

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

Ю.В. Родионов, М.Ю. Обшивалкин

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОЧИСТКИ
СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ
ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ**

Пенза 2015

УДК 658.011.46:621.9 .079:621.829.029

ББК 03

Р60

Рецензент – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования» Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии им. П.А. Столыпина В.А. Китаев

Родионов Ю.В.

Р60 **Повышение эффективности систем очистки смазочно-охлаждающих жидкостей при механической обработке деталей: моногр. / Ю.В. Родионов, М.Ю. Обшивалкин. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 168 с.**

ISBN 978-5-9282-1252-0

В монографии рассмотрены: возможности повышения эффективности операций механической обработки заготовок путем очистки смазочно-охлаждающих жидкостей от механических примесей, влияние чистоты СОЖ на эффективность технологических линий механической обработки заготовок, представлены результаты экспериментальных исследований влияния загрязнения смазочно-охлаждающих жидкостей механическими примесями на эффективность операций лезвийной обработки заготовок.

Монография подготовлена на кафедре «Эксплуатация автомобильного транспорта» и предназначена для специалистов автотранспортного комплекса и студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров 23.03.03 и 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

ISBN 978-5-9282-1252-0

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2015

© Родионов Ю.В., Обшивалкин М.Ю., 2015

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И СИМВОЛОВ

ГСО – групповая система очистки.

ИСО – индивидуальная система очистки.

ОДЗ – область допустимых значений.

СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость.

СП – система применения.

ТЛ – технологическая линия.

ЦСО – централизованная система очистки.

A_T – годовая программ выпуска изделий, шт.

A_i – абсолютный критерий эффективности.

B – количество бракованных деталей, шт.

V – количество годных деталей, шт.

E_n – коэффициент нормативной окупаемости, (руб./год)/руб.

Z – приведенные затраты, руб.

K – капитальные вложения на операцию, руб.

Критерии технологической эффективности, определяющие изменения по сравниваемым вариантам:

K_B – вспомогательного времени,

$K_{ж}$ – расхода или стоимости СОЖ,

K_M – машинного времени,

K_N – потребляемой мощности,

K_{Ra} – среднего арифметического отклонения профиля,

K_{ω} , $K_{\omegaф}$, $K_{\omegaр}$ – соответственно изменение фактической погрешности линейных размеров, формы и взаимного расположения поверхностей,

K_{θ} – контактной температуры,

K_T – периода стойкости режущего инструмента.

$K_{ш}$ – коэффициент шлифования.

M_p – момент резания при сверлении, Н·м.

O_i – относительный критерий эффективности.

C – концентрация механических примесей в СОЖ, г/л.

$C_{бр}$ – затраты, связанные с появлением брака на операции, руб.

C_T – себестоимость годового количества заготовок, руб.

$C_{заг}$ – стоимость заготовки, руб.

$C_{и}$, C_o – соответственно концентрация механических примесей в СОЖ до очистки (исходная) и после очистки (остаточная), г/л.

C_n – степень наклепа, %.

C_T – технологическая себестоимость обработки заготовки на операции, руб.

T_B – вспомогательное время, мин.

T_L – такт работы технологической линии, мин.

T_M – машинное время, мин.

$T_{орг}$ – время организационного обслуживания, мин.

$T_{отд}$ – время отдыха рабочего, мин.
 $T_{тех}$ – время технического обслуживания, мин.
 $T_{шт}$ – штучное время, мин.
 $\Phi_{д.о}$ – годовой фонд времени оборудования, ч.
 $\Phi_{д.р}$ – годовой фонд рабочего времени, ч.
 $\mathcal{E}_г$ – годовой экономический эффект, руб.
 d – размер частицы механических примесей, мкм.
 \bar{d} – средний размер частиц механических примесей, мкм.
 $d_{и}, d_{о}, d_{у}$ – соответственно размер частицы механических примесей до (исходной), после очистки (оставшейся) и удаленной из СОЖ, мкм.
 d_{ϵ} – размер частицы механических примесей, удаляемых очистителем, мкм.
 F – критерий Фишера.
 f_L – погрешность геометрической формы обработанной детали (поверхности) в продольном сечении, мкм.
 f_R – погрешность геометрической формы детали в поперечном сечении, мкм.
 H_{μ} – микротвердость, МПа
 h_3 – износ режущего инструмента по задней поверхности, мм.
 h_{μ} – глубина наклепа, мкм.
 N_y – установленная мощность, кВт.
 $N_{уд}$ – удельная мощность шлифования на единицу объема удаленного материала, (кВт · с)/мм³.
 $N_{шт}$ – мощность шлифования, кВт.
 N_{ϵ} – эффективная мощность, кВт.
 n – частота вращения, мин⁻¹.
 $P_{ди}, P_{до}, P_{ду}$ – соответственно функции распределения частиц механических примесей по размерам до и после очистки СОЖ и удаленных из СОЖ.
 $P_{уд}$ – удельная сила шлифования, Н/мм.
 P_y, P_z – соответственно радиальная и касательная силы резания, Н.
 $p(d)$ – плотность вероятности.
 Q_a – расход шлифовального круга, мм³/мин.
 $Q_{ж}$ – расход СОЖ, м³/ч.
 Q_m – режущая способность шлифовального круга, мм³/мин.
 R – коэффициент корреляции.
 R^2 – коэффициент регрессии.
 S_m – скорость подачи, мм/мин.
 S_o – подача на оборот, мм/об.
 $t_{п}$ – глубина резания, мм.
 t_s – критерий Стьюдента.
 V – скорость резания, м/мин.
 $V_{свр}$ – скорость врезной подачи, мм/мин.
 z – число режущих кромок инструмента, шт.
 α – задний угол инструмента, град.

$\alpha_{\text{КС}}$ – уровень значимости Колмогорова-Смирнова.

γ – передний угол инструмента, град.

$\Delta_{\text{кр}}$ – отклонение от круглости, мкм.

Δ_d – изменение диаметра отверстия, мм.

ε – степень очистки, %.

$\bar{\varepsilon}$, ε_d – соответственно степень очистки средняя и по размеру d , %.

$\theta_{\text{п}}$ – контактная температура, °С.

σ – среднее квадратическое отклонение размеров частиц, мкм.

σ' , σ'' – остаточные напряжения 1 и 2 рода, МПа.

$\sigma_{\text{и}}$, $\sigma_{\text{о}}$, $\sigma_{\text{у}}$ – соответственно среднее квадратическое отклонение размеров до и после очистки и удаленных из СОЖ, мкм.

τ – время, мин.

$\tau_{\text{с}}$ – период стойкости режущего инструмента, мин.

Φ – функция Лапласа.

φ , φ_1 – соответственно главный и вспомогательный углы в плане режущего инструмента, град.

φ_{Ra} – коэффициент отношения фактического значения к требуемому значению среднего арифметического отклонения профиля.

φ_{ω} , $\varphi_{\omega\phi}$, $\varphi_{\omega\rho}$ – соответственно коэффициент отношения погрешности к допуску линейного размера, формы и взаимного расположения поверхностей.

φ_{θ} – коэффициент отношения фактической и расчетной контактной температуры.

χ^2 – критерий согласия.

ω , ω_{ϕ} , ω_{ρ} – соответственно погрешность линейного размера, формы и взаимного расположения поверхностей, мкм.

$\omega_{\text{к}}$ – угол наклона винтовой канавки, град.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач современного машиностроения является выпуск высококачественной и конкурентноспособной продукции. Значительная роль при этом отводится повышению эффективности операций механической обработки заготовок, выполняемых, как правило, с применением смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ).

В процессе эксплуатации СОЖ загрязняется механическими примесями, негативно влияющими на ее функциональные свойства и ухудшающими, в конечном итоге, технико-экономические показатели операций механической обработки заготовок. Очистка СОЖ от механических примесей требует значительных затрат, часто соизмеримых с затратами на механическую обработку, особенно на финишных операциях технологического процесса изготовления деталей.

Номенклатура выпускаемых в России и за рубежом устройств и систем очистки СОЖ достаточно широка, однако в научно-технической литературе отсутствуют четкие и аргументированные рекомендации по выбору очистителя для конкретной операции механической обработки заготовок. Не решен вопрос проектирования систем очистки СОЖ от механических примесей для обслуживания различных по видам обработки и технологическому оснащению операций и линий механической обработки, которые обеспечили бы минимум суммарных затрат на технологический процесс, выполняемый с применением СОЖ.

Стремление к повышению эффективности технологических линий механической обработки выдвигает задачу разработки методики оценки эффективности систем очистки СОЖ от механических примесей, обслуживающих технологические линии, состоящие из различных операций.

Целью данной работы является обобщение теоретического и практического материала, полученного в результате экспериментов, проведенных под руководством авторов в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства и Ульяновском государственном техническом университете.

Авторы будут благодарны за возможные замечания и предложения и просят направлять свои отзывы и пожелания по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Г.Титова, 28, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, кафедра «Эксплуатация автомобильного транспорта». Тел. (8412) 49-83-30, факс (8412) 49-72-77, E-mail: dekauto@pguas.ru.

1. ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ПУТЕМ ОЧИСТКИ СОЖ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

1.1. Влияние загрязнения СОЖ механическими примесями на производительность механической обработки и качество деталей

Как теперь общепризнанно, смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) является неотъемлемым элементом технологического обеспечения операций обработки заготовок резанием, оказывая непосредственное и часто существенное влияние на производительность и качество обработанных деталей [36, 38, 48, 62, 65, 72, 73, 77 и др.] путем реализации комплекса функциональных свойств – смазочного, охлаждающего, диспергирующего, моющего и демпфирующего. В процессе эксплуатации функциональные свойства СОЖ ухудшаются под действием большого числа возмущающих факторов. Изучению факторов, влияющих на эффективность применения СОЖ на операциях механической обработки заготовок, посвящено много работ [3, 16, 17, 28, 36, 37, 48, 54, 55, 62, 77, 79-81, 85-90 и др.]. Отмечено, что основными факторами, влияющими на эффективность применения СОЖ определенного состава, являются: механические примеси, посторонние масла и бактерии, содержащиеся в СОЖ; тепловые, разнообразные физико-механические и химические воздействия на СОЖ, находящуюся в системе ее применения. Также установлено, что изменение функциональных свойств СОЖ в процессе ее эксплуатации приводит к ухудшению технико-экономических показателей операций механической обработки (рис. 1.1).

Известно, что наиболее сильное негативное влияние на функциональные свойства СОЖ оказывают механические примеси, попадающие в нее в процессе обработки [3, 16, 17, 28, 54, 55, 57, 60, 88, 90]. Это приводит к ухудшению качества обработанных деталей (или заготовок), ускорению износа режущего инструмента (уменьшению периода его стойкости), увеличению энергозатрат (сил и мощности резания), что в конечном счете вызывает увеличение затрат на выполнение операций механической обработки.

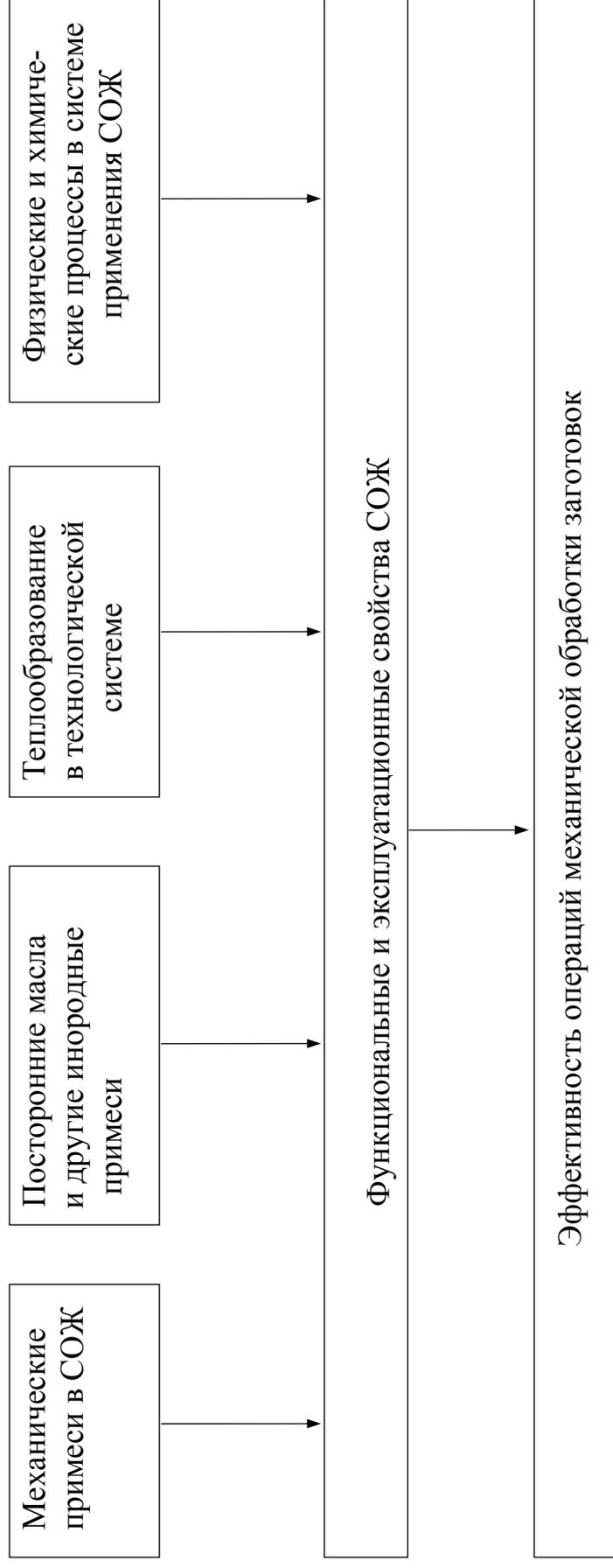


Рис. 1.1. Схема влияния возмущающих факторов на свойства СОЖ и эффективность операций механической обработки

Так исследованиями [3, 17, 28, 54] установлено, что присутствие в СОЖ механических примесей интенсифицирует износ абразивного круга, что в свою очередь приводит к снижению точности геометрической формы деталей в продольном f_L и поперечном f_R сечениях (рис. 1.2) и увеличению шероховатости обработанной поверхности (рис. 1.3). При обследовании действующего производства 4 ГПЗ и 23 ГПЗ [3] выявлено, что увеличение концентрации механических примесей в СОЖ вызывает усиленное затупление и засаливание абразивных кругов, что в свою очередь ведет к увеличению выпуска бракованной продукции Б по критерию прижогообразования и соответствующему снижению выпуска годной продукции В (рис. 1.4) [3]. Уменьшение производительности абразивной обработки при увеличении концентрации механических примесей в СОЖ вызвано необходимостью снижения скорости врезной подачи $V_{Свр}$, чтобы избежать образования прижогов и увеличения шероховатости (рис. 1.5).

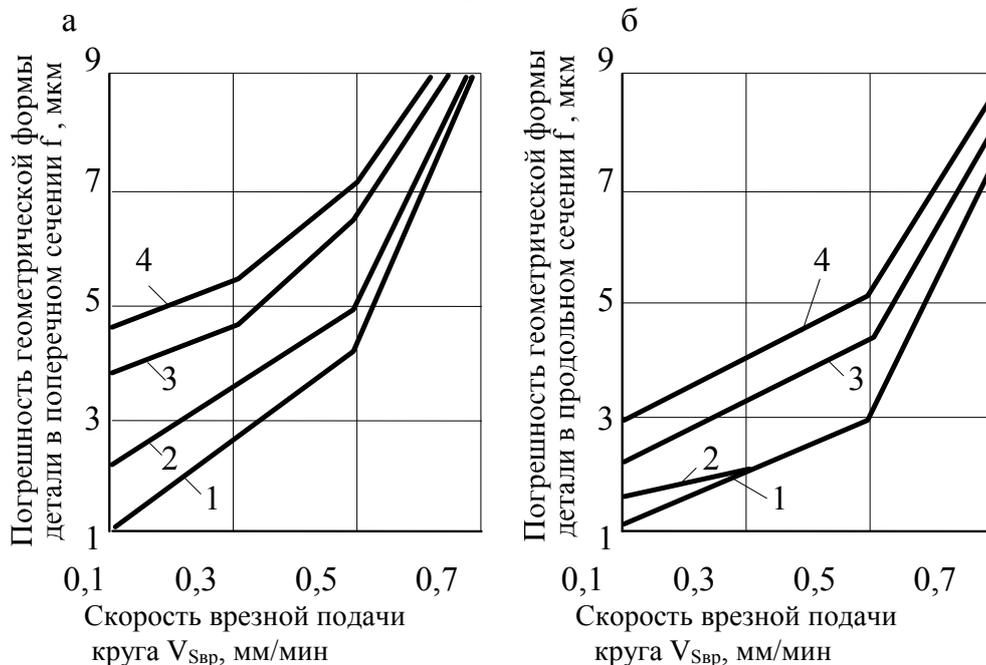


Рис. 1.2. Влияние концентрации C механических примесей, содержащихся в СОЖ, на точность геометрической формы шлифованных деталей из стали 45, HRC, 45...48 в поперечном (а) и продольном (б) сечениях; шлифовальный круг 24A16HC17K5;
1, 2, 3, 4 – соответственно $C = 0; 0,05; 0,1; 0,2$ г/л [17]

Очистка СОЖ от механических примесей приводит к существенному повышению эффективности операций обработки заготовок резанием как абразивными [3, 16, 17, 28, 52-60, 85-90], так и лезвийными инструментами [37, 48, 73, 78-81, 107]. Это обстоятельство часто недооценивают, полагая, что тщательная очистка СОЖ необходима только на операциях абразивной обработки, являющихся, как правило, заключительными в технологическом процессе механической обработки заготовок и формирующих выходные характеристики качества деталей.

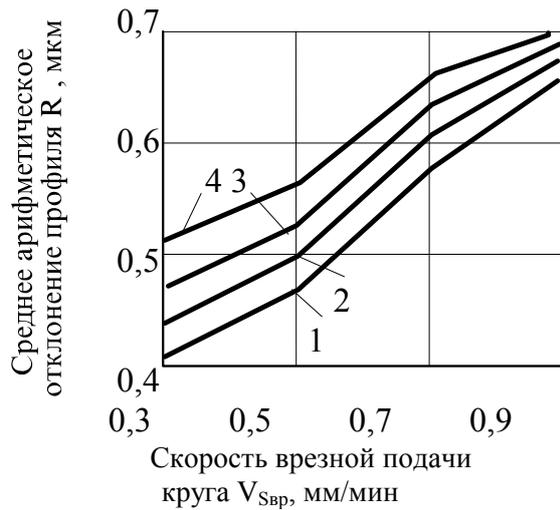
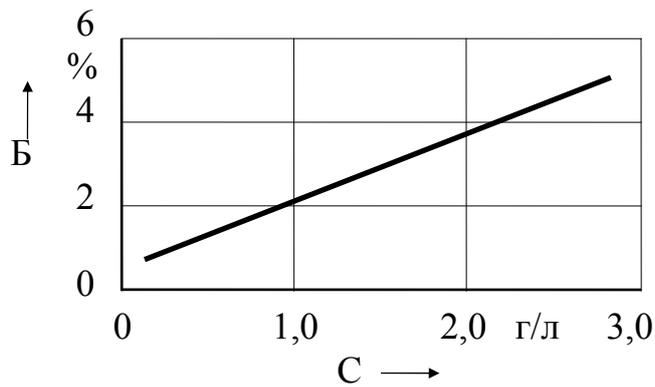


Рис. 1.3. Влияние концентрации C механических примесей, содержащихся в СОЖ, на шероховатость поверхностей деталей из стали 45, HRC, 45...48 шлифованных кругом 24A16HC17K5; 1, 2, 3, 4 – соответственно $C=0; 0,05; 0,1; 0,2$ г/л [17]

а



б

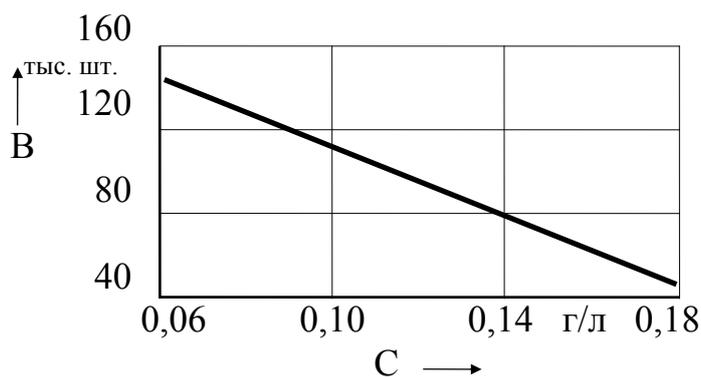


Рис. 1.4. Влияние концентрации C механических примесей, содержащихся в СОЖ, на выпуск бракованной продукции B на всех операциях шлифования колец подшипников на 4 ГПЗ (а) и на суточный выпуск колец подшипников B на операциях круглого внутреннего шлифования на 23 ГПЗ (б) [3]

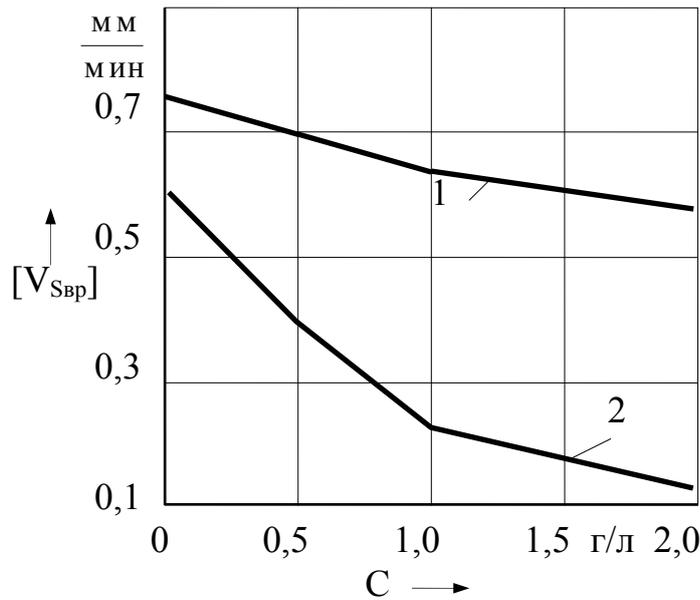


Рис. 1.5. Зависимость допустимой скорости врезной подачи $[V_{свр}]$ от концентрации C механических примесей в СОЖ при круглом наружном шлифовании заготовок из стали ШХ15, HRC₃, 62...64 кругом 24A25HC17K5: 1 – по критерию $R_a = 0,5$ мкм; 2 – по критерию прижообразования [3]

Очистка СОЖ от механических примесей приводит к существенному повышению эффективности операций обработки заготовок резанием как абразивными [3, 16, 17, 28, 52-60, 85-90], так и лезвийными инструментами [37, 48, 73, 78-81, 107]. Это обстоятельство часто недооценивают, полагая, что тщательная очистка СОЖ необходима только на операциях абразивной обработки, являющихся, как правило, заключительными в технологическом процессе механической обработки заготовок и формирующих выходные характеристики качества деталей.

Между тем, проведенными за рубежом исследованиями [78, 107] установлено, что, например, оснащение фрезерных станков фильтрующими устройствами приводит в ряде случаев к повышению стойкости фрез в среднем в 5–10 раз, при этом скорость резания можно увеличить в 2 раза, а подачу – до 1,5 раз. Оснащение станков для глубокого сверления фильтрами, очищающими СОЖ от частиц размером более 10 и 2 мкм, обеспечило повышение стойкости сверл, соответственно, до 5000 и 13500 обработанных между переточками отверстий. На многошпиндельных станках очистка СОЖ способствовала увеличению стойкости сверл с внутренним охлаждением в 2 раза, а разверток, расточных и фасонных резцов, непереключаемых многогранных пластинок – в 1,4–1,8 раза. Одновременно шероховатость обработанной поверхности уменьшилась на 20%, а заточные работы сократились на 55%. При проведении аналогичных исследований на Ульяновском автомобильном заводе [10] было установлено, что с уменьшением концентрации механических примесей, попадающих вместе с СОЖ в зону течения, снижается износ резцов и соответственно увеличивается период их стойкости τ_c . Это в свою очередь ведет к снижению

времени, затрачиваемого на наладку оборудования, и увеличению сменной наработки деталей B (рис. 1.6).

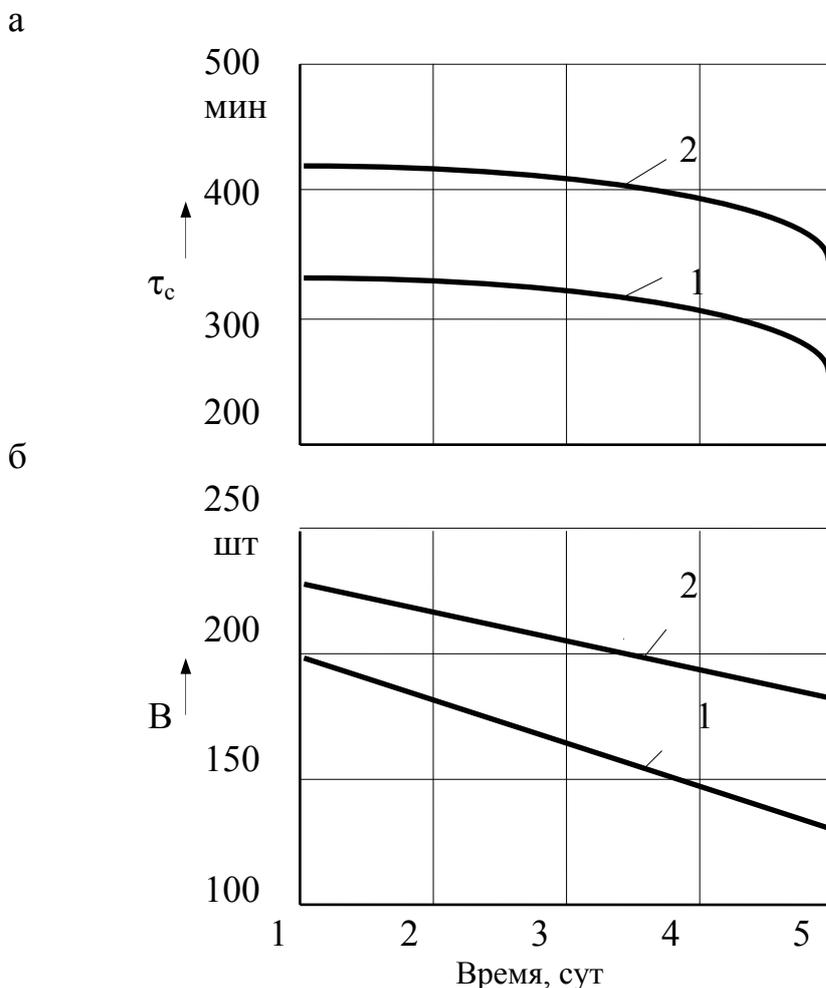


Рис. 1.6. Влияние концентрации C механических примесей в СОЖ на период стойкости τ_c токарных резцов (а) и суточный выпуск продукции B (б):
1, 2 – соответственно $C=0,2; 0,1$ г/л [10]

Существенное влияние на эффективность обработки резанием оказывает не только изменение концентрации C , но и размера \bar{d} частиц механических примесей, содержащихся в СОЖ. По данным работ [10, 78, 107] при тонкости очистки СОЖ от механических примесей до (100...120) мкм период стойкости лезвийного инструмента увеличивается в 1,2–2 раза, а при тонкости очистки до (2,5...10) мкм – в 2–5 раз. В работе [17] исследовано влияние среднего размера \bar{d} частиц механических примесей на силы и мощность шлифования и расход абразивных кругов. Выявлено, что с увеличением \bar{d} удельная сила $P_{уд}$ и удельная мощность шлифования $N_{уд}$, а также и расход абразивных кругов Q_a изменяются по экспоненциальной зависимости (рис. 1.7).

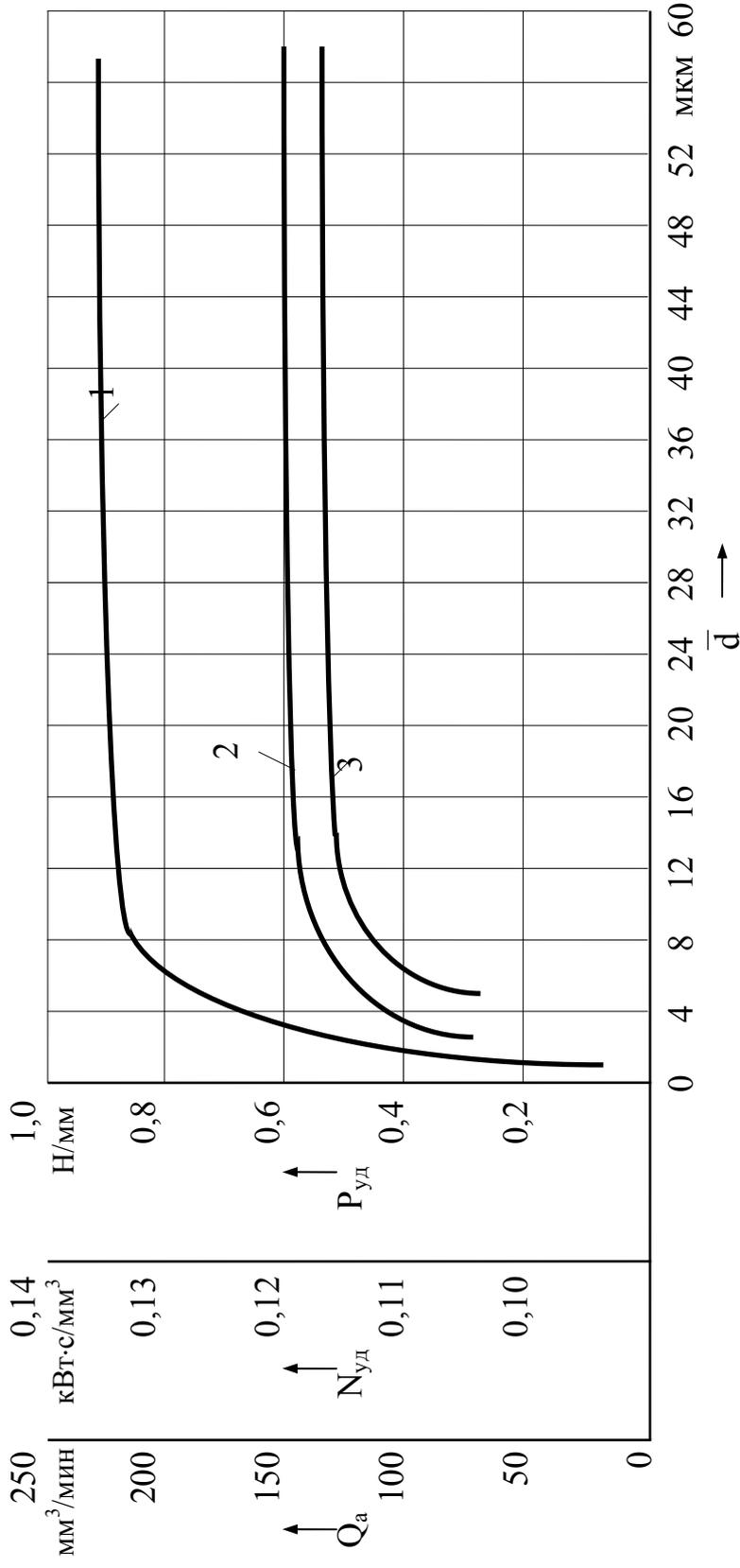


Рис. 1.7. Влияние среднего размера частиц \bar{d} механических примесей на изменение удельной силы $P_{уд}$ (1), удельной мощности шлифования $N_{уд}$ (2), расхода шлифовального круга Q_a (3): $C = 1 \text{ г/л}$ [17]

Гранулометрический состав механических примесей характеризуют еще одним параметром – средним квадратическим отклонением σ (или дисперсией σ^2) размеров частиц. Установлено [28], что σ существенно влияет на шероховатость и точность геометрической формы обработанной поверхности (рис. 1.8).

Для устранения или заметного снижения негативного влияния механических примесей СОЖ очищают, обеспечивая тем самым требуемые качество и производительность обработки [3, 16, 17, 28, 37, 52-58, 79-81, 86, 87].

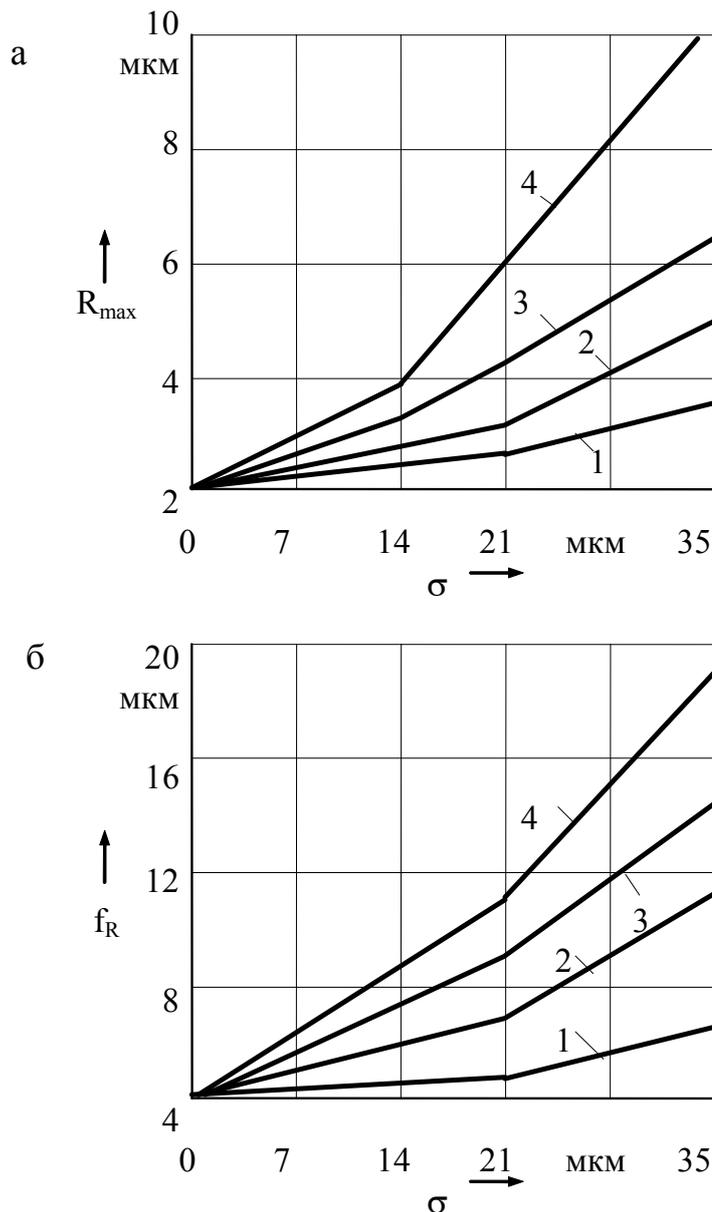


Рис. 1.8. Влияние среднего квадратического отклонения размера частиц механических примесей σ и их концентрации C на наибольшую высоту неровностей профиля R_{max} (а), точность формы шлифованных поверхностей в поперечном сечении f_R (б); материал заготовок – сталь ШХ15, HRC, 62...65; круг 24A16HSM17K5;

1, 2, 3, 4 – соответственно $C = 0,12; 0,4; 0,6; 0,8$ г/л [28]

1.2. Современные способы и техника очистки СОЖ от механических примесей. Основные принципы разработки и выбора систем очистки, нормирование чистоты СОЖ

Современные системы применения (СП) СОЖ полного состава включают следующие основные подсистемы: приготовления и аккумуляции СОЖ; транспортирования СОЖ к станкам; активации СОЖ; подачи СОЖ в зону обработки; сбора загрязненной СОЖ от станков; очистки СОЖ от механических и жидкостных примесей; диагностики СОЖ и управления ее составом; аккумуляции, обеззараживания, разложения и утилизации отработанной СОЖ. В любом случае, даже упрощенные системы применения СОЖ содержат подсистемы ее очистки, причем эти последние являются наиболее сложными по конструкции, материало- и энергоемкими по сравнению с другими системами.

Большинство систем применения СОЖ, разработанных в 70-80-е годы, как групповые и централизованные, так и индивидуальные, имеют в своем составе многоступенчатые подсистемы очистки СОЖ и отдельные устройства подачи СОЖ на металлорежущих станках. Такие СП можно квалифицировать как системы очистки. Этот термин мы и будем использовать в дальнейшем.

Простая одноступенчатая система очистки СОЖ имеет элементный состав, показанный на рис. 1.9 [52].

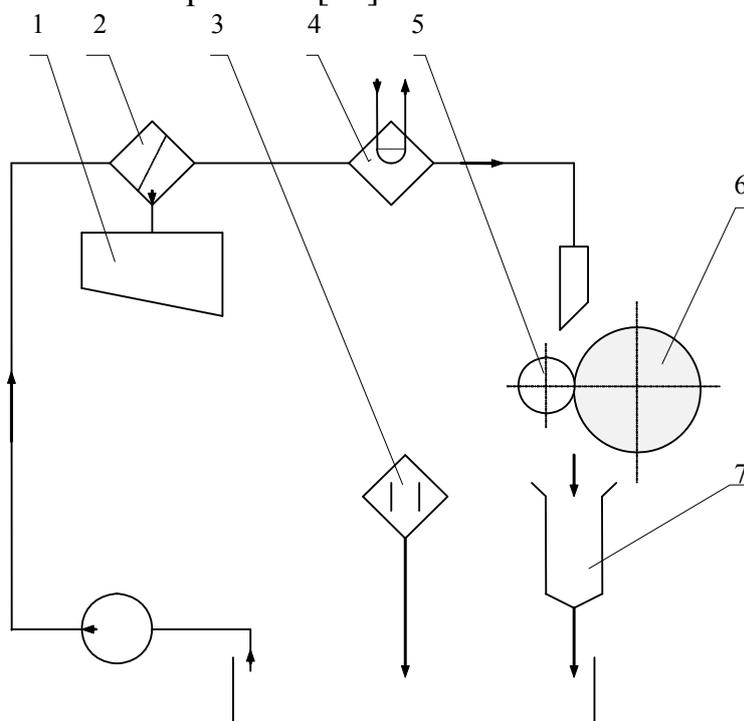


Рис. 1.9. Состав типовой одноступенчатой системы очистки СОЖ: 1 – устройство обезвоживания шлама; 2 – очиститель; 3 – устройство дозированного пополнения компонентов СОЖ; 4 – устройство термостабилизации; 5 – обрабатываемая заготовка; 6 – инструмент; 7 – устройство отделения горячей стружки от СОЖ [52]

На выбор способа очистки СОЖ от механических примесей и устройства очистки (очистителя) влияют следующие основные факторы: вид обработки заготовки резанием; материал обрабатываемой заготовки; режимы резания; требования к качеству обработанной детали или заготовки (точность геометрической формы, волнистость, шероховатость, качество поверхностного слоя и др.); состав и расход СОЖ; условия эксплуатации СОЖ; санитарно-гигиенические требования и др. Гранулометрический состав механических примесей (\bar{d}, σ) зависит от сочетания перечисленных факторов. Например, кривая 1 на рис. 1.10 [12] резко отличается от кривой 4, хотя обе они относятся к обработке заготовок из одной и той же стали.

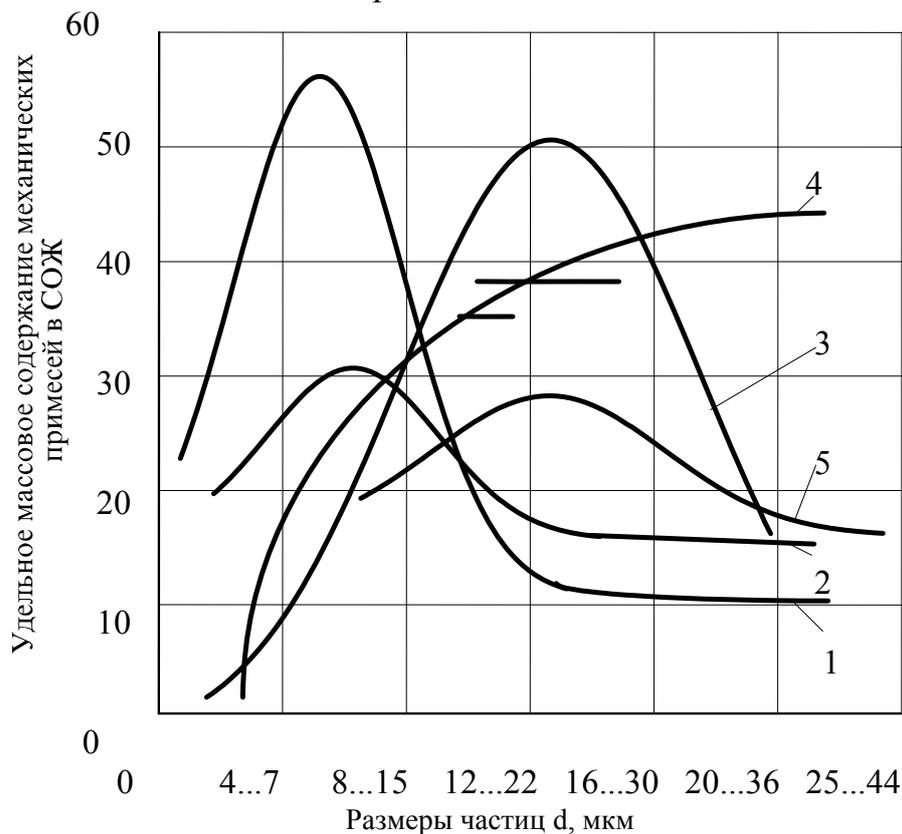


Рис. 1.10. Гранулометрический состав механических примесей в различных условиях обработки:

- 1 – шлифование торцем круга стальных заготовок; 2 – хонингование заготовок из чугуна; 3 – круглое наружное шлифование стальных заготовок с централизованной системой применения СОЖ; 4 – резбошлифование стальных заготовок; 5 – внутреннее шлифование стальных заготовок [12]

Известны различные способы и техника очистки СОЖ от механических примесей (рис. 1.11, табл. 1.1). Перечисленные в табл. 1.2 устройства очистки обеспечивают, естественно, различные степень и тонкость очистки СОЖ, оказывая тем самым влияние на производительность и качество обработки заготовок (рис. 1.12 [69]).



Рис. 1.11. Способы и техника очистки СОЖ от механических примесей

Т а б л и ц а 1.1
Преимущества и недостатки устройств очистки СОЖ [113]

Устройство очистки	Преимущества	Недостатки
1	2	3
Система аэрации	1. Совмещение с отстаиванием для удаления мелких и крупных частиц	1. Не удаляет крупные частицы 2. Не удаляет посторонние масла 3. Длительность процесса
Пеносниматель	1. Удаляется масляная плёнка 2. Низкая стоимость	1. Не удаляет масло, растворенное в эмульсии 2. Не удаляет тонкодисперсные частицы
Центрифуга	1. Удаляет все масла и другие примеси	1. Высокая стоимость 2. Ограниченная производительность 3. Высокая энергоёмкость
Безнапорный фильтр	1. Простота конструкции 2. Низкая стоимость 3. Улучшенная компоновка	1. Высокие эксплуатационные расходы 2. Высокая стоимость фильтроматериалов
Гидроциклон	1. Автоматическое удаление шлама 2. Низкая стоимость 3. Небольшие габаритные размеры 4. Отсутствие подвижных деталей	1. Не удаляет масло 2. Большая энергоёмкость 3. Засоряется при удалении больших частиц

Окончание табл. 1.1

1	2	3
Магнитный сепаратор	1. Простота конструкции 2. Низкая стоимость 3. Компактность	1. Не удаляет масло 2. Не удаляет частицы размером менее 30 мкм 3. Абразивные частицы необходимо направлять в отстойник
Напорный фильтр	1. Автоматическая смена фильтроматериала	1. Высокая стоимость фильтроматериалов 2. Относительно дорогостоящий 3. Удаление фильтроматериалов с осадком
Отстойник	1. Простая конструкция 2. Низкая стоимость 3. Немеханическая система	1. Медленный процесс 2. Не удаляются мелкие частицы 3. Значительные размеры в плане
Вакуумный фильтр	1. Удаляет мелкие частицы 2. Большая производительность	1. Высокая стоимость фильтроматериалов 2. Удаление фильтроматериалов с осадком 3. Возможно закупоривание фильтроматериала

В настоящее время, особенно в условиях массового и крупносерийного производства, на одной технологической линии производят обработку заготовок резцами, фрезами, зенкерами, развертками и другими лезвийными инструментами, а также абразивными инструментами, как правило, в присутствии СОЖ. Обслуживается такая технологическая линия часто групповой (ГСО) или централизованной системой очистки (ЦСО) СОЖ, в которых проще и экономичнее решаются вопросы очистки СОЖ по сравнению с индивидуальными системами (ИСО) [52, 54, 85]. Роль системы (подсистемы) очистки при этом резко возрастает, так как в этих случаях приходится очищать СОЖ от резко различных по размерам, физико-механическим свойствам и гранулометрическому составу механических примесей, что неизбежно усложняет технологию очистки, требует применения многоступенчатых комбинаций различных очистителей для надежности обеспечения требуемой чистоты СОЖ.

Вопросы проектирования, выбора и компоновки систем очистки СОЖ решаются различными методами [3, 28, 32, 37, 52-54, 56-60, 66, 79-81, 85, 99-103].

В работе [85] проектирование систем очистки СОЖ сводится, в основном, к выбору очистителей, насосов, трубопроводов, емкостей и определению их конструктивных параметров. Изложены общие принципы разработки и выбора техники очистки СОЖ, заключающиеся в распределении очистителей по группам в зависимости от типа производства, номенклатуры изготавливаемых деталей и составов СОЖ, экономических требований. Главной задачей при этом является выбор основных показателей технической характеристики системы: производительности, объе-

ма циркулирующей в системе СОЖ, сечения трубопроводов, мощности насосов, емкости резервуаров, числа фильтров и т.п. Эти показатели оценивают, как правило, по эмпирическим данным. Основным критерием выбора устройств и компоновки систем очистки являются заданные параметры шероховатости обработанных поверхностей, которые непосредственно связаны с размерами и содержанием в СОЖ механических примесей [24, 65].

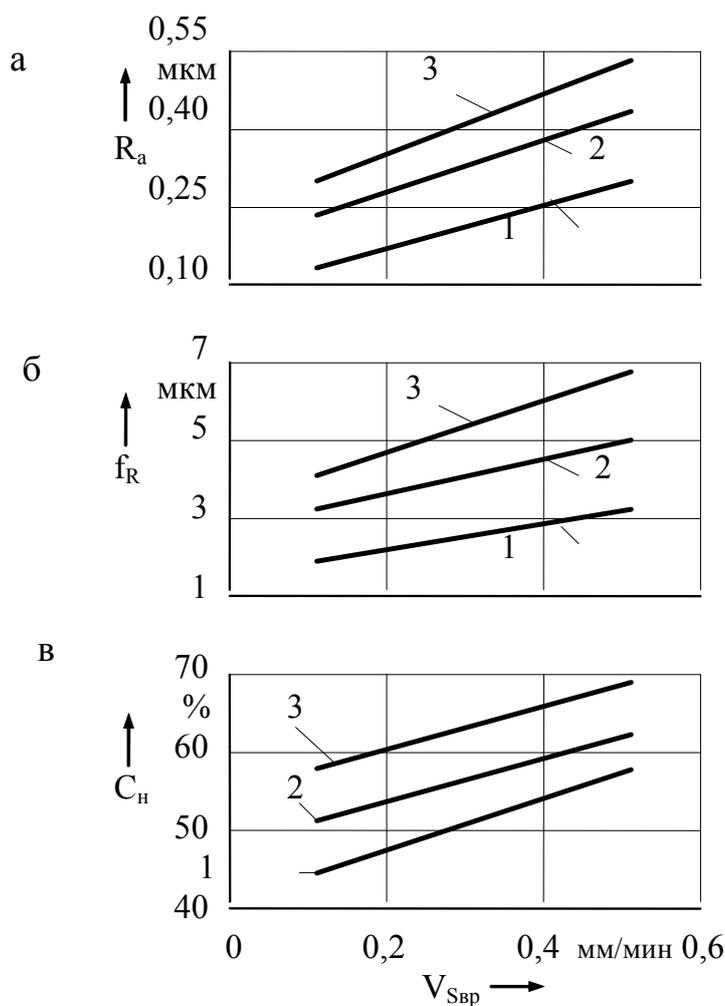


Рис. 1.12. Влияние очистки СОЖ в различных очистителях на шероховатость по параметру R_a (а), точность формы обработанной поверхности в поперечном сечении f_R (б), и степень наклепа C_H (в) при шлифовании кругом ЛОЛ6100СМ1К9 заготовок из стали ШХ15, НРС₃ 62...64:
1, 2, 3 – очистка СОЖ соответственно в электромагнитном напорном сепараторе, магнитном сепараторе и баке-отстойнике [69]

Таблица 1.2

Рекомендации по применению устройств очистки водных СОЖ на операциях металлообработки [113, 115]

Вид обработки, оборудование	Очиститель														
	С ручной очисткой					С автоматической очисткой									
	Блок-отстойник	Магнитный сепаратор	Сетчатый фильтр	Бумажный napopный фильтр	Центрифуга	Бак-отстойник с драгой	Магнитный сепаратор	Центрифуга с автоматической нагрузкой	Гидроциклон	Ленточный безnapopный фильтр	Сетчатый безnapopный фильтр с промывкой	Вакуумный фильтр	Намывной фильтр	Комбинированные стpиатели	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Обточка, сверление, фрезерование	*	**	****			***				*	*	*		*	
Обрабатывающий центр						***				*	*	*		*	
Токарные автоматы						***				*	*	*		*	
Протягивание, глубокое сверление		**	****							*	*	*		*	
Круглое шлифование	*	**	****		*		*	**	*	*	*	*		*	
Плоское шлифование	*	**	****		*		*	**		*	*	*		*	
Шлифование заготовок из чугуна										*		*		*	
Ленточное шлифование										*		*		*	
Хонингование				*			*			*					

Примечание: * – применяется; ** – при ферромагнитном материале; *** – при низких требованиях к чистоте СОЖ; **** – при небольших припусках.

В работе [80] предложена методика компоновки систем очистки водных СОЖ, в которой в качестве оптимизирующего параметра использован расход СОЖ в системе. Расчет системы очистки сводится к определению характеристик гидроциклонов, фильтров, емкостей в зависимости от требуемых расходов СОЖ на операциях механической обработки.

Иной подход к построению систем показан в работах [54, 60]. Для выбора и компоновки очистителей в системы использованы значения исходной и остаточной загрязненности СОЖ механическими примесями, средний размер частиц и степень очистки. На основании модели, описывающей динамику изменения состояния СОЖ, определяют уровень загрязненности СОЖ механическими примесями в любой момент времени. Систему компонуют с учетом значений степени очистки каждой ступени системы и допустимого содержания механических примесей, которое устанавливают по лимитирующей операции (линии или цеха) с учетом обеспечения требуемого качества обработанных деталей.

По рекомендациям [3] допускаемая концентрация механических примесей определяется только по лимитирующей операции или по среднему значению, характерному для конкретного цеха или линии. Моделируют систему очистки СОЖ с различной вероятностью удаления механических примесей и различным распределением частиц шлифовального шлама по размерам.

Известна попытка [100-103] использовать для проектирования и компоновки систем очистки СОЖ глобальный критерий эффективности системы, который вычисляют на основании частных технологических и экономических критериев с использованием балльной оценки (расстановки приоритетов). Однако такая оценка носит субъективный характер, и ее использование может привести к искаженным результатам.

При разработке ГСО или ЦСО для технологических линий по указанным методикам [3, 54] предельные значения показателей чистоты СОЖ определяют по лимитирующей операции, которая требует наиболее чистой СОЖ (по сравнению с другими операциями данной линии). Это значение чистоты закладывают в техническое задание на проектирование системы, что может привести к неоправданному увеличению затрат на очистку СОЖ от механических примесей (рис. 1.13). В то же время, как показано в параграфе 1.1, уменьшение концентрации C и размеров частиц \bar{d} и σ механических примесей, содержащихся в СОЖ, открывает возможность увеличения производительности обработки и улучшения качества обработанных деталей (см. рис. 1.2-1.8), а значит, в конечном итоге, снижения затрат на механическую обработку (кривая 2 на рис. 1.14). Экстремум кривой суммарных затрат (кривая 3) указывает оптимальное значение загрязненности (чистоты) СОЖ, которое необходимо обеспечить при

функционировании системы для получения наибольшего экономического эффекта.

