Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 18,6.

Тираж 500 экз.

Заказ № 5024.

Научное издательство Вятского государственного университета
610000, г. Киров, ул. Московская, 36
www.vestnik43.ru, www.vyatsu.ru
Тел. 20-89-64

Отпечатано в центре полиграфических услуг
Вятского государственного университета,
610000, г. Киров, ул. Московская, 36