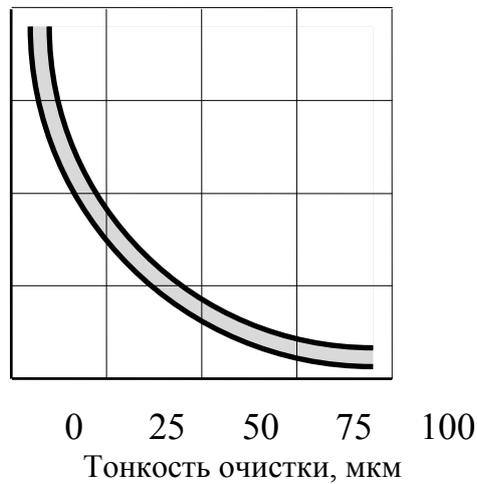


Рис. 1.13. Зависимость стоимости очистителей от обеспечиваемой ими тонкости очистки СОЖ [12]

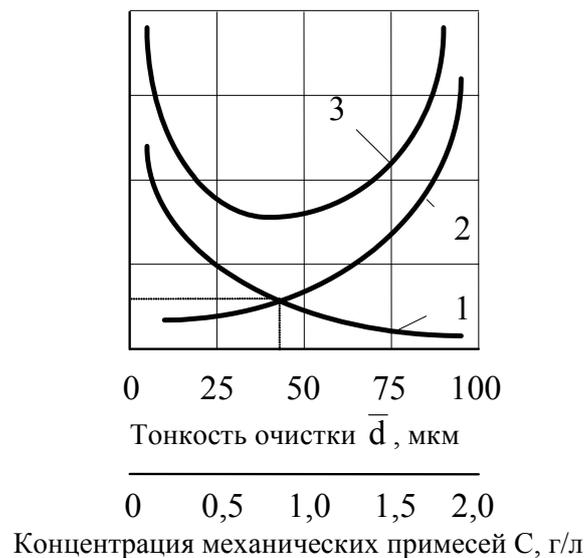


Рис. 1.14. Зависимость затрат на очистку СОЖ (1), механическую обработку (2), и суммарных затрат на технологический (3) от размера \bar{d} и концентрации C механических примесей, содержащихся в СОЖ

Поскольку обеспечение заданного уровня чистоты СОЖ (по механическим примесям) сопряжено с техническими трудностями и существенными материальными затратами, особенно важно установить оптимальные нормы чистоты.

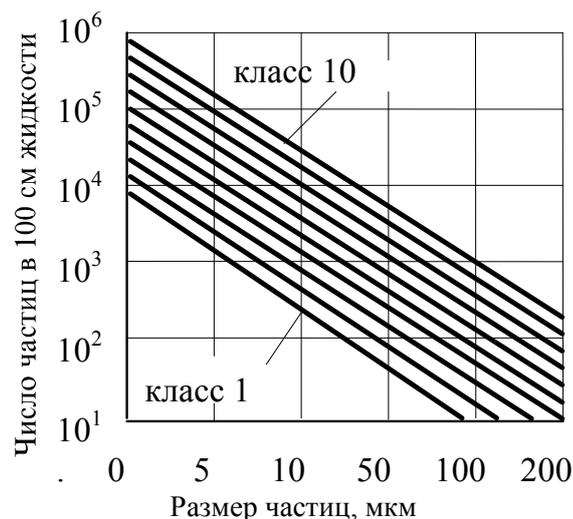


Рис. 1.15. Распределение частиц механических примесей по их количеству и размерам в зависимости от класса чистоты [33]

Известен ГОСТ 17216-71 «Промышленная чистота. Классы чистоты жидкости», которым установлено 19 классов чистоты в зависимости от размеров частиц загрязнений, содержащихся в жидкости [2, 31]. Этот ГОСТ регламентирует максимально допустимое количество частиц загрязнений по интервалам их размеров, однако при исследовании загрязненности реальных жидкостей в различных размерных группах часто соответствует разным классам чистоты, причем эти расхождения могут составлять 5–6 классов. Выбор класса чистоты жидкости по наибольшему значению количества частиц в одной группе может не соответствовать классу чистоты жидкости по количеству частиц в других размерных группах, что в целом ведет к занижению эксплуатационных свойств жидкости.

За рубежом разработано несколько систем классификации чистоты масел и топлива, которые используются при производстве, хранении и эксплуатации жидкостей в автомобильной и авиационной промышленности, где предъявляются высокие требования к чистоте жидкостей по механическим примесям [32]. Так американской ассоциацией AIA установлено пять классов чистоты рабочих жидкостей. Этими классами нормируется содержание частиц размером более 10 мкм. По спецификации MIL T 2565-68 – 61, разработанной фирмами SAE и ASTM, установлены нормы содержания частиц загрязнений размером от 5 до 100 мкм по 7 классам. Применяется также система NAS 1638 [32] из 14 классов, согласно которой число частиц данного размера в каждом последующем классе удваивается, как и в ГОСТ 17216-71.

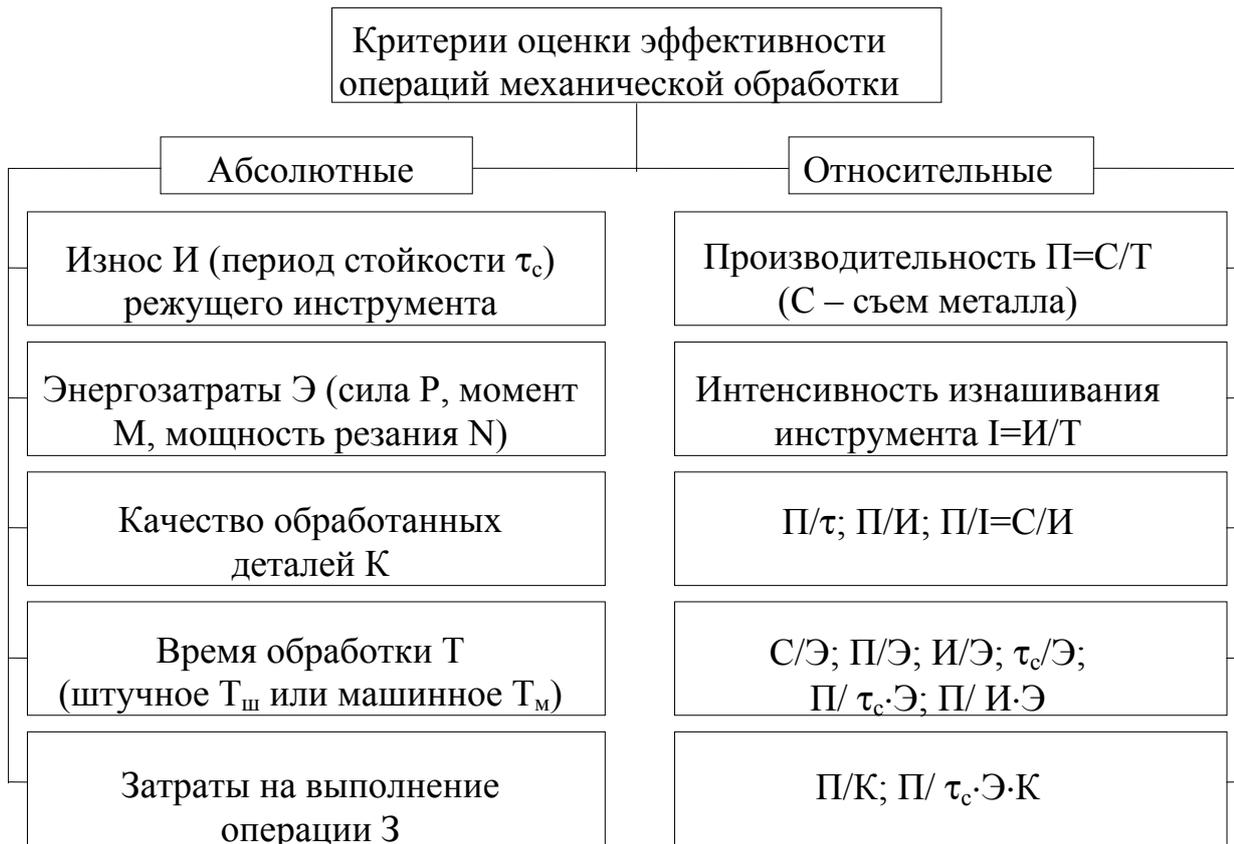


Рис. 1.16. Классификация критериев эффективности операций механической обработки [96]

Главный недостаток перечисленных норм чистоты заключается в том, что, пользуясь ими нельзя по номеру класса судить о степени чистоты жидкости, не имея дополнительных сведений о количестве загрязнений в каждом интервале размеров. Кроме того, соотношение частиц различных размеров в каждом классе не соответствует реальному распределению частиц по размерам в жидкости, в связи с чем значительные трудности представляет определение класса чистоты. Для упрощения процедуры определения класса чистоты жидкости было предложено представить распределение количества частиц загрязнений по интервалам размеров в каждом классе в виде математической зависимости. Зависимости, описывающие распределение частиц загрязнений по размерным интервалам, целесообразно выражать в виде модифицированной логарифмической функции. Это позволяет линеаризировать графики допустимого содержания частиц загрязнений различного размера для каждого класса, представив эти графики в координатах $\lg - \lg^2$.

Графическое изображение распределения в виде прямых линий позволяет выразить эти зависимости какой-либо геометрической характеристикой. Такие графики можно характеризовать углом наклона прямой к оси абсцисс и числом частиц, имеющих размер более 1 мкм (отрезок, отсекает

мый прямой на оси ординат), или размером частиц при их количестве, равном 1 (отрезок, отсекаемый прямой на оси абсцисс). По такому принципу построены нормы чистоты жидкостей фирмой Cincinatti (США) [33] (рис. 1.15). Аналогично представлены нормы чистоты в работе [116].

Преимущество использования математических зависимостей при разработке норм чистоты СОЖ несомненны, однако неадекватность выбранных при этом математических моделей и отсутствие четких границ их применимости приводит к тому, что действительные распределения частиц по размерам резко отличаются от теоретического закона.

Рассмотренные нормы чистоты не могут быть использованы в групповых и централизованных системах очистки СОЖ по следующим причинам: подсчет размеров частиц по интервалам очень трудоемок; сведения о законах распределения частиц механических примесей в СОЖ весьма противоречивы; отсутствуют объективные критерии эффективности нормирования.

В нормах чистоты для операций круглого наружного шлифования, разработанных в Ульяновском политехническом институте [17, 24, 92, 93], определено массовое допустимое содержание механических примесей в определенных интервалах размеров частиц шлифовального шлама в зависимости требуемой шероховатости обработанной поверхности детали (или заготовки) по параметру R_a и степени точности формы. Эти нормы чистоты не учитывают среднее квадратическое отклонение размеров частиц σ , тогда как этот параметр чистоты СОЖ существенно влияет на шероховатость и точность формы обработанной поверхности (см. рис. 1.8); не учитывается накопление механических примесей в СОЖ. Кроме того эти нормы предназначены только для обслуживания операций круглого наружного шлифования.

Развитием вышеназванных норм чистоты являются нормы чистоты СОЖ при абразивной обработке [65], содержащие: данные по качеству очистки СОЖ в различных устройствах; классы чистоты СОЖ в зависимости от массовой концентрации шлифовального шлама и абразива, \bar{d} и σ твердых частиц; рекомендации по чистоте СОЖ в зависимости от требуемых шероховатости (по параметру R_a) и степени точности формы деталей (по ГОСТ 10356-73). Эти нормы чистоты устанавливают классы чистоты СОЖ и рекомендуют конкретные очистители для обеспечения требуемой чистоты СОЖ. Однако сведения о качестве очистки СОЖ различными устройствами устарели, многие устройства в настоящее время не выпускаются.

Разработанный на кафедре “Технология машиностроения” Ульяновского политехнического института ГОСТ Р 50558-93 “Промышленная чистота. Жидкости смазочно-охлаждающие. Общие технические требования” [14] дает значения показателей чистоты СОЖ для операций круглого

наружного и плоского шлифования, точения, сверления, зенкерования и развертывания; определяет конструктивно-технологические требования по обеспечению чистоты СОЖ при проектировании систем применения, а также требования к организации обеспечения чистоты СОЖ на машиностроительном предприятии при ее транспортировании, хранении, приготовлении, эксплуатации и разложении.

В результате многолетних исследований взаимосвязи между чистотой СОЖ и качеством шлифованных поверхностей заготовок из различных материалов, проведенных УлПИ, разработан ГОСТ Р 50815-95 “Промышленная чистота. Жидкости смазочно-охлаждающие. Требования к чистоте СОЖ на операциях круглого наружного и плоского шлифования периферией круга” [15]. Этот стандарт регламентирует допустимые значения концентрации механических примесей в СОЖ и среднего их размера в зависимости от группы обрабатываемости материала заготовки шлифованием, зернистости шлифовального круга и заданной шероховатости шлифованной поверхности по параметру R_a . Для подобной регламентации параметров чистоты СОЖ C , \bar{d} и σ для других операций (видов) механической обработки заготовок необходимы дальнейшие исследования в этой области.

При проектировании или выборе системы очистки СОЖ от механических примесей возникает проблема оценки целесообразности использования той или иной системы для обслуживания данного технологического процесса. Рассмотрим далее критерии технико-экономической эффективности операций механической обработки, выполняемых с применением СОЖ, с помощью которых можно было бы оценить эффективность системы очистки в целом.

1.3. Критерии оценки технологической и экономической эффективности операций механической обработки заготовок, выполняемой с применением СОЖ

В научных исследованиях и в практике машиностроения технологическую эффективность различных по видам обработки и техническому оснащению операций механической обработки заготовок оценивают различными критериями [11, 21, 23, 27, 38, 48, 63, 72, 73, 94-96]. В подавляющем большинстве работ в области лезвийной обработки заготовок основными критериями для оценки технологической эффективности токарных, фрезерных, сверлильных операций служат: износ I и период стойкости τ_c режущего инструмента, высотные параметры шероховатости R_a и R_z . В отдельных работах эффективность технологических операций

характеризуют энергозатратами – силами резания P_z и P_y , моментом резания M_p (при сверлении, зенкерования и развертывании отверстий), учитывают иногда и температуру θ_n в зоне обработки. В отдельных случаях в качестве критерия оценки технологической эффективности операций используют интенсивность изнашивания режущего инструмента $I = \dot{V} / \tau$.

Для оценки эффективности операций абразивной обработки разработана система критериев, характеризующих процесс обработки с разных сторон [27, 95]: режущая способность шлифовального круга (производительность обработки) Q_m , эффективная мощность шлифования $N_{ш}$, расход шлифовального круга Q_a , стойкость круга τ_c , коэффициент режущей способности $K_p = Q_m / P_y$, коэффициент шлифования $K_{ш} = Q_m / Q_a$, удельная мощность $N_{уд} = N_{ш} / Q_m$, комплексный критерий $K_{мш} = Q_m / (Q_a \cdot N_{ш} \cdot R_a)$, критерий качества обработанной поверхности и др. Качество обработанной поверхности оценивают по следующим параметрам: шероховатость поверхности – $R_a, R_z, R_{max}, t_p, S, S_m$; волнистость W_z, W_{max}, S_w ; точность формы Δ_ϕ ; точность линейных и угловых размеров; микротвёрдость поверхности H_μ и глубина наклёпа h_μ ; остаточные напряжения σ' и σ'' . Однако использовать эти критерии для других операций механической обработки практически невозможно, да и во многих случаях нецелесообразно.

В общем виде все вышеперечисленные критерии оценки технологической эффективности операций обработки резанием можно подразделить, в соответствии со схемой, показанной на рис. 1.16, на абсолютные и относительные [96]. При этом относительные критерии образуются как произведение или отношение двух или нескольких критериев. В общем случае относительный критерий можно записать в виде

$$O_i = \prod_{i=1}^n A_i^{\alpha_i}, \quad (1.1)$$

где A_i – i -й абсолютный критерий;

α_i – показатель степени при i -м абсолютном критерии (α_i – целое число);

n – число абсолютных критериев, ($n > 1$).

Таким образом, для нахождения какого-либо относительного критерия оценки технологической эффективности операций механической обработки необходимо предварительно определить значения входящих в него абсолютных критериев.

Наиболее объективным подходом к оценке эффективности технологических операций является использование экономических показателей. В работах [11, 23, 50, 82] авторы определяют экономические показатели на основе известных технологических критериев. Например, в [82], основные

статьи затрат на шлифовальную операцию представлены в следующем виде:

$$C_T = C_3 + C_{ир} + C_{об} + C_э + C_{сож} + C_{сп}, \quad (1.2)$$

где C_3 , $C_{ир}$, $C_{об}$, $C_э$, $C_{сож}$, $C_{сп}$ – соответственно затраты на зарплату, режущий инструмент, оборудование, электроэнергию, СОЖ и систему ее подачи, приходящиеся на данную операцию.

С учетом ряда соотношений, приведенных в [23, 50, 82], получаем:

$$C_3 = C_{зч} \cdot M_o \cdot \left(\frac{1}{Q_m} + \frac{T_{пр}}{Q_m \cdot \tau_c} \right); \quad (1.3)$$

$$C_{ир} = C_{и} \cdot M_o \cdot \left(\frac{Q_a}{Q_m} + \frac{\pi \cdot D_{ср} \cdot H \cdot h_{пр}}{Q_m \cdot \tau_c} \right); \quad (1.4)$$

$$C_{об} = C_a \cdot \frac{M_o \cdot N_э}{Q_m}; \quad (1.5)$$

$$C_э = Ц_э \cdot \frac{M_o \cdot N_э}{Q_m}; \quad (1.6)$$

$$C_{сож} = C_ж \cdot \frac{M_o \cdot Q_ж}{Q_m \cdot n_B}; \quad (1.7)$$

$$C_{сож} = \frac{K_{сп} \cdot M_o \cdot (1 + \alpha_T)}{\Phi_{д.о} \cdot Q_m \cdot n_B}; \quad (1.8)$$

где $C_{зч}$ – часовая тарифная ставка рабочего, руб.;

M_o – припуск на обработку, мм;

$T_{пр}$ – время, затрачиваемое на внецикловую правку круга, мин;

$C_{ир}$ – стоимость шлифовального круга, руб.;

$D_{ср}$ – средний диаметр круга, мм;

H – высота круга, мм;

$h_{пр}$ – толщина слоя, удаляемого при правке, мкм;

C_a – амортизационные отчисления на технологическое оборудование, руб.;

$Ц_э$ – стоимость кВт·ч электроэнергии, руб.;

$C_ж$ – стоимость одного м³ СОЖ, руб.;

$Q_ж$ – минимально необходимый расход СОЖ на операцию, л/мин;

n_B – количество оборотов СОЖ до начала потери ею функциональных свойств;

$K_{сп}$ – стоимость системы подачи (применения) СОЖ, руб.;

$\Phi_{д.о}$ – годовой фонд рабочего времени оборудования, ч;

$$\alpha_T = \frac{T_{ш} - T_M}{T_M}.$$

Как видим, формулы (1.3)-(1.8) можно использовать только для расчета показателей эффективности операций шлифования, выполняемых инструментами со связанным абразивом. Для оценки эффективности всего многообразия операций механической обработки заготовок необходимы иные, универсальные зависимости.

Рассмотрим критерии, используемые для оценки влияния СОЖ на эффективность операций обработки заготовок резанием [11, 21, 23, 27, 36, 38, 48, 62, 63, 72, 73, 77, 94-96]. Установлено, что влияние СОЖ (ее состава и состояния) на эффективность операций обработки заготовок лезвийными и абразивными инструментами оценивают с помощью тех же абсолютных и относительных критериев (см. рис. 1.16), с помощью которых оценивают влияние на эффективность технологической операции других факторов, например инструментального материала и геометрии режущей части инструмента, режима обработки и др. Для оценки влияния СОЖ используют также критерии вида:

$$K_i = \frac{A_i^H}{A_i^B}; \quad (1.9)$$

$$K'_i = \frac{O_i^H}{O_i^B}, \quad (1.10)$$

где A_i^H и O_i^H – i -й абсолютный или относительный критерий, характеризующий эффективность операции, выполняемой с применением той СОЖ, влияние которой на эффективность операции оценивается;

A_i^B и O_i^B – те же критерии, полученные при обработке с применением заранее выбранной (базовой) СОЖ.

В литературе такие критерии называют коэффициентами изменения параметра при переходе на новую СОЖ (или при изменении ее состояния). Следует отметить, что несомненным достоинством таких критериев – коэффициентов является простота их определения на основе известных данных о показателях операции, выполняемой с применением базовой СОЖ, и данных об аналогичных показателях, полученных при обработке заготовок с применением новой СОЖ в ходе опытно-промышленных испытаний ее на соответствующих операциях. В табл. 1.3 приведены значения критериев-коэффициентов эффективности операций механической

обработки заготовок, выполняемых с применением СОЖ, по результатам ранее проведенных исследований [21, 23, 36, 48, 62, 63, 72, 73, 77, 85]. Приведенные в табл. 1.3 критерии-коэффициенты оценивают эффективность операций по производительности, работоспособности режущего инструмента, энергозатратам, точности размеров и формы, качеству обработанной поверхности. Данные критерии K_i целесообразно использовать также и для оценки влияния механических примесей на эффективность операций механической обработки, так как присутствие механических примесей в СОЖ приводит к увеличению износа режущего инструмента и энергозатрат, снижению точности размеров и геометрической формы, ухудшению шероховатости обработанной поверхности (см. рис. 1.2-1.8). В этом случае значения K_i вычисляют через отношение соответствующих параметров по (1.9) или (1.10), которые в свою очередь можно определить по аналитическим и эмпирическим зависимостям, полученным по результатам ранее выполненных на кафедре “Технология машиностроения” Ульяновского политехнического института под руководством Л.В.Худобина исследований и обследований действующего производства (4ГПЗ, 23ГПЗ, УАЗ и др. предприятий) [3, 10, 17, 28, 54, 69, 71, 76]. Большинство приведенных в табл. 1.4 зависимостей характеризует взаимосвязь чистоты СОЖ с параметрами операций абразивной обработки. Преобладание данных для операций абразивной обработки по сравнению с операциями лезвийной обработки легко объяснимо: операции абразивной обработки являются, как правило, заключительными в технологическом процессе изготовления деталей и формируют их выходные качественные характеристики; влияние механических примесей в СОЖ при абразивной обработке более значимо, чем при лезвийной. Большинство формул, приведенных в табл. 1.4, получено экспериментальным путем, и в силу этого имеют ограниченную область применения.

Изменение удельной силы резания при шлифовании в зависимости от среднего размера частиц \bar{d} и их концентрации C позволяют оценить формулы (1.11) и (1.12). По эмпирическим формулам (1.13) и (1.14) можно определить удельную мощность шлифования и расход абразивного круга в зависимости от \bar{d} . Определить величину периода стойкости абразивного инструмента τ_c или ее изменение $\Delta\tau_c$ в зависимости от параметров C , \bar{d} , а также σ , можно, используя зависимости (1.15), (1.18) и (1.19). Зависимости (1.20), (1.25) и (1.26) позволяют определить количество годных деталей B по значению остаточной концентрации механических примесей C_0 . Количество бракованных деталей B по критерию прижогообразования можно определить по формуле (1.23).

Таблица 1.3

Значения критериев эффективности технологических операций, выполняемых с применением СОЖ [21, 23, 36, 38, 48, 62, 63, 72, 73, 77, 85]

Вид обработки резанием	Критерии эффективности											K _{RA}		
	Стойкость инструмента, мин	K _τ	Энергозатраты N, кВт	K _N	Производительность в обработке П, мкм	K _П	Точность линейных размеров IT	K _W	Точность геометрической формы f, мкм	K _{офф}	Волнистость W, мкм		K _W	Шероховатость поверхности Ra, мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Наружные поверхности вращения														
Обтачивание:														
– предварительное	–	1,5-2,5	–	С	–	НУ	11-14	НУ	8-13	НУ	–	НУ	3,2-5	3
– окончательное	–	1,5-2,5	–	С	–	НУ	8-10	НУ	5-9	НУ	1,0	НУ	0,8-2,5	1,0-1,4
– тонкое	–	НУ	–	С	–	НУ	6-9	НУ	3-8	НУ	0,75-3	НУ	0,1-0,8	1,0-1,4
Шлифование:														
– предварительное	–	3	–	3	–	3	8-9	НУ	5-8	1,3-2,0	0,75-3	1,3-2,0	1,0-2,5	1,2-4,5
– окончательное	–	3	–	1,2-1,3	–	3	6-7	С	3-6	1,3-2,0	0,75-3	3	0,2-1,2	1,2-2,0
– тонкое	–	ОЗ	–	С	–	ОЗ	5-6	С	2-5	3	–	С	0,1-0,2	1,6
Суперфиниширование														
1-20	1-20	1,6-2,2	–	С	–	3,8-4,4	4-5	НУ	6-7	НУ	4-5	НУ	5-10	НУ
3-10	3-10	ОЗ	–	НУ	30-60	НУ	6-7	НУ	–	НУ	0,3-3	НУ	0,1-0,6	3
Притирка	–	НУ	–	НУ	–	1,1	4-5	НУ	0,4-13	НУ	–	НУ	0,1-0,8	2,0
Внутренние поверхности вращения														
Сверление	–	1,5-3,0	–	С	–	НУ	9-13	НУ	6-12	НУ	–	НУ	3,2-12	3

Продолжение табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Зенкерование: – предварительное	–	3	–	С	–	НУ	12-13	НУ	9-12	НУ	–	НУ	3,2-6,3	3
– окончательное	–	3	–	С	–	НУ	8-9	НУ	5-8	НУ	–	НУ	1,2-3,2	3
Развёртывание: – предварительное	–	1-2	–	С	–	НУ	10-11	НУ	7-10	3	–	НУ	1,2-2,5	1,2-2
– окончательное	–	1-2	–	С	–	НУ	7-9	НУ	4-8	НУ	–	НУ	0,6-1,2	1,2-2
– тонкое	–	3	–	С	–	НУ	5-6	НУ	2-5	НУ	–	НУ	0,3-0,6	О3
Протягивание: – предварительное	–	3	–	С	–	НУ	10-11	НУ	3-8	НУ	–	НУ	1,2-3,3	О3
– окончательное	–	3	–	С	–	НУ	6-9	НУ	8-11	3	–	НУ	0,3-1,2	О3
Растачивание: – предварительное	–	1,5-2,5	–	С	–	НУ	11-13	НУ	8-11	3	–	3	6,3-12	3
– окончательное	–	3	–	С	–	НУ	8-10	НУ	5-9	3	0,5-10	3	0,8-2,0	О3
– тонкое	–	3	–	С	–	НУ	5-7	НУ	2-6	3	–	3	0,2-0,8	О3
Шлифование: – предварительное	–	3	–	3	–	3	8-9	С	5-8	3	0,6-4,5	3	1,6-3,2	О3
– окончательное	–	3	–	3	–	3	6-7	С	3-6	1,3	0,6-4,5	1,3-2	0,3-1,6	1,3-4
– тонкое	–	3	–	3	–	С	5-6	НУ	2-4	3	0,6-4,5	О3	0,1-0,3	О3
Хонингование	–	3	–	С	–	3	4-5	НУ	0,4-2,5	НУ	0,1-12	НУ	0,04-3	1,1-2,0
Плоские поверхности														
Фрезерование торцовое: – предварительное	–	2-3	–	С	–	С	8-13	НУ	40-100	НУ	–	НУ	3-100	3
– окончательное	–	3	–	С	–	С	8-11	НУ	16-40	НУ	–	НУ	0,8-18	3
– тонкое	–	3	–	С	–	С	6-11	НУ	10-25	НУ	–	НУ	0,2-3,2	3
Фрезерование периферийное: – предварительное	–	3	–	С	–	С	11-13	НУ	40-100	НУ	–	НУ	3,2-40	3

Продолжение табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
– окончательное	–	3	–	С	–	С	8-11	НУ	16-40	НУ	–	НУ	0,8-10	3
– тонкое	–	3	–	С	–	С	6-9	НУ	10-25	НУ	–	НУ	0,2-1,6	3
Строгание: – предварительное	–	НУ	–	С	–	С	11-13	НУ	10-11	НУ	–	НУ	6,5-50	3
– окончательное	–	НУ	–	С	–	С	9-10	НУ	9-10	НУ	2-6	НУ	1,0-6,3	1,1-1,5
Подрезание	–	1,0-1,1	–	С	–	С	6-11	НУ	–	НУ	–	НУ	0,3-50	1,0-1,6
Протягивание: – предварительное	–	НУ	–	НУ	–	С	10-11	НУ	–	НУ	–	НУ	1,0-3,2	3
– окончательное	–	НУ	–	НУ	–	С	6-9	НУ	–	НУ	–	НУ	0,3-1,2	3
Шлифование: – предварительное	–	3	–	С	–	3	8-9	С	6-8	С	1,2-13	С	1,6-4,0	3
– окончательное	–	3	–	С	–	3	7-8	С	5-7	С	1,2-13	С	0,3-1,6	3
– тонкое	–	ОЗ	–	С	–	ОЗ	6-7	С	3-6	С	1,2-13	С	0,1-0,3	3
Притирка	–	3	–	С	–	3	0,1-5,0	С	0,1-8,0	НУ	0,6-6,0	С	0,02	3
Боковые поверхности щлиц														
Фрезерование: – предварительное	–	3	–	НУ	–	НУ	–	НУ	–	НУ	–	НУ	–	3
– окончательное	–	3	–	НУ	–	НУ	–	НУ	–	НУ	–	НУ	1,2-4,0	3
Протягивание	–	НУ	–	НУ	–	НУ	–	НУ	–	НУ	–	НУ	–	НУ
Шлифование: – предварительное	–	1,3-2,0	–	НУ	–	3	–	НУ	–	С	–	С	1,6-3,2	3
– окончательное	–	1,3-2,0	–	НУ	–	3	–	НУ	–	С	–	С	0,4-1,2	3
Боковые поверхности зубьев														
Фрезерование фрезами	–	3	–	НУ	–	НУ	8-10	НУ	–	НУ	–	НУ	1-100	НУ
Фрезерование черв. фрезами	–	3	–	НУ	–	НУ	4-7	НУ	–	НУ	–	НУ	3-100	НУ

Окончание табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Зубодобление	-	1,2-2,0	-	НУ	-	НУ	5-8	НУ	-	НУ	-	НУ	1,2-50	НУ
Зубострогание	-	НУ	-	НУ	-	НУ	5-9	НУ	-	НУ	-	НУ	0,8-1,2	НУ
Шлифование	-	3	-	С	-	3	5-6	НУ	-	НУ	-	НУ	0,5-1,2	3
Шевингование	-	1,5	-	НУ	-	НУ	6-9	НУ	12	НУ	-	НУ	0,3-2,5	НУ
Резьбовые поверхности														
Нарезание гребёнками	-	3	-	НУ	-	НУ	-	НУ	-	НУ	-	НУ	0,8-6,3	НУ
Нарезание метчиками, плашками	-	3	-	НУ	-	НУ	6-8	НУ	-	НУ	-	НУ	1,2-12	НУ
Фрезерование: - предварительное	-	3	-	НУ	-	НУ	-	НУ	-	НУ	-	НУ	1,2-6,3	НУ
- окончательное	-	3	-	НУ	-	НУ	-	НУ	-	НУ	-	НУ	0,5-6,3	НУ
Резьбошлифование	-	3	-	С	-	3	4-6	НУ	-	НУ	-	НУ	0,2-1,6	НУ

П р и м е ч а н и е : - - нет данных; НУ – влияние не установлено; С, 3, ОЗ – соответственно влияние слабое, заметное, очень заметное.

Таблица 1.4

Взаимосвязь параметров чистоты СОЖ, показателей процесса резания и выходных показателей технологических операций

Зависимость	№ зависимости	Автор, источник
1	2	3
$\Delta P_{уд} = \frac{N \cdot (\bar{d} - h_1)^{z_1 + 1}}{h_1 \cdot C_p^{z_1} \cdot (z_1 + 1)}, \text{ Н/см}$	1.11	Гульнов Е.П. [17]
$\Delta P_{уд} = \frac{e_{1, \dots} \cdot (\bar{d} - h_1)^{z_1 + 1}}{\bar{d}^3}, \text{ Н/см}$	1.12	
$N_{уд} = 0,118 - \frac{0,05}{\bar{d}}, \text{ кВт} \cdot \text{с/мм}^3$	1.13	
$\Delta Q_a = 128,4 - \frac{237,4}{\bar{d}}, \text{ мм}^3/\text{мин}$	1.14	
$\Delta \tau_c = 17,4 + 35,5 C + 1,8 S_{вр} - 45,3 L + 0,3 T -$ $- 25 C \cdot S_{вр} - 11 C \cdot L + 32 S_{вр} \cdot L - 0,2 S_{вр} \cdot T,$ %	1.15	
$R_a = 0,02 + 1,09 C_o + 1,1 S_{вр} - 0,007 C_o \cdot \bar{d}_o -$ $- 0,014 C_o \cdot \sigma_o - 0,02 C_o \cdot S_{вр} + 0,0002 \sigma_o \cdot \bar{d}_o +$ $+ 0,0005 \bar{d}_o \cdot S_{вр} + 0,02 \sigma_o \cdot t_n + 0,02 C_o \cdot \sigma_o \cdot S_{вр} -$ $- 0,0004 \sigma_o \cdot \bar{d}_o \cdot S_{вр}, \text{ мкм}$	1.16	Карев Е.А. [28]
$R_a = 0,28 + 0,95 C_o + 0,00047 \bar{d}_o + 0,0007 \sigma_o -$ $- 0,0076 C_o \cdot \bar{d}_o, \text{ мкм}$	1.17	
$\tau_c = 5,7 - 0,3 C_o - 0,2 \bar{d}_o - 5 S_{вр} + 0,01 C_o \cdot \bar{d}_o -$ $- 0,05 C_o \cdot \sigma_o - 0,3 C_o \cdot S_{вр} + 0,0005 \sigma_o \cdot \bar{d}_o +$ $+ 0,03 \bar{d}_o \cdot S_{вр} + 0,03 \sigma_o \cdot S_{вр} + 0,004 C_o \cdot \bar{d}_o \cdot \sigma_o -$ $- 0,02 C_o \cdot \bar{d}_o \cdot S_{вр} + 0,04 C_o \cdot \sigma_o \cdot S_{вр} -$ $- 0,0007 \bar{d}_o \cdot \sigma_o \cdot S_{вр}, \text{ мин}$	1.18	

Окончание табл. 1.4

1	2	3
$[\tau_{\max}] = \frac{V_o}{\varepsilon \cdot Q_c} \cdot \left[\ln \frac{v_{\text{ш}} \cdot V_o}{\varepsilon \cdot Q_c} - \ln \left(\frac{v_{\text{ш}} \cdot V_o}{\varepsilon \cdot Q_c} - \frac{a_1}{a_2} \right) \right], \text{ МИН}$	1.19	Ромашкин В.Г. [69]
$n_d = \frac{V_o}{\varepsilon \cdot Q_{\text{ж}} \cdot T_{\text{ш}}} \cdot \left[\ln \left(\frac{v_{\text{ш}} \cdot V_o}{\varepsilon \cdot Q_{\text{ж}}} - \frac{a_1}{a_2} \right) \right], \text{ ШТ}$	1.20	
$R_a = Y_o + Y_{\text{ж}}(t) + Y_{\text{и}}(\tau), \text{ МКМ}$	1.21	Полянсков Ю.В. [54]
$R_{\max} = 2,01 \left[\frac{d}{2} - \sqrt{\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \frac{1}{\pi^2 \cdot \text{HB}_3^2}} \cdot \left(\pi \cdot \text{HB}_3 \cdot P_y + \frac{P_y^2}{d} \right) - 0,615 \sqrt[3]{\frac{2P_y^2}{E \cdot d}} \right], \text{ МКМ}$	1.22	Степанов М.С. [75]
$\theta_{\Pi} = 144,01 S_{\text{вп}}^{0,742} \cdot C^{0,745} \cdot z_0^{0,0435}, \text{ град}$	1.23	
$B = 0,05 + 0,014 C_o, \text{ ШТ}$	1.24	
$B = -0,51 + 22,33 C_{\text{эм}} - 17,87 C_c - 7,17 C_6 + 48,44 C_{\text{нн}} - 127,84 C_o, \text{ ШТ}$	1.25	Богданов В.В. [3]
$B = 105,52 - 127,84 C_o, \text{ ШТ}$	1.26	
$R_a = 0,42 + 0,11 C_o + 0,04 C_o^2, \text{ МКМ}$	1.27	Сазанов В.Е. [70]
$K_c = \frac{V_{\text{ин}}}{V_c},$ $V_{\text{ин}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{t_n \cdot S_m \cdot \cos \gamma \cdot \cos(90 - \alpha) \cdot C_p \cdot T^x}{\sin(\alpha + \gamma) \cdot (\text{ctg} \varphi + \varphi_1) \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1},$ $V_c = \frac{d^2}{24} \left(\frac{\pi \cdot \theta}{180^\circ} - \sin \theta \right) \cdot \frac{\text{HB}_{\text{и}} \cdot \pi \cdot d_3 \cdot T}{(\text{HB}_{\text{и}} + \text{HB}_3) \cdot 1000} \cdot (1 - \varepsilon), \text{ ММ}^3$	1.28	Ведров С.Е. [10]

Условные обозначения к табл. 1.4:

$\Delta P_{уд}$ – изменение удельной силы шлифования, Н/см;

N – количество частиц, находящихся в контакте с шлифовальным кругом заготовкой на единицу длины контакта, шт/см;

h_1 – разнорысность абразивных зерен в шлифовальном круге, мкм;

C_p – постоянный коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала;

z_1 – показатель степени, $z_1=2$;

B_1 – экспериментальный коэффициент;

ΔQ_a – изменение расхода шлифовального круга, мм³/мин;

$\Delta \tau_c$ – изменение периода стойкости режущего инструмента, %;

L – зернистость шлифовального круга, мм;

T – твердость шлифовального круга (по ГОСТ 19202-71), МПа;

\bar{d}_o – средний размер частиц оставшихся в СОЖ после очистки, мкм;

$[\tau_{max}]$ – наработка шлифовального круга на отказ по параметру R_{max} , мин;

V_o – начальный объем СОЖ в системе очистки СОЖ, м³;

$Q_{ж}$ – производительность системы очистки, м³/ч;

$v_{ш}$ – скорость поступления частиц из зоны обработки, шт/ч;

a_1, a_2 – экспериментальные коэффициенты;

n_d – количество обработанных заготовок до отказа по параметру R_{max} , шт.;

$Y_o, Y_{ж}(t), Y_{и}(\tau)$ – соответственно функции, описывающие влияние станка и приспособления, СОЖ, инструмента на шероховатость;

$HВ_з, HВ_и$ – соответственно твердость заготовки и инструментального материала, усл. ед;

E – модуль упругости Н/м²;

$C_{эм}, C_c, C_b, C_{нн}$ – соответственно концентрация эмульсола, соды, бикарбонатов, нитрита натрия в СОЖ, %;

$V_{ин}$ – объем материала изношенной части резца, мм³;

V_c – объем материала, удаленного стружкой, мм³;

S_m – подача, мм/мин;

γ, α – соответственно передний и задний углы режущего инструмента, град;

φ, φ_1 – соответственно главный и вспомогательный углы в плане, град;

x – постоянный коэффициент условий резания;

θ – угол внедрения стружки в материал обрабатываемой заготовки, град;

d_3 – диаметр заготовки, мм.

Оценить изменение периода стойкости лезвийного инструмента в зависимости от параметров чистоты СОЖ C и d можно по формуле (1.28). Эта зависимость позволяет учесть геометрию режущей части инструмента, а также твердость инструментального и обрабатываемого материалов. Зависимость (1.28) может быть распространена на все виды механической

обработки лезвийными инструментами, тогда как зависимости (1.11)-(1.27) справедливы только для конкретных условий абразивной обработки.

В настоящее время практически не исследовано влияние чистоты СОЖ на точность формы и шероховатость поверхностей заготовок, обработанных лезвийными инструментами. Это особенно важно при обработке отверстий сверлами, зенкерами и развертками, когда лезвийный инструмент работает в “стесненных условиях”. Удельный вес таких операций в крупносерийном и массовых производствах при обработке заготовок на технологических линиях достигает 40%. Для выявления влияния чистоты СОЖ на макро- и микрогеометрию отверстий, обработанных мерным лезвийным инструментом (а следовательно, для определения K_i), необходимо провести экспериментальные исследования в лабораторных или производственных условиях.

1.4. Выводы. Цель и задачи исследований

На основе представленного выше анализа научно-технической информации можно сделать следующие выводы:

1. Механические примеси, содержащиеся в СОЖ, негативно влияют на эффективность операций лезвийной и абразивной обработки заготовок: загрязнение СОЖ приводит к снижению производительности абразивной обработки заготовки до (40-60)%, лезвийной обработки – до (20-35)%, увеличению выпуска бракованной продукции, интенсификации износа лезвийных инструментов в 1,4-2,5 раза, абразивных кругов – в 2-5 раз, увеличению энергозатрат на процесс резания на (15-30)%, существенно снижает точность формы и увеличивает шероховатость шлифованных поверхностей.

2. Современные технологии и техника очистки СОЖ от механических примесей позволяют обеспечить требуемые параметры чистоты СОЖ. Использование существующих норм чистоты СОЖ, разработанных для отдельных операций, при проектировании систем очистки, обслуживающих технологические линии, приводит неоправданному увеличению затрат на очистку СОЖ и, соответственно, суммарных затрат на механическую обработку заготовок.

3. Эффективность различных по видам обработки и технологическому оснащению операций механической обработки, выполняемых с применением СОЖ, оценивают различными, иногда весьма специфическими критериями. Отсутствие системы универсальных критериев существенно затрудняет оценку эффективности ГСО и ЦСО СОЖ, обслуживающих технологические линии, предназначенные для выполнения разнообразных операций механической обработки.

4. До сих пор не разработана методика проектирования ГСО и ЦСО СОЖ, которые обеспечили бы минимум суммарных затрат на механическую обработку. Нет и методики оценки эффективности систем очистки, обслуживающих технологические линии, состоящие из различных операций.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является повышение эффективности технологических линий механической обработки заготовок, выполняемой с применением СОЖ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать систему универсальных критериев технологической эффективности для различных операций механической обработки.

2. Разработать методику оценки эффективности систем очистки СОЖ, обслуживающих технологические линии механической обработки заготовок, на основе системы универсальных критериев.

3. Разработать методику расчета систем очистки СОЖ от механических примесей, обеспечивающих минимум суммарных затрат на механическую обработку заготовок на технологических линиях.

4. Установить взаимосвязь критериев технологической эффективности с параметрами чистоты СОЖ для малоисследованных видов обработки заготовок резанием.

5. Провести опытно-промышленную проверку разработанной методики на предприятиях г. Ульяновска.

2. ВЛИЯНИЕ ЧИСТОТЫ СОЖ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

2.1. Система универсальных критериев оценки эффективности технологических линий

Приступая к созданию системы универсальных критериев, объективно оценивающей влияние СОЖ и ее чистоты на эффективность технологических линий, необходимо исходить из следующего:

– система критериев должна оценивать технологическую линию с разных точек зрения: по производительности; по работоспособности режущего инструмента и энергозатратам на процесс обработки; по обеспечению требуемого качества деталей и др.;

– критерии должны быть доступными, т.е. сведения об их значениях должны содержаться в технической литературе или они могут быть легко получены в производственных или лабораторных условиях;

– критерии должны быть универсальными, что позволит свести их количество к минимуму;

– критерии должны быть значимыми для оценки влияния чистоты СОЖ на процесс обработки резанием.

Как следует из материалов, представленных в главе 1 (см., например, табл. 1.3), выделить из критериев эффективности часть, обусловленную влиянием СОЖ и тем более ее чистотой, не представляется возможным, так как СОЖ действует в той или иной степени на все элементы технологической системы, которые при этом меняют свои количественные и качественные характеристики, что и является причиной изменения практически всех показателей процесса резания. В конечном итоге изменяются экономические показатели технологических операций и линий. Поэтому универсальную систему критериев можно выявить на основе структурного анализа зависимости, используемой для расчета экономического эффекта, как это сделано в работе [23]. Влияние чистоты СОЖ на процесс обработки заготовок резанием можно оценить с помощью критериев K_i , характеризующих изменение того или иного показателя при изменении состояния СОЖ (см. подразд. 1.3).

$$\Delta = C^6 - C^H = \Delta C - E_n \cdot \Delta K, \quad (2.1)$$

где C^6, C^H – приведенные затраты на производство годового количества деталей, соответственно, по базовому (б) и новому (н) вариантам, руб.;

E_n – нормативный коэффициент окупаемости дополнительных капитальных вложений, (руб./год)/руб.;

ΔK – разность капитальных вложений по рассматриваемым вариантам, руб.

$$C = C_T + C_{бр} + C_M, \quad (2.2)$$

здесь C_T – технологическая себестоимость изготовления детали, руб.;

$C_{бр}$ – затраты на брак, руб.;

C_M – затраты на материалы, руб.; подлежат расчету, когда сопоставляемые варианты различаются величиной расхода основных материалов, покупных полуфабрикатов и комплектующих изделий.

Затраты C_M можно считать постоянными для рассматриваемых вариантов и в дальнейшем не учитывать.

Рассмотрим подробно элементы затрат, составляющие C_T и $C_{бр}$, в расчете на i -ю операцию j -й технологической линии при обработке одной заготовки.

2.1.1. Критерии оценки эффективности отдельной операции (механической обработки)

Согласно методики расчетов экономической эффективности [67]

$$C_T = C_3 + C_{об} + C_{осн} + C_K + C_{п}, \quad (2.3)$$

где C_3 – затраты на заработную плату, руб.;

$C_{об}$ – затраты по содержанию и эксплуатации оборудования, руб.;

$C_{осн}$ – затраты по эксплуатации приспособлений, инструментов и прочей технологической оснастки, руб.;

C_K – затраты на содержание зданий и сооружений, руб.;

$C_{п}$ – прочие затраты на хозяйственный инвентарь, сантехнику и другие, относящиеся к данному изделию (детали), руб.

$$C_3 = C_{30} + C_{3в} + C_{3н} = C_{30} (1 + k_1 / 100);$$

здесь C_{30} , $C_{3в}$, $C_{3н}$ – соответственно затраты на заработную плату основных, вспомогательных рабочих, наладчиков, руб.;

k_1 – процент заработной платы вспомогательных рабочих и наладчиков от заработной платы основных рабочих.

$$C_{30} = C_{3ч} \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot T_{ш},$$

где $C_{3ч}$ – часовая тарифная ставка основного рабочего, руб./ч;

k_2 , k_3 , k_4 , k_5 – соответственно коэффициенты оплаты отпусков, премий, на социальное страхование, бригадного обслуживания;

$T_{ш}$ – штучное время на выполнение операции, мин.

Затраты на оборудование в расчете на один час его работы

$$C_{об} = C_{эс} + C_{эт} + C_{эн} + C_{вм} + C_a + C_{ро}, \quad (2.4)$$

где $C_{эс}$, $C_{эт}$, $C_{эн}$, $C_{вм}$, C_a , $C_{ро}$ – соответственно затраты на силовую электроэнергию, технологическую электроэнергию, энергоносители, вспомогательные материалы, амортизацию и ремонт оборудования, руб./ч.

$$C_{эс} = \frac{N_{ус} \cdot k_6 \cdot k_7 \cdot k_8 \cdot k_9 \cdot Ц_э}{\eta} \cdot T_m,$$

где $N_{ус}$ – установленная мощность электродвигателей, кВт;
 k_6, k_7, k_8, k_9 – соответственно коэффициенты загрузки электродвигателя по мощности и времени, одновременности работы всех двигателей, потерь электроэнергии в сети завода;
 $Ц_э$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.;
 T_m – машинное время операции, мин;
 η – коэффициент полезного действия оборудования.

$$C_{эт} = \frac{N_{ут} \cdot k_9 \cdot k_{10} \cdot k_{11} \cdot k_{12} \cdot Ц_э}{\eta} \cdot T_m,$$

где $N_{ут}$ – установленная мощность электропечи, кВт;
 k_9, k_{10} – соответственно коэффициенты загрузки печи по мощности и времени;
 k_{12} – коэффициент одновременности работы энергопотребителей печи.

$$C_{эн} = \sum_{i=1}^k Q_{эн} \cdot Ц_{эн} \cdot T_m,$$

где k – количество видов энергоносителей (пар, сжатый воздух, вода и т.п.);
 $Q_{эн}$ – расход энергоносителя, м³/ч;
 $Ц_{эн}$ – стоимость 1 м³ энергоносителя, руб.

$$C_{вм} = \sum_{i=1}^n Q_{вм} \cdot Ц_{вм} \cdot T_m,$$

где n – количество видов вспомогательных материалов (обтирочные материалы, смазка, СОЖ, флюс, защитный газ и т.п.);
 $Q_{вм}$ – расход вспомогательного материала, м³/ч или кг/ч;
 $Ц_{вм}$ – стоимость вспомогательного материала, руб./м³ или руб./кг.

$$C_a = \frac{K_o \cdot k_7 \cdot \alpha_a \cdot O_c}{100A_r},$$

где K_o – балансовая стоимость единицы оборудования, руб.

α_a – процент амортизационных отчислений, %;

O_c – количество технологического оборудования на операции, шт;

A_r – годовая программа выпуска изделий, шт;

$$C_{po} = \frac{K_o \cdot k_{13} \cdot W_m \cdot R_m}{T_{pc} \cdot k_{14} \cdot A_r},$$

где R_m – группа ремонтной сложности механической части оборудования;

W_m – затраты на планово-предупредительный ремонт за ремонтный цикл, руб.;

k_{13} – коэффициент ремонта энергетической части оборудования;

T_{pc} – длительность ремонтного цикла механической части оборудования, ч;

k_{14} – коэффициент влияния типа производства, размера оборудования на T_{pc} .

$$C_{ocн} = C_{ир} + C_{им} + C_{пр}, \quad (2.5)$$

где $C_{ир}$, $C_{им}$, $C_{пр}$ – соответственно затраты на режущий инструмент, мерительный инструмент, приспособление, руб.

$$C_{ир} = \frac{((C_{и} + Ц_{и}) + n_{пер} \cdot C_{пер} + n_{вос} \cdot C_{вос}) \cdot k_{15} \cdot k_{16}}{\tau_c (n_{пер} + 1) k_{17} \cdot \varphi_{пер}} \cdot T_m,$$

где $C_{и}$ – стоимость единицы инструмента, руб.;

$Ц_{и}$ – выручка от реализации изношенного инструмента, руб.;

$n_{пер}$, $n_{вос}$ – соответственно количество переточек и восстановлений инструмента;

$C_{пер}$, $C_{вос}$ – соответственно стоимость одной переточки и восстановления инструмента, руб.;

k_{15} – коэффициент случайной убыли инструмента;

k_{16} – коэффициент затрат на амортизацию вспомогательного инструмента;

k_{17} – коэффициент влияния восстановлений на стойкость инструмента;

$\varphi_{пер}$ – число граней для неперетачиваемого инструмента.

$$C_{\text{им}} = \frac{\alpha_{\text{им}} (\Pi_{\text{им}} + n_{\text{вр}} \cdot C_{\text{вр}} + n_{\text{пов}} \cdot C_{\text{пов}}) \cdot K_{15}}{100A_{\text{г}}},$$

где $\alpha_{\text{им}}$ – процент амортизационных отчислений;

$\Pi_{\text{им}}$ – стоимость мерительного инструмента, руб.;

$n_{\text{вр}}, n_{\text{пов}}$ – соответственно количество восстановительных ремонтов и проверок мерительного инструмента;

$C_{\text{вр}}, C_{\text{пов}}$ – соответственно стоимость восстановительного ремонта и проверки, руб.;

$$C_{\text{пр}} = \frac{\alpha_{\text{пр}} (\Pi_{\text{пр}} - \Pi_{\text{ипр}} + 0,4\Pi_{\text{пр}})}{100A_{\text{г}}},$$

где $\alpha_{\text{пр}}$ – процент амортизационных отчислений на приспособления;

$\Pi_{\text{пр}}$ – стоимость приспособления, руб.;

$\Pi_{\text{ипр}}$ – выручка от реализации изношенного приспособления, руб.

Затраты на содержание зданий и сооружений

$$C_{\text{к}} = \frac{S_{\text{о}} \cdot k_{18} \cdot k_{19} \cdot O_{\text{с}} \cdot C_{\text{кг}}}{A_{\text{г}}},$$

где $S_{\text{о}}$ – производственная площадь, занимаемая оборудованием на операции, м²;

k_{18} – коэффициент дополнительной площади на проезды, проходы и т.п.;

k_{19} – коэффициент занятости площади при выполнении операции;

$C_{\text{кг}}$ – среднегодовые расходы на содержание помещений в расчете на 1 м² площади, руб.

Затраты на прочие расходы

$$C_{\text{п}} = (C_{\text{з}} + C_{\text{эс}} + C_{\text{эт}} + C_{\text{эн}} + C_{\text{вм}} + C_{\text{ир}} + C_{\text{им}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{а}} + C_{\text{ро}} + C_{\text{к}}) K_{20},$$

где K_{20} – коэффициент отношения прочих расходов к сумме затрат на оплату труда, эксплуатацию оборудования и оснастки, на помещения.

Обозначим

$$C'_{\text{з}} = C_{\text{зч}} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 (1 + K_1 / 100); \quad (2.6)$$

$$C'_{\text{эс}} = \frac{K_6 \cdot K_7 \cdot K_8 \cdot K_9 \cdot \Pi_{\text{э}}}{\eta}; \quad (2.7)$$

$$C'_{\text{эт}} = \frac{K_9 \cdot K_{10} \cdot K_{11} \cdot K_{12} \cdot \Pi_{\text{э}}}{\eta}; \quad (2.8)$$

$$C'_{ЭН} = Q_{ЭН} \cdot Ц_{ЭН}; \quad (2.9)$$

$$C'_{ВМ} = Q_{ВМ} \cdot Ц_{ЭМ}; \quad (2.10)$$

$$C'_a = \frac{K_o \cdot K_7 \cdot \alpha_a \cdot O_c}{100A_\Gamma \cdot T_\Gamma}; \quad (2.11)$$

$$C'_{ро} = \frac{K_o \cdot K_{13} \cdot W_m \cdot R_m}{T_{рц} \cdot K_{14} \cdot A_\Gamma \cdot T_\Gamma}; \quad (2.12)$$

$$C'_{ир} = \frac{\left((C_{и} + Ц_{и}) + n_{п е р} \cdot C_{п е р} + n_{в о с} \cdot C_{в о с} \right) \cdot K_{15} \cdot K_{16}}{\tau_c (n_{п е р} + 1) K_{17} \cdot \Phi_{п е р}}; \quad (2.13)$$

$$C'_{им} = \frac{\alpha_{им} (Ц_{им} + n_{в р} \cdot C_{в р} + n_{п о в} \cdot C_{п о в}) \cdot K_{15}}{100A_\Gamma \cdot T_\Gamma}; \quad (2.14)$$

$$C'_{п р} = \frac{\alpha_{п р} (Ц_{п р} - Ц_{и п р} + 0,4Ц_{п р})}{100A_\Gamma \cdot T_\Gamma}; \quad (2.15)$$

$$C'_k = \frac{S_o \cdot K_{18} \cdot K_{19} \cdot O_c \cdot C_{к \Gamma}}{A_\Gamma \cdot T_\Gamma}; \quad (2.16)$$

где T_Γ – такт выпуска изделия на технологической линии, мин.

Подставим (2.6)-(2.16) в (2.3):

$$\begin{aligned} C_T = & C'_3 \cdot T_{ш} + C'_{эс} \cdot T_M \cdot N_c + C'_{эт} \cdot T_M \cdot N_T + C'_{ЭН} \cdot T_M + C'_{ВМ} \cdot T_M + \\ & + C'_a \cdot T_{ш} + C'_{ро} \cdot T_{ш} + C'_{ир} \cdot T_M / \tau_c + C'_{им} \cdot T_{ш} + C'_{п р} \cdot T_{ш} + C'_k \cdot T_{ш} + \\ & + K_{20} \cdot C'_3 \cdot T_{ш} + K_{20} \cdot C'_{эс} \cdot T_M \cdot N_c + K_{20} \cdot C'_{эт} \cdot T_M \cdot N_T + K_{20} \cdot C'_{ЭН} \cdot T_M + \\ & + K_{20} \cdot C'_{ВМ} \cdot T_M + K_{20} \cdot C'_a \cdot T_{ш} + K_{20} \cdot C'_{ро} \cdot T_{ш} + K_{20} \cdot C'_{ир} \cdot T_M / \tau_c + \\ & + K_{20} \cdot C'_{им} \cdot T_{ш} + K_{20} \cdot C'_{п р} \cdot T_{ш} + K_{20} \cdot C'_k \cdot T_{ш}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Если обозначить

$$C''_3 = C'_3 + K_{20} \cdot C'_3;$$

$$C''_{эс} = C'_{эс} + K_{20} \cdot C'_{эс};$$

$$C''_{эт} = C'_{эт} + K_{20} \cdot C'_{эт};$$

$$\begin{aligned}
C''_{\text{ЭН}} &= C'_{\text{ЭН}} + K_{20} \cdot C'_{\text{ЭН}}; \\
C''_{\text{ВМ}} &= C'_{\text{ВМ}} + K_{20} \cdot C'_{\text{ВМ}}; \\
C''_{\text{а}} &= C'_{\text{а}} + K_{20} \cdot C'_{\text{а}}; \\
C''_{\text{ро}} &= C'_{\text{ро}} + K_{20} \cdot C'_{\text{ро}}; \\
C''_{\text{ир}} &= C'_{\text{ир}} + K_{20} \cdot C'_{\text{ир}}; \\
C''_{\text{им}} &= C'_{\text{им}} + K_{20} \cdot C'_{\text{им}}; \\
C''_{\text{п р}} &= C'_{\text{п р}} + K_{20} \cdot C'_{\text{п р}}; \\
C''_{\text{к}} &= C'_{\text{к}} + K_{20} \cdot C'_{\text{к}},
\end{aligned}$$

ТО ПОЛУЧИМ:

$$\begin{aligned}
C_{\text{Т}} = (C''_3 + C''_{\text{а}} + C''_{\text{ро}} + C''_{\text{им}} + C''_{\text{п р}} + C''_{\text{к}}) T_{\text{ш}} + C''_{\text{Эс}} \cdot T_{\text{М}} \cdot N_{\text{с}} + \\
+ C''_{\text{ЭТ}} \cdot T_{\text{М}} \cdot N_{\text{Т}} + C''_{\text{ЭН}} \cdot T_{\text{М}} + C''_{\text{ВМ}} \cdot T_{\text{М}} + C''_{\text{ир}} \cdot T_{\text{М}} / \tau_{\text{с}}.
\end{aligned} \quad (2.18)$$

Обозначим

$$C_{\text{ш}} = C''_3 + C''_{\text{а}} + C''_{\text{ро}} + C''_{\text{им}} + C''_{\text{п р}} + C''_{\text{к}}.$$

Подставим в (2.18) следующее выражение:

$$\begin{aligned}
T_{\text{ш}} = T_{\text{М}} + T_{\text{В}} + T_{\text{орг}} + T_{\text{тех}} + T_{\text{отд}} = T_{\text{М}} + T_{\text{В}} + \beta_1 \cdot T_{\text{М}} + \beta_2 (T_{\text{М}} + T_{\text{В}}) + \\
+ \beta_3 (T_{\text{М}} + T_{\text{В}}) = T_{\text{М}} (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3) + T_{\text{В}} (1 + \beta_2 + \beta_3),
\end{aligned} \quad (2.19)$$

где $T_{\text{М}}$, $T_{\text{В}}$, $T_{\text{орг}}$, $T_{\text{тех}}$, $T_{\text{отд}}$ – соответственно время машинное, вспомогательное, технического и организационного обслуживания, отдыха рабочего, мин;

β_1 , β_2 , β_3 – соответственно доля времени на техническое, организационное обслуживание и отдых рабочего.

Тогда

$$\begin{aligned}
C_{\text{Т}} = C_{\text{ш}} \cdot T_{\text{М}} (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3) + C_{\text{ш}} \cdot T_{\text{В}} (1 + \beta_2 + \beta_3) + C''_{\text{Эс}} \cdot T_{\text{М}} \cdot N_{\text{с}} + \\
+ C''_{\text{ЭТ}} \cdot T_{\text{М}} \cdot N_{\text{Т}} + C''_{\text{ЭН}} \cdot T_{\text{М}} + C''_{\text{ВМ}} \cdot T_{\text{М}} + C''_{\text{ир}} \cdot T_{\text{М}} / \tau_{\text{с}}.
\end{aligned}$$

Изменение технологической себестоимости

$$\begin{aligned}
\Delta C_{\text{Т}} = C_{\text{ш}} \cdot T_{\text{М}} (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3) + C_{\text{ш}} \cdot T_{\text{В}} (1 + \beta_2 + \beta_3) + C''_{\text{Эс}} \cdot T_{\text{М}} \cdot N_{\text{с}} + \\
+ C''_{\text{ЭТ}} \cdot T_{\text{М}} \cdot N_{\text{Т}} + C''_{\text{ЭН}} \cdot T_{\text{М}} + C''_{\text{ВМ}} \cdot T_{\text{М}} + C''_{\text{ир}} \cdot T_{\text{М}} / \tau_{\text{с}} - C_{\text{ш}} \cdot T_{\text{М}} (1 + \beta_1 + \\
+ \beta_2 + \beta_3) K_{\text{М}} - C_{\text{ш}} \cdot T_{\text{В}} (1 + \beta_2 + \beta_3) K_{\text{В}} - C''_{\text{Эс}} \cdot T_{\text{М}} \cdot N_{\text{с}} \cdot K_{\text{М}} \cdot K_{\text{Nc}} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - C''_{\text{ЭТ}} \cdot T_M \cdot N_T \cdot K_M \cdot K_{N_T} - C''_{\text{ЭН}} \cdot T_M \cdot K_M \cdot K_{\text{ЭН}} - C''_{\text{ВМ}} \cdot T_M \cdot K_M \cdot K_{\text{ВМ}} - \\
& - C''_{\text{ир}} (T_M / \tau_c) \cdot (K_M / K_\tau) = C_{\text{ш}} \cdot T_M (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3) \cdot (1 - K_M) + \\
& + C_{\text{ш}} \cdot T_B (1 + \beta_2 + \beta_3) \cdot (1 - K_B) + C''_{\text{Эс}} \cdot T_M \cdot N_c (1 - K_M \cdot K_{N_c}) + \\
& + C''_{\text{ЭТ}} \cdot T_M \cdot N_T (1 - K_M \cdot K_{N_T}) + C''_{\text{ЭН}} \cdot T_M (1 - K_M \cdot K_{\text{ЭН}}) + C''_{\text{ВМ}} \cdot T_M (1 - \\
& - K_M \cdot K_{\text{ВМ}}) + C''_{\text{ир}} (T_M / \tau_c) \cdot (1 - K_M / K_\tau).
\end{aligned}$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned}
C_{\text{ш}} \cdot T_M = Z_M; \quad C_{\text{ш}} \cdot T_B = Z_B; \quad C''_{\text{Эс}} \cdot T_M \cdot N_c = Z_{\text{Эс}}; \quad C''_{\text{ЭТ}} \cdot T_M \cdot N_T = Z_{\text{ЭТ}}; \\
C''_{\text{ЭН}} \cdot T_M = Z_{\text{ЭН}}; \quad C''_{\text{ВМ}} \cdot T_M = Z_{\text{ВМ}}; \quad C''_{\text{ир}} \cdot T_M / \tau_c = Z_{\text{ир}}.
\end{aligned}$$

Тогда окончательно получим

$$\begin{aligned}
\Delta C_T = Z_M (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3) \cdot (1 - K_M) + Z_B (1 + \beta_2 + \beta_3) \cdot (1 - K_B) + Z_{\text{Эс}} (1 - \\
- K_M \cdot K_{N_c}) + Z_{\text{ЭТ}} (1 - K_M \cdot K_{N_T}) + Z_{\text{ЭН}} (1 - K_M \cdot K_{\text{ЭН}}) + Z_{\text{ВМ}} (1 - K_M \cdot K_{\text{ВМ}}) + \\
+ Z_{\text{ир}} (1 - K_M / K_\tau), \tag{2.20}
\end{aligned}$$

где $K_M, K_{N_c}, K_{N_T}, K_{\text{ЭН}}, K_{\text{ВМ}}, K_\tau$ – критерии, определяющие изменение значений машинного и вспомогательного времени, силовой и мощности, потребления энергоносителей и вспомогательных материалов (СОЖ), стойкости режущего инструмента:

$$K_M = \frac{T_M^H}{T_M^6}, \quad K_{N_c} = \frac{N_c^H}{N_c^6}, \quad K_\tau = \frac{\tau_c^H}{\tau_c^6} \text{ и т. д.}$$

2.1.2. Критерии оценки эффективности отдельной операции механической обработки заготовок при возможном снижении брака

Для определения величины изменения затрат, связанных с появлением брака при обработке на i -й операции j -й линии $\Delta C_{\text{бр}}$, воспользуемся методикой, приведенной в работе [23]. По этой методике затраты, связанные с появлением брака, можно определить следующим образом:

$$C_{\text{бр}} = C (1 - P_{(\bar{6})}); \tag{2.21}$$

$$\Delta C_{\text{бр}} = C_{\text{бр}}^6 - C_{\text{бр}}^H,$$

где $P_{(б)}$ – вероятность безотказного выполнения операции:

$$P_{(б)} = \prod_{n=1}^N P_{(к)},$$

где $P_{(к)}$ – вероятность безотказного выполнения операции по параметру точности детали;

N – количество изменяющихся параметров точности.

Например

$$P_{(б)} = P_{(т)} \cdot P_{(R_a)} \cdot P_{(\theta)},$$

где $P_{(т)}$, $P_{(R_a)}$, $P_{(\theta)}$ – соответственно вероятность выполнения обработки заготовки с заданной точностью размеров (или формы), шероховатостью и без прижогов.

$$P_{(т)} = (1 - P_{(от)}) \cdot \exp \left(-C_T \left(\frac{\omega}{[T]} - 1 \right) \right); \quad (2.22)$$

$$P_{(R_a)} = (1 - P_{(oRa)}) \cdot \exp \left(-C_{Ra} \left(\frac{R_a}{[R_a]} - 1 \right) \right); \quad (2.23)$$

$$P_{(\theta)} = (1 - P_{(o\theta)}) \cdot \exp \left(-C_\theta \left(\frac{\theta_{п}}{[\theta_{п}]} - 1 \right) \right), \quad (2.24)$$

где $P_{(от)}$, $P_{(oRa)}$, $P_{(o\theta)}$ – соответственно вероятность отказов в технологической системе на операции по параметрам T , R_a , $\theta_{п}$;

ω – производственная погрешность линейного размера;

$[T]$, $[R_a]$, $[\theta_{п}]$ – допускаемые значения параметров обработанной детали по точности размеров, шероховатости и контактной температуре;

C_T , C_{Ra} , C_θ – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Для определения значений C_T , C_{Ra} , C_θ используют следующий приём.

Пусть при известных значениях $R_x = \frac{X}{[X]}$ (X – параметр T , R_a , или $\theta_{п}$) и $P_{(ox)}$

известны $P_{(x)}$. Тогда C_x можно рассчитать по формуле, полученной после логарифмирования и преобразования зависимости (2.22):

$$C_x = \frac{1}{R_{(x)} - 1} \cdot \ln \left(\frac{1 - P_{(ox)}}{P_{(x)}} \right).$$

Обычно брак в технологическом процессе не должен превышать 0,27 %, тогда $P_{(ox)} = 0,9973$. При этом, приняв $P_{(ox)} = 0,001$ [23], можно определить C_x :

$$C_x = \frac{1}{R_{(x)} - 1} \cdot \ln \left(\frac{1 - 0,001}{0,9973} \right) = \frac{0,17 \cdot 10^{-2}}{R_{(x)} - 1}.$$

Зависимость C_x от $R_{(x)}$ приведена на рис. 2.1. Приняв реально возможный диапазон изменения $R_{(x)}$ от 1,1 до 1,3, дальнейшие расчеты выполним

при $C_x \approx 0,011$ (среднее значение указанного диапазона $R_{(x)}$, см. рис. 2.1). Обозначим

$$\varphi_{\omega} = \frac{\omega^{\bar{\delta}}}{[T]}; \quad \varphi_{R_a} = \frac{R_a^{\bar{\delta}}}{[R_a]}; \quad \varphi_{\theta} = \frac{\theta_{\Pi}^{\bar{\delta}}}{[\theta_{\Pi}]}, \quad (2.25)$$

где $\omega^{\bar{\delta}}$, $R_a^{\bar{\delta}}$, $\theta_{\Pi}^{\bar{\delta}}$ – соответственно погрешность размера, фактического значения среднего арифметического отклонения профиля и контактной температуры в базовом варианте.

Введем обозначение

$$B_{\bar{\delta}} = (1 - P_{(от)}) \cdot (1 - P_{(oRa)}) \cdot (1 - P_{(o\theta)}); \quad (2.26)$$

$$3_{\bar{\delta}}^{\bar{\delta}} = (C_T^{\bar{\delta}} - C_{заг}) P_c, \quad (2.27)$$

где $C_{заг}$ – стоимость заготовки, руб.;

P_c – доля себестоимости обработки заготовки C_T на данной операции.

$$3_{\bar{\delta}}^{\bar{\delta}} = (C^{\bar{\delta}} + \Delta C_T - C_{заг}) P_c; \quad (2.28)$$

тогда, подставив (2.25)-(2.28) в (2.21) и выполнив необходимые преобразования, получим зависимость для определения разности затрат, связанных с возможностью появления брака в базовом (б) и новом (н) вариантах:

$$\begin{aligned} \Delta C_{бр} = & C_{заг} \{ [1 - B_{\bar{\delta}} \cdot \exp [- C_T (\varphi_{\omega} - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} - 1) - C_{\theta} (\varphi_{\theta} - 1)]] - \\ & - \{ 1 - B_{\bar{\delta}} \cdot \exp [- C_T (\varphi_{\omega} \cdot K_{\omega} - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} \cdot K_{Ra} - 1) - C_{\theta} (\varphi_{\theta} \cdot K_{\theta} - \\ & - 1)]] \} + 3_{\bar{\delta}}^{\bar{\delta}} \{ 1 - B_{\bar{\delta}} \cdot \exp [- C_T (\varphi_{\omega} - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} - 1) - C_{\theta} (\varphi_{\theta} - \\ & - 1)] \} - 3_{\bar{\delta}}^H \{ 1 - B_{\bar{\delta}} \cdot \exp [- C_T (\varphi_{\omega} \cdot K_{\omega} - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} \cdot K_{Ra} - 1) - \\ & - C_{\theta} (\varphi_{\theta} \cdot K_{\theta} - 1)] \} \} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \Delta C_{бр} = & C_{заг} \cdot B_{\bar{\delta}} \{ \exp [- C_T (\varphi_{\omega} \cdot K_{\omega} - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} \cdot K_{Ra} - 1) - C_{\theta} (\varphi_{\theta} \cdot \\ & \cdot K_{\theta} - 1)] - \exp [- C_T (\varphi_{\omega} - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} - 1) - C_{\theta} (\varphi_{\theta} - 1)] + 3_{\bar{\delta}}^{\bar{\delta}} \{ 1 - \\ & - B_{\bar{\delta}} \cdot \exp [- C_T (\varphi_{\omega} - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} - 1) - C_{\theta} (\varphi_{\theta} - 1)] \} - 3_{\bar{\delta}}^H \{ 1 - B_{\bar{\delta}} \cdot \\ & \cdot \exp [- C_T (\varphi_{\omega} \cdot K_{\omega} - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} \cdot K_{Ra} - 1) - C_{\theta} (\varphi_{\theta} \cdot K_{\theta} - 1)] \} \}. \quad (2.29) \end{aligned}$$

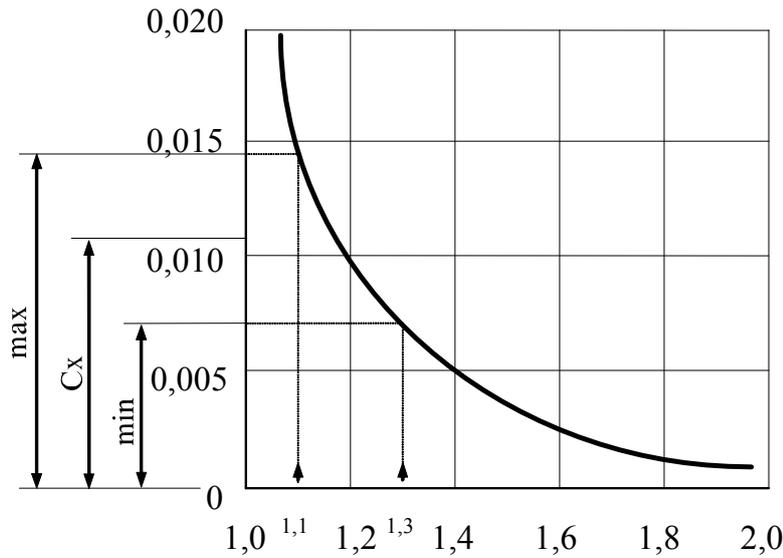


Рис. 2.1. График зависимости $C_x = f(R_x)$

Критерии K_ω , K_{Ra} и K_θ определяют соответствующее изменение параметров точности линейных размеров, шероховатости и температуры поверхностного слоя материала заготовки при переходе от базового к новому варианту:

$$K_\omega = \frac{\omega^H}{\omega^6}; K_{Ra} = \frac{R_a^H}{R_a^6}; K_\theta = \frac{\theta_\Pi^H}{\theta_\Pi^6}.$$

2.1.3. Критерии оценки эффективности технологической линии

Эффект \mathcal{E}_{rj} для j -ой технологической линии представляет собой сумму эффектов на всех операциях и для годовой программы выпуска изделий A_{rj} равен

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{rj} = A_{rj} \sum_{i=1}^J \mathcal{E}_i = A_{rj} \sum_{i=1}^J (\Delta C_T + \Delta C_{6p}) - E_H \sum_{i=1}^J \Delta K_i = A_{rj} \sum_{i=1}^J (\mathcal{Z}_{mi} (1 + \beta_1 + \beta_2 + \\ + \beta_3) \cdot (1 - K_{mi}) + \mathcal{Z}_{vi} (1 + \beta_2 + \beta_3) \cdot (1 - K_{vi}) + \mathcal{Z}_{эci} (1 - K_{mi} \cdot K_{Nci}) + \\ + \mathcal{Z}_{эti} (1 - K_{mi} \cdot K_{Nti}) + \mathcal{Z}_{эni} (1 - K_{mi} \cdot K_{эni}) + \mathcal{Z}_{вmi} (1 - K_{mi} \cdot K_{вmi}) + \\ + \mathcal{Z}_{ипi} (1 - K_{mi} / K_{\tau i}) + C_{заг} \cdot B_6 \{ \exp [- C_T (\varphi_\omega \cdot K_\omega - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} \cdot \\ \cdot K_{Ra} - 1) - C_\theta (\varphi_\theta \cdot K_\theta - 1)] - \exp [- C_T (\varphi_\omega - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} - 1) - \\ - C_\theta (\varphi_\theta - 1)] + \mathcal{Z}_6^6 \{ 1 - B_6 \cdot \exp [- C_T (\varphi_\omega - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} - 1) - C_\theta (\varphi_\theta - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - 1)]\} - 3_6^H \{ 1 - B_6 \cdot \exp [- C_T (\varphi_\omega \cdot K_\omega - 1) - C_{Ra} (\varphi_{Ra} \cdot K_{Ra} - 1) - \\
& - C_\theta (\varphi_\theta \cdot K_\theta - 1)]\} - E_H \sum_{i=1}^J \Delta K_i . \quad (2.30)
\end{aligned}$$

где J – количество операций, выполняемых на j -й технологической линии.

Эффект \mathcal{E}_{ij} зависит от критериев-коэффициентов K_i , определяющих технологические эффекты с разных сторон: критерии K_M , K_B – по производительности; K_T , K_{Nc} и K_{NT} – по работоспособности режущего инструмента и энергозатратам; $K_{ЭH}$ и K_{BM} – по энергоносителям и вспомогательным материалам (СОЖ); K_ω , K_{Ra} , K_θ – по качеству изготавливаемых деталей.

С помощью критериев K_i по зависимости (2.30) можно оценить эффективность системы очистки СОЖ, обслуживающей технологическую линию, включающую различные операции механической обработки заготовок. Зависимости (2.20) и (2.30) универсальны, главным достоинством является возможность их применения для оценки эффективности внедрения на операциях и линиях механической обработки любых мероприятий: например, использование новой техники приготовления или подачи СОЖ, применения режущих инструментов с износостойкими покрытиями и т.п.; эти зависимости можно использовать и для оценки эффективности различных операций – термических, сборочных, контрольных и других.

Предлагаемая система универсальных критериев технологической эффективности состоит из набора критериев K_i (табл. 2.1), характеризующих изменяющиеся технологические показатели операций. При этом в зависимости (2.20) или (2.30) остаются только те затраты (Z_i), изменение которых связано с технологическими эффектами K_i . Например, для оценки экономической эффективности операции механической обработки при наличии технологических эффектов по машинному времени T_M , эффективной мощности $N_{эс}$, стойкости режущего инструмента τ_c и шероховатости обработанной поверхности (по параметру R_a), зависимость (2.30) преобразуется к следующему виду (в расчете на одну деталь):

$$\begin{aligned}
\mathcal{E} = & Z_{Mi} (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3) \cdot (1 - K_{Mi}) + Z_{эci} (1 - K_{Mi} \cdot K_{Nci}) + Z_{ипi} (1 - \\
& - K_{Mi} / K_{\tau i}) + C_{зар} \cdot B_6 \{ \exp [- C_{Ra} (\varphi_{Ra} \cdot K_{Ra} - 1)] - \exp [- C_{Ra} (\varphi_{Ra} - \\
& - 1)]\} + 3_6^H \{ 1 - B_6 \cdot \exp [- C_{Ra} (\varphi_{Ra} - 1) - 3_6^6 \{ 1 - B_6 \cdot \exp [- \\
& - C_{Ra} (\varphi_{Ra} \cdot K_{Ra} - 1)]\} - E_H \cdot \Delta K_i . \quad (2.31)
\end{aligned}$$

Т а б л и ц а 2.1

Система универсальных критериев оценки эффективности
технологических операций и линий

Операция	Критерий									
	K_M	K_B	K_{Nc}	K_{NT}	K_T	$K_{ЭH}$	K_{BM}	K_O	K_{Ra}	K_θ
Механическая обработка	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
Термическая	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+
Контрольная	+	+	-	-	-	+	-	+	-	-
Сборочная	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
Критерий применяется (+) или не применяется(-)										

Полученную зависимость (2.30) применительно к вопросам, рассматриваемым в данной диссертационной работе, можно использовать для решения следующих задач:

1. Выбор варианта системы очистки СОЖ для технологической операции или линии по наибольшему экономическому эффекту.
2. Анализ действующих систем очистки СОЖ с целью определения направления и целесообразности их совершенствования.
3. Выявление оптимальной системы очистки СОЖ, обеспечивающей минимум суммарных затрат при обработке заготовок на операции или линии.

В общем случае эти задачи можно сформулировать следующим образом:

1. Выбор варианта технологической операции или линии.
2. Анализ технологических операций или линий действующего производства с целью определения направлений их совершенствования, оценки целесообразности реализации различных мероприятий, повышающих эффективность отдельных операций или линий в целом.
3. Структурная или параметрическая оптимизация технологических операций или линий по экономическому эффекту \mathcal{E}_r .

Решение первой и второй задач становится возможным при наличии данных о затратах в базовом варианте и значениях критериев коэффициентов K_i по сравниваемым вариантам. Решение третьей задачи требует знания диапазона возможного изменения критериев-коэффициентов K_i , а результатом является оптимальное сочетание K_i , которое обеспечивает максимальное значение экономического эффекта \mathcal{E}_r (проектируемая система очистки должна обеспечить это оптимальное сочетание K_i). Рассмотрим эту задачу более подробно.

2.2. Определение оптимального сочетания критериев технологической эффективности систем очистки СОЖ для технологических линий механической обработки заготовок

Рассмотрим в качестве примера технологическую линию механической обработки заготовок с применением СОЖ, включающую две операции O_1 и O_2 ; эта линия должна обеспечить заданные показатели качества обработанных деталей (или заготовок) при максимальной производительности обработки. С увеличением концентрации механических примесей в СОЖ снижается выпуск V годных деталей и увеличивается количество B бракованных деталей (рис. 2.2,б), возрастают затраты на выполнение операций (кривые Z_{o1} и Z_{o2} на рис. 2.2,а).

На данной технологической линии можно применить два очистителя, стоимость которых изменяется в зависимости от обеспечиваемой ими степени очистки СОЖ ϵ (кривые $Z_{\epsilon 1}$ и $Z_{\epsilon 2}$ на рис. 2.2,а). Рассмотрим эффективность применения каждого из этих очистителей на операциях O_1 и O_2 .

Для начала сравним эффективность применения на операции O_1 очистителей ϵ_1 и ϵ_2 . Выпуск годных деталей при использовании очистителей ϵ_1 и ϵ_2 соответственно обозначим $V_{1,1}$ и $V_{1,2}$, а количество бракованных деталей – $B_{1,1}$ и $B_{1,2}$; тогда, согласно рис. 2.2,б: $V_{1,1} > V_{1,2}$, а $B_{1,1} < B_{1,2}$; затраты на выполнение операции $Z_{1,1} < Z_{1,2}$ (см. рис. 2.2,а). Экономический эффект $\mathcal{E}_{1,2}$ от применения на операции O_1 очистителя ϵ_2 больше эффекта $\mathcal{E}_{1,1}$, следовательно $K_{1,2} > K_{1,1}$.

При сравнении аналогичных показателей эффективности на операции O_2 для очистителей ϵ_1 и ϵ_2 имеем (см. рис. 2.2): $V_{2,1} > V_{2,2}$; $B_{2,1} < B_{2,2}$; $Z_{2,2} > Z_{2,1}$; $\mathcal{E}_{2,1} > \mathcal{E}_{1,2}$; $K_{2,1} > K_{2,2}$. Следовательно, на операции O_1 более эффективен очиститель ϵ_2 , а на операции O_2 – очиститель ϵ_1 . Выбрать оптимальный очиститель для данной технологической линии можно по наибольшему суммарному эффекту $\mathcal{E}_{\text{тл}}$, полученному при суммировании эффектов от применения очистителя на каждой операции:

$$\mathcal{E}_{\text{тл}} = \max \begin{cases} \mathcal{E}_{1,1} + \mathcal{E}_{2,1} = \mathcal{E}_{\epsilon 1} \\ \mathcal{E}_{1,2} + \mathcal{E}_{2,2} = \mathcal{E}_{\epsilon 2} \end{cases}.$$

Предположим, что $\mathcal{E}_{\epsilon 2} > \mathcal{E}_{\epsilon 1}$; тогда очиститель ϵ_2 будет наиболее эффективным для данной технологической линии механической обработки, а обеспечиваемое им сочетание критериев технологической эффективности K_{2i} будет оптимальным. Для расчета экономического эффекта $\mathcal{E}_{\text{тл}}$ от внедрения какого-либо мероприятия на j -й технологической линии, состоящей из любого числа операций (i), необходимо определить экономические эффекты \mathcal{E}_i по всем операциям в зависимости от каждого критерия технологической эффективности K_{ji} , выбрать максимальное значение

$\mathcal{E}_{\text{тл}} = \sum_{i=1}^J \mathcal{E}_i(K_{ji})$ и соответствующее сочетание K_{ji} на операциях (в пятой главе приведены расчеты $\mathcal{E}_{\text{тл}}$ для автоматической линии, состоящей многих станций; см. также п. 2.1.3).

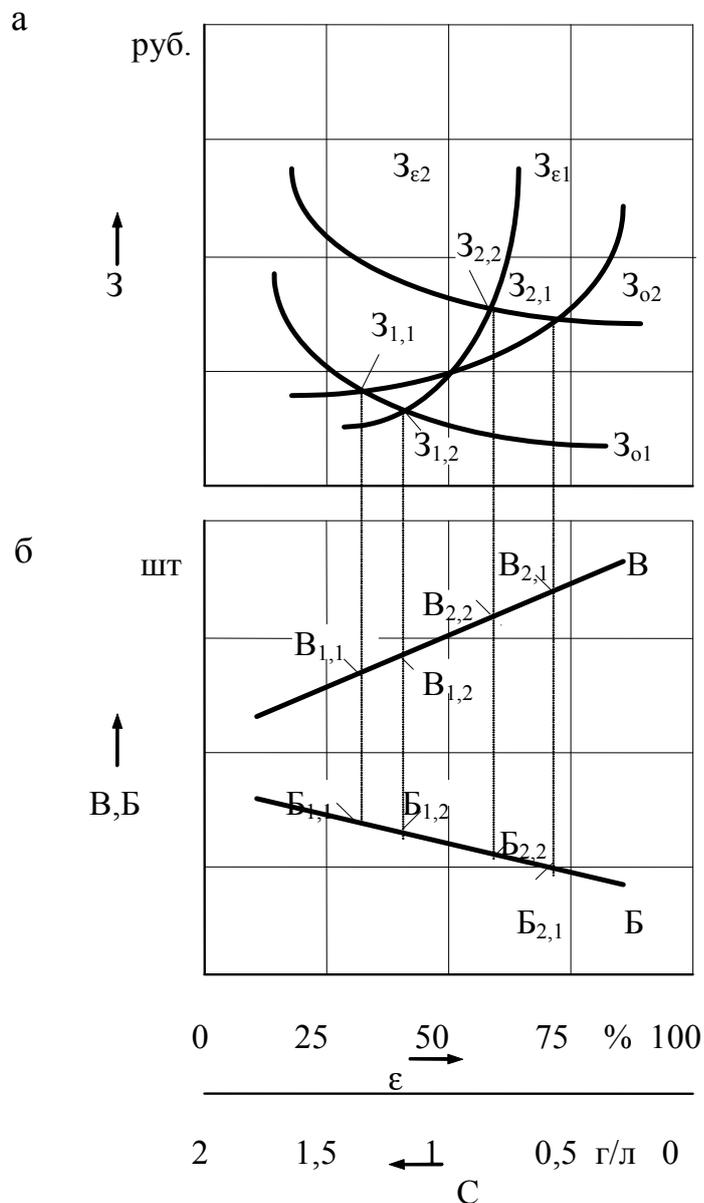


Рис. 2.2. Зависимость затрат на механическую обработку Z_0 , и на очистку СОЖ Z_ϵ (а), выпуска годных В и бракованных Б деталей (б) от степени очистки ϵ и концентрации С механических примесей в СОЖ

Анализ зависимости (2.30) показывает, что максимальное значение \mathcal{E}_r обеспечивается, когда K_r приближается (гипотетически) к $+\infty$, а остальные коэффициенты K_i стремятся к нулю. При значениях $K_i = 1$ эффект отсутствует ($\mathcal{E}_r = 0$). Зависимости \mathcal{E}_r от критериев $K_m, K_b, K_{\text{НС}}, K_{\text{ПГ}}, K_{\text{ЭН}}, K_{\text{ВМ}}, K_r$ линейные, причем зависимость \mathcal{E}_r от последнего критерия – обратно-пропорциональная, а зависимости от остальных критериев – прямопропор-

циональные. Зависимости \mathcal{E}_r (K_0 ; K_{Ra} ; K_0) – экспоненциальные. Изменение капитальных вложений ΔK (например, стоимость очистителей, см. рис. 1.13) также имеет экспоненциальный характер.

Задача определения максимального значения экономического эффекта \mathcal{E}_r , а следовательно, и оптимального сочетания критериев K_i , для технологической линии, состоящей из нескольких операций (и тем более для участка или цеха), при одновременном изменении нескольких критериев технологической эффективности K_i , требует большого количества расчетов и для нелинейного уравнения (2.30) может быть решена несколькими итерационными методами [1, 44, 82]:

1. Методом Гаусса-Зейделя, который прост в реализации, но имеет ряд недостатков, в частности, сходимость метода линейна, значительно увеличивает время расчетов на ЭВМ, сходимость метода зависит от начального приближения.

2. Методом Ньютона-Рафсона, имеющим квадратичную (ускоренную) сходимость и определенность алгоритма. Недостатком этого метода является трудоемкость определения матрицы Якоби, что может быть устранено при некоторой модернизации метода.

Существуют и другие “эвристические” методы, например, метод штрафных функций, случайного выбора начальной точки. Однако эти методы неприменимы для решения поставленной задачи. Решим задачу оптимизации зависимости (2.30) модернизированным методом Ньютона.

Пусть требуется минимизировать функцию $f_0(x)$, $x \in E^n$, при ограничениях

$$f_i(x) \leq 0, i \in I, f_i(x) = 0, i \in I^0, \quad (2.32)$$

где I, I^0 – конечные множества индексов.

Предположим, что все функции $f_i(x)$ непрерывно дифференцируемы. Разложим $f_i(x)$ в ряд Тейлора и заменим в x_0 все ограничения на линейные

$$\begin{cases} f_1(x) \cong f_1(a) + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Delta x_n, \\ \dots \\ f_n(x) \cong f_n(a) + \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n. \end{cases}$$

Приравняем правые части нулю, перенося затем $f_i(a)$ в правую часть системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Delta x_n = -f_1; \\ \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n = -f_n. \end{cases}$$

В результате получится задача линейного программирования. Естественно было бы решение линеаризованной задачи взять в качестве следующего приближения, как это делается в методе Ньютона для решения систем нелинейных уравнений [1]. К сожалению, этот путь не приводит к цели, так как обычно вспомогательная задача линейного программирования не имеет решения. Поэтому необходимо наложить некоторые ограничения на приращение вектора X в точке x_0 , чтобы решение линеаризованной задачи в точке x_0 не уходило далеко от x_0 , оставаясь в такой окрестности x_0 , в которой линеаризация еще справедлива. Попробуем это сделать добавлением квадратичного члена к линеаризованной целевой функции.

Положим:

$$F(x) = \max_{i \in I} f_i(x);$$

$$I_\delta(x) = \{i \in I: f_i(x) \geq F(x) - \delta\}, \delta \geq 0. \quad (2.33)$$

Предположим, что $F(x) \geq 0$ при всех x , и что существуют такие константы $N > 0, \delta > 0$, что:

а) множество $\Omega_N = \{x: f_0(x) + F(x) \leq C_0\}$, при $C_0 = f_0(x_0) + N \cdot F(x)$ ограничено;

б) градиенты функций $f_i(x), i \in \{0\} \cup I$, в Ω_N удовлетворяют условию Липшица:

$$\|f'_i(x_1) - f'_i(x_2)\| \leq L \cdot \|x_1 - x_2\|;$$

в) задача квадратичного программирования

$$\min ((f'_0(x), p) + \frac{1}{2} \|p\|^2), (f'_i(x), p) + f_i(x) \leq 0, i \in I_\delta(x) \quad (2.34)$$

разрешима относительно $p \in E^n$ при любом $x \in \Omega_N$, и существуют такие множители Лагранжа $u^i(x), i \in I_\delta(x)$, что

$$\sum_{i \in I} u^i(x) \leq N,$$

где $\|p\|$ – эвклидова норма вектора p .

Обозначим решение задачи (2.24) через $p(x)$, а множители Лагранжа через $u^i(x), i \in I_\delta(x)$. Сформулируем алгоритм решения задачи.

Пусть x_0 – начальное приближение и выбрано $\varepsilon_0: 0 < \varepsilon_0 < 1$. Пусть в процессе работы алгоритма уже получена точка x_k . Построение следующего приближения производим в два этапа:

1. Решаем (2.34) при $x = x_k$, находим ее решение – вектор $p_k = p(x_k)$.

2. Находим первое значение $i=0,1,\dots$, при котором будет выполнено неравенство

$$f_0\left(x_k + \left(\frac{1}{2}\right)^i p_k\right) + N \cdot F\left(x_k + \left(\frac{1}{2}\right)^i p_k\right) \leq f_0\left(x_k + N \cdot F(x_k) - \left(\frac{1}{2}\right)^i \varepsilon_0 (p^2)\right).$$

Если это неравенство впервые было выполнено при $i = i_0$, то полагаем $\alpha_k = 2^{-i_0}$, $x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k$. Таким образом, на каждом шаге выполняется следующее неравенство:

$$f(x_{k+1}) + NF(x_{k+1}) \leq f(x_k) + NF(x_k) - \alpha_k \varepsilon_0 \|p\|^2.$$

Пусть в задаче имеются только ограничения на изменения каждой координаты в отдельности, т.е. задача имеет вид:

$$\min \{f_0(x); a_j \leq x_j \leq b_j, j=1, 2, \dots, n\},$$

причем значения $a_j = -\infty$, $b_j = +\infty$ не исключаются. Для такой задачи целесообразно включить во вспомогательную задачу все ограничения. При этом

$$F(x) = \max \{0, a_1 - x_1, \dots, a_n - x_n, x_1 - b_1, \dots, x_n - b_n\},$$

а вспомогательная задача принимает вид:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_0}{\partial x_j} p_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (p_j)^2 : a_j \leq x_j + p_j \leq b_j, j=1 \dots n \right\}.$$

Теперь целевая функция представляет собой сумму членов, каждый из которых зависит от своей переменной, меняющейся независимо от остальных, а задача легко решается:

$$p_j(x) \begin{cases} a_j - x_j, & \text{если } -\frac{\partial f_0}{\partial x_j} \leq a_j - x_j; \\ -\frac{\partial f_0}{\partial x_j}, & \text{если } a_j - x_j < -\frac{\partial f_0}{\partial x_j} < b_j - x_j; \\ b_j - x_j, & \text{если } -\frac{\partial f_0}{\partial x_j} \geq b_j - x_j. \end{cases} \quad (2.35)$$

Зная $p_j(x)$, нетрудно найти множители Куна-Таллера. Обозначим через u^- , u^+ множители, соответствующие неравенствам:

$$x_j + p_j - b_j \leq 0, \quad -x_j - p_j + a_j \leq 0.$$

Тогда функция Лагранжа приобретает вид

$$\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{2}(p_j) + \frac{\partial f_0}{\partial x_j} p_j + u^+(a_j - x_j - p_j) + u^-(x_j + p_j - b_j) \right].$$

Множители Куна-Таллера должны обладать следующими свойствами:

1. Минимум функции Лагранжа по p_j должен достигаться в решении $p(x)$. Отсюда, путем дифференцирования получаем:

$$\frac{\partial f_0}{\partial x_j} - u^+ + u^- + p_j = 0.$$

$$2. u^+ \geq 0, u^+(a_j - x_j - p_j) = 0, u^- = 0, u^-(x_j + p_j - b_j) = 0.$$

Так как $p_j = p(x)$ теперь известно, то из полученных соотношений и (2.35) можно определить u^- , u^+ :

$$а) \text{ Если } \frac{\partial f_0}{\partial x_j} \leq a_j - x_j, \text{ то } u^- = 0; u^+ = \frac{\partial f}{\partial x_j} + p_j(x) = \frac{\partial f}{\partial x_j} + a_j - x_j;$$

$$б) \text{ Если } a_j - x_j < -\frac{\partial f_0}{\partial x_j} < b_j - x_j, \text{ то } u^- = u^+ = 0;$$

$$в) \text{ Если } -\frac{\partial f_0}{\partial x_j} \geq b_j - x_j, \text{ то } u^+ = 0; u^- = -\frac{\partial f_0}{\partial x_j} - p_j(x) = -\frac{\partial f_0}{\partial x_j} - b_j + x_j.$$

Итак, в случае простых ограничений вспомогательная задача легко решается и также определяются множители Куна-Таллера.

Впрочем, если начальная точка x_0 удовлетворяет ограничениям $a \leq x_0 \leq b$, а по построению $a \leq x_0 + p(x) \leq b$, то $a \leq x_0 + \alpha p(x) \leq b$, $0 \leq \alpha \leq 1$ и поэтому

$$F(x + \alpha p(x)) = 0.$$

Отсюда следует, что для выбора α на каждом шаге алгоритма линейаризации по формуле

$$f(x_{k+1}) + NF(x_{k+1}) \leq f(x_k) + NF(x_k) - \alpha_k \varepsilon_0 \|p\|^2.$$

нет необходимости в знании константы N , а значит нет необходимости вычислять множители Куна-Таллера.

В связи с выше перечисленным, при простых ограничениях алгоритм приобретает следующий вид:

1. Выбирают точку x_0 : $a_j \leq x_{0j} \leq b_j, j = 1 \dots n$.

2. Если точка x_k уже построена, то вычисляют вектор $p_k = p(x_k)$ по зависимостям (2.35).

3. Делят пополам $\alpha = 1$ до выполнения неравенства

$$f_0(x_k + \alpha p_k) \leq f_0(x_k) - \varepsilon_0 \alpha \|p\|^2.$$

Полагают α_k равным полученному α и

$$x_{k+1} = x_k + \alpha p_k.$$

Возвращаются к шагу 2.

4. Критерий останова: $p_k = 0$.

Основной операцией, требующей значительных вычислений при реализации алгоритма на каждом шаге, является решение задачи квадратичного программирования. При выборе метода решения этой задачи необходимо учитывать, что, она является вспомогательной, ее решение необходимо получить за конечное число шагов. Кроме того, поскольку константа N заранее, вообще говоря, неизвестна, для контроля правильности выбора N при решении (2.34) удобно получить и соответствующие множители Лагранжа $u_j(x)$. С этих позиций представляется целесообразным при решении (2.34) перейти к двойственной задаче и решать ее методом сопряженных градиентов.

Построим двойственную задачу для (2.34). Целевая функция двойственной задачи имеет вид:

$$\varphi(u) = \min_p \left[(f'_0(x), p) + \frac{1}{2} \|p\|^2 + \sum_{i \in I} u_i ((f'_i(x), p) + f_i(x)) \right]. \quad (2.36)$$

Приравнявая нулю производные по p_k от правой части последнего равенства, найдем что минимум достигается при

$$p = -f'_0(x) - \sum_{i \in I} u_i f'_i(x). \quad (2.37)$$

Таким образом, точка p_k однозначно определяется вектором U с компонентами u_i , $i \in I_\delta(x)$. Подставив (2.37) в правую часть (2.36) получим

$$\varphi(u) = -\frac{1}{2} \left\| f'_0(x) + \sum_{i \in I} u_i f'_i(x) \right\|^2 + \sum_{i \in I} u_i f_i(x).$$

Итак, вычислена целевая функция двойственной задачи. Сама двойственная задача состоит теперь максимизации $\varphi(u)$ при ограничениях $u_i \geq 0$, $i \in I_\delta(x)$.

Таким образом, получилась задача максимизации квадратичной формы при простых ограничениях, которую можно решить методом сопряженных градиентов. В результате решения будут определены множители Лагранжа $u_i(x)$, а подстановка $u_i(x)$ в (2.37) даст вектор $p(x)$ – решение исходной задачи.

Для поиска экстремальной точки с требуемой точностью ϵ_0 необходимо область допустимых значений (ОДЗ) разбить на квадраты со стороной ϵ_0 (рис. 2.3,а). Таким образом задача поиска разбивается на $M \cdot N$ подзадач для каждого квадрата в отдельности. Для примера рассмотрим оптимизируемую функцию на плоскости двух переменных x и y в следующих границах:

$$\begin{cases} x_0 = a_1; \\ x_i = x_{i-1} + \epsilon_0; \\ x_N = b_1. \end{cases} \quad \begin{cases} y_0 = a_2; \\ y_i = y_{i-1} + \epsilon_0; \\ y_M = b_2. \end{cases}$$

После того, как метод линеаризации был запущен $M \cdot N$ раз (начальным приближением являются произвольные точки текущего квадрата), получим промежуточный результат $M \cdot N$ различных точек. Обработку результатов ведут следующим образом:

- если экстремальная точка находится внутри ϵ_0 -квадрата (точка m_1 на рис. 2.3,а), то считают ее экстремальной точкой исходной задачи;
- если m_1 – точка, принадлежащая внутренней границе, и она была получена только из одного ϵ_0 -квадрата, то m_1 не является экстремальной точкой исходной задачи;
- если m_2 – точка, принадлежащая внутренней границе, и она была получена из смежных ϵ_0 -квадратов, то можно считать ее экстремальной точкой исходной задачи.

Но этот метод невозможно реализовать на практике, поскольку потребуются очень большие ресурсы памяти и скорости обработки. Например, в исходной задаче по зависимости (2.31) осуществляется поиск по восьми матрицам (для каждого из коэффициентов K_{ji}); для двух технологических линий, включающих по десять операций механической обработки, одна матрица K_{ji} состоит из $2 \times 10 = 20$ элементов. Если предположить, что для каждой переменной ОДЗ разбита хотя бы на два квадрата (реально больше), то в итоге общее количество ϵ_0 -квадратов

$$N_{\epsilon_0} = (2^8)^{20} = 2^{160}.$$

Отсюда становится очевидным, что даже для этого сильно упрощенного случая, решение задачи становится нереальным.

Допустим, на каком-то шаге метода линеаризации из точки A попадаем в точку B (см. рис. 2.3,б). окружив отрезок AB ϵ_0 -окрестностью, изымаем из ОДЗ эту окрестность. То же самое сделаем на следующих шагах. В результате этого ОДЗ постепенно сокращается, и метод линеаризации запускается в еще не исследованных областях. Этот метод лучше преды-

дущего с точки зрения экономии времени и памяти, однако непонятно, как находить еще не исследованные области.

Можно совместить простоту реализации первого метода и эффективность второго метода (см. рис. 2.3,в):

1. Разбивают ОДЗ на ϵ_0 -квадраты, как и в первом случае.

2. Если в процессе работы метода линейаризации из точки А попадают в точку В, то из ОДЗ изымают все ϵ_0 -квадраты, через которые проходит отрезок АВ. Таким образом, ОДЗ постепенно сокращается.

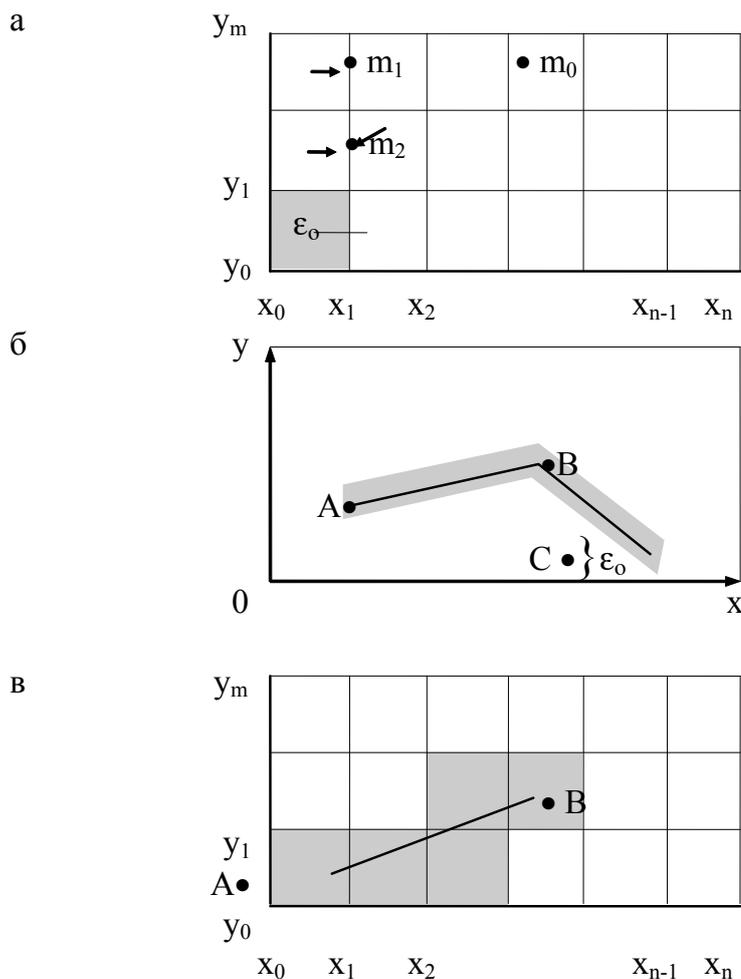


Рис. 2.3. Схемы исследования области допустимых значений:
 а – метод “сетки”; б – линейный метод; в – комбинированный метод

Рассмотрим, какие изменения произойдут в результате учета вероятности нахождения ϵ_0 -окрестностей в ОДЗ. Разобьем ОДЗ на квадраты со стороной ϵ_0 (плоский случай). Если задана вероятность поиска $p_n = 100\%$, то это означает, что необходимо найти все ϵ_0 -окрестности. Если $p_n < 100\%$,

то можно увеличить сетку ОДЗ в κ_{Π} раз, где $\kappa_{\Pi} = \sqrt{\frac{100}{p_{\Pi}}}$. Например, если $\varepsilon_0 = 0,1$; $p_{\Pi} = 64\%$; то

$$\kappa_{\Pi} = \sqrt{\frac{100}{64}} = \frac{10}{8} = 1,25; \quad \varepsilon_0' = \varepsilon_0 \cdot \kappa_{\Pi} = 0,1 \cdot 1,25 = 0,125.$$

Очевидно, что в этом случае сетка ОДЗ будет шире, следовательно, сократится количество ε_0 -квадратов – уменьшится время расчетов. В об-

щем случае для N-мерного пространства поиска $\kappa_{\Pi} = \sqrt[N]{\frac{100}{p_{\Pi}}}$; $\varepsilon_0' = \varepsilon_0 \cdot \kappa_{\Pi}$.

Алгоритм приобретает следующий вид:

1. Выбор первой незанятой ε_0 -окрестности.
2. Выбор z_0 , как центра ε_0 -окрестности.
3. Вычисление $p_k = p(z_k)$:

$$p_j(z) = \begin{cases} a_j - z_j, & \text{если } -\frac{\partial \Delta}{\partial z_j} \leq a_j - z_j; \\ -\frac{\partial \Delta}{\partial z_j}, & \text{если } a_j - x_j < -\frac{\partial \Delta}{\partial z_j} < b_j - x_j; \\ b_j - z_j, & \text{если } -\frac{\partial \Delta}{\partial z_j} \geq b_j - z_j. \end{cases}$$

4. Деление $\alpha' = \alpha / 2$ так, что $\Delta(z_k + \alpha p_k) \leq \Delta(z_k) - \delta \alpha \|p_k\|^2$. Полагаем $\alpha_k = \alpha'$.

5. Определение максимального значения $p_k = \max_{1 \leq j \leq \text{DIM}} (|p_{jm}|)$,

где DIM = $8 \times JG \times IG$ – массив данных; JG, IG – соответственно количество технологических линий и операций.

Полагаем $\sigma_k = \frac{\varepsilon_0}{p_k m}$, $\beta_k = \sigma_k$.

6. Если $\beta_k < \alpha_k$, то переходим к следующему шагу. Иначе переходим к шагу 10.

7. Полагаем $z_{k+1} = z_k + \beta_k p_k$.

8. Если z_{k+1} принадлежит уже занятой ε_0 - окрестности, то переходим к шагу 1, иначе переходим к следующему шагу.

9. Считаем ε_0 -окрестность теперь занятой. Полагаем $\beta_k = \beta_k + \sigma_k$ и переходим к шагу 6.

10. Полагаем $z_{k+1} = z_k + \alpha_k p_k$.

11. Если $p_k = 0$, то запоминаем полученный результат и переходим к шагу 1, иначе переходим к следующему шагу.

12. Если z_{k+1} принадлежит уже занятой ε_0 -окрестности, то переходим к шагу 1. Иначе переходим к следующему шагу.

13. Считаем эту ε_0 -окрестность теперь занятой. Полагаем $z_k = z_{k+1}$ и переходим к шагу 3.

14. Критерий останова: нет свободных ε_0 -окрестностей.

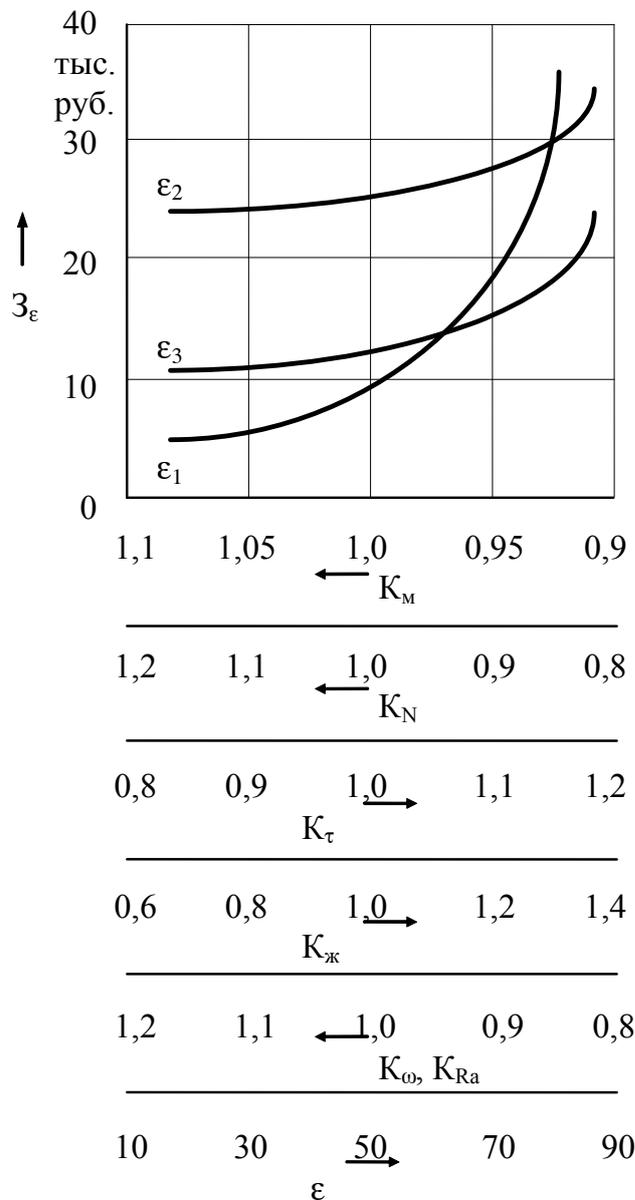


Рис. 2.4. Техничко-экономические показатели различных систем очистки СОЖ (к примеру)

С 6-го по 9-й шаги описан цикл, предназначенный для выяснения ε_0 -окрестностей, через которые проходит отрезок АВ, где А есть z_k , а точка В – это $z_{k+1} = z_k + \alpha_k p_k$. Длина шага для “просматривания” отрезка АВ определяется на 5-ом шаге алгоритма. Блок-схема алгоритма определения оптимального сочетания критериев K_{ji} приведена в прил. 1.

Выявим влияние каждого технологического критерия K_{ji} и затрат на выполнение операции на экономическую эффективность технологической линии (ТЛ), состоящей из двух различных операций O_1 и O_2 . Примем затраты на операцию O_1 : $z_{m1} = z_{b1} = z_{N1} = z_{\tau1} = z_{ж1} = 1$ руб.; затраты на операцию O_2 : $z_{m2} = z_{b2} = z_{N2} = z_{\tau2} = z_{ж2} = 10$ руб. Программа выпуска изделий $A_r = 10000$ шт, стоимость заготовки $C_{заг} = 1$ руб. Рассмотрим экономическую эффективность ТЛ при внедрении системы очистки СОЖ, обеспечивающей технологические эффекты по машинному времени T_m ($0,9 < K_m < 1,1$), мощности резания N_s ($0,8 < K_N < 1,2$), стойкости режущего инструмента τ_c ($0,8 < K_\tau < 2,2$), расходу и стоимости СОЖ ($0,5 < K_{ж} < 2,2$), по погрешности линейных размеров ω ($0,5 < K_\omega < 1,2$) и шероховатости обработанной поверхности по параметру R_a ($0,8 < K_{Ra} < 1,2$). На данной ТЛ можно применить три системы очистки СОЖ ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ рис. 2.4), которые различны по своему составу и затратам на очистку СОЖ ($z_\varepsilon = \Delta K \cdot E_n + z_3$). Выполним расчеты по зависимости (2.30), оставив в ней только те слагаемые в которых изменяются вышеперечисленные K_{ji} . Результаты расчетов свидетельствуют о различном влиянии критериев K_{ji} на экономический эффект \mathcal{E}_r . Так изменение машинного времени T_m вызывает приращение \mathcal{E}_r на 10 тыс. руб., тогда как изменение потребляемой мощности N дает рост \mathcal{E}_r на 4 тыс. руб. (рис. 2.5). Применение различных СОЖ может обеспечить такое же изменение экономического эффекта \mathcal{E}_r , как и изменение T_m (рис. 2.6).

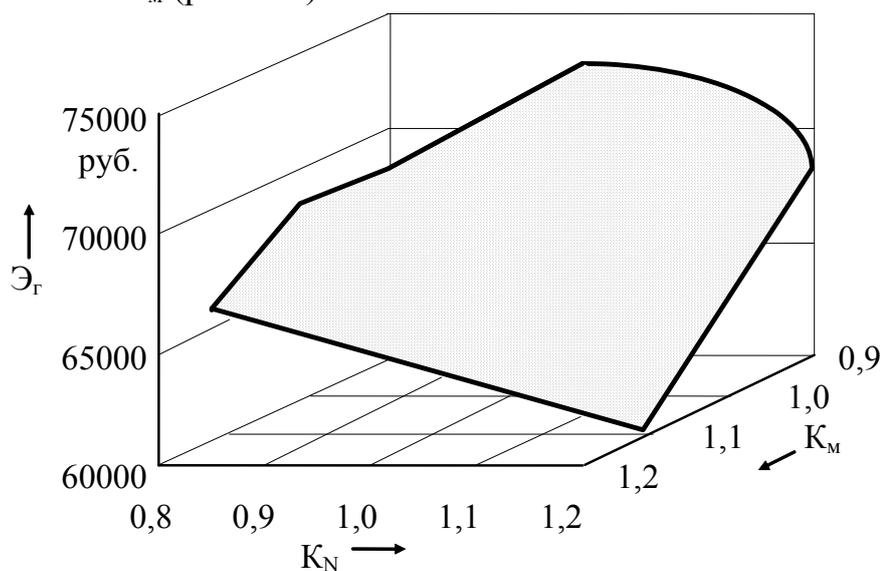


Рис. 2.5. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения машинного времени K_M и мощности резания K_N

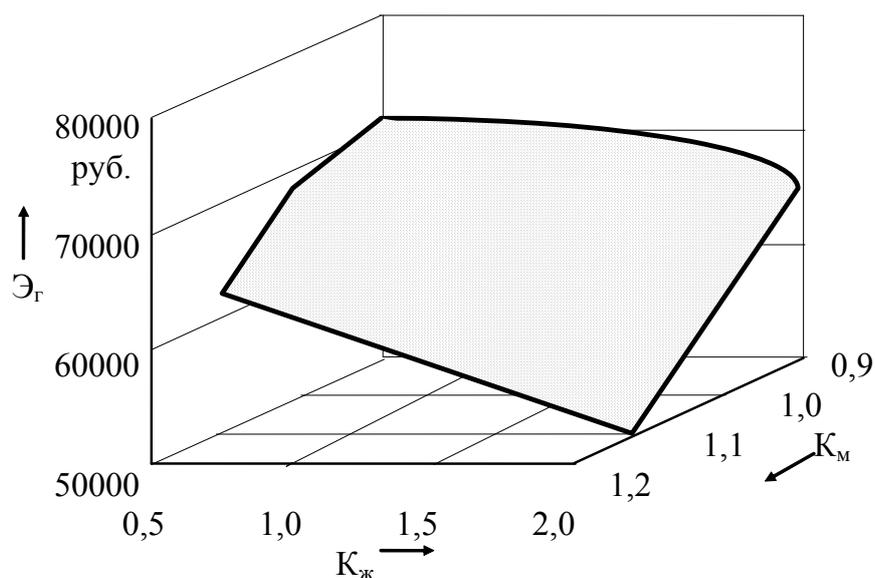


Рис. 2.6. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения машинного времени K_M и стоимости жидкости $K_{ж}$

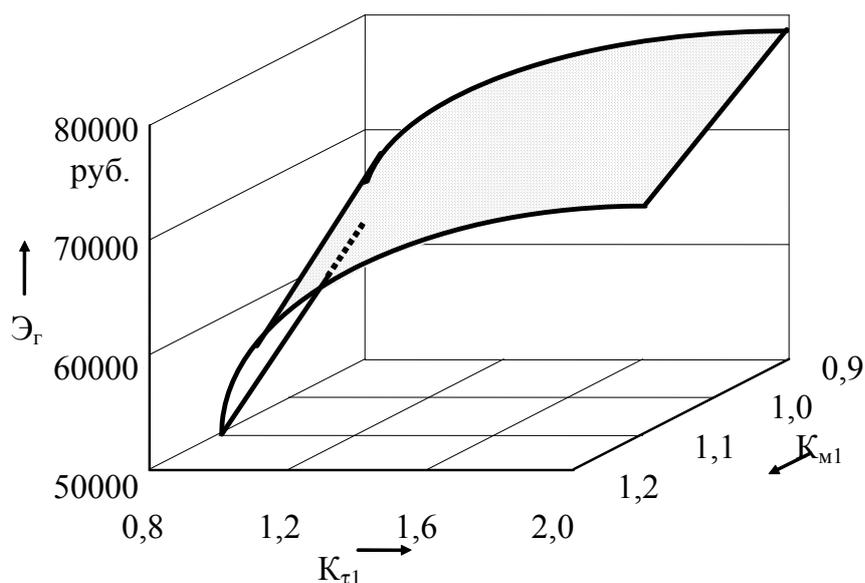


Рис. 2.7. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения машинного времени K_{M1} и периода стойкости режущего инструмента $K_{\tau1}$ на операции O_1

Соотношение затрат на выполнение операций оказывает заметное влияние на экономический эффект. Так, например, при изменении машинного времени T_{M1} и периода стойкости режущего инструмента τ_{c1} на операции O_1 можно достигнуть $\mathcal{E}_r \cong 80$ тыс. руб. (рис. 2.7), а при изменении машинного времени T_{M1} на операции O_1 и периода стойкости τ_{c2} на операции O_2 – $\mathcal{E}_r \cong 116$ тыс. руб. (рис. 2.8). Увеличение стойкости инструмента τ_{c1} на

операции O_1 дает гораздо меньшее приращение \mathcal{E}_r , чем варьирование машинным временем T_{m2} (рис. 2.9) и стойкостью инструмента τ_{c2} (рис. 2.8) на операции O_2 .

Изменение параметров качества обработанной детали (например точности линейных размеров и параметра шероховатости R_a) также существенно изменяет экономический эффект \mathcal{E}_r (рис. 2.10). Однако соотношение затрат по операциям O_1 и O_2 не оказывает столь заметного влияния на экономический эффект (рис. 2.11).

Сравнение результатов расчетов по применению на данной ТЛ различных систем очистки (рис. 2.12 – 2.17) позволяет сделать вывод о влиянии технико-экономических показателей систем очистки (см. рис. 2.4) на значение критериев технологической эффективности K_{ji} , обеспечивающих наибольший эффект \mathcal{E}_r . Например, при использовании на данной ТЛ системы очистки ε_1 наибольший экономический эффект \mathcal{E}_r наблюдается при изменении критериев в следующих диапазонах (рис. 2.12): $0,9 < K_{M1} < 1,0$; $1,0 < K_{Ra} < 1,2$. Для системы очистки ε_2 (рис. 2.13) диапазоны оптимальных критериев значительно сужаются: $1,08 < K_{M1} < 1,1$; $1,16 < K_{Ra} < 1,2$. Применение системы ε_3 позволяет расширить интервалы значений технологических критериев, обеспечивающих максимальный экономический эффект \mathcal{E}_r : $0,9 < K_{M1} < 0,94$; $0,88 < K_{Ra} < 1,2$ (рис. 2.14). Аналогично изменяются диапазоны критериев $K_{\tau1}$ и K_{Ra} в зависимости от применяемой системы очистки СОЖ на данной ТЛ (рис. 2.15–2.17).

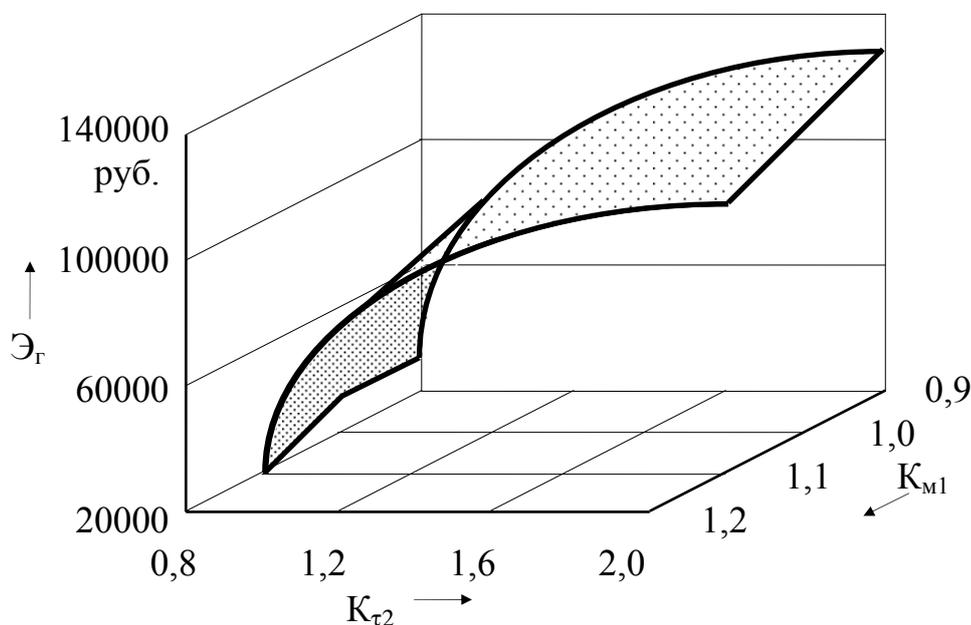


Рис. 2.8. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения машинного времени K_{M1} на операции O_1 и периода стойкости режущего инструмента $K_{\tau2}$ на операции O_2

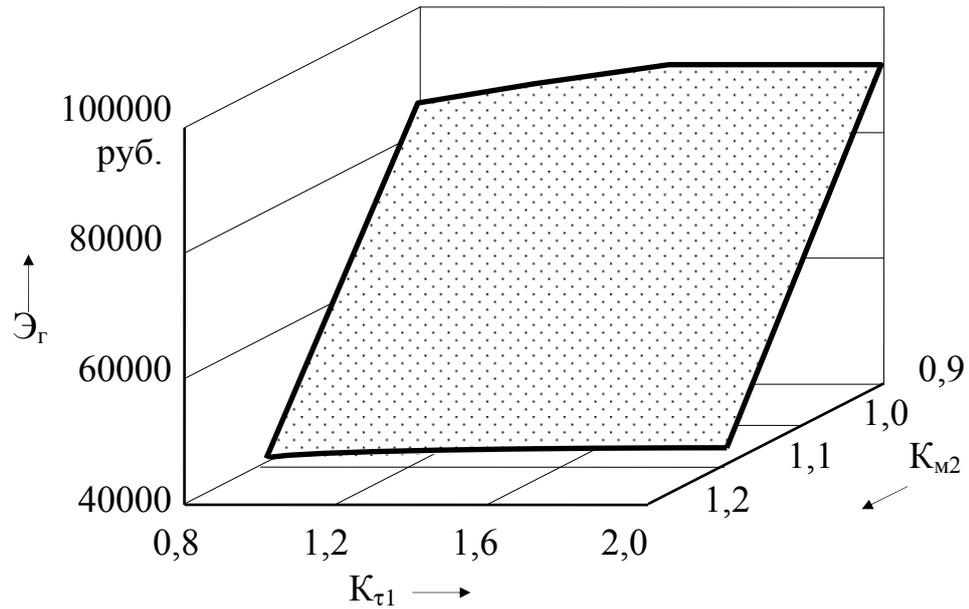


Рис. 2.9. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения машинного времени K_{M2} на операции O_2 и периода стойкости режущего инструмента $K_{\tau 1}$ на операции O_1

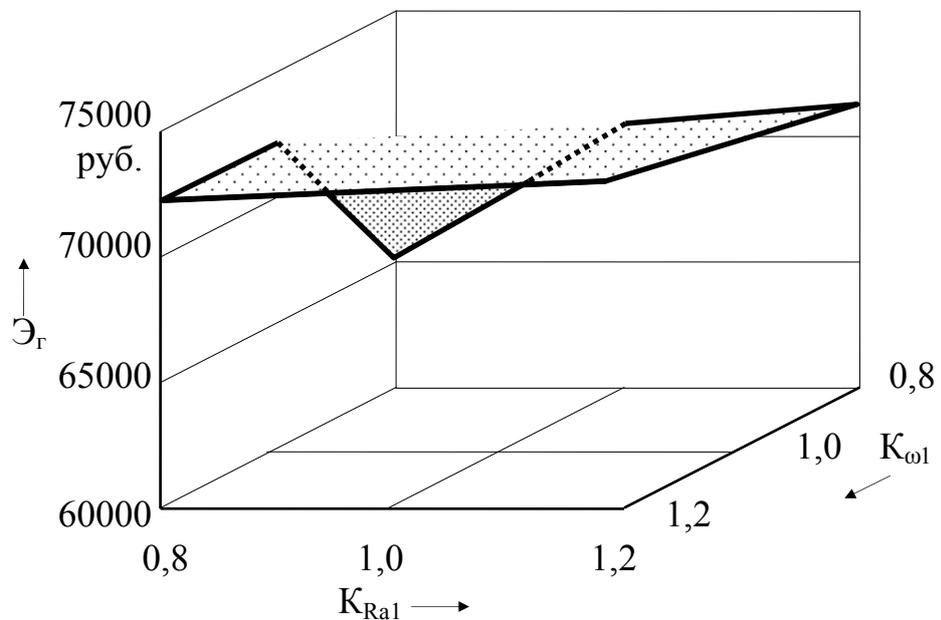


Рис. 2.10. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения точности линейных размеров $K_{\omega 1}$ и параметра шероховатости K_{Ra1} на операции O_1

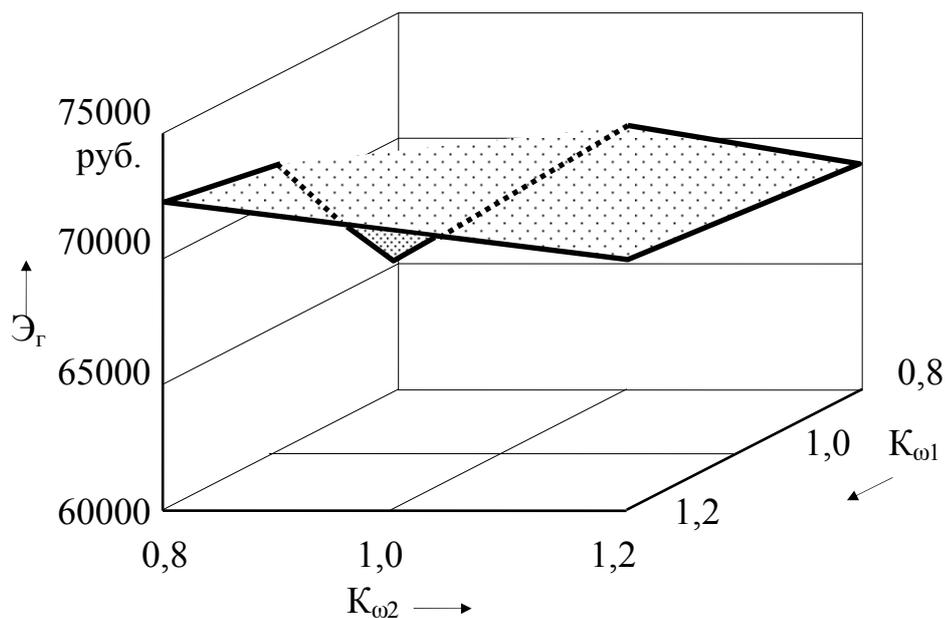


Рис. 2.11. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_g от критериев изменения точности линейных размеров $K_{\omega 1}$ и $K_{\omega 2}$ на операции O_1 и O_2

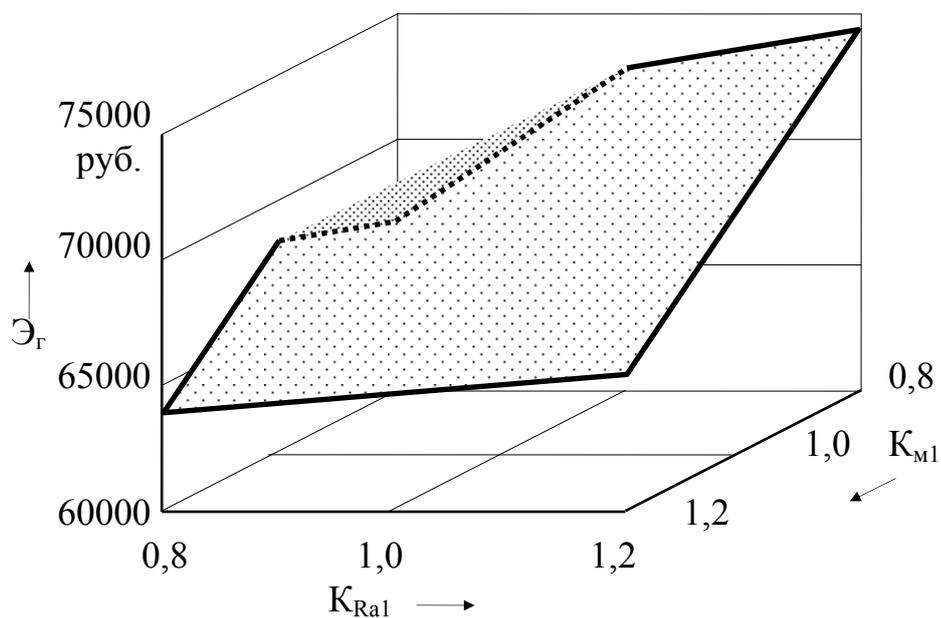


Рис. 2.12. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_g от критериев изменения машинного времени K_{M1} и параметра шероховатости K_{Ra1} на операции O_1 и технико-экономических показателей систем очистки: система ε_1 (см. рис. 2.4)

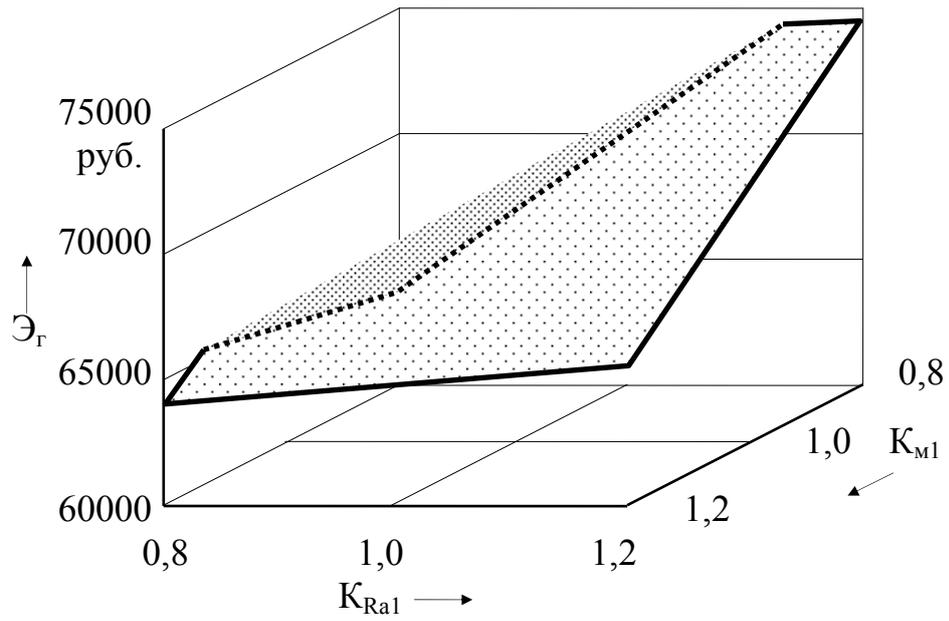


Рис. 2.13. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения машинного времени K_{M1} и параметра шероховатости K_{Ra1} на операции O_1 и технико-экономических показателей систем очистки: система ε_2 (см. рис. 2.4)

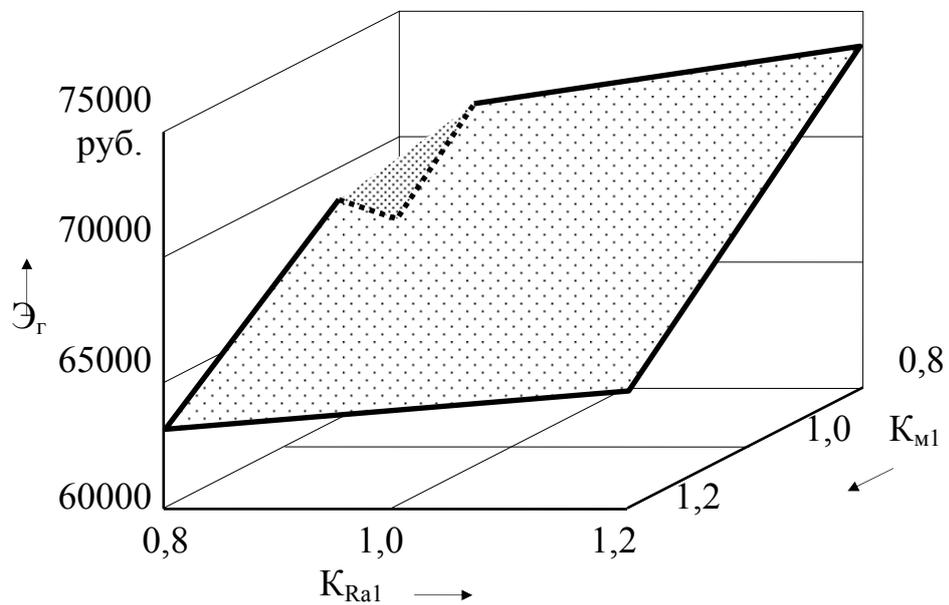


Рис. 2.14. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения машинного времени K_{M1} и параметра шероховатости K_{Ra1} на операции O_1 и технико-экономических показателей систем очистки: система ε_3 (см. рис. 2.4)

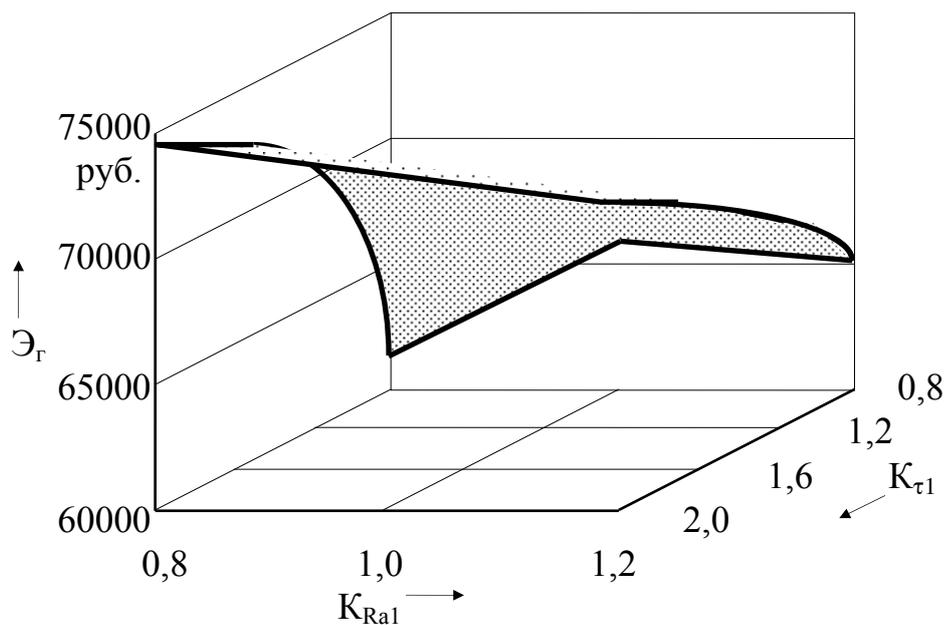


Рис. 2.15. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения периода стойкости $K_{\tau 1}$ и параметра шероховатости K_{Ra1} на операции O_1 и технико-экономических показателей систем очистки: система ε_1 (см. рис. 2.4)

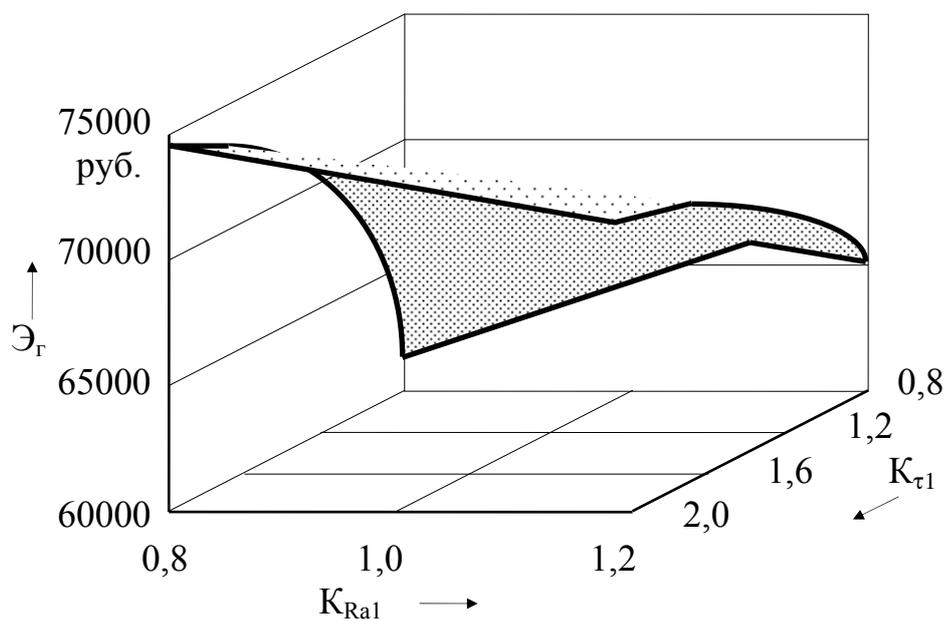


Рис. 2.16. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения периода стойкости $K_{\tau 1}$ и параметра шероховатости K_{Ra1} на операции O_1 и технико-экономических показателей систем очистки: система ε_2 (см. рис. 2.4)

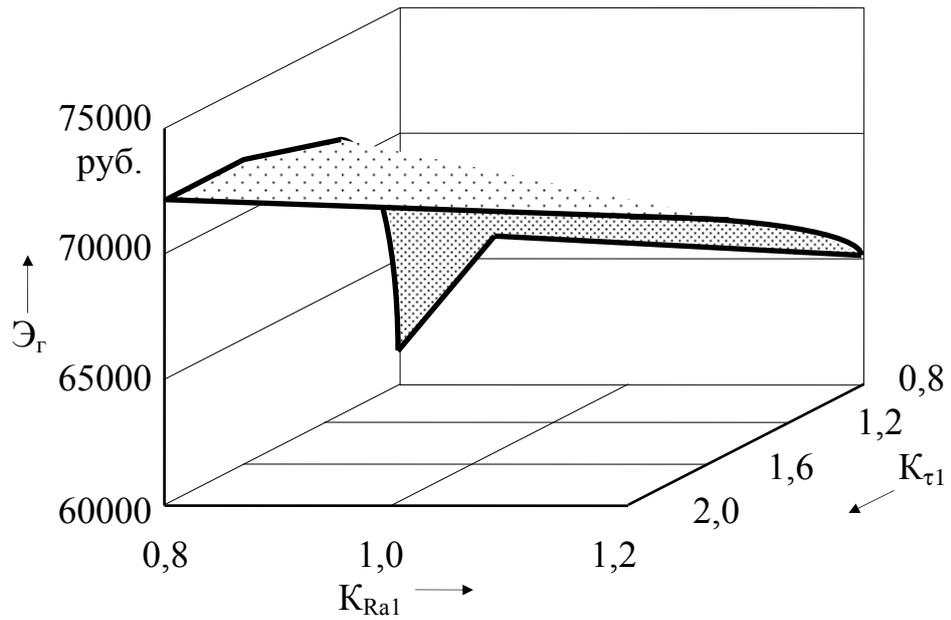


Рис. 2.17. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения периода стойкости $K_{\tau 1}$ и параметра шероховатости K_{Ra1} на операции O_1 и технико-экономических показателей систем очистки: система ε_3 (см. рис. 2.4)

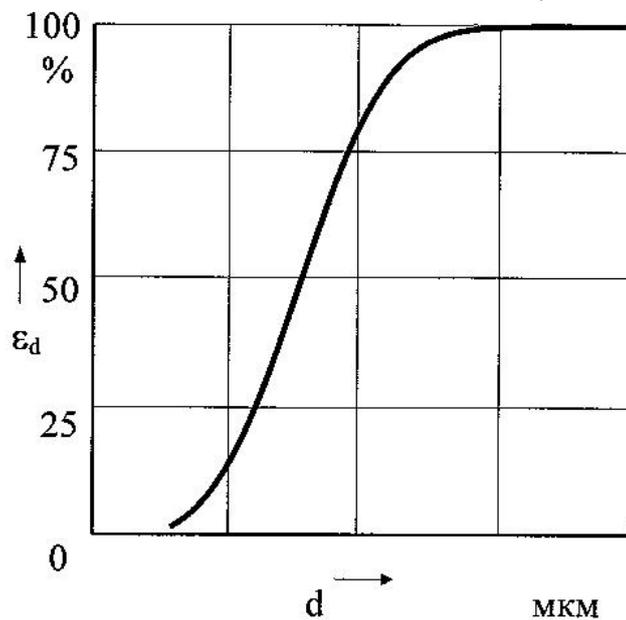


Рис. 2.18. Функция распределения вероятности удаления частиц из СОЖ ε_d в зависимости от их размера d [6]

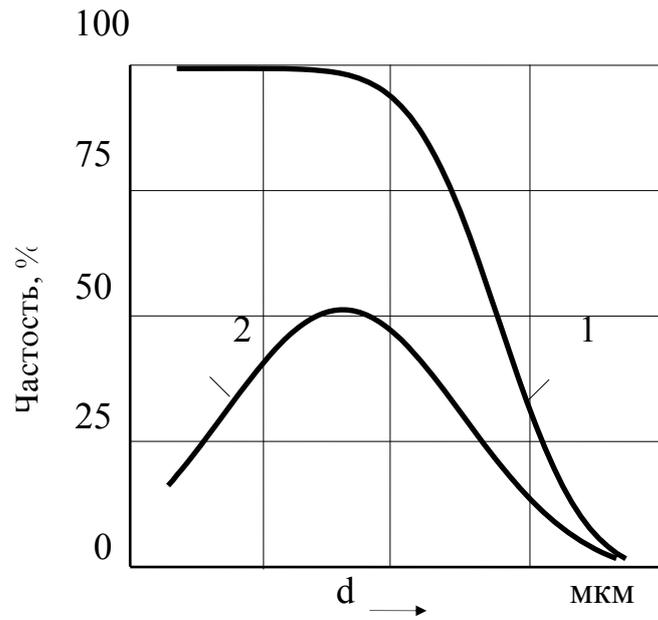


Рис. 2.19. Гранулометрический состав механических примесей:
1 – накопленная частота; 2 – частота [6]

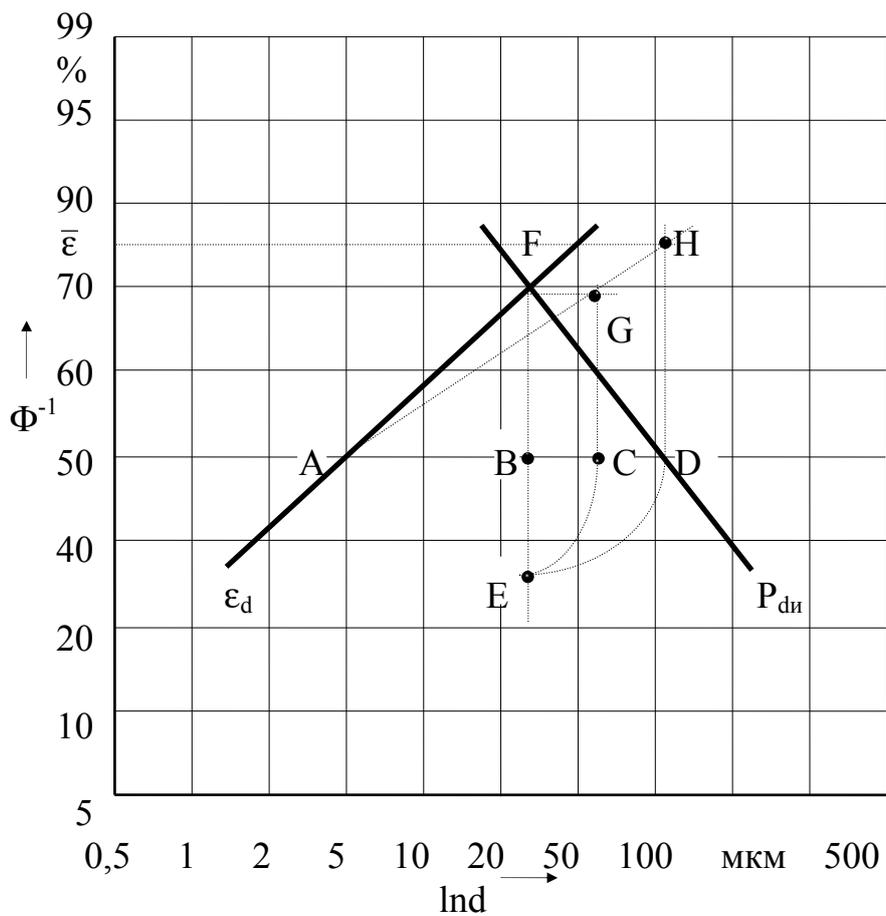


Рис. 2.20. Метод геометрического определения $\bar{\epsilon}$ по известным ϵ_d и P_d [105]

На основании вышеизложенного, можно заключить, что на экономическую эффективность систем очистки СОЖ от механических примесей на технологических линиях механической обработки заготовок влияют следующие факторы:

1. Собственные технико-экономические показатели системы очистки, т.е. соотношение “степень (качество) очистки СОЖ – стоимость системы” (см. рис. 2.4, 2.12 – 2.14).

2. Соотношение затрат по операциям технологической линии. Необходимо прежде всего обеспечить технологические эффекты для наиболее дорогостоящих операций ТЛ (см. рис. 2.7, 2.8).

3. Соотношение затрат на выполнение операции. Необходимо обеспечить технологические эффекты по наиболее значимым составляющим технологической себестоимости операции (см. формулу (2.30)). При определенном сочетании вышеперечисленных факторов более эффективной может оказаться сравнительно дешевая система очистки СОЖ, обеспечивающая худшую степень (качество) очистки, но наименьшие суммарные затраты на механическую обработку заготовок на технологической линии.

2.3. Расчет параметров чистоты СОЖ и характеристик очистителя для обеспечения оптимального сочетания критериев технологической эффективности

Различные очистители обеспечивают разные параметры чистоты СОЖ (C , \bar{d} , σ), оказывая тем самым влияние на производительность механической обработки и выходные показатели качества обработанных деталей, изменяя при этом критерии K_{ji} и, в конечном итоге, экономическую эффективность технологической операции или линии в целом. После определения оптимального сочетания критериев K_{ji} для линии (см. п. 2.2), необходимо установить параметры чистоты СОЖ (C , \bar{d} , σ), которые обеспечили бы это сочетание. Для этого нужно знать характеристику очистителя ε_d – степень очистки СОЖ по размеру частиц d , $\bar{\varepsilon}$ – среднюю степень очистки.

Влияние чистоты СОЖ на изменение технологических показателей можно описать в общем виде:

$$\Delta X_i = \frac{X_i^H}{X_i^6} = K_i = f_{ki} \{C_o, \bar{d}_o, \sigma_o\}, \quad (2.34)$$

где ΔX_i – изменение параметра на i -ой операции;

C_o – остаточная концентрация механических примесей в СОЖ после ее очистки, г/л;

\bar{d}_o – средний размер частиц механических примесей, оставшихся в СОЖ после ее очистки, мкм;

σ_o – среднее квадратическое отклонение размеров частиц, оставшихся в СОЖ после ее очистки, мкм;

f_{ki} – функциональная зависимость критерия технологической эффективности K_i от параметров чистоты СОЖ.

Для проектирования системы очистки СОЖ, обеспечивающей требуемое (оптимальное) сочетание критериев K_i , необходимо установить взаимосвязь K_i и параметров чистоты СОЖ. Для этого можно воспользоваться зависимостями, приведенными в табл. 1.4, или выявить их экспериментально в производственных или лабораторных условиях, что и будет сделано далее в разд. 4.

Определим требуемые параметры чистоты СОЖ на выходе из системы очистки C_o , \bar{d}_o , σ_o . Остаточную концентрацию механических примесей в СОЖ найдем по формуле:

$$C_o = (1 - \varepsilon) C_{и}, \quad (2.39)$$

где ε – степень очистки СОЖ в отдельном устройстве или в системе, %;

$C_{и}$ – исходная концентрация механических примесей в СОЖ, г/л.

Обозначим число частиц механических примесей, поступивших в очиститель и оставшихся в СОЖ после ее очистки, соответственно через $m_{и}$ и m_o . Тогда:

$$m_o = (1 - \varepsilon) m_{и}. \quad (2.40)$$

Исследованиями [6, 28 и др.] установлено, что степень очистки ε_d является вероятностной величиной, распределенной по логарифмически-нормальному закону (рис. 2.18). Гранулометрический состав механических примесей также близок к логарифмически нормальному распределению частиц по размерам (рис. 2.19) с плотностью вероятности

$$p(d) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln d - \bar{d})^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.41)$$

Можно записать

$$P_{do} = (1 - \varepsilon) P_{ди}, \quad (2.42)$$

где P_{do} , $P_{ди}$ – соответственно функции распределения частиц механических примесей по размеру d , оставшихся в СОЖ после её очистки и исходных (до очистки).

Изменение технологического параметра, учитывая формулы (2.39) и (2.42), зависит от параметров чистоты СОЖ C , \bar{d} , σ и характеристики очистителя ε_d :

$$\Delta X_i = K_i = f_{ki}(C_{и} (1 - \varepsilon); P_{ди} (1 - \varepsilon)). \quad (2.43)$$

При этом возникает задача расчета характеристик очистителя $\bar{\epsilon}$, ϵ_d и параметров чистоты СОЖ C_o , \bar{d}_o , σ_o .

Известен метод Allander C.G. [105] геометрического определения средней степени очистки СОЖ от механических примесей $\bar{\epsilon}$, обеспечиваемой определенным очистителем при известных ϵ_d и P_{di} , распределенных по логарифмически нормальному закону (рис. 2.19).

В логарифмической вероятностной плоскости (ордината градуирована по функции Лапласа $\Phi(x)$ стандартного нормального закона, а абсцисса – $\ln d$) зависимости ϵ_d и P_{di} изображены прямыми линиями AF и FD соответственно (см. рис. 2.20). Из точки F опускают перпендикуляр FB к AD до точки E, так что $|BE| = |BD|$. Затем строят точку C так, что $|AC| = |AE|$. Из точки C восстанавливают перпендикуляр GC к AD так, что $|CG| = |BF|$. Через точки A и G проводят прямую до пересечения в точке H с перпендикуляром к AD, восстановленным в точке D. Ордината точки H и есть $\bar{\epsilon} \cong 80\%$ данного очистителя.

В общем случае $\bar{\epsilon}$ и функции распределения P_{do} и P_{dy} могут быть найдены по следующим зависимостям:

$$\bar{\epsilon} = \int_0^{\infty} \epsilon_d \partial P_{di} ; \quad (2.44)$$

$$P_{do} = \frac{1}{1 - \bar{\epsilon}} \int_0^d (1 - \epsilon_d) \partial P_{di} ; \quad (2.45)$$

$$P_{dy} = \frac{1}{\bar{\epsilon}} \int_0^d \epsilon_d \partial P_{di} , \quad (2.46)$$

где P_{dy} – функция распределения частиц механических примесей по размерам удаленных очистителем из СОЖ.

На основании данных [105] ϵ_d и P_{di} описываются логарифмическим нормальным распределением с большой точностью и имеют следующий вид:

$$\epsilon_d = \Phi \left[\frac{\ln d - \ln d_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon}} \right] = \frac{1}{\sigma_{\epsilon} \sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{u} \exp \left(- \frac{(\ln u - \ln d_{\epsilon})^2}{2\sigma_{\epsilon}^2} \right) \partial u ; \quad (2.47)$$

$$P_{di} = \Phi \left[\frac{\ln d - \ln d_u}{\sigma_u} \right] = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{u} \exp \left(- \frac{(\ln u - \ln d_u)^2}{2\sigma_u^2} \right) \partial u , \quad (2.48)$$

где Φ – функция Лапласа. $\Phi = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp \left(- \frac{t^2}{2} \right) \partial t .$

Известно, что для логарифмического нормального распределения с плотностью вероятности

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - a)^2}{2\sigma^2}\right), & x > 0, \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

математическое ожидание и дисперсия равны соответственно:

$$M_\xi = e^{a + \frac{\sigma^2}{2}}; \quad (2.49)$$

$$D_\xi = e^{2a + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1). \quad (2.50)$$

Тогда из зависимостей (2.49) и (2.50) получили:

$$\sigma = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{D_\xi}{(M_\xi)^2}\right)}; \quad (2.51)$$

$$a = \ln \frac{(M_\xi)^2}{\sqrt{(M_\xi)^2 + D_\xi}}. \quad (2.52)$$

Заметим, что по методу Алландера [105] $\bar{\varepsilon}$ можно найти не вычисляя интегралов:

$$\bar{\varepsilon} = \Phi\left(\frac{\ln d_{и} - \ln d_{\varepsilon}}{\sqrt{\sigma_{и}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2}}\right). \quad (2.53)$$

Предположим, что P_{do} и $P_{дн}$ будут также иметь логарифмическое нормальное распределение. Если рассмотреть систему координат (ξ, η) на плоскости, где $\xi = \ln d$, $\eta = \Phi^{-1}$ (Φ^{-1} – функция, обратная функции Лапласа Φ), то зависимости (2.47) и (2.47) примут линейный вид:

$$\eta = \frac{1}{\sigma_{\varepsilon}} (\xi - \ln d_{\varepsilon}); \quad (2.54)$$

$$\eta = \frac{1}{\sigma_o} (\xi - \ln d_{и}). \quad (2.55)$$

Таким образом, на логарифмически-нормальной плоскости ε_d и P_{dn} являются прямыми с угловыми коэффициентами $K_\varepsilon = \frac{1}{\sigma_\varepsilon}$, $K_n = \frac{1}{\sigma_n}$ соответственно.

Получим распределение P_{dy} частиц механических примесей, удаленных очистителем. По предположению:

$$P_{dy} = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{u} \exp\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) du =$$

$$= \frac{1}{\bar{\varepsilon}} \int_0^d \Phi\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right) \frac{1}{\sigma_n u \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_n)^2}{2\sigma_n^2}\right) du.$$

Так как d – величина произвольная, то подинтегральные функции равны

$$\frac{1}{\bar{\varepsilon}} \Phi\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right) \frac{1}{\sigma_n u \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_n)^2}{2\sigma_n^2}\right) =$$

$$= \frac{1}{\sigma_y u \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_y)^2}{2\sigma_y^2}\right).$$

Подставим $u = \bar{d}_n$ в последнее выражение, чтобы получить размер исходных механических примесей в точке математического ожидания, т.е. в наиболее вероятном случае:

$$\exp\left(-\frac{(\ln \bar{d}_n - \ln \bar{d}_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) = \frac{\sigma_y}{\bar{\varepsilon} \cdot \sigma_n} \Phi\left(-\frac{(\ln \bar{d}_n - \ln \bar{d}_\varepsilon)}{\sigma_\varepsilon}\right).$$

Прологарифмируем:

$$-\frac{(\ln \bar{d}_n - \ln \bar{d}_y)^2}{2\sigma_y^2} = \ln\left(\frac{\sigma_y}{\bar{\varepsilon} \cdot \sigma_n} \Phi\left(\frac{\ln \bar{d}_n - \ln \bar{d}_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\right)\right)$$

Тогда

$$\ln \bar{d}_y = \ln \bar{d}_n + \sqrt{\left| -2 \sigma_y^2 \ln\left(\frac{\sigma_y}{\bar{\varepsilon} \cdot \sigma_n} \Phi\left(\frac{\ln \bar{d}_n - \ln \bar{d}_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\right)\right) \right|}. \quad (2.56)$$

Зависимость (2.56) показывает, что средний размер удаленных частиц механических примесей \bar{d}_y будет всегда больше среднего размера $\bar{d}_и$ частиц примесей до очистки СОЖ (исходных), что согласуется со здравым смыслом.

Найдем функцию распределения P_{do} для оставшихся в СОЖ частиц механических примесей:

$$P_{do} = \frac{1}{\sigma_o \sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{u} \exp\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_o)^2}{2\sigma_o^2}\right) du =$$

$$= \frac{1}{1 - \bar{\varepsilon}} \int_0^d \left(1 - \Phi\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right)\right) \frac{1}{\sigma_{иu} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_и)^2}{2\sigma_{и}^2}\right) du.$$

Так как d – величина произвольная, то подинтегральные функции равны:

$$\frac{1}{1 - \bar{\varepsilon}} \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln u - \ln \bar{d}_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\right)\right) \frac{1}{\sigma_{иu} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_и)^2}{2\sigma_{и}^2}\right) =$$

$$= \frac{1}{\sigma_o u \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln u - \ln \bar{d}_o)^2}{2\sigma_o^2}\right).$$

Подставим $u = \bar{d}_и$:

$$\exp\left(-\frac{(\ln \bar{d}_и - \ln \bar{d}_o)^2}{2\sigma_o^2}\right) = \frac{\sigma_o}{(1 - \bar{\varepsilon})\sigma_{и}} \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln \bar{d}_и - \ln \bar{d}_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\right)\right).$$

Прологарифмируем:

$$-\frac{(\ln \bar{d}_и - \ln \bar{d}_o)^2}{2\sigma_o^2} = \ln\left(\frac{\sigma_o}{(1 - \bar{\varepsilon})\sigma_{и}} \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln \bar{d}_и - \ln \bar{d}_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\right)\right)\right).$$

Тогда

$$\ln \bar{d}_o = \ln \bar{d}_и - \sqrt{\left| -2 \sigma_o^2 \ln\left(\frac{\sigma_o}{(1 - \bar{\varepsilon}) \sigma_{и}} \left(1 - \Phi\left(\frac{\ln \bar{d}_и - \ln \bar{d}_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\right)\right)\right) \right|}. \quad (2.57)$$

Как следует из зависимости (2.57), средний размер оставшихся в СОЖ частиц \bar{d}_o будет всегда меньше размера частиц механических примесей $\bar{d}_и$ до очистки (исходных).

Сравнение результатов расчетов по формулам (2.56), (2.57) для разных σ_o и σ_y с точными значениями, полученными по уравнениям (2.45), (2.46) позволило восстановить функциональные зависимости:

– если $\sigma_{и} \leq \sigma_y$, то

$$\sigma_y = (1 + 0,25333 \sigma_{и} (\bar{\varepsilon}^2 - 1) / \sigma_{\varepsilon}) \sigma_{и}; \quad (2.58)$$

$$\sigma_o = (1 - 0,26874 \sigma_{и} \sqrt{\bar{\varepsilon}} / \sigma_{\varepsilon}) \sigma_{и}; \quad (2.59)$$

– если $\sigma_{и} > \sigma_{\varepsilon}$ то функции распределения P_{do} и P_{dy} имеют вид гипербол, а функции распределения $P_{ди}$ и ε_d – вид асимптот. В этом случае нельзя с малой погрешностью приблизить данные функции распределения к логарифмически нормальным, следовательно, формулы (2.56)-(2.59) применить нельзя.

Поступим следующим образом. Пусть F_d и G_d – две функции распределения на $(-\infty; +\infty)$, а f_d и g_d – соответствующие плотности вероятностей. Рассмотрим интеграл

$$J = \int_{-\infty}^d G(x) \partial F(x) = \int_{-\infty}^d f(x) \int_{-\infty}^x g(y) \partial y \partial x.$$

Интеграл J записан как повторный интеграл для повторного интеграла. Изменим порядок интегрирования:

$$\begin{aligned} J &= \int_{-\infty}^d g(y) \int_{-\infty}^x f(x) \partial x \partial y = \int_{-\infty}^d g(y) (F_d - F_y) \partial y = F_d \int_{-\infty}^d g(y) \partial y - \\ &- \int_{-\infty}^d g(y) F(y) \partial y = F_d G_d - \int_{-\infty}^d F(y) \partial G(y) \end{aligned}$$

Тогда

$$P_{dy} = \frac{1}{\bar{\varepsilon}} P_{ди} \varepsilon_d - \frac{1 - \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}} \tilde{P}_{dy}, \quad (2.60)$$

где \tilde{P}_{dy} – функция распределения по размерам частиц, удаленных из СОЖ при

$$\begin{cases} \tilde{P}_{dy} = \varepsilon_d; \\ \tilde{\varepsilon}_{dy} = P_{dy}. \end{cases}$$

Таким образом, проблема нахождения P_{dy} и P_{do} при $\sigma_{\varepsilon} < \sigma_{и}$ решена, так как \tilde{P}_{dy} хорошо описывается логарифмическим нормальным законом распределения, и

$$P_{do} = \frac{1}{1 - \bar{\varepsilon}} P_{ди} - \frac{\bar{\varepsilon}}{1 - \bar{\varepsilon}} P_{dy}. \quad (2.61)$$

Если функции ε_d и $P_{dн}$ совпадают, то имеет место следующее соотношение:

$$P_{dн} = \varepsilon_d = \Phi \left(\frac{\ln d - \ln m}{\sigma} \right). \quad (2.62)$$

Распределение $P_{dу}$:

$$\begin{aligned} P_{dу} &= \frac{1}{\bar{\varepsilon}} \int_0^d \Phi \left(\frac{\ln d - \ln m}{\sigma} \right) \partial \Phi \left(\frac{\ln d - \ln m}{\sigma} \right) = \frac{1}{\bar{\varepsilon}} \int_0^{\Phi} t \partial t = \frac{1}{\bar{\varepsilon}} \left. \frac{t^2}{2} \right|_0^{\Phi \left(\frac{\ln d - \ln m}{\sigma} \right)} = \\ &= \frac{1}{2\bar{\varepsilon}} \Phi^2 \left(\frac{\ln d - \ln m}{\sigma} \right), \end{aligned} \quad (2.63)$$

где $t = \Phi \left(\frac{\ln d - \ln m}{\sigma} \right)$.

Отметим, что в этом случае $\bar{\varepsilon} = 0,5$.

Распределение $P_{dо}$

$$\begin{aligned} P_{dо} &= \frac{1}{1-\bar{\varepsilon}} \int_0^d \left(1 - \Phi \left(\frac{\ln u - \ln m}{\sigma} \right) \right) \partial \Phi \left(\frac{\ln u - \ln m}{\sigma} \right) = \frac{1}{1-\bar{\varepsilon}} \int_0^{\Phi} (1-t) \partial t = \\ &= \frac{1}{1-\bar{\varepsilon}} \left(t - \frac{t^2}{2} \right) \Big|_0^{\Phi \left(\frac{\ln d - \ln m}{\sigma} \right)} = \Phi \left(\frac{\ln d - \ln m}{\sigma} \right) \left(2 - \Phi \left(\frac{\ln d - \ln m}{\sigma} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.64)$$

Таким образом, решена задача определения $\bar{\varepsilon}$ очистителя и параметров механических примесей, оставшихся в СОЖ (C_o, \bar{d}_o, σ_o) и удаленных из СОЖ (\bar{d}_y, σ_y) очистителем при известных $P_{dн}$ и ε_d . Рассмотрим теперь обратные задачи, т.е., зная любые три функции распределения из ряда $\varepsilon_d, P_{dн}, P_{dу}, P_{dо}$ и $\bar{\varepsilon}$ необходимо найти два остальных распределения.

1. Пусть известны $P_{dо}, \ln \bar{d}_o, \sigma_o, P_{dу}, \ln \bar{d}_y, \sigma_y, \bar{\varepsilon}$. Необходимо найти $\ln \bar{d}_{и}, \sigma_{и}, \ln \bar{d}_{\varepsilon}, \sigma_{\varepsilon}$.

Обозначим $\alpha_{\sigma} = 0,25333; \beta_{\sigma} = -0,26874$. Выразим из (2.58) величину σ_{ε} :

$$\sigma_y = \sigma_{и} + \alpha_{\sigma} \sigma_o^2 (\bar{\varepsilon}^2 - 1) / \sigma_{\varepsilon};$$

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{\sigma_{и}^2}{\sigma_y - \sigma_{и}} \alpha_{\sigma} (\bar{\varepsilon}^2 - 1). \quad (2.65)$$

Подставим (2,65) в (2.59):

$$\sigma_o = \sigma_{и} + \frac{\beta_{\sigma} \sqrt{\bar{\epsilon}}}{\alpha_{\sigma}(\bar{\epsilon}^2 - 1)}(\sigma_y + \sigma_{и}).$$

Тогда

$$\sigma_{и} = \frac{\sigma_o - \sigma_y \cdot \lambda}{1 - \lambda}, \quad (2.66)$$

где $\lambda = \frac{\beta_{\sigma} \sqrt{\bar{\epsilon}}}{\alpha_{\sigma}(\bar{\epsilon}^2 - 1)}.$

Так как $P_{ди} = (1 - \bar{\epsilon}) P_{до} + \bar{\epsilon} P_{ды}$, то

$$\ln \bar{d}_{и} = (1 - \bar{\epsilon}) \ln \bar{d}_{о} + \bar{\epsilon} \ln \bar{d}_{y}. \quad (2.67)$$

Воспользуемся уравнением (2.53):

$$\ln \bar{d}_{\epsilon} = \ln \bar{d}_{и} - \sqrt{\sigma_{и}^2 + \sigma_{\epsilon}^2} \Phi^{-1}(\bar{\epsilon}). \quad (2.68)$$

Последовательное решение уравнений (2.65)-(2.68) приведет к решению поставленной задачи.

2. Рассмотрим следующую задачу: известны $P_{до}$, $\ln \bar{d}_{о}$, σ_o , $P_{ди}$, $\ln \bar{d}_{и}$, $\sigma_{и}$, $\bar{\epsilon}$. Необходимо найти $\ln \bar{d}_{y}$, σ_y , $\ln \bar{d}_{\epsilon}$, σ_{ϵ} .

Выразим из (2.59) величину σ_{ϵ} :

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{\beta_{\sigma} \sqrt{\bar{\epsilon}}}{\sigma_o - \sigma_{и}} \sigma_{и}^2. \quad (2.69)$$

$\ln \bar{d}_{\epsilon}$ определим по выражению (2.68). Далее найдем $P_{ды}$ по формулам (2.56) и (2.58).

3. Известны $P_{ды}$, $\ln \bar{d}_{y}$, σ_y , ϵ_{σ} , $\ln \bar{d}_{\epsilon}$, σ_{ϵ} , $\bar{\epsilon}$. Найти $\ln \bar{d}_{о}$, σ_o , $\ln \bar{d}_{и}$, $\sigma_{и}$.

Рассмотрим (2.58) как квадратное уравнение:

$$\frac{\alpha_{\sigma}}{\sigma_{\epsilon}}(\bar{\epsilon}^2 - 1)\sigma_{и}^2 + \sigma_{и} - \sigma_y = 0;$$

дискриминант этого уравнения

$$D = 1 + \frac{4\alpha_{\sigma}}{\sigma_{\epsilon}}(\bar{\epsilon}^2 - 1)\sigma_y;$$

следовательно

$$\sigma_{и} = \frac{-1 \pm \sqrt{D}}{2\alpha_{\sigma}(\bar{\epsilon}^2 - 1)}, \quad (2.70)$$

где $\sigma_{и}$ выбираем из условий: $\sigma_{и} > 0$; $\sigma_{и} > \sigma_y$.

Воспользуемся уравнением (2.68) для определения $\ln \bar{d}_и$:

$$\ln \bar{d}_и = \ln \bar{d}_\epsilon + \sqrt{\sigma_и^2 + \sigma_\epsilon^2} \Phi^{-1}(\bar{\epsilon}). \quad (2.71)$$

Далее можно найти по формулам (2.57), (2.59) $\ln \bar{d}_о$, $\sigma_о$.

4. Известны $P_{до}$, $\ln \bar{d}_о$, $\sigma_о$, ϵ_d , $\ln \bar{d}_\epsilon$, σ_ϵ , $\bar{\epsilon}$. Найти $\ln \bar{d}_у$, $\sigma_у$, $\ln \bar{d}_и$, $\sigma_и$.
Рассмотрим (2.59) как квадратное уравнение:

$$\sigma_и^2 \cdot \bar{\beta}_\sigma \sqrt{\bar{\epsilon}} / \sigma_\epsilon + \sigma_и + \sigma_о = 0$$

дискриминант

$$D' = 1 + \frac{4\beta_\sigma \sqrt{\bar{\epsilon}}}{\sigma_\epsilon} \sigma_о;$$

следовательно

$$\sigma_и = \frac{-1 \pm \sqrt{D'}}{2\beta_\sigma \sqrt{\bar{\epsilon}}}. \quad (2.72)$$

где $\sigma_и$ выбираем из условий: $\sigma_и > 0$; $\sigma_и > \sigma_о$.

$\ln \bar{d}_и$ рассчитываем по уравнению (2.71). Далее определяем $\ln \bar{d}$ и $\sigma_у$ по формулам (2.56), (2.58) соответственно.

5. Известны $P_{дy}$, $\ln \bar{d}_у$, $\sigma_у$, $P_{ди}$, $\ln \bar{d}_и$, $\sigma_и$, $\bar{\epsilon}$. Необходимо найти $\ln \bar{d}_о$, $\sigma_о$, $\ln \bar{d}_\epsilon$, σ_ϵ .

σ_ϵ определяем по формуле (2.65), $\ln \bar{d}_\epsilon$ – по формуле (2.68). Далее по формулам (2.57) и (2.59) рассчитываем соответственно $\ln \bar{d}_о$ и $\sigma_о$.

6. Известны $P_{дy}$, $\ln \bar{d}_у$, $\sigma_у$, $P_{ди}$, $\ln \bar{d}_и$, $\sigma_и$, $P_{до}$, $\ln \bar{d}_о$, $\sigma_о$. Найти $\ln \bar{d}_\epsilon$, σ_ϵ , $\bar{\epsilon}$.
 $\bar{\epsilon}$ определяем из зависимости (2.67):

$$\bar{\epsilon} = \frac{\ln \bar{d}_и - \ln \bar{d}_о}{\ln \bar{d}_у - \ln \bar{d}_о}, \quad (2.73)$$

σ_ϵ определяем по (2.65), $\ln \bar{d}_\epsilon$ по (2.68).

7. Известны $P_{до}$, $\ln \bar{d}_о$, $\sigma_о$, $P_{дy}$, $\ln \bar{d}_у$, $\sigma_у$, ϵ_σ , $\ln \bar{d}_\epsilon$, σ_ϵ . Найти $\ln \bar{d}_и$, $\sigma_и$, $\bar{\epsilon}$.

$\sigma_и$, $\bar{\epsilon}$ определяем из решения нелинейной системы уравнений (2.58) и (2.59). Далее $\ln \bar{d}_и$ рассчитываем по формуле (2.71).

Задача расчета системы очистителей сводится к последовательному решению прямых или обратных задач для каждой ступени системы очистки. Тогда изменение параметра ΔX_i на i -й операции можно определить на основе известных зависимостей (см., например, табл. 1.4) или экспериментально в заводских или лабораторных условиях.

Адекватность разработанных в п. 2.3 зависимостей для расчета характеристик очистителя и параметров чистоты СОЖ проверяли экспериментально по методике, изложенной в п. 3.3. Результаты экспериментов представлены в п. 4.2.

2.4. Выводы

1. На основе структурного анализа зависимости, используемой для расчета экономического эффекта от внедрения новой техники, выработана система универсальных критериев K_{ji} технологической эффективности операций механической обработки заготовок, выполняемой с применением СОЖ. Предлагаемую систему универсальных критериев K_{ji} можно использовать для оценки эффективности систем очистки СОЖ, обслуживающих технологические линии, включающие различные по видам и оснащению операции механической обработки.

В общем случае эту систему критериев можно применить для оценки эффективности внедрения любой новой техники на отдельных операциях, технологических линиях, участках и в цехах машиностроительных предприятий (например, для оценки эффективности применения новой технологической оснастки – приспособлений, режущих инструментов и др.).

2. Предложена зависимость (2.20) для расчета экономической эффективности отдельных операций механической обработки заготовок без брака и зависимость (2.29) для аналогичных расчетов с учетом возможного снижения брака на операции. Получена зависимость (2.30) для расчета экономической эффективности технологических линий, участков и механических цехов.

3. Выработан алгоритм расчета оптимальных значений критериев K_{ji} , обеспечивающих наибольший эффект на отдельной операции и на технологических линиях в целом. Предложенный алгоритм существенно сокращает время расчетов на ЭВМ по сравнению с известными методами решения оптимизационных задач.

4. Решены задачи расчета характеристик очистителя ϵ_d , $\bar{\epsilon}$ и параметров чистоты СОЖ S_o , \bar{d}_o , σ_o , которые необходимы для обеспечения требуемых (оптимальных) значений критериев технологической эффективности K_{ji} . Зависимости (2.56)-(2.59), (2.65)-(2.68), полученные в п. 2.3, можно использовать при проектировании одно- и многоступенчатых систем очистки СОЖ от механических примесей.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ научно-технической информации, представленный в разд. 1, свидетельствует о скудности данных о значениях критериев K_{ji} , характеризующих изменение показателей эффективности лезвийной обработки заготовок в зависимости от чистоты СОЖ. В связи с этим, с целью определения критериев K_{ji} , нами предприняты экспериментальные исследования влияния чистоты СОЖ на показатели эффективности операций обработки отверстий мерным инструментом, а также операций точения наружных поверхностей заготовок (обработка заготовок сверлами, зенкерами, развертками и резцами составляет более 70 % всех операций обработки заготовок резанием в серийном и массовом машиностроительном производстве). Полученные экспериментальные значения критериев K_{ji} для различных видов обработки использовали для оценки эффективности систем очистки СОЖ по зависимостям (2.20), (2.29) и (2.30), приведенным в п. 2.1.

Для определения реальных размеров d , σ и концентрации механических примесей, образующихся при обработке заготовок на технологических линиях точением, сверлением, зенкерованием и развертыванием, проведено обследование действующего производства Ульяновского автомобильного завода.

Полученные значения C , d , σ использовали при проведении экспериментальных исследований влияния чистоты СОЖ на изменение показателей эффективности операций обработки заготовок лезвийными инструментами для определения критериев K_{ji} , а также для проверки адекватности зависимостей (2.56)-(2.59) и (2.65)-(2.68), используемых для расчета характеристик очистителя и параметров механических примесей при проектировании систем очистки СОЖ.

3.1. Методика экспериментальных исследований влияния чистоты СОЖ на эффективность обработки отверстий мерным инструментом

3.1.1. Задачи экспериментальных исследований

Задачи экспериментальных исследований заключаются в определении изменения показателей эффективности обработки отверстий в заготовках сверлением, зенкерованием и развертыванием в зависимости от параметров чистоты СОЖ.

3.1.2 Контролируемые показатели

1. Работоспособность режущего инструмента и энергозатраты:
 - величина износа инструмента по задней поверхности h_3 , мм;
 - мощность резания N_3 , кВт.
2. Качество обработанных заготовок:
 - изменение диаметра обработанного отверстия Δ_d , мм;
 - погрешность формы отверстия (отклонение от круглости) $\Delta_{кр}$, мкм;
 - параметры шероховатости обработанных отверстий по ГОСТ 25142-82:
 - среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм;
 - высота неровностей профиля по десяти точкам R_z , мкм;
 - наибольшая высота неровностей профиля R_{max} , мкм;
 - средний шаг неровностей профиля S_m , мкм;
 - средний шаг местных выступов профиля S , мкм;
 - опорная длина профиля t_p , мкм;
 - относительная опорная длина профиля t_p , %.
3. Параметры чистоты СОЖ (по ГОСТ Р 50558-93):
 - массовая концентрация механических примесей C , г/л;
 - средний размер частиц \bar{d} , мкм;
 - среднее квадратическое отклонение размеров частиц σ , мкм.
4. Элементы режима резания:
 - скорость резания V , м/мин;
 - частота вращения инструмента n , мин⁻¹;
 - снимаемый припуск t_n , мм;
 - подача на оборот инструмента S_o , мм/об.

3.1.3. Образцы

Исследования проводили при обработке отверстий в образцах (рис. 3.1), изготовленных из стали 45, НВ 170...190 и чугуна СЧ 20, НВ 180...210. Эти материалы наиболее широко применяются в современном автомобилестроении и в других отраслях машиностроения и являются типовыми представителями двух различных групп обрабатываемости металлов резанием. В каждом образце последовательно обрабатывали 75 сквозных отверстий диаметром 16 мм сверлением, зенкерованием и развертыванием.

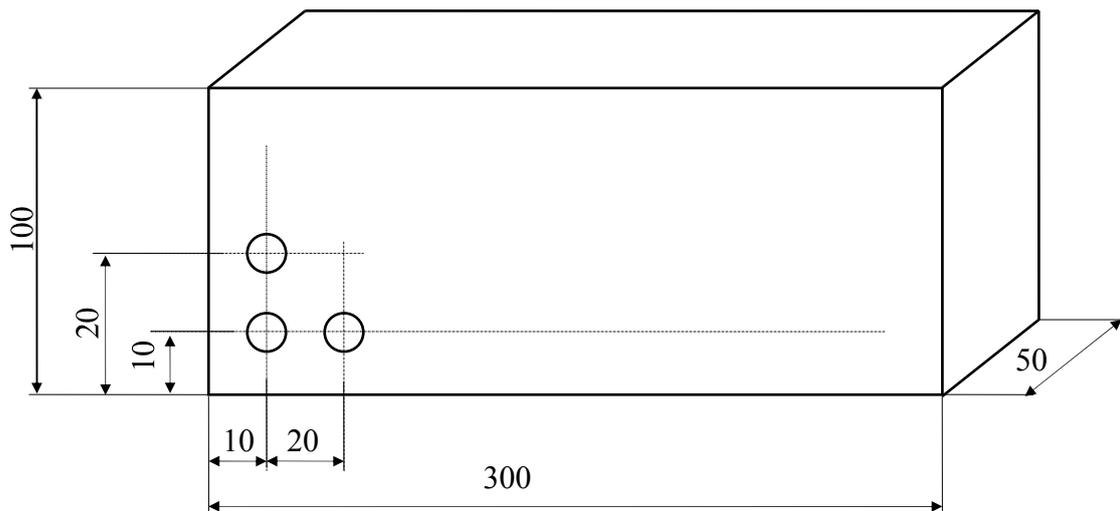


Рис. 3.1. Экспериментальный образец

3.1.4. Режущий инструмент

Для проведения исследований была подготовлена партия сверл, зенкеров и разверток из быстрорежущей стали Р6М5, ГОСТ 19265-73 на Ульяновском автомобильном заводе.

Т а б л и ц а 3.1

Режущий инструмент

Параметр	Инструмент		
	Сверло	Зенкер	Развертка
Номинальный размер \varnothing , мм	15,0	15,85	16,0
Число режущих кромок z	2	4	6
Угол в плане φ , град	118	60	45
Передний угол γ , град	-	0	7
Задний угол α , град	12	10	10
Угол наклона винтовой канавки ω_k , град	29	20	7
Твердость HRC _э , ед.	65...67	65...67	65...67
ГОСТ	10902-77	12489-71	1672-71

3.1.5. Оборудование и аппаратура, применяемые при исследованиях. Техника проведения эксперимента

Обработку отверстий проводили на вертикально-фрезерном станке мод. FV-36 (Румыния). Этот станок позволяет последовательно обрабатывать отверстия с достаточно высокой точностью – цена деления механизмов перемещения стола с неподвижно закрепленной на нем заготовкой

равна 0,005 мм. Сверла и зенкера устанавливали в конусные оправки, которые жестко закрепляли в шпинделе станка. Развертки устанавливали в “плавающий” патрон.

Величину износа режущего инструмента h_z определяли при помощи отсчетного микроскопа “Мир-2”, цена деления 0,04 мм. Мощность резания N_z измеряли на измерительном приборе К-50, последовательно включенном в электрическую цепь станка. Цена деления прибора при установленных пределах по току $I = 10$ А и напряжению $U = 450$ В составила 30 Вт. Диаметр обработанного отверстия d и его изменение Δd определяли индикаторным нутромером ИН кл. 2 по ГОСТ 868-82 с диапазоном измерения 10-18 мм и ценой деления 0,01 мм.

Параметры шероховатости обработанной поверхности R_a , R_z , R_{max} , S_m , S , n_p , t_p измеряли при помощи профилометра П296 с аналого-цифровым выходом, подключенным к ПЭВМ АТ 286. Перемещение датчика профилометра П296 регистрировалось ЭВМ по двум координатам: координата X – вдоль измеряемой поверхности с дискретностью шага 0,001 мм (длина трассы); координата Y – перпендикулярно измеряемой поверхности (высота микронеровностей). Полученные значения координат X и Y обрабатывали на ЭВМ по специальной программе и определяли высотные и шаговые параметры шероховатости. Разность значений параметра шероховатости R_a , вычисленного по программе и измеренного прибором П296 на нескольких эталонах, не превышала $\pm 5\%$.

Отклонение от круглости $\Delta_{кр}$ оценивали по круглограммам, записанным на кругломере ВЕ-20. Цена деления при увеличении прибора $\times 500$ раз и использовании щупа № 1 составила 4 мкм. Показатели чистоты СОЖ определяли в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 50558-93 [14].

Режимы резания назначены по рекомендациям [47]. Точность и скорость перемещений механизмов станка проверили по методике, изложенной в паспортной документации станка FV-36.

Исследования проводили по следующей схеме. Устанавливали и зажимали в тисках образец. Сверлили 75 отверстий с применением 5%-й водомасляной эмульсии Автокат (ТУ 37.104.104-88). СОЖ подавали поливом с расходом (7-8) л/мин. В первой серии опытов СОЖ очищали от механических примесей в фильтре 6 (рис. 3.2). В последующих сериях СОЖ загрязняли механическими примесями необходимой концентрации, которые размещивали в баке 4 при помощи мешалки 5. После завершения сверления всех 75 отверстий производили необходимые измерения. Далее снова устанавливали этот же образец на станке, выверяя его положение по нескольким отверстиям при помощи центроискателя с точностью до 0,01 мм для равномерного распределения припуска. Затем зенкеровали 75 отверстий и проводили аналогичные измерения. После этого указанные действия повторяли и развертывали последовательно все отверстия.

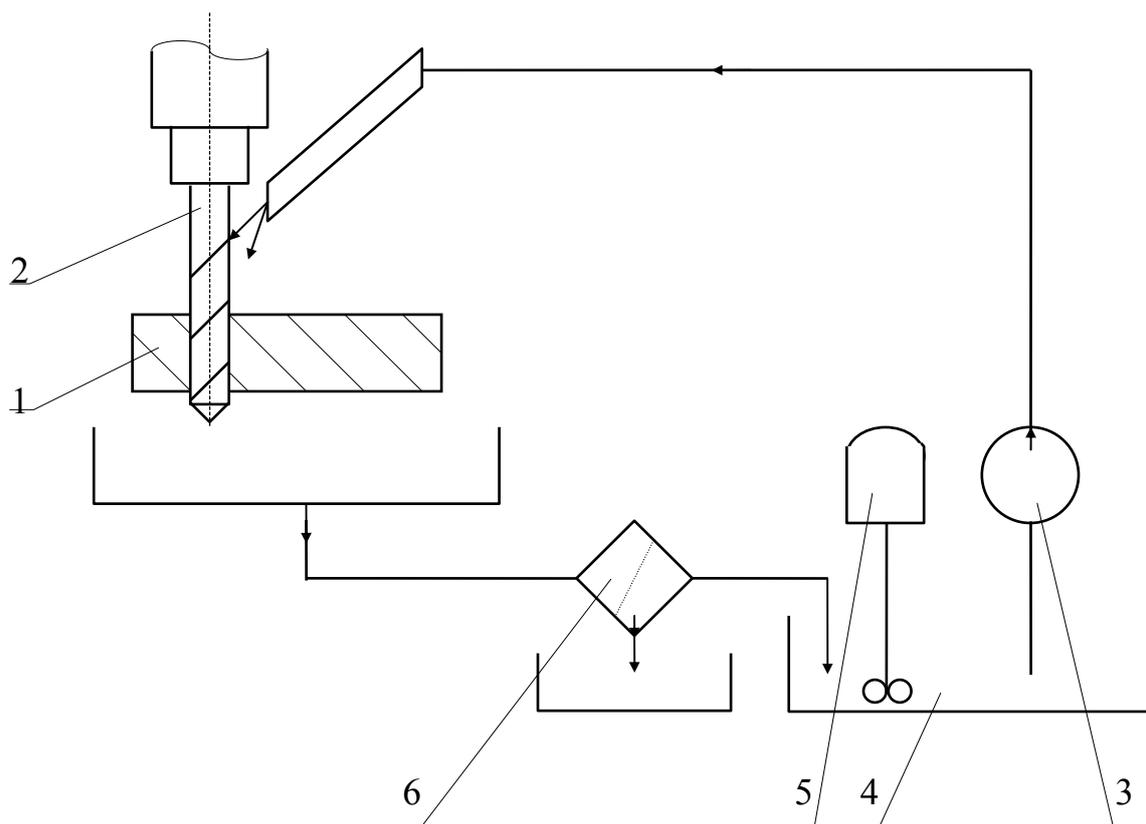


Рис. 3.2. Принципиальная схема экспериментальной установки:
 1 – обрабатываемый образец; 2 – режущий инструмент; 3 – насос; 4 – емкость для СОЖ; 5 – мешалка; 6 – фильтр

3.1.6. Планирование экспериментов, состав и количество опытов

Результаты предварительных исследований показали, что функции изменения износа режущего инструмента, мощности резания, макро- и микрогеометрии обработанного лезвийным инструментом отверстия не имеют экстремальных точек и носят монотонно возрастающий или убывающий характер. Следовательно, проведение экспериментов многофакторным планом, при котором решается задача нахождения экстремума функции, нецелесообразно. При проведении исследований варьировали концентрацией механических примесей C от 0 до 4 г/л. Состав опытов представлен в табл. 3.2. Серии 1-3 и 13-15 являются базовыми для последующего сравнения результатов обработки отверстий в образцах из чугуна СЧ20 и стали 45. В каждой серии проводили 3 опыта – обрабатывали по 75 отверстий в каждом образце.

Таблица 3.2

Состав опытов (исследуемые зависимости: $h_3(C)$, $N_3(C)$, $\Delta_d(C)$, $\Delta_{кр}(C)$, $R_a(C)$, $R_z(C)$, $R_{max}(C)$, $S_m(C)$, $S(C)$, $n_p(C)$, $t_p(C)$)

№ серии	Вид обработки	Материал заготовки	Элементы режима резания				Параметры чистоты СОЖ		
			t, мм	S _o , мм/об	V, м/мин	n, мин ⁻¹	C, г/л	\bar{d} , мкм	σ , мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Сверление	СЧ20	7,5	0,5	14,84	315	0	-	-
2	Зенкерование		0,85	0,5	19,91	400			
3	Развертывание		0,15	0,31	11,78	80			
4	Сверление	СЧ20	То же	То же	То же	То же	1	92	88
5	Зенкерование		То же	То же	То же	То же			
6	Развертывание		То же	То же	То же	То же			
7	Сверление	СЧ20	То же	То же	То же	То же	2	То же	То же
8	Зенкерование		То же	То же	То же	То же			
9	Развертывание		То же	То же	То же	То же			
10	Сверление	СЧ20	То же	То же	То же	То же	4	То же	То же
11	Зенкерование		То же	То же	То же	То же			
12	Развертывание		То же	То же	То же	То же			
13	Сверление	Сталь 45	7,5	0,31	11,78	250	0	То же	То же
14	Зенкерование		0,85	0,5	15,68	475			
15	Развертывание		0,15	1	6,28	125			
16	Сверление	Сталь 45	То же	То же	То же	То же	1	То же	То же
17	Зенкерование		То же	То же	То же	То же			
18	Развертывание		То же	То же	То же	То же			
19	Сверление	Сталь 45	То же	То же	То же	То же	2	То же	То же
20	Зенкерование		То же	То же	То же	То же			
21	Развертывание		То же	То же	То же	То же			
22	Сверление	Сталь 45	То же	То же	То же	То же	4	То же	То же
23	Зенкерование		То же	То же	То же	То же			
24	Развертывание		То же	То же	То же	То же			

Необходимое для получения достоверных результатов число параллельных опытов N_0 определили на основе статистической оценки результатов экспериментов.

$$N_0 = t_\gamma \cdot s^2 / \delta^2,$$

где t_γ – значение нормированной функции Лапласа $\Phi_0(t)$; находим по [20, табл. ПЗ], при заданной доверительной вероятности $\gamma_t = 0,95$: $t_\gamma = 1,96$.

s^2 – дисперсия измеряемой величины; определяли по известным зависимостям [20];

δ – точность получения величины математического ожидания:

$$\delta = t_{\alpha s} \cdot s / \sqrt{n},$$

где $t_{\alpha s}$ – квантиль распределения Стьюдента; определяли по [20, табл. П1],
 $t_{\alpha s} = 2,78$;

n – количество измерений.

Расчет доверительных значений и необходимого числа опытов произвели для параметра R_a обработанного отверстия, как параметра, имеющего, наибольший разброс показаний при измерении. R_a : 7,11; 5,33; 6,8; 6,9; 6,43; 5,64 мкм.

$\bar{R}_a = 6,36$ мкм; $s_{R_a}^2 = 0,526$; $s_{R_a} = 0,725$ мкм; доверительный интервал (95%): 5,606 ... 7,129 мкм.

$$\delta = 2,78 \cdot 0,725 / \sqrt{6} = 0,8233.$$

$$N_0 = 1,96 \cdot 0,725 / 0,8233^2 = 2,09.$$

Принимаем $N_0 = 3$ опыта в одной серии. Общее количество опытов для одного обрабатываемого материала $3 \times 12 = 36$ опытов по 75 обработанных отверстий в каждом.

Экспериментальные данные обрабатывали на ПЭВМ типа IBM PC с помощью ППП “STATGRAPHICS” и получали регрессионные уравнения, которые проверяли на адекватность по критерию Фишера F_p и Стьюдента t_s в соответствии с методиками [9, 20, 68].

3.2. Методика экспериментальных исследований влияния чистоты СОЖ на эффективность обработки заготовок точением

3.2.1. Задачи экспериментальных исследований

Задачи экспериментальных исследований заключаются в определении показателей эффективности токарной обработки заготовок в зависимости от параметров чистоты СОЖ

3.2.2. Контролируемые показатели

1. Величина износа инструмента по задней поверхности h_3 , мм.
2. Среднее арифметическое отклонение профиля обработанной поверхности R_a , мкм.
3. Параметры чистоты СОЖ (по ГОСТ Р 50558-93):
 - массовая концентрация механических примесей C , г/л;
 - средний размер частиц \bar{d} , мкм;

– среднее квадратическое отклонение размеров частиц σ , мкм.

4. Элементы режима резания:

– скорость резания V , м/мин;

– частота вращения заготовки n , мин⁻¹;

– снимаемый припуск t_n , мм;

– подача на оборот заготовки S_o , мм/об.

3.2.3. Обрабатываемый материал

Исследования проводили на Ульяновском машиностроительном заводе при обработке заготовок деталей ПВ8.300.174 из стали 45, НВ 160...190 (рис. 3.3).

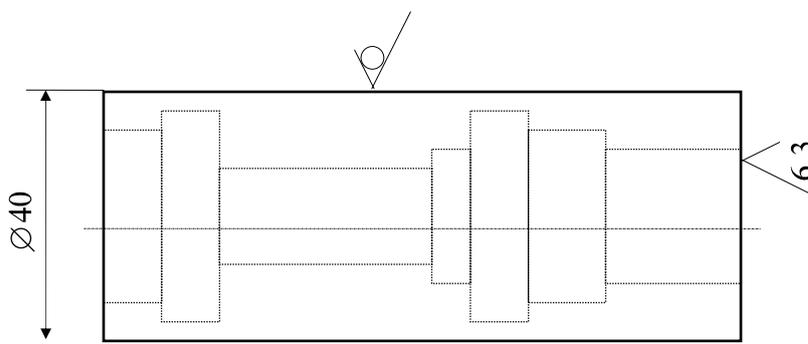


Рис. 3.3. Заготовка детали ПВ8.300.174

3.2.4. Режущий инструмент, режимы резания

Обработку заготовок проводили токарным проходным упорным резцом (ГОСТ 18879-73) с напаянной пластиной типа 07 (ГОСТ 25426-82) из твердого сплава Т15К6 (ГОСТ 3882-74), HRC, 64...67. Геометрия режущей части: $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\phi = 90^\circ$; $\phi_1 = 20^\circ$. Корпус резца выполнен из стали 45 сечением 16×20 мм.

Элементы режима резания: $t_n = (0,5-2)$ мм, $S_o = (0,5-2)$ мм/об;

$n = (100- 250)$ об/мин; $V = (8-30)$ м/мин.

3.2.5. Оборудование и аппаратура, применяемые при исследованиях.

Техника проведения эксперимента

Токарную обработку заготовок вала ПВ8.300.174 выполняли на токарном станке с ЧПУ модели ИТ42. Величину износа резца измеряли при помощи отсчетного микроскопа “Мир-2” с ценой деления 0,04 мм. Параметр шероховатости R_a обработанной поверхности заготовки измеряли на профилометре П291.

Исследования проводили методом пассивного наблюдения в условиях действующего производства на токарном участке цеха № 37 Ульяновского машиностроительного завода следующим планом: в течение смены обрабатывали на станке ИТ42 партию заготовок по заводской технологии с применением 5 %-ной эмульсии Укринол-1М. СОЖ подавали поливом с расходом (12-15) л/мин. Через каждые 2 ч измеряли износ резца h_3 , концентрацию механических примесей в СОЖ C и параметр шероховатости R_a . Полученные экспериментальные данные обрабатывали на ПЭВМ с помощью ППП “STATGRAPHICS” и получали регрессионные зависимости $h_3 = f(C)$, $R_a = f(C)$.

3.3. Методика экспериментального определения параметров чистоты СОЖ и характеристик очистителя

3.3.1. Цель и задачи исследований

Цель настоящей методики – определение дисперсного состава механических примесей, образующихся при обработке заготовок на технологических линиях точением, сверлением, зенкерованием и развертыванием.

Задачи экспериментальных исследований заключаются в определении характеристик очистителя и параметров чистоты СОЖ до и после ее очистки.

3.3.2. Контролируемые показатели

1. Параметры чистоты СОЖ (по ГОСТ Р 50558-93):
 - массовая концентрация механических примесей C , г/л;
 - средний размер частиц \bar{d} , мкм;
 - среднее квадратическое отклонение размеров частиц σ , мкм.
2. Показатели работы системы очистки СОЖ:
 - производительность системы очистки $Q_{ж}$, м³/ч;
 - средняя степень очистки $\bar{\epsilon}$, %;
 - степень очистки по размерам частиц ϵ_d , %;
 - средний размер удаляемых очистителем частиц \bar{d}_ϵ , мкм
 - среднее квадратическое отклонение размеров частиц σ_ϵ , мкм.

3.3.3. Оборудование и аппаратура, применяемые при исследованиях. Техника проведения эксперимента

Исследования проводили в условиях действующего производства Ульяновского автомобильного завода методом пассивного наблюдения. Обследовали систему очистки СОЖ, состоящую из флотатора с барабанным маслоудалителем и чистовой емкости, разработанной в ПКТБ

“Экосистема” УлГТУ. Система обслуживает автоматическую линию механической обработки ЛБ0425, на которой обрабатывают заготовку ведомой шестерни главной передачи автомобиля УАЗ из стали 20ХН2М (ГОСТ 2622-79). Заготовку обрабатывали резцами, сверлами, зенкерами, развертками и цековками с применением 5 %-й эмульсии Автокат (ТУ 37.104.104-88). Производительность системы – 60 м³/ч, суммарная емкость системы очистки – 60 м³.

Отбирали три пробы СОЖ по 500 мл: первую – на входе загрязненной СОЖ в систему очистки; вторую – после очистки СОЖ во флотаторе; третью – на выходе из системы очистки в напорном трубопроводе подачи СОЖ на металлорежущие станки.

Концентрацию механических примесей в СОЖ С определяли методом вакуумного фильтрования согласно Приложения 2 ГОСТ Р 50558-93 [14]. Средний размер частиц \bar{d} , \bar{d}_ε и среднее квадратическое отклонение размеров частиц механических примесей σ , σ_ε определяли микроскопическим методом согласно Приложения 3 ГОСТ Р 50558-93. Пробы СОЖ отбирали через 5,5-6 часов после начала работы первой смены на автоматической линии.

Полученные результаты использовали для решения трех задач:

- 1) расчет характеристик очистителя по зависимостям (2.65), (2.68), (2.69);
- 2) определение параметров дисперсного состава механических примесей в СОЖ до, после и удаленных при очистке по зависимостям (2.56)- (2.59);
- 3) для проверки адекватности вышеперечисленных зависимостей, которую проводили на основе дисперсионного анализа по критерию H_0 [5] при сравнении экспериментальных и расчетных значений \bar{d} , \bar{d}_ε , σ , σ_ε .

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СОЖ МЕХАНИЧЕСКИМИ ПРИМЕСЯМИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

4.1. Исследование технологической эффективности СОЖ, загрязненной механическими примесями, на операциях лезвийной обработки заготовок

Исследования проводили по методике, изложенной в п.3.1 и 3.2, с целью получения данных о влиянии чистоты СОЖ на эффективность лезвийной обработки заготовок. Эти данные предназначаются для дальнейшего использования при оценке эффективности систем очистки СОЖ по зависимостям (2.20), (2.29) и (2.30) (п. 2.1).

Экспериментальные данные обрабатывали по методике корреляционно-регрессионного анализа [9, 20, 68] с использованием прикладного пакета программ “STATGRAPHICS”. По наибольшему коэффициенту корреляции R выбирали вид регрессионной модели – линейную (л) $y=a+b\cdot x$, экспоненциальную (э) $y=\exp(a+b\cdot x)$, степенную $y=a\cdot x^b$ или обратнопропорциональную (о) $y=1/(a+b\cdot x)$. В этих моделях аргумент x – варьируемая концентрация C механических примесей в СОЖ (см. табл. 3.2), функция y – технологические показатели: мощность резания $N_э$, отклонение от круглости $\Delta_{кр}$, высотные и шаговые параметры шероховатости R_a , R_z , R_{max} , S_m , S , n_p , t_p . Для износа режущего инструмента по задней поверхности h_3 и изменения диаметра обработанного отверстия Δ_d аргументом x в этих моделях является количество обработанных отверстий n при фиксированных значениях концентрации механических примесей C ($C=0; 2; 4$ г/л). Полученные регрессионные модели проверяли на адекватность по критерию Фишера F_p и критерию Стьюдента t_s , сравнивая расчетные значения критериев с табличными [9, 20, 68]. Статистические характеристики регрессионных моделей приведены в табл. 4.1. В прил. 2 дан пример распечатки результатов регрессионного и дисперсионного анализа зависимости $R_a(C)$ при сверлении отверстий в образце из чугуна СЧ20.

Анализ данных табл. 4.1 свидетельствует о высокой корреляционной связи между концентрацией C механических примесей в СОЖ и технологическими показателями эффективности механической обработки: коэффициент корреляции R (графа 5 табл. 4.1) для большинства полученных регрессионных моделей изменяется от 0,8 до 0,95; значения коэффициента регрессии R^2 (графа 6 табл. 4.1) свидетельствующего о доле вариабельности технологических показателей от изменения концентрации C механических примесей в СОЖ, находятся в диапазоне от 65 до 90%.

Таблица 4.1

Результаты регрессионного анализа экспериментальных данных

№ зависимости	Вид механической обработки	Технический показатель	Вид модели	Коэффициент корреляции R	Коэффициент регрессии R	Критерий Фишера F	Критерий Стьюдента t	Параметры регрессионной модели	
								9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Чугун СЧ20									
1	С	$h_3(0)$	Л	0,99	98,2	169	13	0,108	0,00646
2	С	$h_3(2)$	Л	0,98	97,4	136	11,66	0,124	0,00933
3	С	$h_3(4)$	Л	0,99	99,7	1225	35	0,228	0,00933
4	З	$h_3(0)$	Л	0,97	94,2	49	7	-0,06	0,00933
5	З	$h_3(2)$	Л	0,98	97,5	120	10,95	0	0,01066
6	З	$h_3(4)$	Л	0,99	98,4	184	13,56	0,032	0,012
7	Р	$h_3(0)$	Л	0,99	99,1	363	19,05	0,008	0,00293
8	Р	$h_3(2)$	Л	0,99	98	150	12,24	0,076	0,00266
9	Р	$h_3(4)$	Л	0,97	94,7	53	7,31	0,09	0,00333
10	С	N_3	Л	0,99	98,6	525	22,91	1,6533	0,025
11	З	N_3	Л	1	100	9999	9999	0,96	0,015
12	Р	N_3	Л	0,97	94,2	114	10,69	0,735	0,0525
13	С	$\Delta_{кр}$	Л	0,51	27	2,59	1,67	42,7778	1,1266
14	З	$\Delta_{кр}$	Л	0,73	54,5	8,4	2,89	36,8889	1,3333
15	Р	$\Delta_{кр}$	Л	0,86	75	21	4,58	22,6667	2
16	С	$\Delta_d(0)$	Л	0,94	89,2	25	5	0,007	0,00033
17	С	$\Delta_d(2)$	Л	0,97	94,2	49	7	0,025	0,00046
18	С	$\Delta_d(4)$	Л	0,99	98,9	289	17	0,013	0,00113
19	З	$\Delta_d(0)$	Л	0,7	50	3	1,73	-0,0004	0,0013
20	З	$\Delta_d(2)$	Л	0,86	75	9	3	-0,02	0,0025
21	З	$\Delta_d(4)$	Л	0,94	89,2	25	5	-0,03	0,0033
22	Р	$\Delta_d(0)$	Л	0,86	75	9	3	-0,003	0,00026
23	Р	$\Delta_d(2)$	Л	0,94	89,2	25	5	-0,005	0,00038
24	Р	$\Delta_d(4)$	Л	0,99	98,2	169	13	-0,007	0,00086
25	С	R_a	Э	0,87	76,6	32	5,72	1,9794	0,0658
26	З	R_a	Л	0,55	31	4,5	2,12	4,9513	0,12923
27	Р	R_a	Л	0,9	81,7	44	6,68	2,36	0,411
28	С	R_z	Л	0,76	57,8	13	3,7	39,38	2,31143
29	З	R_z	Л	0,8	64,8	18	4,29	32,6667	1,5952
30	Р	R_z	Л	0,95	90,7	98	9,91	12,9067	3,5371
31	С	R_{max}	Л	0,74	55,4	12	3,52	40,8	2,2666
32	З	R_{max}	Л	0,86	74,8	29	5,44	33,4933	1,7847
33	Р	R_{max}	Л	0,93	87	67	8,19	13,34	3,5485

Продолжение табл. 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
34	C	S _m	Л	-0,82	68,7	21	4,68	294,867	-10,1143
35	3	S _m	Л	-0,79	63,8	17	4,19	188,133	-6,9809
36	P	S _m	Л	-0,92	85,5	59	7,69	174	-8,5714
37	C	S	Л	-0,87	76,4	32	5,69	287,933	-9,3428
38	3	S	Л	-0,79	63,8	17	4,19	184,467	-7,1238
39	P	S	Л	-0,92	85	56	7,53	167,733	-7,9442
40	C	n _p	Л	-0,94	89	86	9,32	1,246	-0,0529
41	3	n _p	Л	-0,92	85	59	7,71	1,4026	-0,0439
42	P	n _p	Л	-0,85	73	27	5,22	1,4886	-0,0487
43	C	t _p	Л	-0,93	87	68	8,29	0,4966	-0,0209
44	3	t _p	Л	-0,94	90	90	9,53	0,564	-0,019
45	P	t _p	Л	-0,85	73	27	5,2	0,5933	-0,018
Сталь 45									
46	C	h ₃ (0)	Л	0,98	98	147	12,12	0,112	0,00373
47	C	h ₃ (2)	Л	0,97	95,7	66	8,16	0,112	0,00453
48	C	h ₃ (4)	Л	0,96	93,2	41	6,43	0,158	0,0044
49	3	h ₃ (0)	Л	0,98	97	98	9,92	-0,044	0,00566
50	3	h ₃ (2)	Л	0,96	93	45	6,71	-0,002	0,00493
51	3	h ₃ (4)	Л	0,97	95	60	7,8	-0,018	0,00573
52	P	h ₃ (0)	Л	0,98	97	108	10,39	0,052	0,0016
53	P	h ₃ (2)	Л	0,98	98	147	12,12	0,056	0,00186
54	P	h ₃ (4)	Л	0,99	98	243	15,58	0,068	0,0024
55	C	N ₃	Л	0,98	96	189	13,74	1,433	0,03
56	3	N ₃	Л	1	100	9999	9999	0,93	0,015
57	P	N ₃	Л	1	100	9999	9999	0,72	0,03
58	C	Δ _{кр}	Л	0,88	78	25	5,01	38,7778	2,833
59	3	Δ _{кр}	Л	0,75	57,6	9	3,08	44,889	1,666
60	P	Δ _{кр}	Л	0,86	75	21	4,58	30,888	2,666
61	C	Δ _d (0)	Л	0,97	94,5	51	7,2	-0,011	0,00078
62	C	Δ _d (2)	Л	0,95	92	34	5,89	0,012	0,0012
63	C	Δ _d (4)	Л	0,9	82,3	13	3,73	-0,003	0,0023
64	3	Δ _d (0)	Л	0,86	75	9	3	-0,003	0,0004
65	3	Δ _d (2)	Л	0,94	89,2	25	5	-0,005	0,00063
66	3	Δ _d (4)	Л	0,97	94,2	49	7	-0,007	0,00096
67	P	Δ _d (0)	Л	0,97	94,1	48	6,92	-0,006	0,00053
68	P	Δ _d (2)	Л	0,98	97,3	108	10,39	-0,008	0,0008
69	P	Δ _d (4)	Л	0,99	98,2	169	13	-0,005	0,0008
70	C	R _a	Л	0,76	57,3	13	3,7	6,134	0,4067
71	3	R _a	Э	0,69	47,7	9,1	3,02	1,3423	0,0786
72	P	R _a	Э	0,87	77,1	33	5,81	0,804	0,1072
73	C	R _z	Л	0,65	42,3	7,3	2,7	27,984	0,1958
74	3	R _z	Л	0,7	49,8	9,9	3,14	27,5367	1,50524
75	P	R _z	Л	0,71	50	10,3	3,21	2,853	0,0448
76	C	R _{max}	Л	0,74	54,8	12,1	3,48	32,749	1,0394

Окончание табл. 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
77	З	R _{max}	Л	0,92	84,8	55	7,47	26,9227	1,4419
78	Р	R _{max}	Л	0,94	88,7	78	8,88	16,976	1,6213
79	С	S _m	Л	-0,91	83	49	7	299,067	-19,0381
80	З	S _m	Э	-0,91	82,8	48	6,94	5,4083	-0,0685
81	Р	S _m	Э	-0,94	89,2	83	9,12	5,3518	-0,0634
82	С	S	Э	-0,91	84,1	53	7,2	5,6862	-0,0719
83	З	S	Э	-0,95	91,5	108	10,39	5,4085	-0,077
84	Р	S	Э	-0,94	90,1	91	9,56	5,3278	-0,0616
85	С	n _p	Э	-0,89	79,3	38	6,2	0,2937	-0,0185
86	З	n _p	Э	-0,85	70,8	93	9,65	0,3481	-0,0403
87	Р	n _p	Э	-0,8	64	18,4	4,29	0,3477	-0,0242
88	С	t _p	Э	-0,94	89,7	87	9,35	-0,622	-0,0244
89	З	t _p	Э	-0,66	43,9	7,8	2,8	-0,6144	-0,0185
90	Р	t _p	Э	-0,84	70,7	24	4,91	-0,5635	-0,0253
Сталь 40X									
91	Т	h _з	Л	0,82	65	35	5,95	0,7632	0,132
92	Т	R _a	Л	0,84	70,6	45	6,77	8,035	0,694

Условные обозначения:

С, З, Р, Т – соответственно сверление, зенкерование, развертывание, точение.

h_з(0), h_з(2), h_з(4) – износ инструмента по задней грани при концентрации механических примесей, соответственно С=0; 2; 4 г/л.

Δ_d(0), Δ_d(2), Δ_d(4) – изменение диаметра обработанного отверстия при концентрации механических примесей, соответственно С=0; 2; 4 г/л.

Л – линейная модель y=a+b·x.

Э – экспоненциальная модель y=exp(a+b·x).

Полученные регрессионные зависимости (см. табл. 4.1) использовали для вычисления критериев-коэффициентов технологической эффективности K_{ji} по видам обработки. Расчет K_{ji} вели следующим образом: в регрессионное уравнение подставляли значение концентрации механических примесей С (например С=4 г/л) и получали значение параметра X_i^б (С=4 г/л); затем аналогично вычисляли значение X_i^н (С=0 г/л) и определили K_{ji} по (2.38):

$$K_{ji} = \frac{X_i^н (C = 0 \text{ г / л})}{X_i^б (C = 4 \text{ г / л})}$$

Для примера рассчитаем коэффициент K_{Ra} при развертывании отверстий в заготовке из стали 45. Регрессионное уравнение имеет следующий вид (см. табл. 4.1, зависимость №72): R_a=exp(0,804+0,107С).

При С=4 г/л R_a^б=exp(0,801+0,107·4)=3,428 мкм;

при $C=0$ г/л $R_a^H = \exp(0,801+0,107 \cdot 0) = 2,234$ мкм;

$$K_{Ra} = \frac{2,234}{3,428} = 0,65;$$

полученное значение K_{Ra} заносили в табл. 4.2. Аналогично вычисляли K_{ji} по другим видам обработки, а также для $C=2$ г/л.

Рассчитанные значения критериев K_{ji} , характеризующих изменение показателей технологической эффективности операций обработки отверстий мерным (лезвийным) инструментом при варьировании концентрации механических примесей, использовали для оценки эффективности систем очистки СОЖ по зависимостям (2.20), (2.29) и (2.30).

4.1.1. Влияние чистоты СОЖ на износ лезвийного инструмента и энергозатраты

Как показали экспериментальные исследования, при обработке заготовок мерными лезвийными инструментами с возрастанием концентрации механических примесей в СОЖ C интенсифицируется износ инструмента по задней грани h_3 , в результате чего сокращается период его стойкости. Так, например, при сверлении отверстий в заготовке из чугуна (рис. 4.1,а) при допуске износе сверла $[h_3]=0,6$ мм и при $C=2$ г/л стойкость сверла соответствовала 51 обработанному отверстию. При полном отсутствии в СОЖ механических примесей ($C=0$ г/л) стойкость сверла составила 75 отверстий. Следовательно, при полной очистке СОЖ от механических примесей период стойкости сверла можно увеличить в $K_\tau = 75/51 = 1,47$ раза, тогда как увеличение C от 0 до 4 г/л приводит к снижению периода стойкости сверла при обработке чугунных заготовок с 75 до 40 отверстий ($K_\tau=0,53$).

При сверлении отверстий в стальных образцах абсолютные значения износа инструмента по задней грани h_3 примерно в 2 раза меньше, чем при сверлении отверстий в чугунных образцах при одинаковом количестве обработанных отверстий: после сверления 75 отверстий в стальной заготовке (рис. 4.2,а) при $C=4$ г/л износ сверла равен 0,48 мм, а в чугунной – $h_3=0,9$ мм; при $C=2$ г/л износ сверл соответственно равен 0,44 и 0,8 мм. Период стойкости сверл при сверлении отверстий в стальных заготовках с увеличением концентрации в СОЖ механических примесей от 0 до 4 г/л уменьшается на 23%.

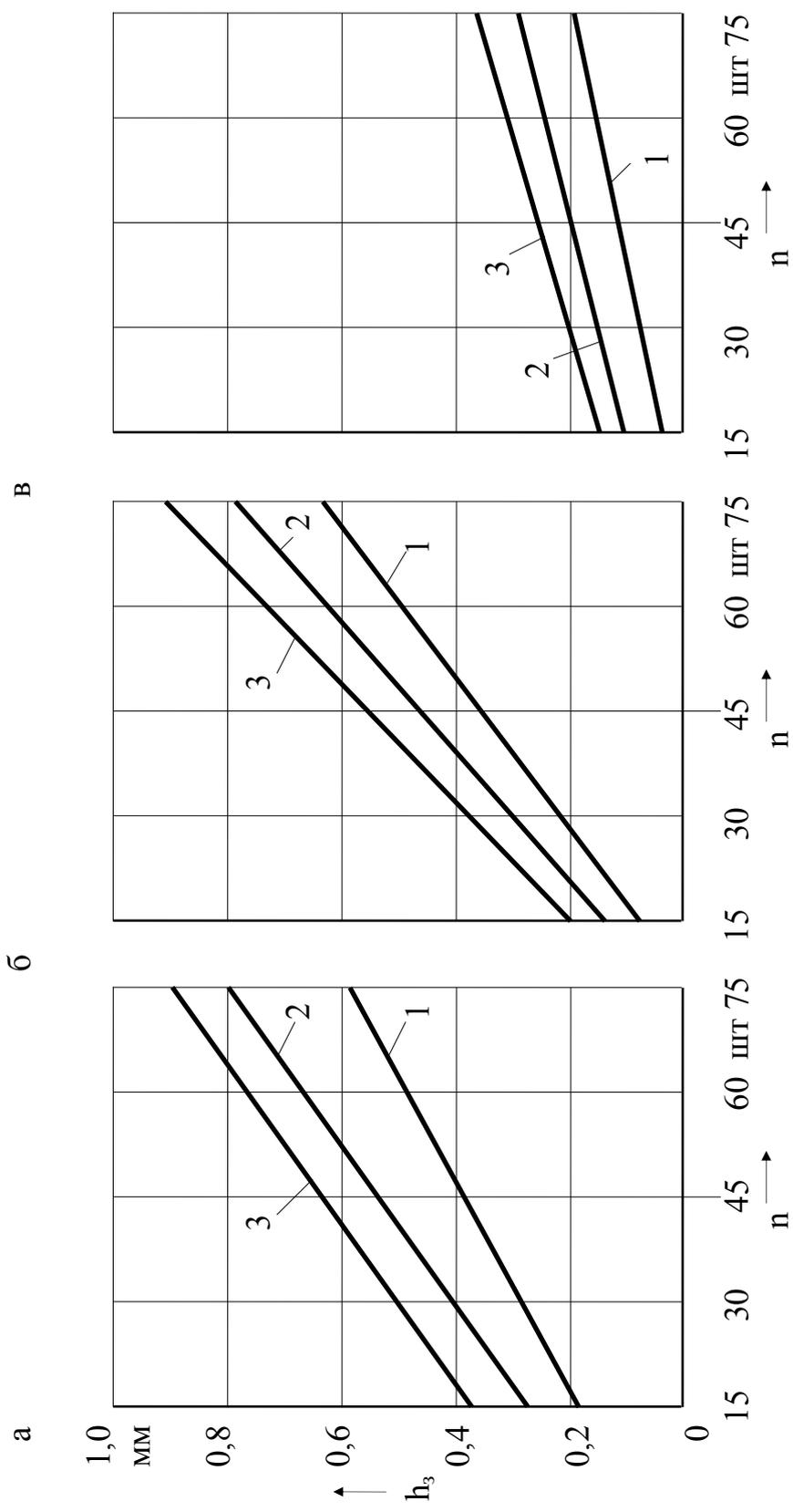


Рис. 4.1. Влияние концентрации механических примесей C на износ по задней грани инструмента h_3 в зависимости от количества обработанных отверстий n при сверлении (а), зенкерования (б), развёртывании (в) отверстий в заготовках из чугуна СЧ20: 1, 2, 3 - соответственно $C = 0; 2; 4$ г/л; режимы обработки см. в табл. 3.2

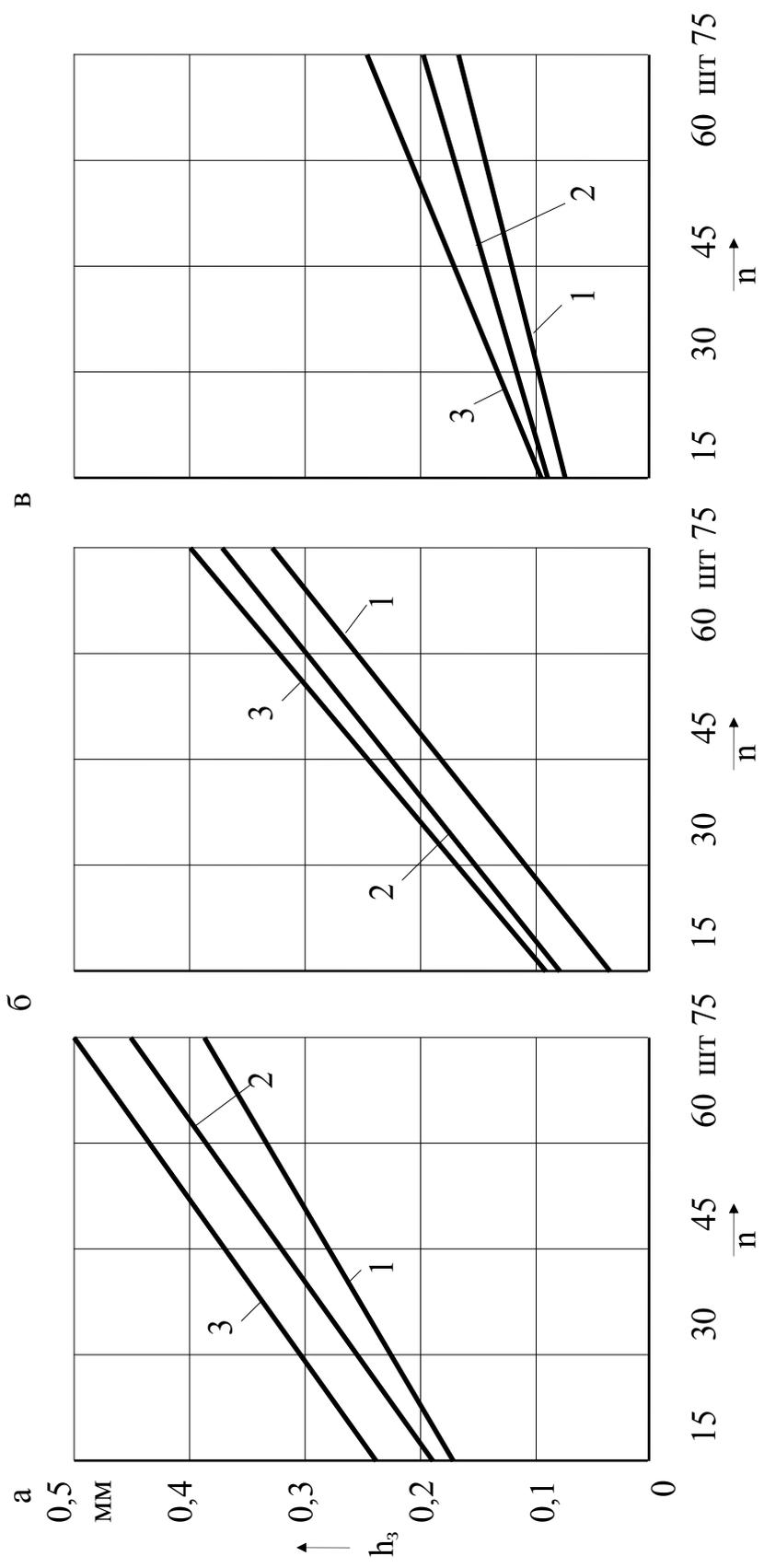


Рис. 4.2. Влияние концентрации механических примесей C на износ по задней грани инструмента h_3 в зависимости от количества обработанных отверстий n при сверлении (а), зенкерования (б), развертывании (в) отверстий в заготовках из стали 45: 1, 2, 3 - соответственно $C = 0; 2; 4$ г/л; режимы обработки см. в табл. 3.2

Т а б л и ц а 4.2

Значения критериев K_{ji} по видам обработки

Показатель, размерность	Критерии K_{ji}					
	Сверление		Зенкерование		Развертывание	
	C=4 г/л	C=2 г/л	C=4 г/л	C=2 г/л	C=4 г/л	C=2 г/л
Чугун СЧ20						
h_3 , мм	0,64	0,71	0,75	0,87	0,67	0,82
N_3 , кВт	0,94	0,97	0,94	0,96	0,77	0,87
Δ_d , мм	0,42	0,53	0,45	0,59	0,38	0,7
$\Delta_{кр}$, мкм	0,9	0,94	0,87	0,93	0,73	0,84
R_a , мкм	0,76	0,87	0,9	0,95	0,49	0,66
R_z , мкм	0,8	0,89	0,83	0,91	0,47	0,64
R_{max} , мкм	0,81	0,9	0,82	0,9	0,48	0,65
S_m , мкм	1,15	1,07	1,17	1,08	1,24	1,10
S , мкм	1,14	1,06	1,18	1,06	1,23	1,10
n_p , мм	1,2	1,09	1,14	1,06	1,15	1,09
t_p , %	1,2	1,09	1,15	1,07	1,13	1,06
Сталь 45						
h_3 , мм	0,8	0,86	0,92	0,96	0,69	0,87
N_3 , кВт	0,92	0,95	0,93	0,96	0,85	0,92
Δ_d , мм	0,38	0,46	0,41	0,63	0,61	0,64
$\Delta_{кр}$, мкм	0,77	0,87	0,87	0,93	0,74	0,85
R_a , мкм	0,79	0,88	0,73	0,85	0,65	0,8
R_z , мкм	0,97	0,98	0,82	0,9	0,94	0,96
R_{max} , мкм	0,88	0,94	0,82	0,9	0,72	0,83
S_m , мкм	1,34	1,14	1,31	1,14	1,28	1,13
S , мкм	1,33	1,15	1,36	1,16	1,27	1,13
n_p , мм	1,07	1,03	1,17	1,08	1,10	1,04
t_p , %	1,10	1,04	1,07	1,03	1,10	1,04

Пр и м е ч а н и е : значения критериев по h_3 , Δ_d даны для 75-го отверстия.

Подобный характер размерного износа инструмента h_3 отмечен и при зенкерование отверстий в чугунных и стальных заготовках. Очистка СОЖ от механических примесей (C уменьшается с 4 до 0 г/л) может обеспечить увеличение периода стойкости зенкера τ_c в 1,47 раза при обработке отверстий в чугунных образцах и в 1,28 раза – в стальных образцах.

При развертывании отверстий в заготовках из чугуна СЧ20 и стали 45 увеличение концентрации загрязнений C в тех же пределах приводит к росту h_3 , соответственно с 0,22 до 0,34 мм (на 55%) (см. рис. 4.1,в) и с 0,17 до 0,24 мм (41%) (см. рис. 4.2,в). Причиной интенсификации износа инструментов h_3 является увеличение числа частиц механических примесей в СОЖ, а следовательно, возрастание вероятности попадания этих частиц в зону контакта режущего инструмента и обрабатываемой заготовки. Этот

факт подтверждается и при токарной обработке (рис. 4.3,а): с увеличением концентрации примесей в СОЖ C от 0 до 1,8 г/л износ проходного упорного резца h_3 при точении заготовок из стали 40Х возрастает на 28% (с 0,78 до 1 мм).

Присутствие механических примесей в СОЖ вызывает изменение сил резания, а следовательно, и изменение энергозатрат на процесс механической обработки (рис. 4.4). Изменение мощности резания при возрастании концентрации механических примесей в СОЖ имеет практически одинаковый характер для чугунных и стальных заготовок при обработке отверстий сверлами и зенкерами. При развертывании отверстий мощность резания возрастает более интенсивно (см. рис. 4.4, кривые 3).

4.1.2. Влияние чистоты СОЖ на качество обработанных заготовок

Следствием износа мерного режущего инструмента по задней грани h_3 является изменение диаметра обработанного отверстия (его уменьшение) Δ_d . При сверлении 75-ти отверстий в заготовке из чугуна СЧ20 изменение диаметра обработанного отверстия Δ_d при $C=4$ г/л составляет почти 0,1 мм, а при $C=0$ г/л $\Delta_d=0,03$ мм (рис. 4.5,а). Для аналогичных условий обработки отверстий в стальных образцах, соответственно, $\Delta_d=0,17$ мм и $\Delta_d=0,055$ мм (рис. 4.6,а). Таким образом, при увеличении концентрации примесей C от 0 до 4 г/л Δ_d возрастает при сверлении в 3-3,3 раза. При зенкерованием загрязнение СОЖ механическими примесями приводит к увеличению Δ_d в 2 раза для заготовок из СЧ20 и в 2,2 раза для заготовок из стали 45 к моменту обработки последнего в серии опытов 75-го отверстия (рис. 4.5,б и 4.6,б). Такое же интенсивное уменьшение диаметра обработанного отверстия наблюдается на операции развертывания (рис. 4.5,в и 4.6,в). Максимальное уменьшение диаметров отверстий, развернутых в чугунных заготовках, составило 0,05 мм, в стальных – 0,06 мм.

Частицы механических примесей, попадая между боковой ленточкой сверла, зенкера или развертки и обрабатываемой поверхностью ухудшают точность формы и шероховатость отверстия. Точность формы, оцениваемая в данном случае как отклонение от круглости в поперечном сечении $\Delta_{кр}$, изменяется в разной степени при различных видах обработки отверстий. Так, например, при сверлении отверстий в чугунных заготовках увеличение C от 0 до 4 г/л приводит к увеличению $\Delta_{кр}$ на 9,3%, при зенкерованием – 13,5%, а при развертывании – на 34% (рис. 4.7,ф). Для аналогичных условий обработки отверстий в стальных заготовках, варьирование загрязнением СОЖ приводит к увеличению отклонения от круглости $\Delta_{кр}$ при сверлении на 29%, при зенкерованием на 13%, и при развертывании – на 32% (рис. 4.7,б).

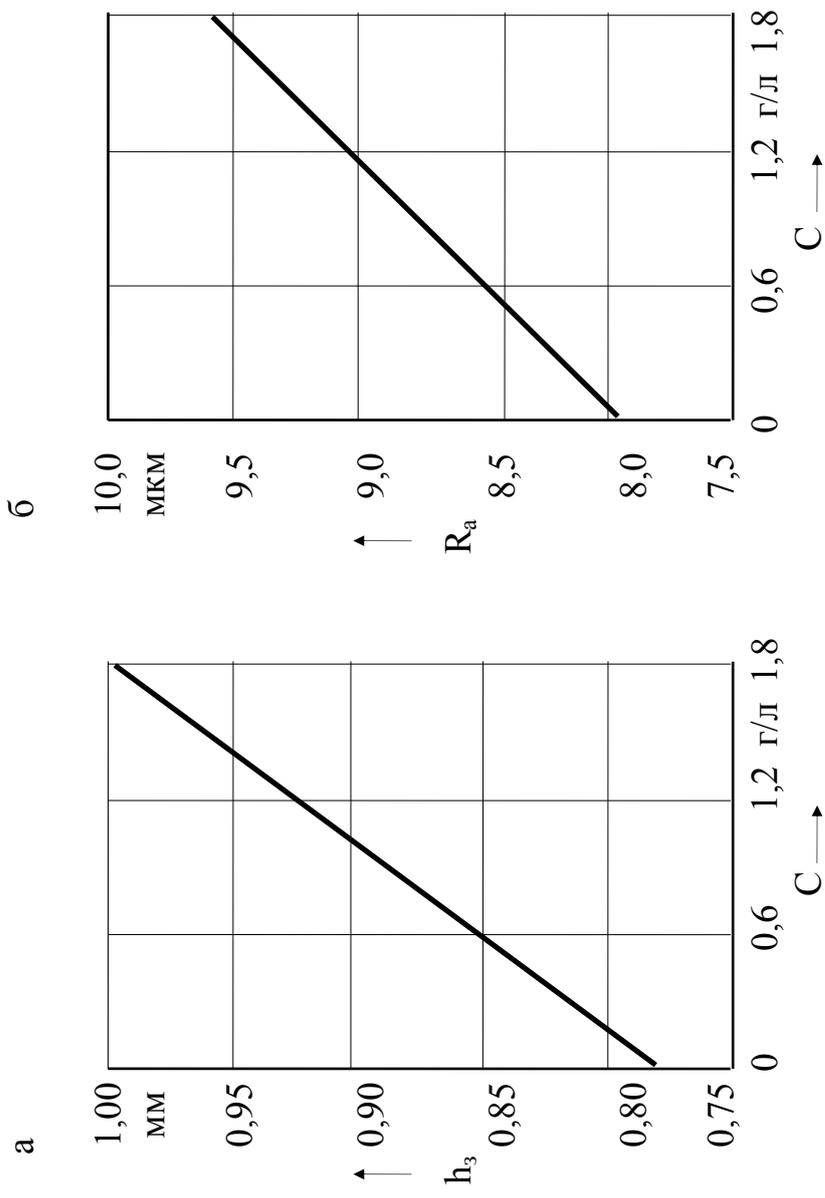


Рис. 4.3. Влияние концентрации механических примесей C на износ по задней грани h_3 (а) и среднее арифметическое отклонение профиля обработанной поверхности R_a (б) при точении заготовок из стали 40Х, НВ 160...190 на станке с ЧПУ: $t = (0,5 - 1)$ мм; $S_0 = (0,5 - 1)$ мм/об; $n = (100 - 250)$ об/мин; $V = (8 - 30)$ м/мин

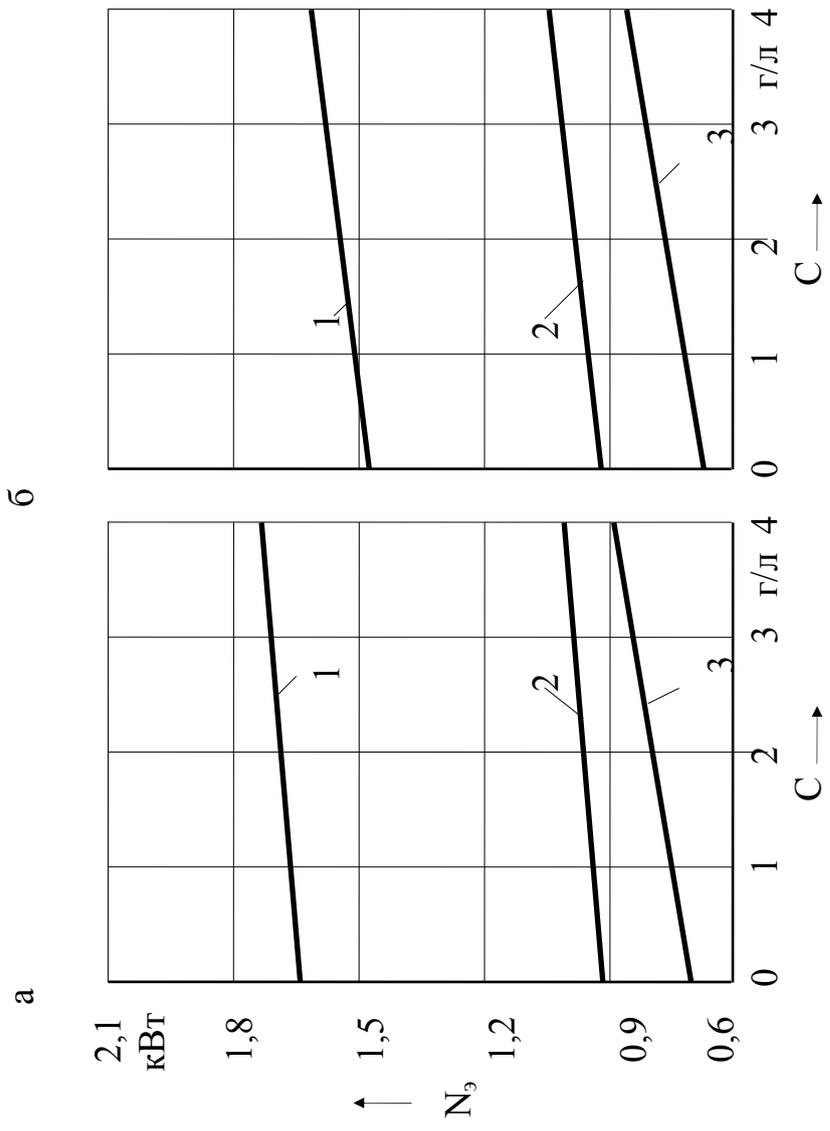


Рис. 4.4. Влияние концентрации механических примесей С на изменение мощности N_9 при обработке отверстий в образце из СЧ20 (а) и стали 45 (б):
 1, 2, 3 - соответственно сверление, зенкерование, развертывание; режимы обработки см. табл. 3.2

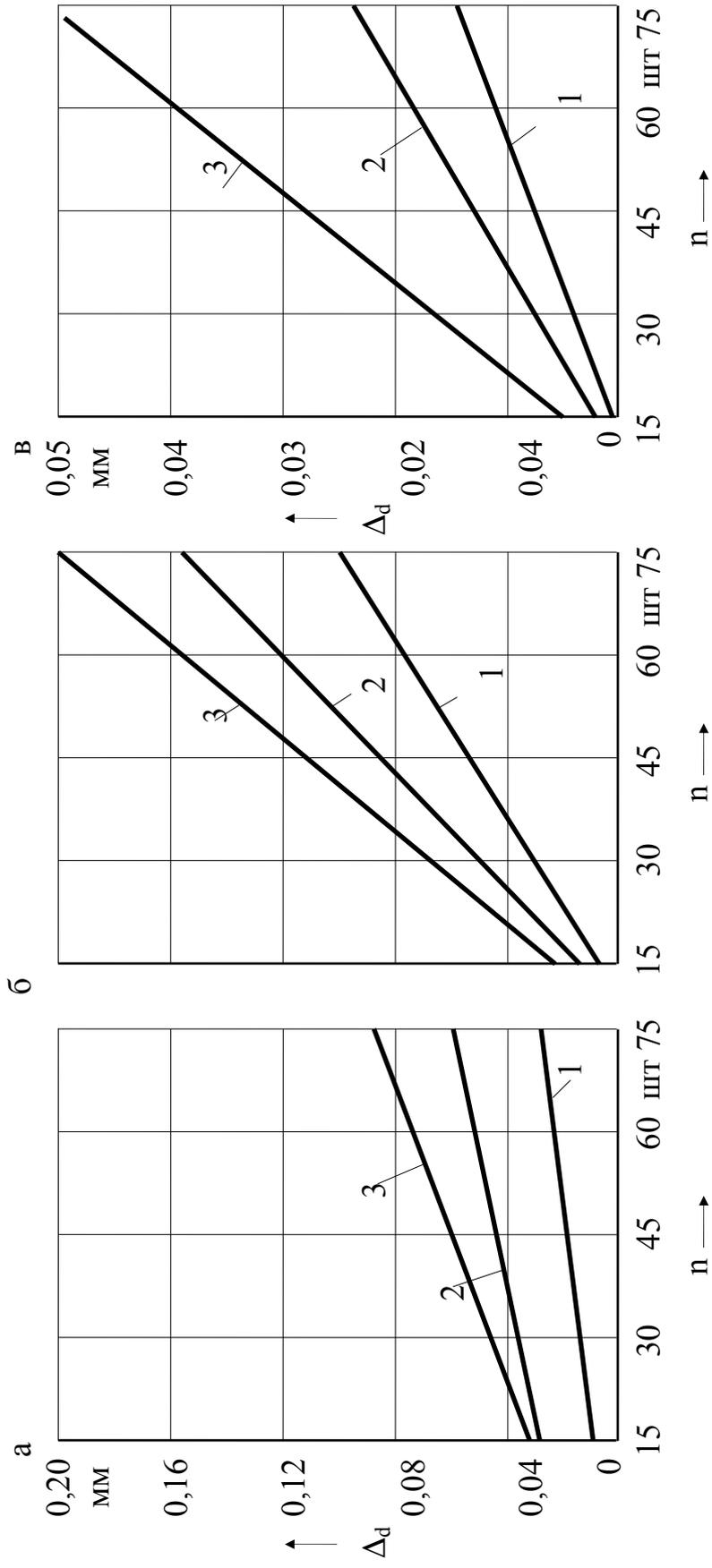


Рис. 4.5. Влияние концентрации механических примесей С на изменение диаметра обработанного отверстия Δ_d в зависимости от количества обработанных отверстий n при сверлении (а), зенкерования (б) и развертывании (в) в заготовках из чугуна СЧ20:

1, 2, 3 – соответственно $C = 0; 2; 4$ г/л; режимы обработки см. в табл. 3.2

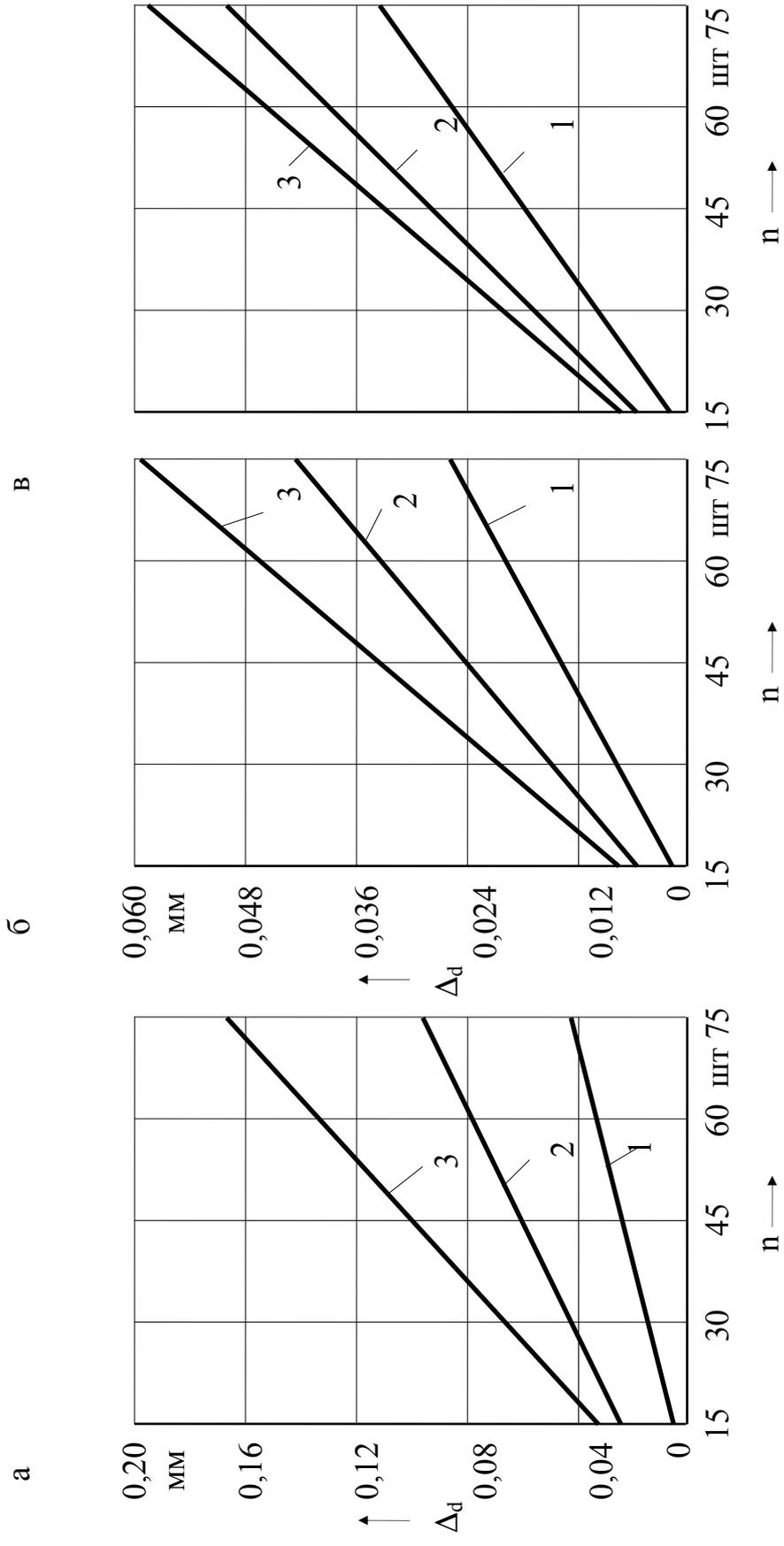


Рис. 4.6. Влияние концентрации механических примесей С на изменение диаметра обработанного отверстия Δ_d в зависимости от количества обработанных отверстий n при сверлении (а), зенкерования (б) и развёртывании (в) в заготовках из стали 45:

1, 2, 3 – соответственно $S = 0; 2; 4$ г/л; режимы обработки см. в табл. 3.2

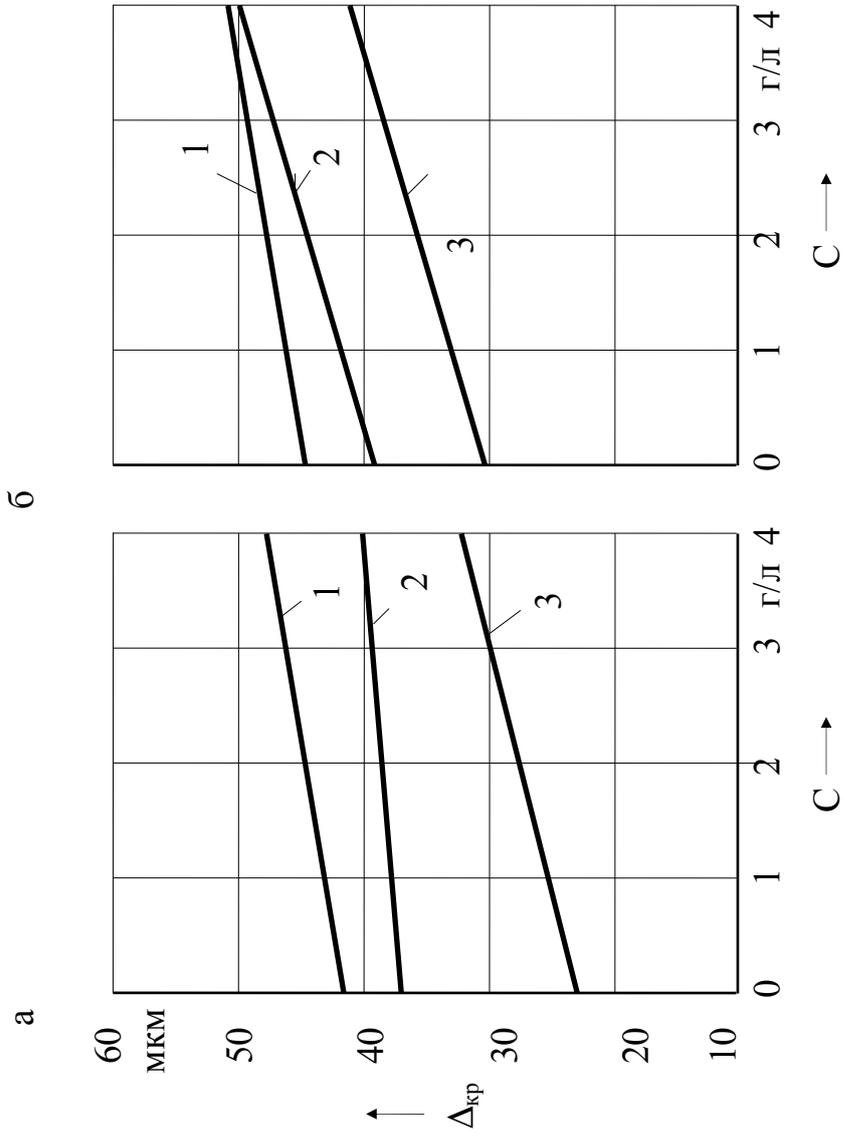


Рис. 4.7. Влияние концентрации механических примесей С на отклонение от круглости $\Delta_{кр}$ отверстий в заготовках из чугуна СЧ20 (а) и стали 45 (б): 1, 2, 3 - соответственно сверление, зенкерование, развертывание; режимы обработки см. табл. 3.2

Механические примеси, содержащиеся в СОЖ, негативно влияют на высотные и шаговые параметры микропрофиля обработанных отверстий. Это влияние более ощутимо при обработке отверстий развертками, чем при сверлении и зенкеровании. Например, при развертывании отверстий в образцах из чугуна СЧ20 с увеличением C от 0 до 4 г/л R_a и R_z возросли в 2 раза, а R_{max} – в 2,3 раза; при зенкеровании с увеличением C в тех же пределах R_a увеличилось на 10%, а R_z и R_{max} – на 20%; при сверлении все вышеперечисленные высотные параметры возросли на 20-25% (рис. 4.8). Примерно также изменяются параметры шероховатости R_a , R_z , R_{max} , с увеличением концентрации механических примесей в СОЖ C при сверлении, зенкеровании и развертывании отверстий в стальных заготовках (рис. 4.9). Шаговые параметры шероховатости S_m , S , n_p , t_p уменьшились с увеличением концентрации C , причем при развертывании отверстий в большей степени, чем при сверлении и зенкеровании отверстий как в чугунных, так и стальных заготовках (рис. 4.10 и 4.11).

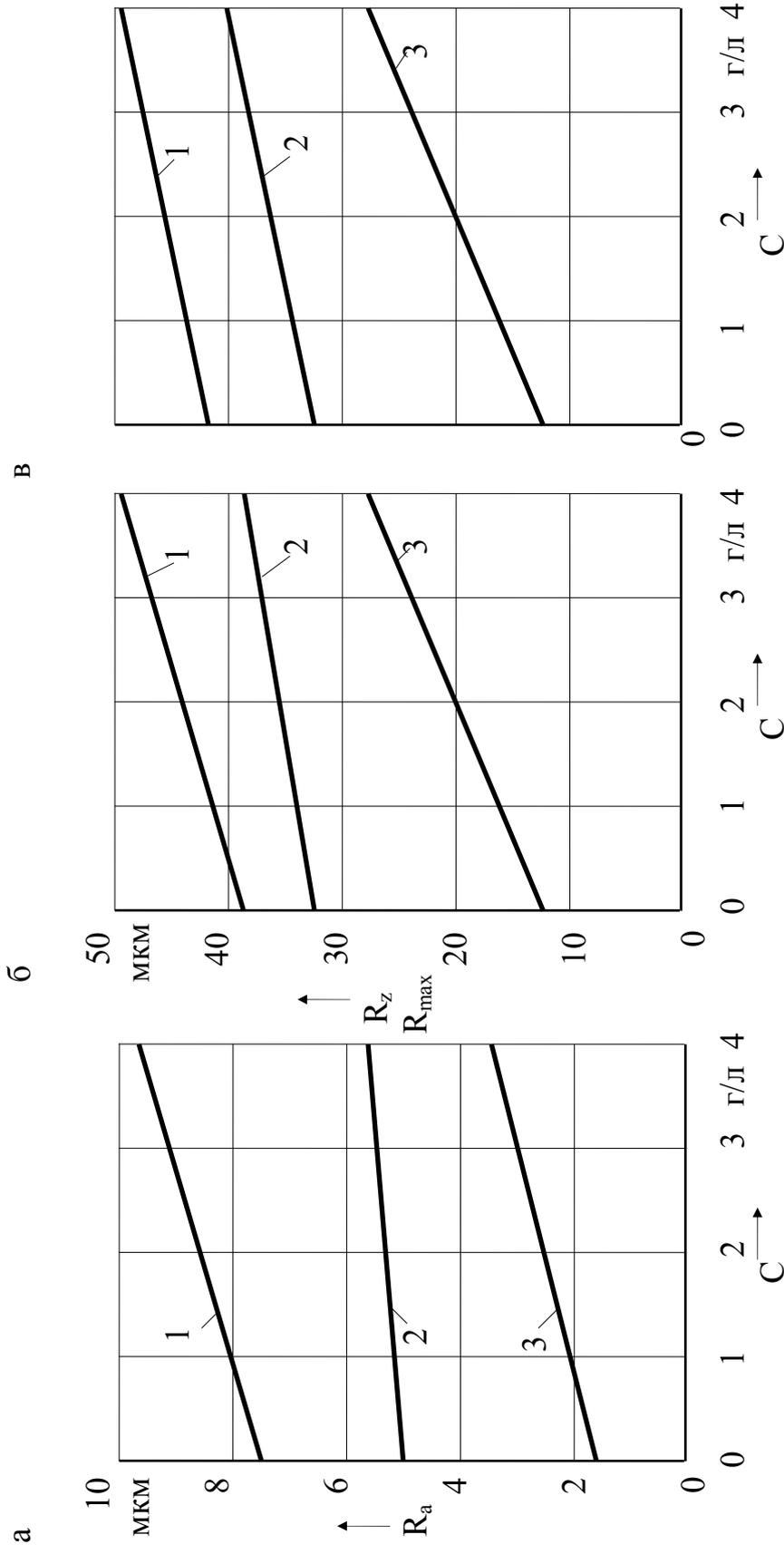


Рис. 4.8. Влияние концентрации механических примесей C на среднее арифметическое отклонение профиля R_a (а), высоту неровностей профиля R_z (б), наибольшую высоту неровностей профиля $R_{z\text{max}}$ (в) отверстий: 1, 2, 3 – соответственно сверление, зенкерование, развертывание отверстий в заготовке из чугуна СЧ20; режимы обработки см. табл. 3.2

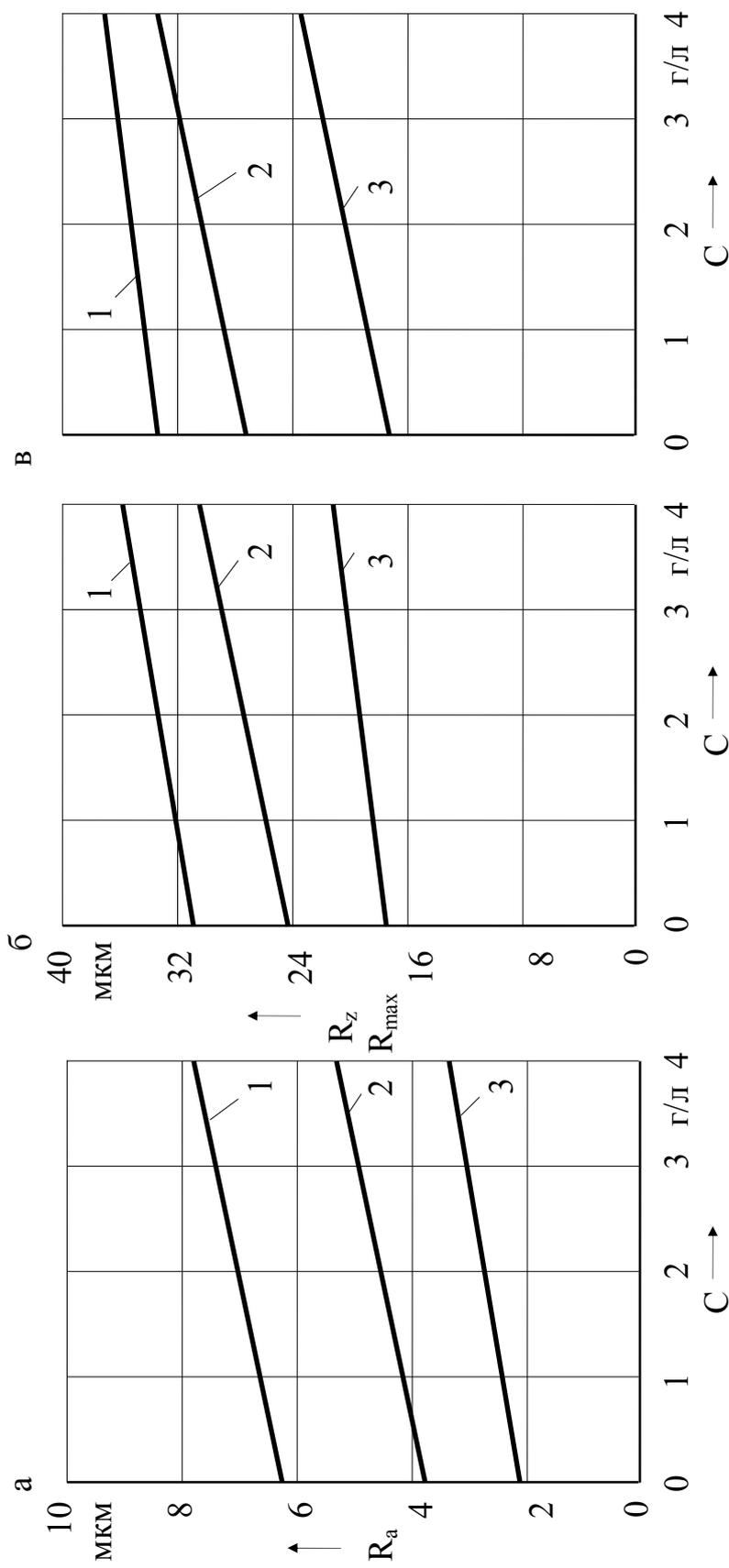


Рис. 4.9. Влияние концентрации механических примесей C на среднее арифметическое отклонение профиля R_a (а), высоту неровностей профиля R_z (б), наибольшую высоту неровностей профиля R_{max} (в) отверстий: 1, 2, 3 – соответственно сверление, зенкерование, развертывание отверстий в заготовке из стали 45; режимы обработки см. табл. 3.2

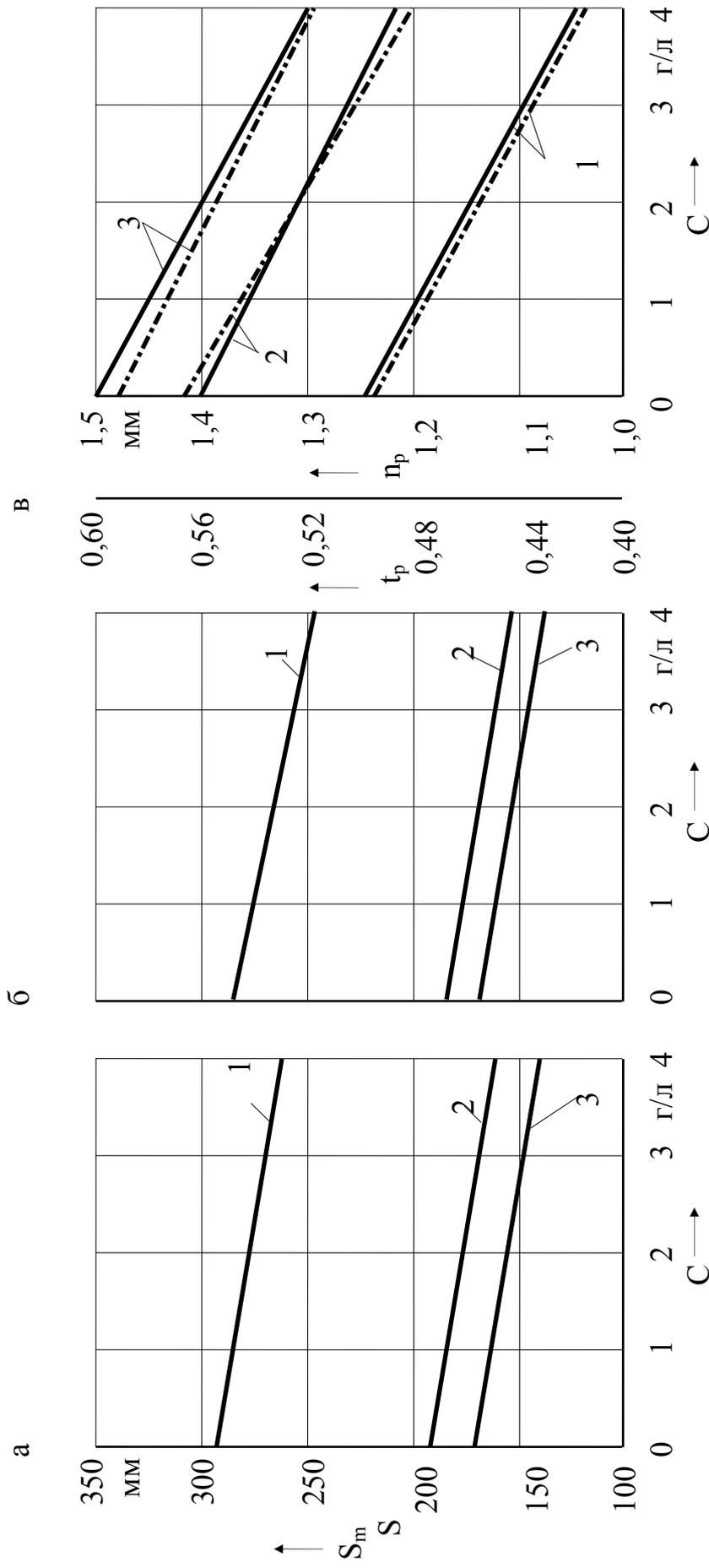


Рис. 4.10. Влияние концентрации механических примесей C на средний шаг неровностей профиля S_m (а), средний шаг местных выступов профиля S (б), опорную длину профиля n_p (—) и относительную опорную длину профиля t_p (---) (в) отверстий: 1, 2, 3 – соответственно сверление, зенкерование, развертывание отверстий в заготовке из чугуна СЧ20; режимы обработки см. в табл. 3.2

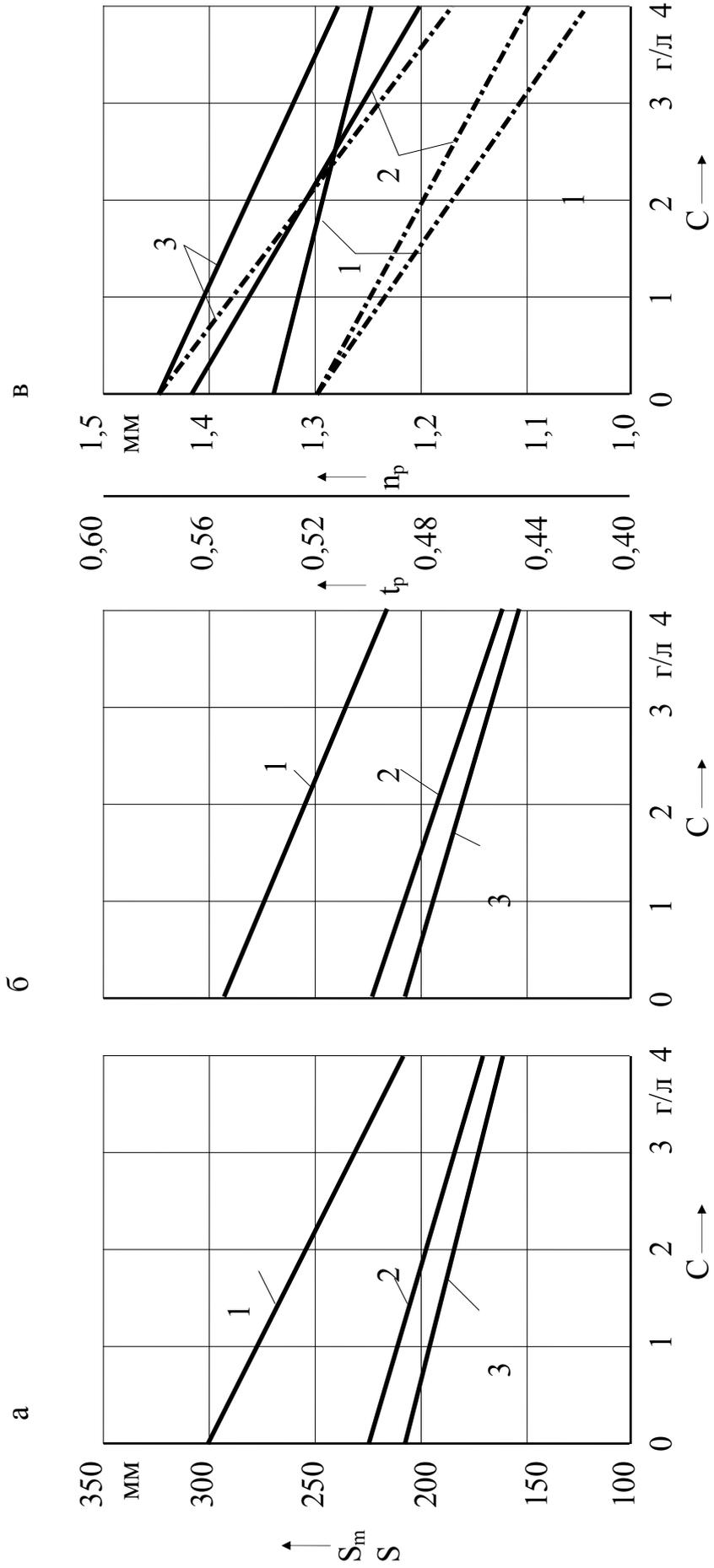


Рис. 4.11. Влияние концентрации механических примесей C на средний шаг неровностей профиля S_m (а), средний шаг местных выступов профиля S (б), опорную длину профиля t_p (—) и относительную опорную длину профиля t_p (---) (в) отверстий: 1, 2, 3 — соответственно сверление, зенкерование, развертывание отверстий в заготовке из стали 45; режимы обработки см. в табл. 3.2

4.2. Экспериментальные исследования параметров чистоты СОЖ на операциях лезвийной обработки заготовок

Экспериментальные исследования проводили по методике, изложенной в параграфе 3.3, с целью изучения дисперсного состава механических примесей, содержащихся в СОЖ на операциях лезвийной обработки заготовок, и проверки адекватности зависимостей для расчета характеристик очистителя и параметров чистоты СОЖ (см. п. 2.3).

Экспериментальные данные представляли в виде гистограмм (рис. 4.12) и обрабатывали с помощью пакета “STATGRAPHICS” для определения теоретических законов распределения размеров частиц механических примесей. Соответствие практических кривых распределения и подобранных теоретических законов распределения проверяли по критериям согласия χ^2 и Колмогорова-Смирнова [5].

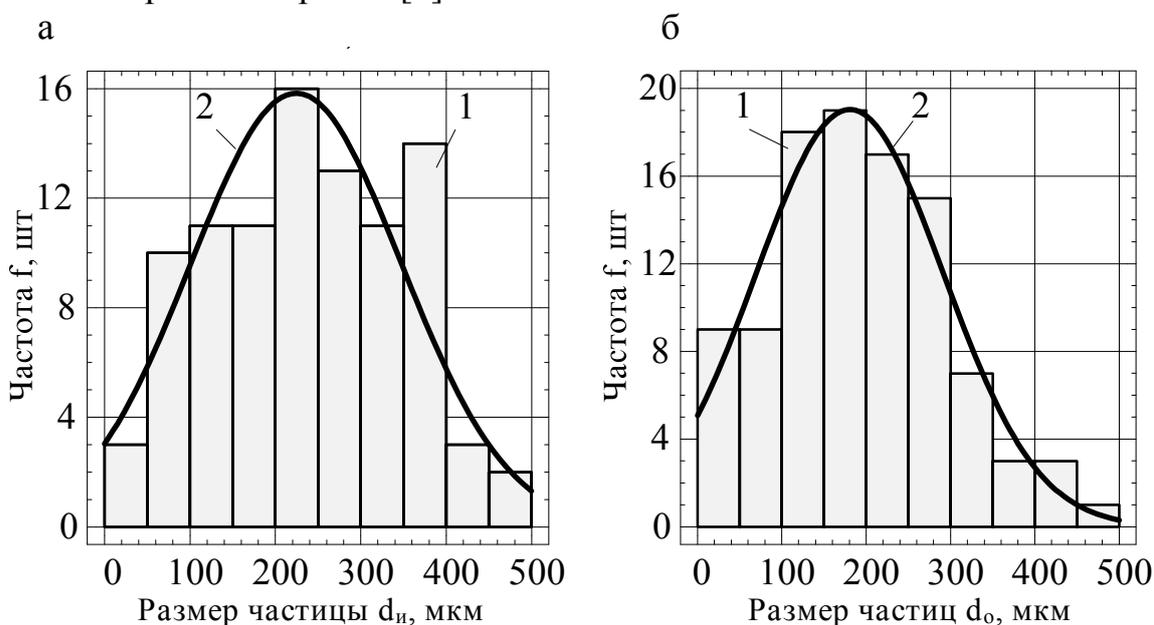


Рис. 4.12. Гистограмма (1) и теоретический закон распределения (2) частиц механических примесей по размерам до (а) и после очистки СОЖ (б)

Рассмотрим задачи определения параметров чистоты СОЖ и характеристик очистителя на конкретном примере.

По результатам дисперсного анализа получены гистограммы для исходных и оставшихся в СОЖ после очистки частиц механических примесей (рис. 4.12). После обработки данных на ЭВМ при помощи пакета “STATGRAPHICS” для гистограмм, показанных на рис. 4.12, определены теоретические (гипотетические) законы распределения частиц по размерам $P_{dн}$: $\bar{d}_n = 224,4$ мкм, $\sigma_n = 123,5$ мкм; $P_{dо}$: $\bar{d}_o = 180,6$ мкм, $\sigma_o = 11$ мкм. В табл. 4.3 и 4.4 представлены результаты расчетов по критериям согласия. Для $P_{dн}$: $\chi^2 = 8,23$, $\chi^2_T = 12,6$ из таблиц [5]; $8,23 < 12,6$ $\chi^2 < \chi^2_T$; следовательно, $P_{dн}$

соответствует по критерию χ^2 . Статистика Колмогорова-Смирнова $DN=0,061$, уровень значимости $\alpha_{\text{КС}}=0,9999$. Проверим условие

$$\sqrt{n} \cdot DN \geq \lambda_0,$$

где λ_0 – для $(1-\alpha_{\text{КС}})=1-0,9999=0,0001$ равна $0,33$ [5];
 n – число измерений.

$$\sqrt{94} \cdot 0,0061 = 0,599 > 0,33.$$

Условие Колмогорова-Смирнова выполнено. Аналогично проверили соответствие для $P_{\text{до}}$ (табл. 4.4): $\chi^2=1,84$; $\chi^2_{\text{T}}=12,6$; $1,84 < 12,6$. $DN=0,0589$, $\alpha_{\text{КС}}=0,9999$, $\lambda_0=0,33$, $\sqrt{102} \cdot 0,0589 = 0,594 > 0,33$.

Следовательно, теоретические законы распределения частиц по размерам $P_{\text{ди}}$ и $P_{\text{до}}$ можно использовать для последующих расчетов.

В нормально-вероятностных координатах (абсцисса градуирована по значению d , а ордината – по функции Лапласа $\Phi(x)$ нормального закона) функции распределения частиц по размерам $P_{\text{до}}$ и $P_{\text{ди}}$ изображены прямыми (рис. 4.13), т.е. подчиняются закону нормального распределения. Тогда при расчетах по формулам (2.56)-(2.68) вместо значений $\ln d$ подставляем d .

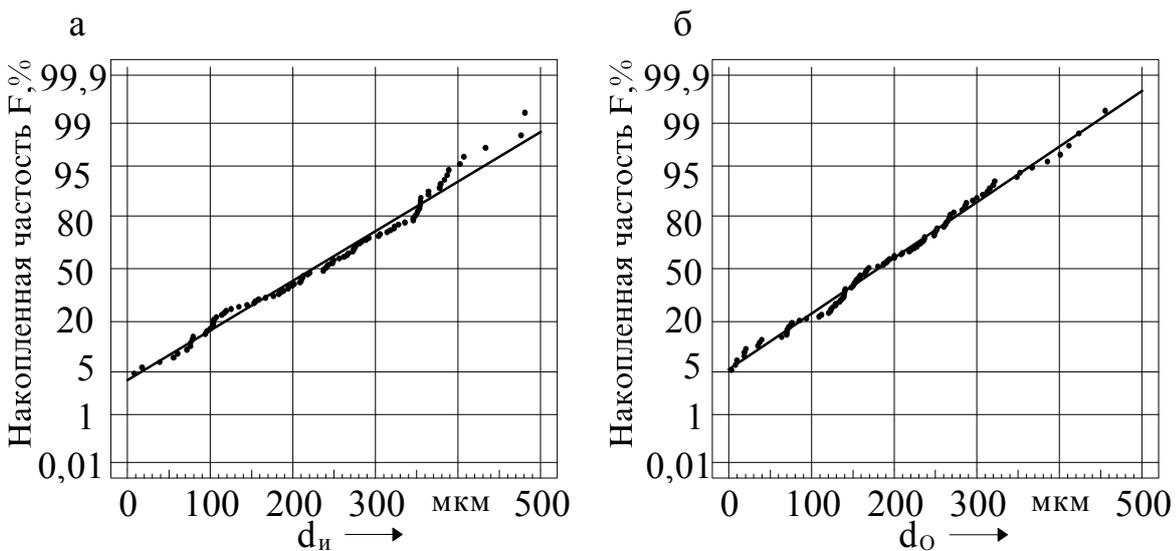


Рис. 4.13. Распределение частиц механических примесей, содержащихся в СОЖ, по размерам до (а) и после очистки (б) в нормально-вероятностных координатах

Определим характеристику очистителя ε_d . По (2.69) с учетом $\bar{\varepsilon}=0,61$ (из эксперимента)

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{-0,26874 \cdot \sqrt{0,61}}{111 - 123,5} \cdot 123,5^2 = 256,1 \text{ мкм.}$$

Т а б л и ц а 4.3

Критерии согласия для распределения частиц механических примесей, содержащихся в СОЖ до ее очистки, по размерам P_{dn}

Размер частиц, мкм		Наблюдаемая частота, шт	Ожидаемая частота, шт	Критерий χ^2
св 0	до 50	7	7,7	0,07031
св 50	до 100	10	7,6	0,73002
св 100	до 150	11	11,4	0,01555
св 150	до 200	11	14,5	0,85672
св 200	до 250	16	15,7	0,00495
св 250	до 300	13	14,5	0,14966
св 300	до 350	11	11,3	0,00979
св 350	до 400	14	7,6	5,50986
св 400		5	7,6	0,88
				$\Sigma\chi^2=8,23541$
Статистика Колмогорова DPLUS=0,058039; Статистика Колмогорова DMINUS=0,0618067; Двусторонняя статистика DN=0,618067; Уровень значимости $\alpha_{kc}=0,9999$.				

Т а б л и ц а 4.4

Критерии согласия для распределения частиц механических примесей, содержащихся в СОЖ после ее очистки, по размерам P_{do}

Размер частиц мкм		Наблюдаемая частота, шт	Ожидаемая частота, шт	Критерий χ^2
св 0	до 50	9	7,2	0,45531
св 50	до 100	9	12,1	0,79485
св 100	до 150	18	16,7	0,10337
св 150	до 200	19	18,9	0,00115
св 200	до 250	17	17,5	0,01170
св 250	до 300	15	13,2	0,23487
св 300	до 350	7	8,2	0,18271
св 350		6	6,7	0,00954
				$\Sigma\chi^2=1,84022$
Статистика Колмогорова DPLUS=0,049465; Статистика Колмогорова DMINUS=0,0589528; Двусторонняя статистика DN=0,0589528; Уровень значимости $\alpha_{kc}=0,9999$.				

По (2.68) при $\Phi(\bar{\varepsilon}=0,61)=0,279$

$$\bar{d}_{\varepsilon}=224,4-\sqrt{123,5^2+256,1^2\cdot 0,279}=145 \text{ мкм.}$$

Определим характеристики распределения размеров частиц, удаленных из СОЖ, P_{dy} по (2.58) и (2.56):

$$\sigma_y=123,5+0,25333\cdot 123,5^2(0,61^2-1)/256,1=114,02 \text{ мкм.}$$

$$\bar{d}_y=224,4+\sqrt{-2\cdot 114^2\cdot \ln\left(\frac{114}{0,61\cdot 123,5}\cdot \Phi\left(\frac{224,4-145}{256,1}\right)\right)}=264,2 \text{ мкм.}$$

Результаты расчета показаны на рис. 4.14 в нормальных координатах в виде S – кривых. Согласно данным работ [6, 28] характеристика очистителя ε_d (кривая 1, рис. 4.14) остается постоянной при неизменяющихся расходе и давлении СОЖ в очистителе. В обследуемом очистителе (флотатор) расход и давление СОЖ оставались постоянными, так как работал один и тот же насос, поэтому считаем ε_d постоянной. Рассчитаем параметры оставшихся в СОЖ P_{d0}^p и удаленных частиц P_{dy}^p и сравним их со значениями P_{d0}^3 и P_{dy}^3 , полученными экспериментально.

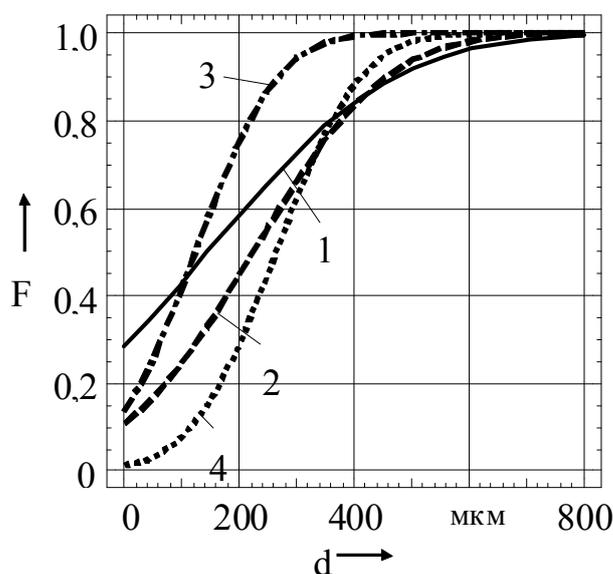


Рис. 4.14. S – кривые очистителя (1), распределения частиц механических примесей по размерам до (2) и после (3) очистки СОЖ и удаленных (4) из СОЖ

При проведении следующего эксперимента (опыта) на вход очистителя поступили механические примеси с параметрами $\bar{d}_и=195$ мкм, $\sigma_и=133$ мкм. В СОЖ после очистки остались механические примеси с параметрами $\bar{d}_0^3=110$ мкм, $\sigma_0^3=118$ мкм. Средняя степень очистки СОЖ в данном эксперименте $\bar{\varepsilon}=54\%$. Полученные практические кривые аппроксимировали

теоретическими законами (рис. 4.15) и проверили по критериям согласия (табл. 4.5, 4.6).

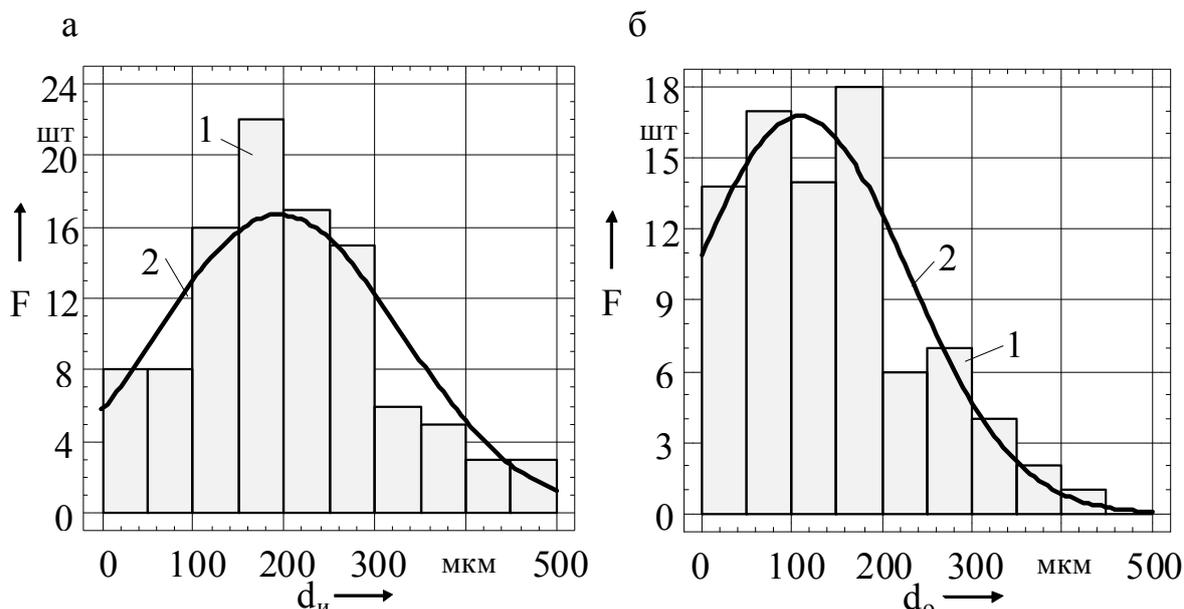


Рис. 4.15. Гистограмма (1) и теоретический закон распределения (2) частиц механических примесей по размерам до (а) и после очистки СОЖ (б)

Т а б л и ц а 4.5

Критерии согласия для распределения частиц механических примесей, содержащихся в СОЖ до ее очистки, по размерам $P_{ди}$

Размер частиц, мкм		Наблюдаемая частота, шт	Ожидаемая частота, шт	Критерий χ^2
св 0	до 50	8	8,1	0,1549
св 50	до 100	8	11,2	0,8056
св 100	до 150	16	14,5	0,1534
св 150	до 200	22	16,4	1,8917
св 200	до 250	17	16,2	0,0399
св 250	до 300	15	13,9	0,0854
св 300	до 350	6	10,4	1,8652
св 350	до 400	5	6,8	0,4671
св 400		8	7,0	0,1393
				$\Sigma\chi^2=5,72878$
Статистика Колмогорова DPLUS=0,0798157;				
Статистика Колмогорова DMINUS=0,0502001;				
Двусторонняя статистика DN=0,0798157;				
Уровень значимости $\alpha_{КС}=0,473421$.				

Таблица 4.6

Критерии согласия для распределения частиц механических примесей, содержащихся в СОЖ после ее очистки, по размерам P_{do}

Размер частиц мкм		Наблюдаемая частота, шт	Ожидаемая частота, шт	Критерий χ^2
св 0	до 50	8	12,9	1,9774
св 50	до 100	17	15,9	0,0697
св 100	до 150	14	16,5	0,3818
св 150	до 200	18	14,4	0,9197
св 200	до 250	6	10,5	1,9306
св 250	до 300	7	6,5	0,0464
св 300	до 350	7	5,5	0,3987
				$\Sigma\chi^2=7,00192$
Статистика Колмогорова DPLUS=0,0479483; Статистика Колмогорова DMINUS=0,0543694; Двусторонняя статистика DN=0,0543694; Уровень значимости $\alpha_{кс}=1$.				

Вычислим по (2.59) и (2.57) расчетные параметры механических примесей, оставшихся в СОЖ после ее очистки:

$$\sigma_0^p = 133 - 0,26874 \cdot 133^2 \cdot \sqrt{0,54} / 256,1 = 119 \text{ мкм}$$

$$\bar{d}_0^p = 194 - \sqrt{\left| -2 \cdot 199^2 \cdot \ln \left(\frac{119}{(1 - 0,54) \cdot 133} \left(1 - \Phi \left(\frac{194 - 145}{256,1} \right) \right) \right) \right|} = 119,5 \text{ мкм.}$$

Вычислим по (2.58) и (2.56) расчетные параметры механических примесей, удаленных из СОЖ при очистке:

$$\sigma_y^p = 133 + 0,25333 \cdot 133^2 \cdot (0,54^2 - 1) / 256,1 = 121,1 \text{ мкм.}$$

$$\bar{d}_y^p = 194 + \sqrt{\left| -2 \cdot 121,1^2 \cdot \ln \left(\frac{121,1}{0,54 \cdot 133} \cdot \Phi \left(\frac{194 - 145}{256,1} \right) \right) \right|} = 225,8 \text{ мкм.}$$

Для удаленных механических примесей определили $\bar{d}_y^3 = 252$ мкм, $\sigma_y^3 = 144$ мкм. Различия между расчетными и экспериментальными значениями \bar{d} и σ не превышали 12% (рис. 4.16), что очевидно, объясняется погрешностями измерения размеров частиц при микроскопическом анализе механических примесей.

Дисперсионный анализ экспериментальных и расчетных значений параметров \bar{d} и σ механических примесей подтверждает сходимость результатов (табл. 4.7, 4.8) и, следовательно, адекватность зависимостей

(2.56)-(2.59) и (2.65)-(2.69) для расчета параметров чистоты СОЖ и характеристик очистителя (см. п. 2.3) доказана. Гипотеза H_0 о том, что разница расчетных и экспериментальных значений \bar{d} и σ равна нулю при $\alpha=0,05$, не отвергается.

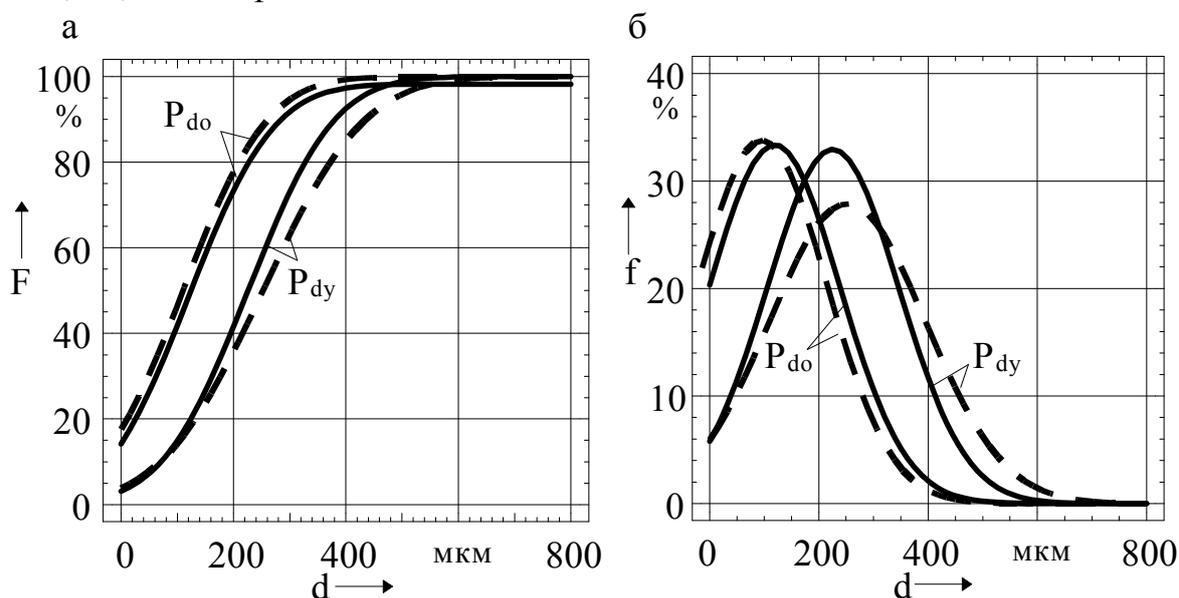


Рис. 4.16. Расчетные и экспериментальные законы распределения частиц механических примесей в СОЖ по размерам после очистки P_{do} и удаленных P_{dy} : а – накопленная частота F ; б – частота f ; (–) расчетный закон, (---) экспериментальный закон

Т а б л и ц а 4.7

Дисперсионный анализ экспериментальных и расчетных законов распределения размеров частиц механических примесей, оставшихся в СОЖ после очистки

Параметры статистики	Значение		
	Эксперимент	Расчет	Общее
Количество частиц n , шт	104	100	204
Средний размер \bar{d} , мкм	110	119	115,3
Дисперсия s^2 , мкм ²	13924	14161	13443
Стандартное отклонение σ , мкм	118	119	118,7
Медиана d_m , мкм	109,8	107,8	109,02
Разность средних – 9 мкм; Отношение дисперсий – 1,01723; При $\alpha=0,05$ гипотезу H_0 не отклонять.			

Таблица 4.8

Дисперсионный анализ экспериментальных и расчетных законов распределения размеров частиц механических примесей, удаленных из СОЖ при очистке

Параметры статистики	Значение		
	Эксперимент	Расчет	Общее
Количество частиц n , шт	88	100	188
Средний размер \bar{d} , мкм	252	225	235,3
Дисперсия s^2 , мкм ²	20449	14641	18630
Стандартное отклонение σ , мкм	143	121	125
Медиана d_m , мкм	258	221	233,6
Разность средних – 27 мкм; Отношение дисперсий – 1,396; При $\alpha=0,05$ гипотезу H_0 не отклонять.			

4.3. Выводы

1. Экспериментально установлено негативное влияние механических примесей, содержащихся в СОЖ, на работоспособность сверл, зенкеров и разверток, энергозатраты и качество обработанных этими инструментами поверхностей отверстий.

2. Получены регрессионные модели влияния концентрации механических примесей в СОЖ C на износ мерных инструментов h_3 ; энергозатраты N_3 ; погрешность размера Δ_d и погрешность формы $\Delta_{кр}$; высотные параметры шероховатости R_a , R_z , R_{max} ; шаговые параметры шероховатости S_m , S , n_p , t_p при сверлении, зенкерования и развертывании, а также на износ h_3 резцов и среднее арифметическое отклонение профиля R_a при точении.

3. Получен экспериментальный информационный массив, который может быть использован для определения критериев K_{ji} , необходимых для оценки эффективности систем очистки СОЖ по зависимостям (2.20), (2.29) и (2.30).

4. Экспериментально установлено, что распределение размеров частиц механических примесей по размерам при лезвийной обработке стальных и чугунных заготовок описывается нормальным законом распределения Гаусса.

5. Доказана адекватность зависимостей (2.56)-(2.69) для расчета параметров чистоты СОЖ \bar{d} , σ и характеристик очистителя ε_d , \bar{d}_ε , σ_ε на операциях очистки СОЖ от механических примесей.

5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОЧИСТКИ СОЖ

5.1. Методика оценки экономической эффективности систем очистки СОЖ

Методика оценки экономической эффективности систем очистки СОЖ состоит из следующих этапов:

1. Определение затрат Z_i базового варианта технологической операции или линии по зависимостям (2.3)-(2.19), (2.22)-(2.28) с использованием программы “Расчет затрат Z_i ”.

2. Определение значений (диапазона изменения) критериев технологической эффективности K_{ji} для каждой операции технологической линии.

3. Расчет изменения технологической себестоимости механической обработки заготовок ΔC_T по зависимости (2.20), изменения затрат, связанных с появлением (или снижением) брака $\Delta C_{бр}$ (2.29), экономического эффекта ΔE_T (2.30) внедрения системы очистки СОЖ, по программе “Экономическая эффективность”.

4. Расчет оптимального сочетания критериев технологической эффективности K_{ji} по зависимости (2.30) с использованием программы “OPN”.

5. Установление функциональной взаимосвязи критериев технологической эффективности K_{ji} и параметров чистоты СОЖ C_o , \bar{d}_o , σ_o по данным ранее выполненных исследований (табл. 1.4), по результатам выполненных нами исследований (табл. 4.1, 4.2) или экспериментально в производственных или лабораторных условиях по методике, приведенной в главе 3.

6. Определение параметров СОЖ C_o , \bar{d}_o , σ_o для технологической линии при проектировании системы очистки:

а) по наименьшим значениям C_o , \bar{d}_o , σ_o ;

б) по преобладающим значениям C_o , \bar{d}_o , σ_o ;

в) по средним (“экономическим”) значениям C_o , \bar{d}_o , σ_o , например

$$C_o = \sum_{n=1}^{N_3} C_{oi} \cdot \frac{f_{ki} \{Z_{ni} \cdot (1 - K_{ji})\}}{\Delta C},$$

где N_3 – количество затрат Z_{ni} , изменение которых связано с технологическими эффектами (критериями K_{ji}).

7. Расчет технико-экономических характеристик системы очистки:

1) Средняя степень очистки $\bar{\epsilon}$ по (2.39).

2) Тонкость очистки \bar{d}_ϵ по (2.68).

3) Среднее квадратическое отклонение размеров σ_ϵ по (2.69).

4) Стоимость K_0 и затраты на эксплуатацию очистителей Z_3 .

Рассмотрим применение данной методики для решения задач, перечисленных в п. 2.1.

5.2. Выбор варианта ЦСО для автоматической линии

С целью апробации разработанной методики выполнены расчеты экономической эффективности использования различных ЦСО СОЖ на действующей автоматической линии КМ-029 механической обработки заготовки картера заднего моста 452-2401012 и на проектируемом комплексе КМ-097 автоматических линий ЛМ-1172, ЛМ-1173, ЛМ-1175 для обработки заготовки картера заднего моста 3741-2401012 автомобилей семейства УАЗ (массовое производство).

Линия КМ-029 скомпонована из агрегатных станков и выполняет 2 операции: на операции 010 обрабатывают поверхности (плоскость и отверстия), используемые в качестве баз при последующей обработке. Далее заготовку устанавливают в приспособление-спутник и при помощи конвейера передают на 015 операцию, где обрабатываются все остальные поверхности. Линия КМ-029 обслуживается системой очистки, состоящей из емкости загрязненной СОЖ, батареи гидроциклонов, емкости очищенной СОЖ, насосов и трубопроводов. Техническая характеристика ЦСО, обслуживающей автоматическую линию КМ-029:

1. Степень очистки $\bar{\epsilon}$, % 80.
2. Тонкость очистки d_{50} , мкм 5.
3. Производительность $Q_{ж}$, м³/ч 180.
4. Установленная мощность $N_э$, кВт 400.

Проектируемый комплекс КМ-097 состоит из трех автоматических линий ЛМ-1172, ЛМ-1173, ЛМ-1175 механической обработки, скомпонованных из специальных станков и соединенных автоматическим конвейером. Обработка заготовки, установленной в приспособление-спутник, осуществляется без смены технологических баз. Для обслуживания комплекса КМ-097 в ПКТБ “Экосистема” УлГТУ спроектирована система очистки СОЖ от механических примесей, состоящая из вакуумного фильтра, флотатора, насосов и трубопроводов. Предусмотрена возможность встраивания в эту систему магнитного сепаратора. Техническая характеристика ЦСО, обслуживающей комплекс КМ-097:

1. Степень очистки $\bar{\epsilon}$, % 90-95.
2. Тонкость очистки d_{50} , мкм 5.
3. Производительность $Q_{ж}$, м³/ч 180.
4. Установленная мощность $N_э$, кВт 200.

По результатам обследования действующего производства обработки заготовок картеров заднего моста выявлено, что заданные параметры

качества изделий обеспечиваются. Следовательно, для определения экономической эффективности спроектированной ЦСО СОЖ можно использовать формулу (2.20). Исходные данные для расчета затрат Z_{mi} , Z_{vi} , Z_{Ni} , Z_{ti} , Z_{ji} , полученные из документации на технологические процессы механической обработки заготовок картеров 452-2401012 и 3741-2401012.

Годовые затраты на электроэнергию определяем по формуле

$$C_{эс} = N_{yc} \cdot k_6 \cdot k_7 \cdot k_8 \cdot k_9 \cdot Ц_э \cdot \eta \cdot \Phi_{д.о},$$

где $\Phi_{д.о}$ – действительный годовой фонд работы ЦСО СОЖ, $\Phi_{д.о} = 4015$ ч.

Значения коэффициентов k_6 - k_9 установлены в соответствии с [67] и равны: $k_6 = 0,9$; $k_7 = 0,9$; $k_8 = 1$; $k_9 = 1,06$; $\eta = 0,95$. Суммарная установленная мощность электродвигателей на действующей ЦСО СОЖ составляет 400 кВт, а на вновь спроектированной – 200 кВт. Тогда годовые затраты на электроэнергию для действующей ЦСО СОЖ равны

$$Z_{эс}^6 = 0,02 \cdot 400 \cdot 4015 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1,06 \cdot 0,95 = 27302 \text{ руб.},$$

а соответствующие затраты на вновь спроектированной ЦСО СОЖ

$$Z_{эс}^H = 0,02 \cdot 200 \cdot 4015 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1,06 \cdot 0,95 = 13651 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на заработную плату рабочих, обслуживающих ЦСО СОЖ, определили по формуле

$$Z_{зп} = C_{зч} \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \Phi_{д.р},$$

где $\Phi_{д.р}$ – действительный годовой фонд рабочего времени, $\Phi_{д.р} = 1860$ ч.

По данным УАЗ действующую ЦСО СОЖ обслуживает 1 оператор в каждую смену. Двухсменную работу спроектированной ЦСО СОЖ обеспечивают 2 оператора, 1 электрик, 1 слесарь. Тогда при $C_{зч} = 0,88$ руб.; $k_2 = 1,14$; $k_3 = 1,12$; $k_4 = 1,14$ [67] соответствующие затраты составят

$$Z_{зп}^6 = 2 \cdot 0,88 \cdot 1,14 \cdot 1,12 \cdot 1,14 \cdot 1860 = 4764 \text{ руб.}$$

$$Z_{зп}^H = 4 \cdot 0,88 \cdot 1,14 \cdot 1,12 \cdot 1,14 \cdot 1860 = 9528 \text{ руб.}$$

Результаты расчета затрат C_1' и Z_1 , выполненного на ЭВМ по формулам (2.6)-(2.16), представлены в табл. 5.1, 5.2.

Используя зависимость (2.20), выполнили сравнительный анализ эффективности использования действующей и спроектированной ЦСО СОЖ на автоматических линиях КМ-029 и КМ-097 по вариантам, представленным в табл. 5.3.

Предложенные варианты предусматривают использование на действующей автоматической линии КМ-029 вновь спроектированной ЦСО

Таблица 5.1

Затраты C'_1, Z_3 для автоматической линии КМ-029

№ станции	C'_3	C'_a	C'_{po}	C'_N	$C'_{ир}$	$C'_к$	Z_3	$Z_в$	Z_N	$Z_{ир}$	$Z_ж$
	руб./ч	руб./ч	руб./ч	руб./кВт·ч	руб.	руб./ч	руб.	руб.	руб.	руб.	руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1,112	0,400	0,00013	0,0097	5,556	0,286	0,0273	0,0022	0,0051	0,0248	0,0024
3	1,112	0,399	0,00013	0,0097	20,94	0,286	0,0272	0,0022	0,0051	0,094	0,0024
5	1,112	0,326	0,00013	0,0097	23,18	0,235	0,0448	0,0036	0,0074	0,108	0,0042
7	1,112	0,372	0,00013	0,0097	33,14	0,267	0,0290	0,0023	0,0052	0,162	0,0026
9	1,112	0,400	0,00013	0,0097	19,36	0,286	0,0224	0,0018	0,0042	0,042	0,0019
11	1,112	0,326	0,00016	0,0097	37,63	0,204	0,0297	0,0024	0,0042	0,118	0,0028
14	1,112	0,295	0,00016	0,0097	18,36	0,169	0,0505	0,0040	0,0062	0,100	0,0049
17	1,112	0,269	0,00013	0,0097	1,080	0,198	0,0201	0,0016	0,0029	0,0039	0,0019
20	1,112	0,176	0,00013	0,0097	59,38	0,119	0,0177	0,0014	0,0017	0,126	0,0019
23	1,112	0,181	0,00013	0,0097	1,898	0,122	0,178	0,0014	0,0017	0,0040	0,0019
26	1,112	0,433	0,00013	0,0097	2,678	0,3082	0,0388	0,0027	0,0067	0,0087	0,0029
29	1,112	0,288	0,00013	0,0097	2,364	0,211	0,0557	0,0045	0,0085	0,0142	0,0054
31	1,112	0,189	0,00013	0,0097	1,120	0,139	0,0200	0,0016	0,0020	0,0026	0,0021
34	1,112	0,537	0,00013	0,0097	20,80	0,199	0,0061	0,0005	0,0007	0,0291	0,0005
39	1,112	0,241	0,00013	0,0097	1,392	0,163	0,0223	0,0018	0,0027	0,0117	0,0029
42	1,112	0,241	0,00013	0,0097	1,392	0,163	0,0037	0,0003	0,0005	0,0009	0,0004
45	1,112	0,177	0,00013	0,0097	1,303	0,119	0,0177	0,0014	0,0017	0,0046	0,0019
48	1,112	0,156	0,00013	0,0097	1,316	0,105	0,0170	0,0014	0,0015	0,0088	0,0019
51	1,112	0,152	0,00013	0,0097	2,127	0,103	0,0026	0,0002	0,0002	0,0017	0,0003
54	1,112	0,136	0,00013	0,0097	1,140	0,092	0,0189	0,0015	0,0014	0,0014	0,0021
57	1,112	0,241	0,00013	0,0097	1,711	0,162	0,0181	0,0014	0,0022	0,0116	0,0018

Окончание табл. 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
60	1,112	0,125	0,00013	0,0097	1,842	0,084	0,0200	0,0016	0,0014	0,0015	0,0023
63	1,112	0,160	0,00013	0,0097	0,732	0,108	0,0184	0,0015	0,0016	0,0055	0,0020
66	1,112	0,149	0,00013	0,0097	1,034	0,101	0,0169	0,0014	0,0014	0,0054	0,0019
69	1,112	0,119	0,00013	0,0097	0,484	0,081	0,0025	0,0002	0,00017	0,00015	0,0003
71	1,112	0,144	0,00013	0,0097	0,768	0,0966	0,0097	0,0008	0,0008	0,0031	0,0012
74	1,112	0,131	0,00013	0,0097	0,388	0,088	0,0096	0,0008	0,0007	0,0016	0,0012
77	1,112	0,136	0,00013	0,0097	0,968	0,092	0,0026	0,0002	0,00019	0,0003	0,0001

Таблица 5.2

Заграты C'_i , Z_i для комплекса автоматических линий КМ-097

№ станции	C'_3	C'_a	C'_{po}	C'_N	$C'_{ир}$	$C'_к$	Z_M	Z_B	Z_N	$Z_{ир}$	$Z_{ж}$
	руб./ч	руб./ч	руб./ч	руб./кВт·ч	руб.	руб./ч	руб.	руб.	руб.	руб.	руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ЛМ-1172											
3	1,112	3,475	0,00014	0,0097	1,370	0,242	1,4864	0,0118	0,0032	0,0164	0,0008
4	1,112	2,724	0,00014	0,0097	76,0	0,176	0,0977	0,0078	0,0019	0,3040	0,0007
5	1,112	2,043	0,00014	0,0097	0,86	0,132	0,0882	0,0070	0,0016	0,0034	0,0007
6	1,112	3,745	0,00014	0,0097	0,867	0,242	0,1363	0,0109	0,0029	0,0038	0,0007
8	1,112	2,247	0,00014	0,0097	5,085	0,145	0,0769	0,0062	0,0014	0,0305	0,0006
9	1,112	6,299	0,00014	0,0097	4,912	0,407	0,2272	0,0182	0,0054	0,0066	0,0008
10	1,112	1,362	0,00014	0,0097	4,775	0,088	0,0565	0,0045	0,0009	0,0286	0,0006
11	1,112	3,745	0,00014	0,0097	4,912	0,242	0,1486	0,0119	0,0032	0,0066	0,0008
ЛМ-1173											
2	1,112	2,477	0,00014	0,0097	1,019	0,206	0,1009	0,0081	0,0016	0,0075	0,0007

Окончание табл. 5.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	1,112	1,858	0,00014	0,0097	11,41	0,155	0,0758	0,0061	0,0011	0,0455	0,0007
4	1,112	3,509	0,00014	0,0097	56,8	0,292	0,1303	0,0104	0,0023	0,248	0,0007
5	1,112	3,922	0,00014	0,0097	25,15	0,327	0,1291	0,0103	0,0023	0,126	0,0007
6	1,112	1,961	0,00014	0,0097	1,676	0,164	0,0628	0,0050	0,0009	0,0057	0,0005
7	1,112	4,541	0,00014	0,0097	1,644	0,378	0,1741	0,0139	0,0032	0,0033	0,0008
8	1,112	0,309	0,00014	0,0097	0,0862	0,025	0,0179	0,0014	0,0009	0,0043	0,0003
9	1,112	1,238	0,00014	0,0097	1,399	0,103	0,0299	0,0024	0,0003	0,0069	0,0003
10	1,112	1,238	0,00014	0,0097	3,200	0,103	0,0179	0,0014	0,0002	0,0095	0,0002
JIM-1175											
1	1,112	6,553	0,00014	0,0097	15,26	0,219	0,2132	0,0171	0,0059	0,068	0,0007
2	1,112	1,787	0,00014	0,0097	18,36	0,059	0,0585	0,0047	0,0012	0,058	0,0005
4	1,112	5,553	0,00014	0,0097	11,46	0,219	0,2132	0,0171	0,0058	0,054	0,0007
5	1,112	1,787	0,00014	0,0097	8,05	0,059	0,0731	0,0058	0,0015	0,032	0,0007
6	1,112	1,548	0,00014	0,0097	21,62	0,051	0,0939	0,0075	0,0018	0,192	0,0009
7	1,112	1,787	0,00014	0,0097	8,30	0,059	0,0658	0,0063	0,0013	0,030	0,0006
9	1,112	0,894	0,00014	0,0097	0,952	0,030	0,0454	0,0036	0,0006	0,0017	0,0006
10	1,112	3,277	0,00014	0,0097	0,900	0,109	0,1108	0,0089	0,0027	0,0036	0,0007
11	1,112	2,532	0,00014	0,0097	197,8	0,085	0,0828	0,0066	0,0019	0,7121	0,0006

Т а б л и ц а 5.3

Варианты использования ЦСО СОЖ и новых СОЖ на автоматических линиях КМ-029, КМ-097

№ варианта	Условное обозначение варианта	Критерии технологической эффективности					Число оборотов СОЖ n_B
		K_M	K_B	K_N	K_T	$K_{ж}$	
1	БЛ + БС + БЖ	1	1	1	1	1	670
2	БЛ + ПС + БЖ	0,97	1	1	1,2	1	3600
3	БЛ + БС + НЖ1	1	1	1	1	0,5	670
4	БЛ + БС + НЖ2	0,97	1	1	1,5	1	670
5	БЛ + ПС + НЖ2	0,95	1	1	1,5	1	3600
6	ПЛ + ПС + БЖ	1	1	1	1	1	3600
7	ПЛ + ПС + НЖ2	0,95	1	1	1,5	1	3600

Примечание: БЛ – базовая (КМ-029) линия; БС – базовая ЦСО СОЖ; БЖ – базовая СОЖ; ПС – проектируемая ЦСО СОЖ; НЖ1 – новая жидкость 1; НЖ2 – новая жидкость 2; ПЛ – проектируемая (КМ-097) линия.

СОЖ (вариант 2), а также новых составов СОЖ, отличающихся от базовой более низкой стоимостью (вариант 3) или наличием при их применении технико-экономических эффектов – снижение трудоемкости, повышения стойкости инструмента (вариант 4). Вариант 5 предусматривает одновременное использование на линии КМ-029 новой ЦСО и новой СОЖ. По вариантам 6 и 7 на комплексе автоматических линий КМ-097 используется вновь спроектированная ЦСО СОЖ и новая СОЖ. Значения критериев K_{ji} , определяющие технологическую эффективность ЦСО СОЖ, установлены по данным ранее выполненных исследований [3, 10, 17, 28, 54, 69, 71, 75].

С целью поэлементного анализа составляющих технологической себестоимости по отдельным статьям расходов определены (табл. 5.4, 5.5) затраты на заработную плату C_z (рис. 5.1), амортизацию C_a (рис. 5.2) и ремонт оборудования C_{po} (рис. 5.3), режущий инструмент $C_{ир}$ (рис. 5.4), электроэнергию $C_{эс}$ (рис. 5.5) и производственные помещения C_k (рис. 5.6) при механической обработке заготовок картеров как на базовой (КМ-029) автоматической линии, так и на вновь проектируемом комплексе КМ-097.

Из рис. 5.1-5.6 следует, что при изготовлении картеров основными составляющими технологической себестоимости являются затраты на заработную плату, амортизацию оборудования и режущий инструмент. Затраты на электроэнергию и ремонт оборудования настолько относительно малы (например, на один два порядка меньше затрат на режущий инструмент), что при оценке эффективности новых ЦСО СОЖ ими можно пренебречь. Этот вывод справедлив как для технологического процесса изготовления картера 452-2401012, так и для вновь спроектированной технологии изготовления картера 3741-2401012 (рис. 5.11).

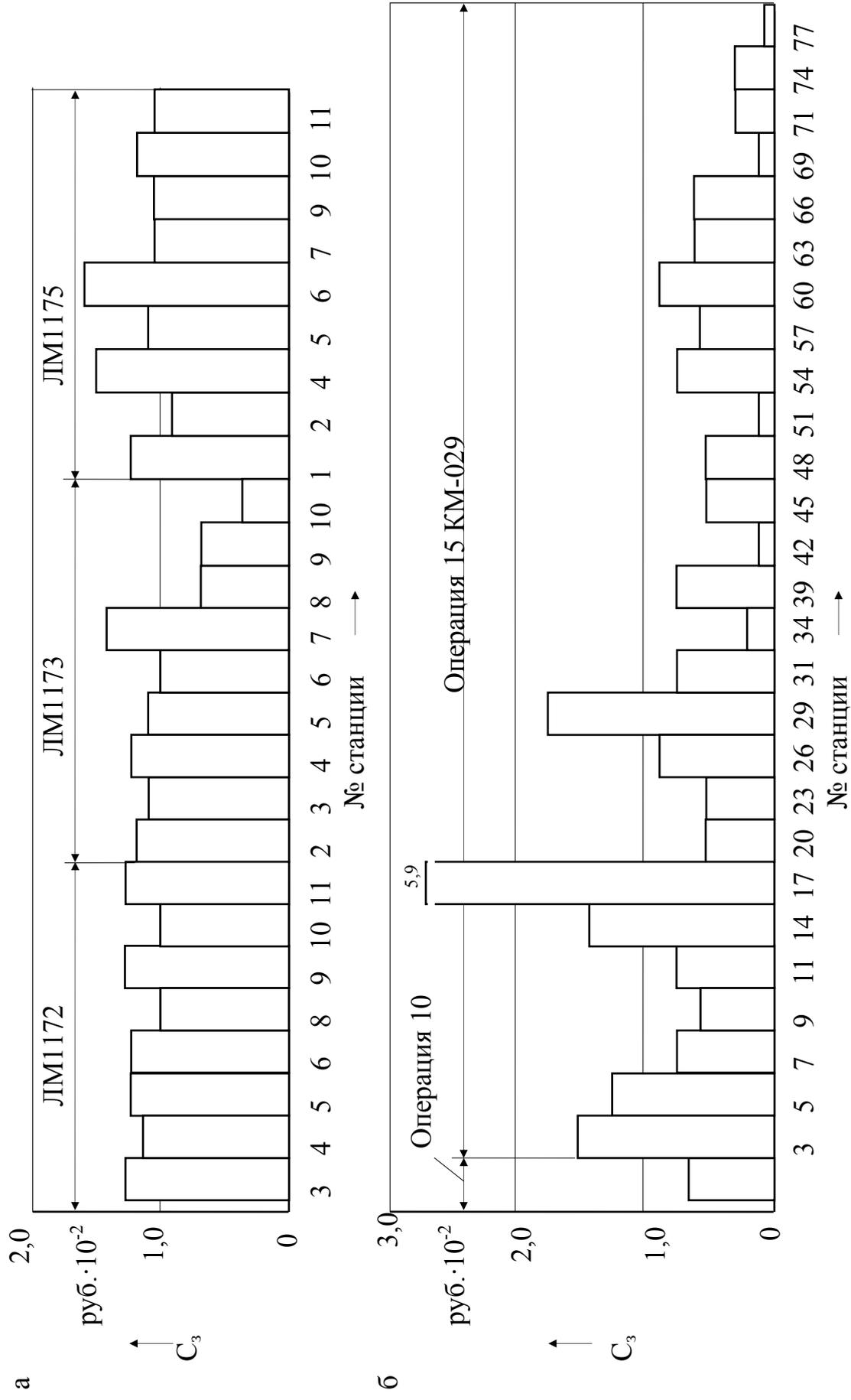


Рис. 5.1. Загрязны на зароботную плату C_3 по станциям технологического процесса изготовления картера на КМ-097 (а), КМ-029 (б)

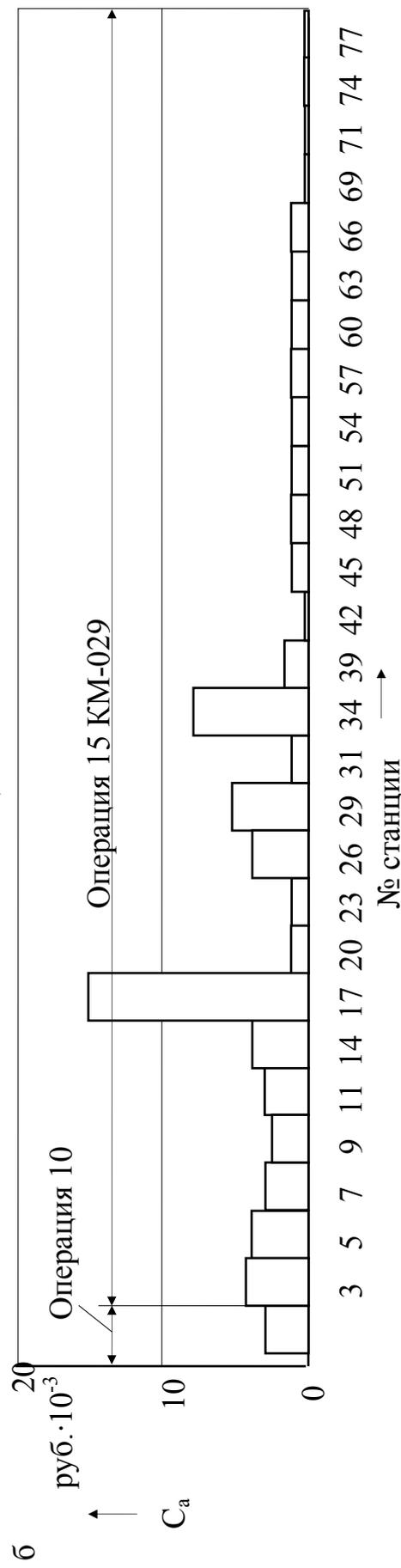
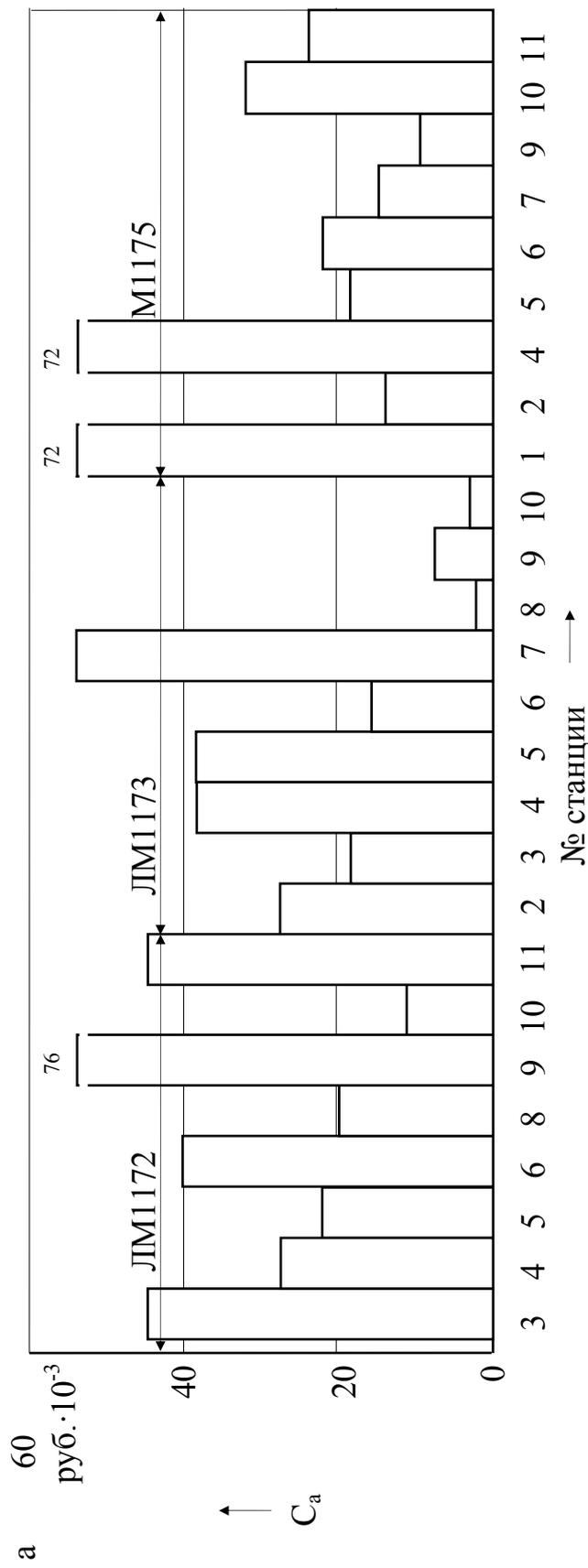


Рис. 5.2. Затраты на амортизацию C_а оборудования по станциям технологического процесса изготовления картера на КМ-097 (а), КМ-029 (б)

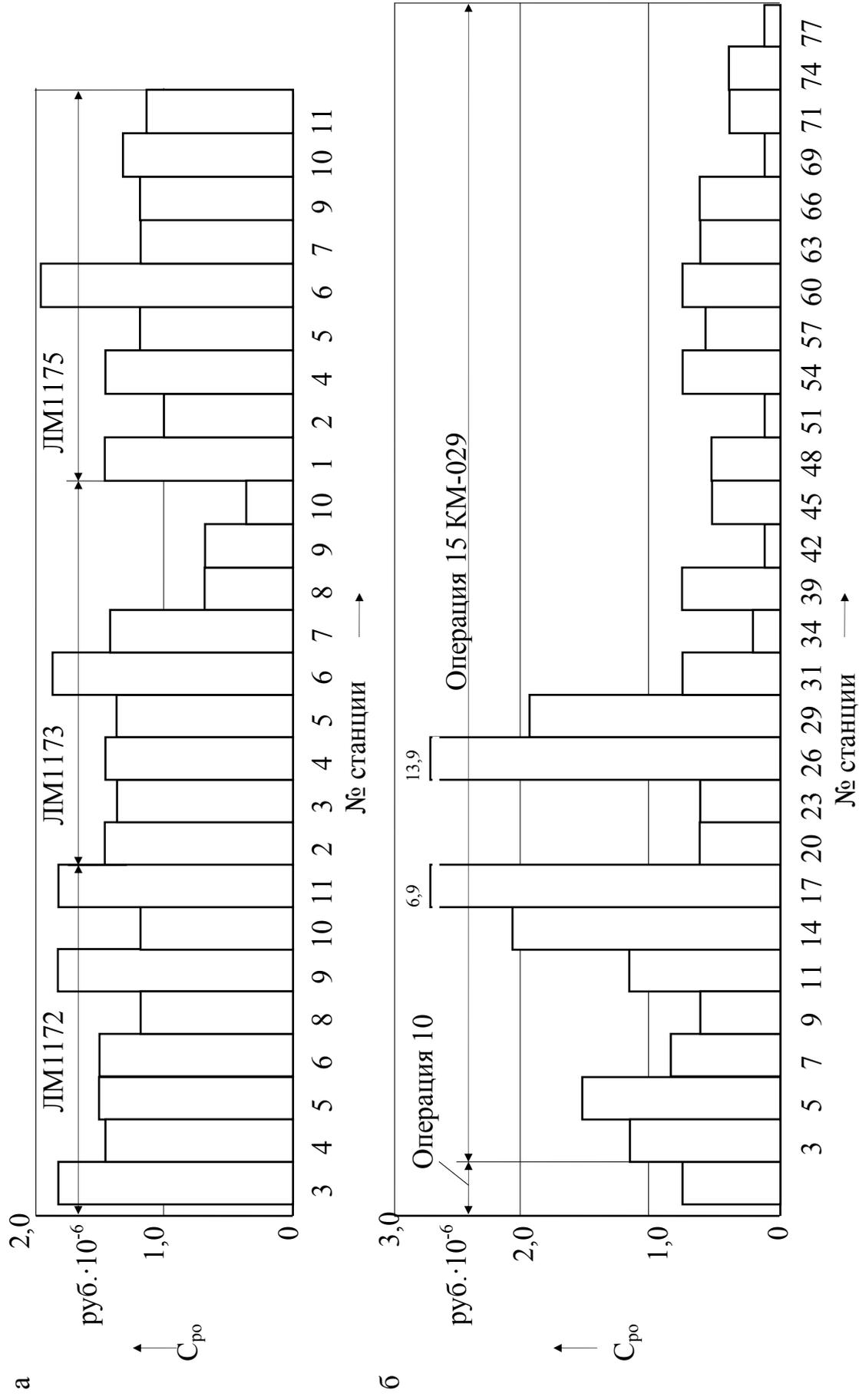


Рис. 5.3. Затраты на ремонт оборудования C_{po} по станциям технологического процесса изготовления картера на КМ-097 (а), КМ-029 (б)

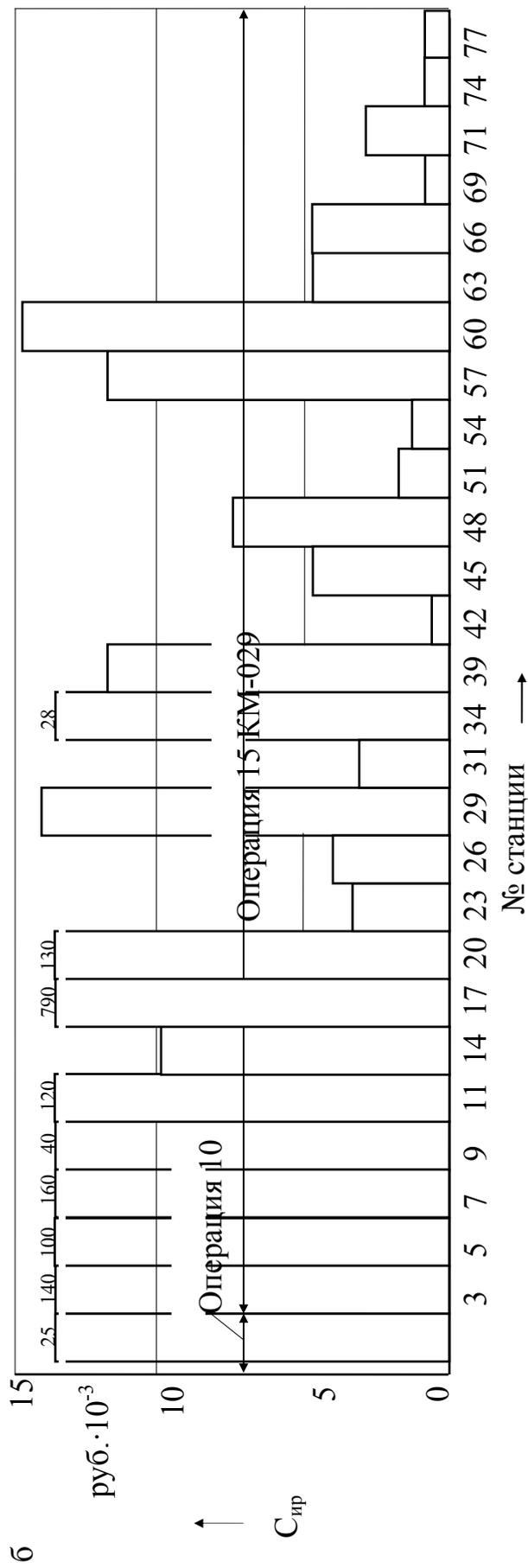
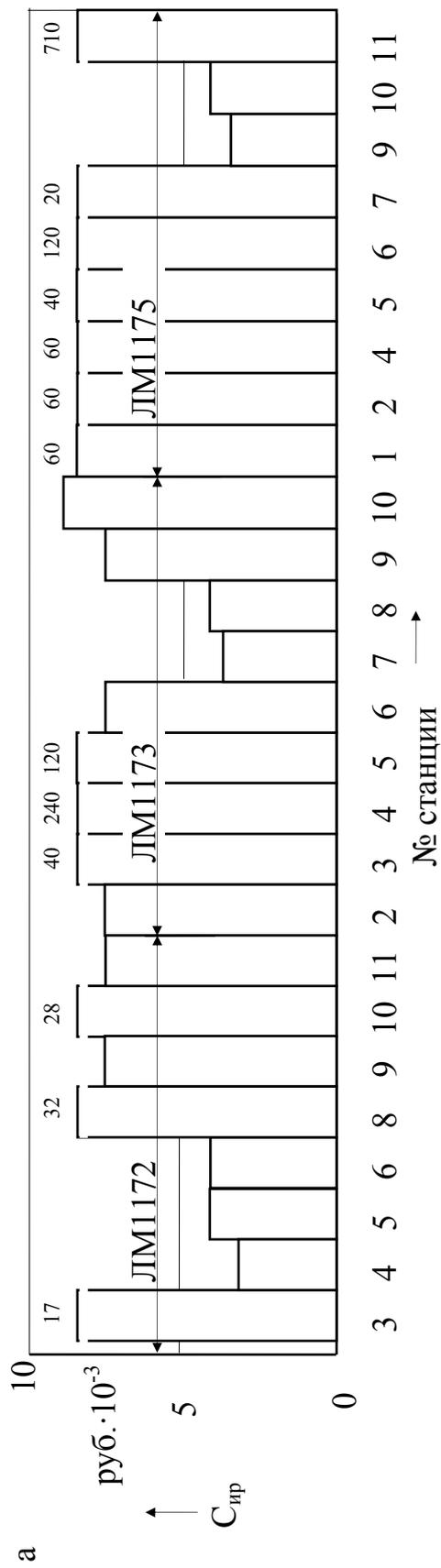


Рис. 5.4. Затраты на инструмент $C_{инс}$ по станциям технологического процесса изготовления картера на КМ-097 (а), КМ-029 (б)

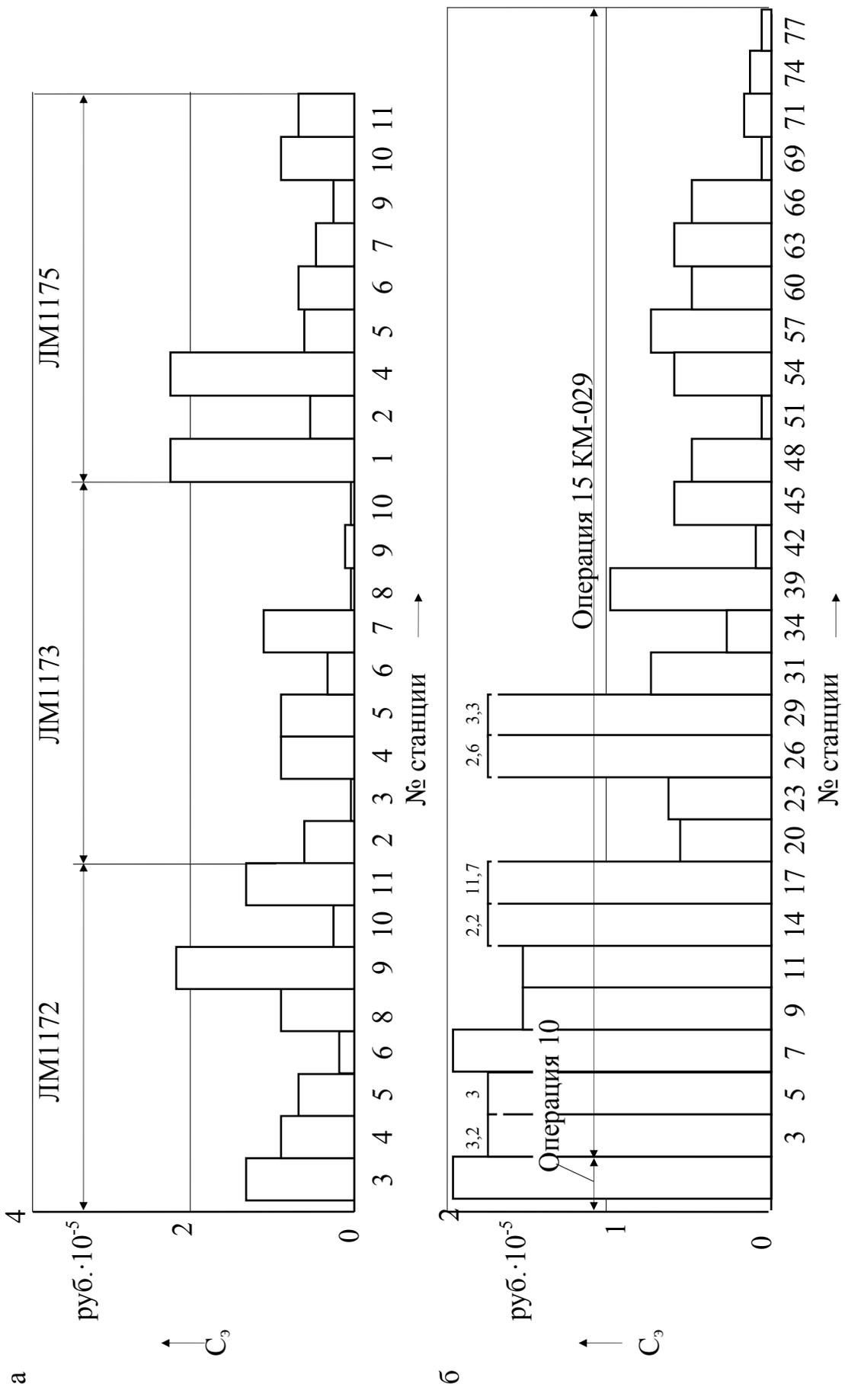


Рис. 5.5. Затраты на электроэнергию C₃ по станциям технологического процесса изготовления картера на КМ-097 (а), КМ-029 (б)

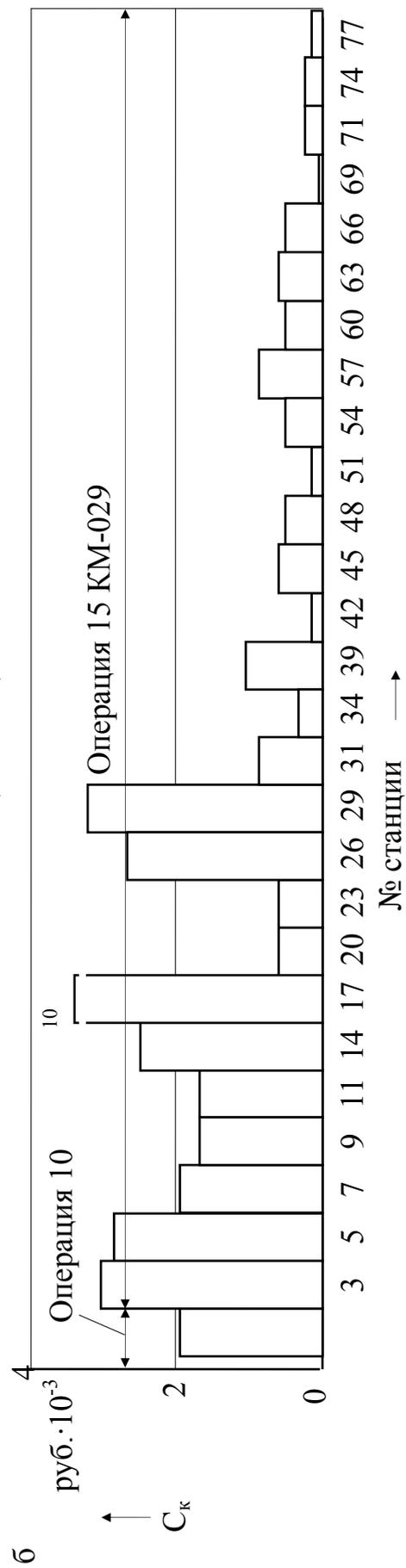
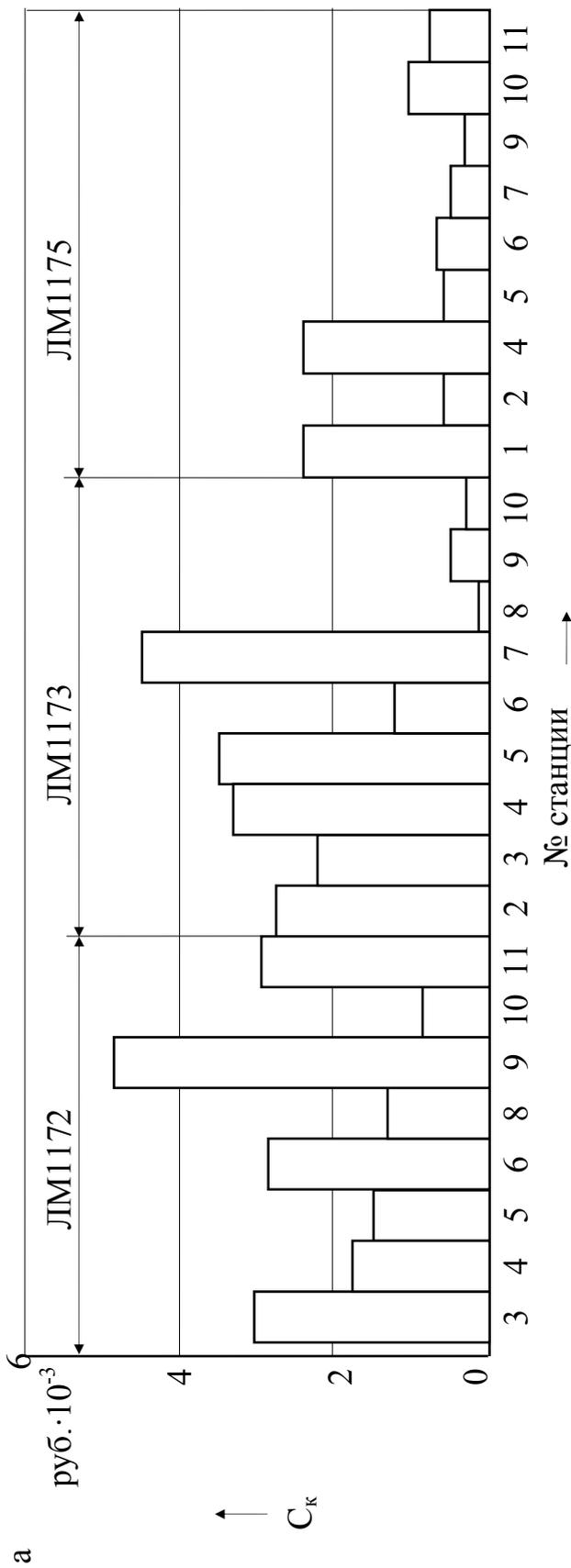


Рис. 5.6. Загрaгы на производственные помещения C_к по станциям технологического процесса изготовления картера на КМ-097 (а), КМ-029 (б)

Таблица 5.4

Заграты по статьям расходов для автоматической линии КМ-029

Станция	Установлен- ная мощность N_y кВт	Машинное время T_m ч	Стойкость инструмента τ_c ч	Заграты на заработную плату C_3 руб.	Заграты на амортизацию оборудования C_a руб.	Заграты на ремонт оборудования C_{po} руб. · 10 ⁻⁵	Заграты на электро- энергию C_9 руб. · 10 ⁻⁴	Заграты на режущий инструмент C_{ip} руб.	Заграты на площадь C_k руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	31,5	0,0057	1,5	0,0074	0,0028	0,08	20,47	0,025	0,0019
3	31,5	0,0105	1,5	0,0160	0,00418	0,13	31,92	0,14	0,003
5	25,5	0,0117	2,5	0,0130	0,00381	0,15	29,3	0,10	0,0027
7	30	0,0073	1,3	0,0081	0,00271	0,09	20,8	0,16	0,0019
9	31,5	0,0053	2,5	0,0061	0,0022	0,07	16,8	0,042	0,0016
11	22,5	0,0078	2,5	0,0087	0,0025	0,13	16,9	0,12	0,0016
14	18,5	0,0137	2,5	0,0152	0,0040	0,22	24,7	0,01	0,0023
17	21	0,0550	1,5	0,0590	0,0157	0,69	116,5	0,792	0,0109
20	13	0,0053	2,5	0,006	0,0009	0,07	6,7	0,126	0,0006
23	13	0,0053	2,5	0,006	0,0009	0,07	6,9	0,004	0,0006
26	33	0,0081	2,5	0,009	0,0035	1,37	26,6	0,0087	0,0025
29	23	0,015	2,5	0,017	0,0045	0,19	33,7	0,0142	0,0032
31	14	0,0059	2,5	0,007	0,001	0,08	8,01	0,0025	0,0008
34	22	0,0014	10	0,002	0,0075	0,02	2,9	0,0291	0,0003
39	17,8	0,0063	0,75	0,007	0,0015	0,08	10,9	0,0117	0,0010
42	17,8	0,0010	1,5	0,001	0,0003	0,01	1,8	0,0009	0,0002
45	13	0,0053	1,5	0,006	0,0009	0,07	6,7	0,0046	0,0006
48	11,5	0,0032	1,0	0,006	0,0008	0,07	5,8	0,0068	0,0005
51	11,5	0,0008	1,0	0,0009	0,0001	0,01	0,9	0,0017	0,0008
54	10,5	0,0059	4,66	0,007	0,0008	0,08	5,8	0,0014	0,0008
57	17,5	0,0051	0,75	0,006	0,0012	0,07	8,8	0,0116	0,0008
60	9,5	0,0063	0,75	0,007	0,0008	0,08	5,7	0,0155	0,0005
63	11,5	0,0056	0,75	0,006	0,0009	0,07	6,4	0,0055	0,0006

Окончание табл. 5.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
66	11,5	0,0052	1,0	0,006	0,0008	0,07	5,6	0,0054	0,0005
69	8,5	0,0008	2,5	0,001	0,0001	0,01	0,7	0,0002	0,0006
71	10,5	0,003	0,75	0,003	0,0004	0,04	3,1	0,0039	0,0003
74	9,5	0,003	0,75	0,003	0,0004	0,04	2,8	0,0013	0,0003
77	10,5	0,0008	2,5	0,001	0,0001	0,01	0,8	0,0003	0,0007

Таблица 5.5

Затраты по статьям расходов для комплекса автоматических линий КМ-097

Станция	Установлен- ная мощность N_y кВт	Машинное время T_m ч	Стойкость инструмента τ_c ч	Затраты на заработную плату C_3 руб.	Затраты на амортизацию оборудования C_a руб.	Затраты на ремонт оборудования C_{po} руб. · 10 ⁻⁵	Затраты на электро- энергию C_5 руб. · 10 ⁻⁴	Затраты на режущий инструмент $C_{пр}$ руб.	Затраты на площадь C_k руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЛМ-1172									
3	11	0,012	1	0,013	0,045	0,168	0,13	0,016	0,0029
4	8	0,010	2,5	0,011	0,027	0,4	0,8	0,304	0,0018
5	5	0,011	2,5	0,012	0,022	0,154	0,6	0,0037	0,0015
6	11	0,011	2,5	0,012	0,041	0,154	0,12	0,004	0,0027
8	6,6	0,009	1,5	0,01	0,02	0,126	0,6	0,0031	0,0013
9	18,5	0,012	9	0,013	0,076	0,168	0,22	0,007	0,0049
10	4	0,009	1,5	0,01	0,012	0,126	0,3	0,029	0,0008
11	11	0,012	9,0	0,013	0,045	0,168	0,13	0,007	0,0029
ЛМ-1173									
2	6	0,011	1,5	0,012	0,027	0,154	0,6	0,007	0,0023
3	4,5	0,010	2,5	0,011	0,019	0,14	0,42	0,046	0,0016
4	8,5	0,011	2,5	0,012	0,039	0,154	9,07	0,24	0,0032
5	5	0,010	2,0	0,011	0,039	0,14	9,2	0,12	0,0033
6	4,75	0,008	2,0	0,009	0,016	0,112	3,7	0,007	0,0013

Окончание табл. 5.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	11	0,012	6,0	0,013	0,054	0,168	12,8	0,003	0,0045
8	0,75	0,005	1,0	0,006	0,002	0,007	0,36	0,004	0,0001
9	3,0	0,005	1,0	0,006	0,006	0,07	1,5	0,007	0,0005
10	3,0	0,003	1,0	0,003	0,004	0,042	0,87	0,009	0,0003
JIM-1175									
1	22	0,011	2,5	0,012	0,072	0,154	23,5	0,006	0,0024
2	6	0,008	2,5	0,009	0,014	0,112	4,7	0,06	0,0005
4	22	0,011	2,5	0,012	0,072	0,154	23,5	0,06	0,0024
5	6	0,010	2,5	0,011	0,018	0,14	5,82	0,04	0,0006
6	5,2	0,014	2,5	0,016	0,022	0,196	7,1	0,12	0,0007
7	8	0,009	2,5	0,010	0,016	0,126	5,2	0,02	0,0005
9	3	0,009	2,5	0,010	0,008	0,126	2,6	0,003	0,0003
10	11	0,010	2,5	0,011	0,033	0,140	10,7	0,004	0,0011
11	8,5	0,009	2,5	0,010	0,023	0,126	7,4	0,712	0,0008

Аналогично и соотношение удельных затрат (рис. 5.7-5.9) C'_3 , C'_a , C'_{po} , C'_N , $C'_{ир}$, что очевидно при относительном равенстве T_m ($T_{ш}$) как по станциям обоих технологических процессов, так и для линий в целом.

При этом отметить, что если затраты на заработную плату, ремонт оборудования, инструмент, электроэнергию, производственные помещения для линий КМ-029 и КМ-097 различаются незначительно, то затраты на амортизацию оборудования линии КМ-097 почти в 10 раз больше аналогичных затрат на линии КМ-029. Это объясняется различной стоимостью автоматических линий: балансовая стоимость КМ-029 составляет 282,3 тыс. руб. (ценах 1980 г.), проектная стоимость КМ-097 2606 тыс. руб. (в ценах 1988 г.). Этот фактор делает невозможным сравнение абсолютных технико-экономических показателей (C_T , ΔC_T , \mathcal{E}_T) линий КМ-029 и КМ-097 между собой.

Расчетные технико-экономические показатели эффективности использования ЦСО СОЖ по вариантам представлены в табл. 5.6.

Анализ результатов расчета изменения технологической себестоимости ΔC_T (рис. 5.12) и относительного изменения технологической себестоимости $\Delta C_T/C_T$ (рис. 5.13) показал, что положительный эффект наблюдается как при использовании перспективной ЦСО СОЖ, так и при применении нового состава СОЖ. Так для автоматической линии изготовления картера 452-2401012 применение перспективной системы очистки СОЖ привело к относительному изменению технологической себестоимости на 15% по сравнению с базовой системой.

Применение на действующей линии новой жидкости СОЖ № 2, позволяющей повысить производительность обработки на 3% ($K_M = 0,97$) и стойкость инструмента в 1,5 раза ($K_T = 1,5$) по сравнению с базовым составом, способствует снижению технологической себестоимости почти на 27% (вариант 4, рис. 5.12, 5.13).

Приведенные результаты справедливы для случая, когда технологические эффекты от внедрения новой ЦСО СОЖ одинаковы на всех станциях автоматической линии. Например, для варианта 2: $K_{M1} = K_{M2} = K_{M3} = \dots = K_M = 0,97$. Возможен другой вариант, когда критерии K_{ji} , определяющие технологические эффекты, различны на разных станциях. Такой вариант наиболее вероятен для автоматических линий, включающих технологическое оборудование различных типов. Для получения высокой эффективности новых разработок, последние должны обеспечить максимальные технологические эффекты (критерии K_{ji}), позволяющие снизить затраты на таких станциях и по таким статьям расходов, по которым они являются наибольшими.

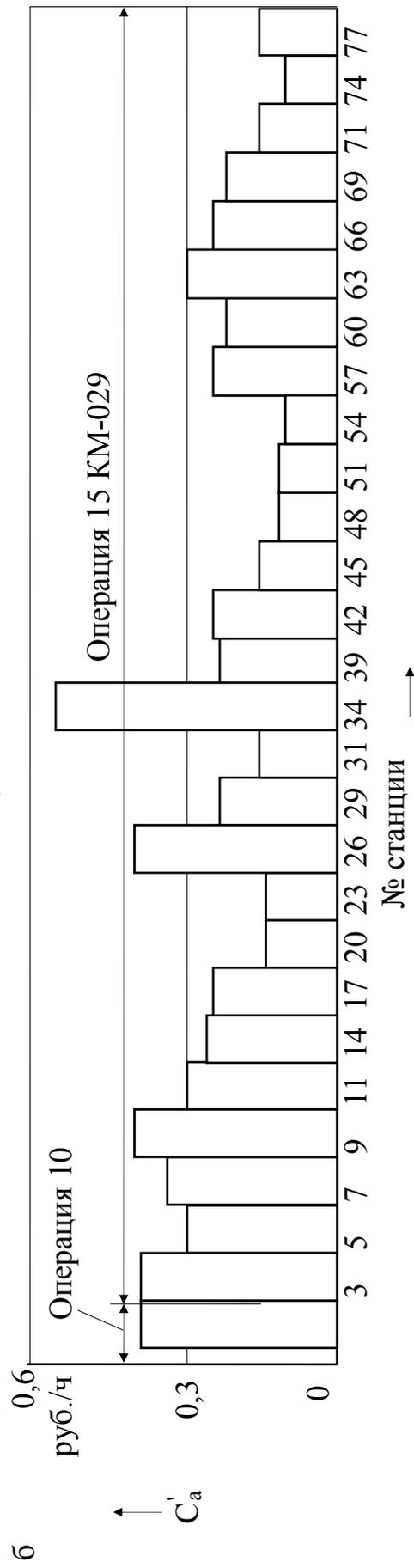
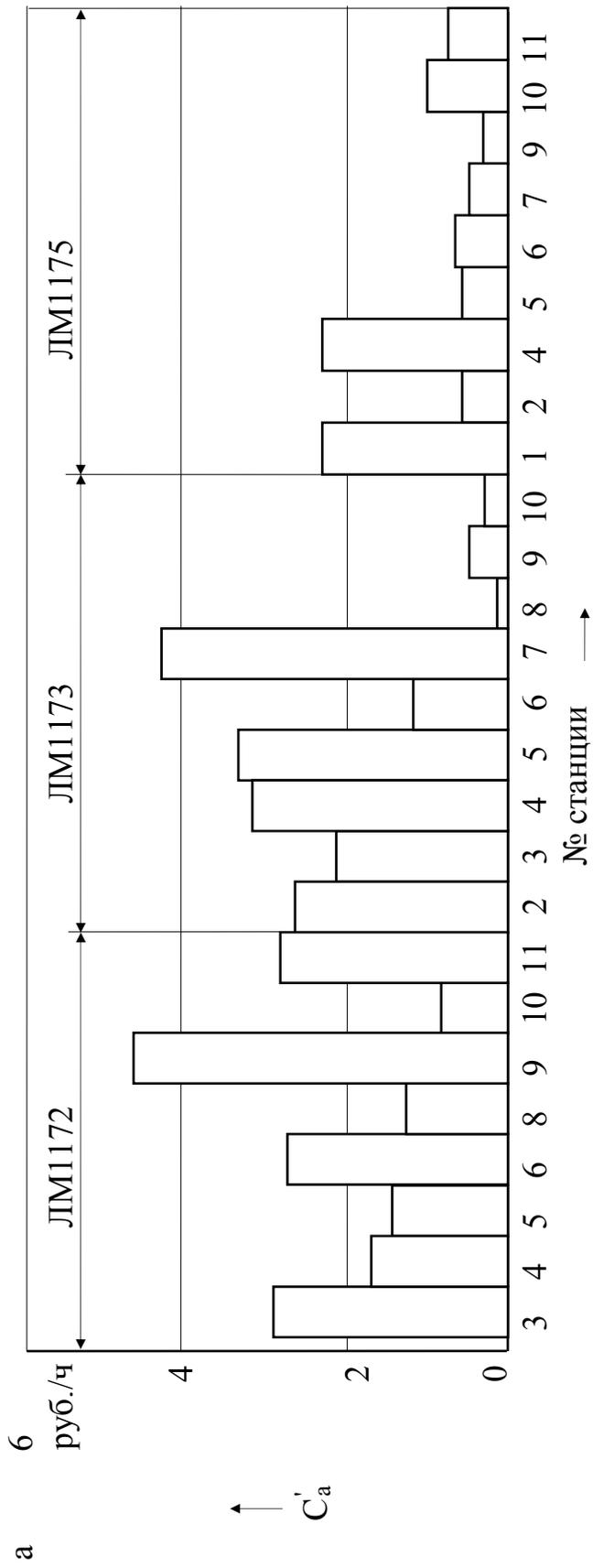


Рис. 5.7. Значения удельных затрат C'_a по станциям технологического процесса изготовления картера на КМ-097 (а), КМ-029 (б)

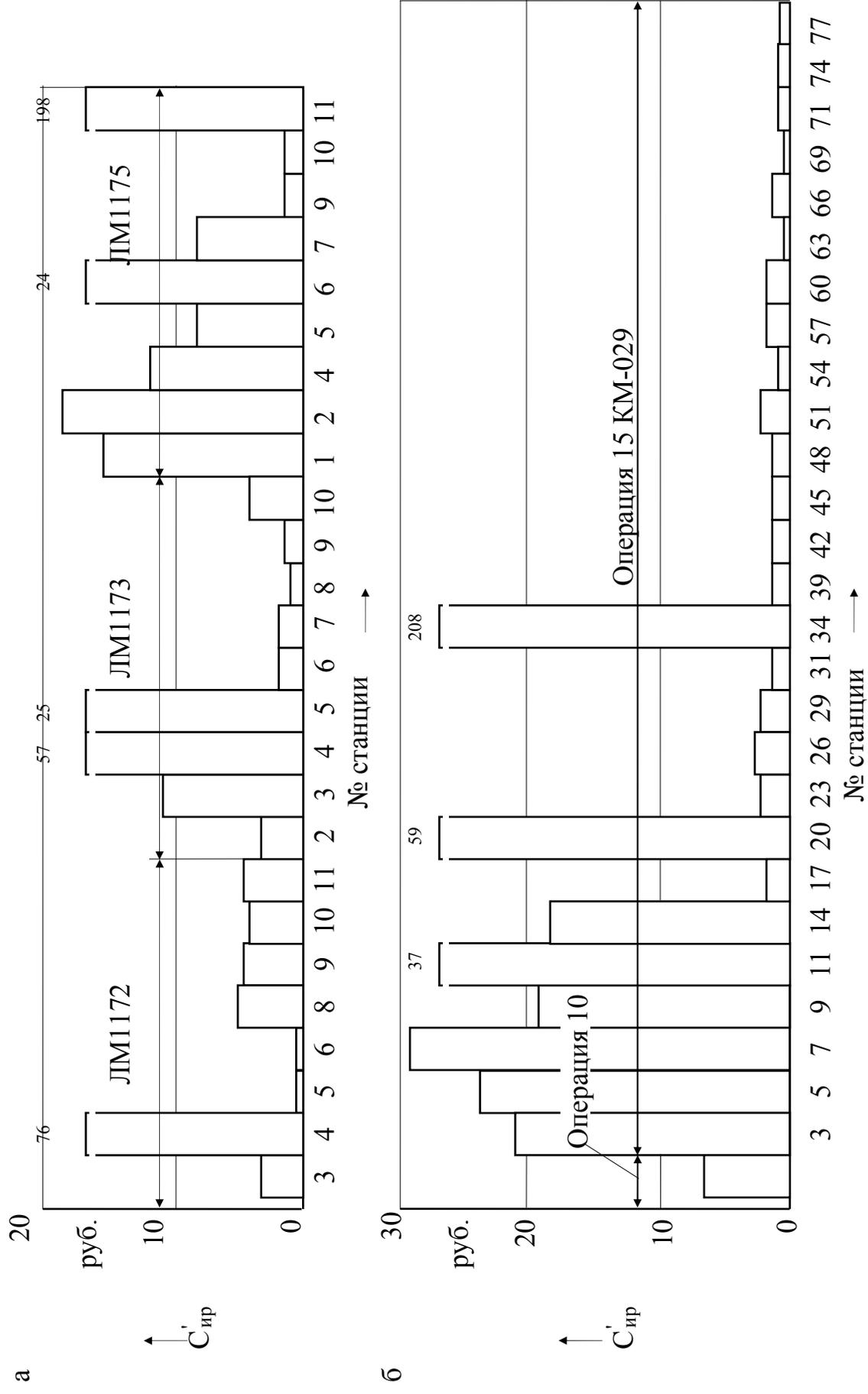


Рис. 5.8. Значения удельных затрат $C'_{ир}$ по станциям технологического процесса изготовления картера на КМ-097 (а), КМ-029 (б)

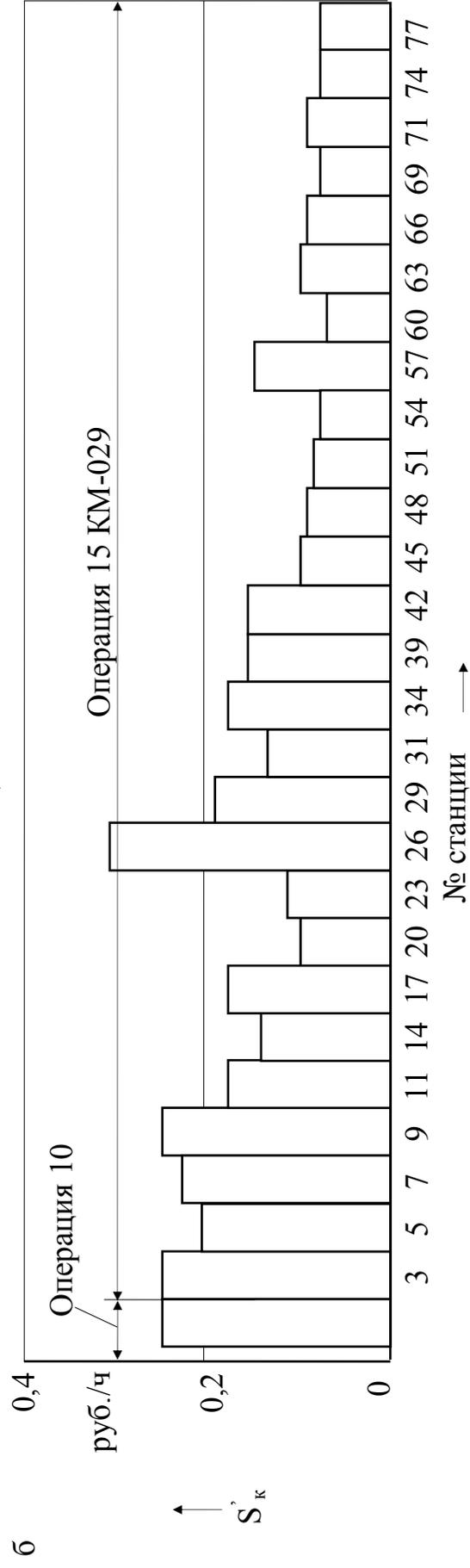
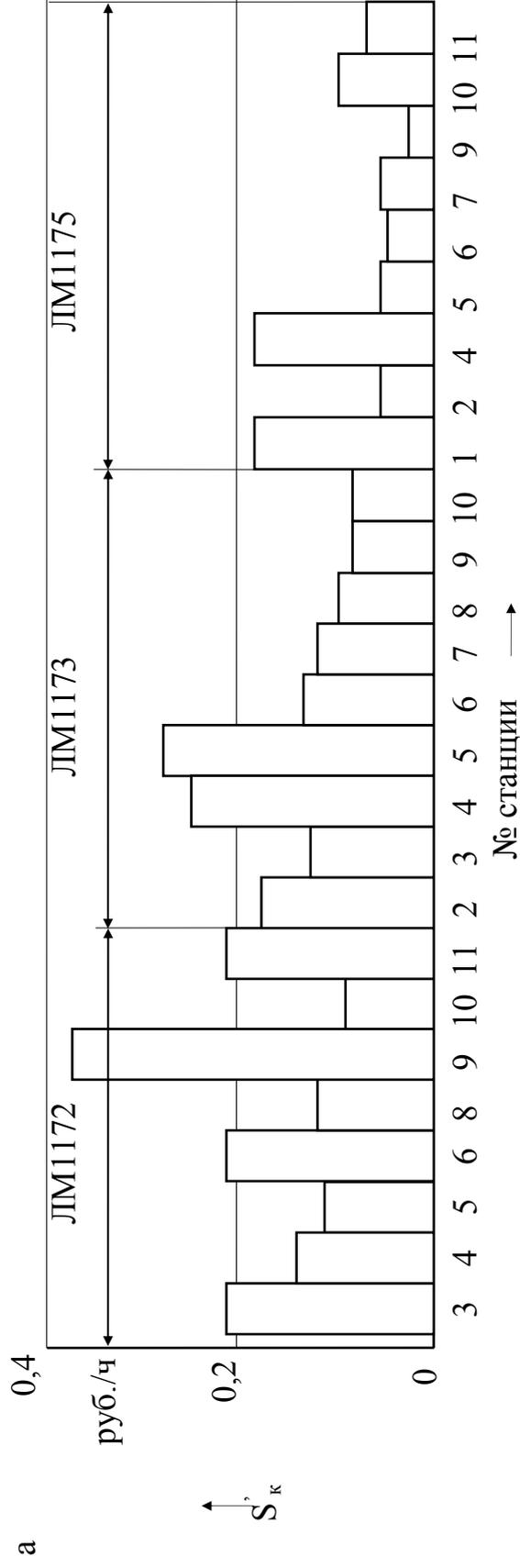


Рис. 5.9. Значения удельных затрат S'_k по станциям технологического процесса изготовления картера на КМ-097 (а), КМ-029 (б)

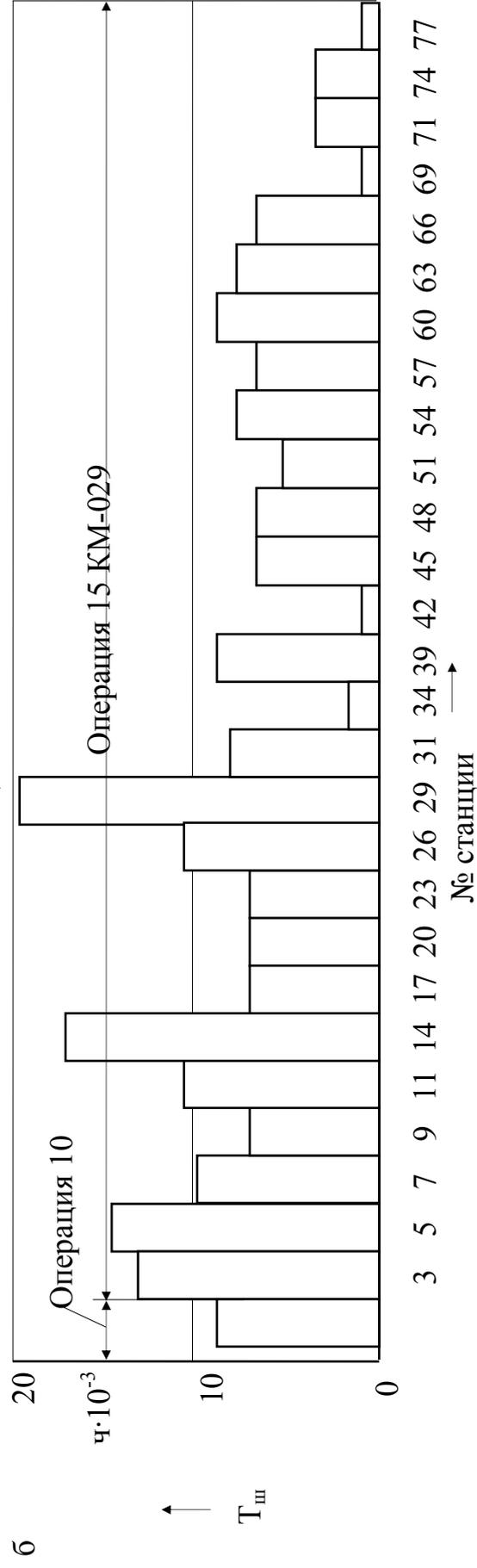
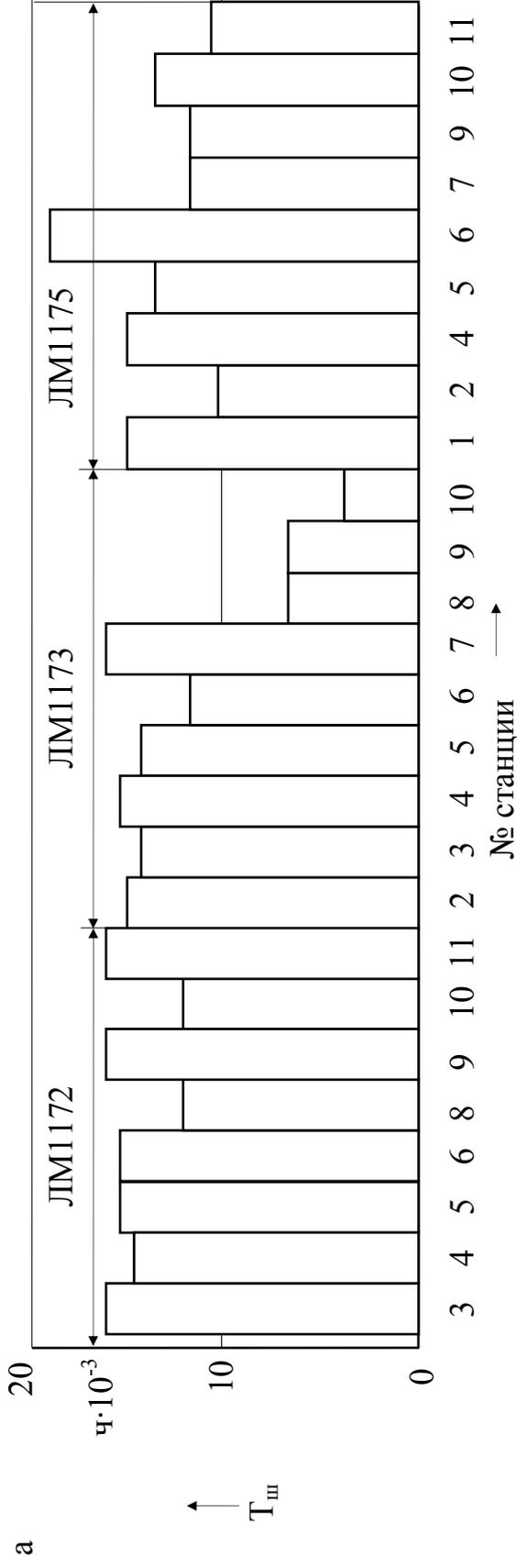


Рис. 5.10. Значения $T_{ш}$ по станциям технологического процесса изготовления картера на КМ-097 (а), КМ-029 (б)

Данные о таких лимитирующих станциях и структуре затрат на обработку заготовок на этих станциях можно получить на основании анализа затрат Z_{Mi} , Z_{Vi} , Z_{Ni} , Z_{Ti} , $Z_{Жi}$ базового варианта. Например, как следует из табл. 5.1, в первую очередь желательно разработать мероприятия, направленные на снижение затрат $Z_{риi}$ (затраты на режущий инструмент). При этом максимальными должны быть технологические эффекты, обеспечивающие повышение стойкости инструмента на 3, 5, 7, 11, 14 и 20-ой станциях автоматической линии КМ-029.

Таблица 5.6

Результаты расчета экономической эффективности использования ЦСО СОЖ и новых СОЖ на автоматических линиях КМ-029 и КМ-097

№ п/п	Автоматическая линия	Технологическая себе стоимость C_T	Изменение технологической себе стоимости ΔC_T	Относительное изменение себе стоимости $\Delta C_T / C_T$	Дополнительные капитальные вложения ΔK	Затраты на эксплуатацию ЦСО СОЖ Z_3	Экономический эффект от внедрения Δ_T
		тыс. руб.	тыс. руб.	%	тыс. руб.	тыс. руб.	тыс. руб.
1	КМ-029	253,28	0	0	0	-	-
2	КМ-029	244,07	37,51	15,3	120	9,52	29,04
3	КМ-029	246,11	2,86	1,1	-	-	2,85
4	КМ-029	253,28	67,97	26,8	-	-	67,97
5	КМ-029	242,73	71,26	29,3	120	9,52	62,78
6	КМ-097	1394,22	0	0	-	-	-
7	КМ-097	1394,22	181,96	13	-	-	181,96

Примечание: № варианта из табл. 5.3.

Из табл. 5.6 видно, что внедрение новой ЦСО СОЖ может обеспечить получение достаточно больших экономических эффектов Δ_T как на действующей, так и на вновь спроектированной линии.

5.3. Оценка целесообразности внедрения различных ЦСО СОЖ

Многовариантные расчеты экономической эффективности, позволяющие оценить целесообразность внедрения новой ЦСО СОЖ, произведены для цеха № 37 Ульяновского машиностроительного завода (УМЗ), который оснащен станками с ЧПУ (мелкосерийное производство).

Анализ данных, приведенных в табл. 5.7, свидетельствует о том, что основными затратами при производстве деталей в цехе № 37 являются затраты на эксплуатацию технологического оборудования и площади, занимаемые этим оборудованием.

Результаты расчета величин ΔC_T и $\Delta C_T / C_T$ для цеха в целом и для каждого его участка в отдельности приведены в табл. 5.8 и графически изображены на рис. 5.14-5.19. Эти результаты позволяют оценить эффективность внедрения любой ЦСО СОЖ, обеспечивая те или иные технологические эффекты (критерии K_{ji}).

Т а б л и ц а 5.7

Затраты, приходящиеся на 1 час работы металлорежущего оборудования в цехе № 37 УМЗ в руб./ч

Наименование затрат	Участок цеха			Цех в целом
	Токарный	Фрезерный	Расточной	
Затраты на заработную плату C_z	0,467	0,865	0,983	
Затраты на амортизацию оборудования C_a	1,630	5,505	17,205	
Затраты на ремонт оборудования C_{po}	1,16	3,792	8,496	
Затраты на эксплуатацию оборудования $C_{об}$	2,790	9,297	25,701	
Затраты на электроэнергию $C_э$	0,311	0,353	0,287	
Затраты на инструмент $C_{ри}$	0,048	0,042	0,555	
Затраты на производственную площадь C_k	1,549	5,166	7,381	
Затраты на СОЖ $C_{ж}$	0,007	0,007	0,007	
Z_m	3453164	4374441	9249723	12707261
Z_b	207189	349955	739977	947515
Z_N	471594	207151	133159	804560
$Z_{ри}$	10198	3690	38633	48834
$Z_{ж}$	1541	630	489	2039

Следует отметить, что результаты расчета свидетельствуют о том, что получение значительного экономического эффекта в производстве цеха № 37 УМЗ можно ожидать лишь при внедрении ЦСО СОЖ (или других мероприятий), повышающих производительность обработки заготовок, так как только в этом случае обеспечивается достаточно большое (до 10000 тыс. руб. в ценах 1991 г.) снижение технологической себестоимости (см. рис. 5.14-5.19).

Внедрение мероприятий, снижающих энергоемкость процессов обработки заготовок, повышающих стойкость инструмента, снижающих затраты на СОЖ, хотя и приводит к снижению себестоимости, но это снижение настолько мало (1-3 %), что даже при незначительных капитальных затратах эффективность рассматриваемого мероприятия становится отрицательной.

Таблица 5.8

Результаты расчета технико-экономической эффективности внедрения в цехе № 37 УМЗ ЦСО СОЖ или (и) новой СОЖ

Критерии технологической эффективности				Экономическая эффективность											
				Цех в целом		Токарный участок (I)		Фрезерный участок (II)		Расточной участок (III)					
				ΔC_T	$\Delta C_T / C_T$	ΔC_T	$\Delta C_T / C_T$	ΔC_T	$\Delta C_T / C_T$	ΔC_T	$\Delta C_T / C_T$	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%
K_M	K_B	K_N	K_T	$K_{ж}$	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%	ΔC_T	$\Delta C_T / C_T$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0			
0,5	1	1	1	1	9620,6	50	2071,6	50	2457,2	50	5080,9	50			
1	0,5	1	1	1	648,5	3,4	103,6	2,5	174,5	3,5	370	3,6			
0,5	0,5	1	1	1	9944,9	51,7	2123,4	51,3	2544,4	51,8	5266	51,8			
1	1	0,5	1	1	405,7	2,1	235,5	5,7	103,5	2,1	66,6	0,7			
0,5	1	0,5	1	1	9623,4	51,1	2189,4	52,8	2518,9	51	5114,3	50,3			
1	1	1	1,5	1	17,5	0,09	3,4	0,08	1,23	0,02	12,9	0,1			
0,5	1	1	1,5	1	9629,3	50	2073,3	50	2467,7	50	5087,4	50			
1	1	1	2	1	26,2	0,1	5,1	0,1	1,8	0,04	19,3	0,2			
0,5	1	1	2	1	9633,7	50	2074,2	50	2468,1	50	5090,6	50			
1	1	1	2,5	1	31,5	0,1	5,2	0,1	2,2	0,04	23,2	0,2			
0,5	1	1	2,5	1	9636,3	50,1	2074,7	50	2468,3	50	5092	50,1			
1	1	1	3	1	35,0	0,2	5,8	0,2	2,5	0,05	25,7	0,3			
0,5	1	1	3	1	9638,1	50,1	2075	50,1	2468,4	50	5093	50,1			
0,5	0,5	0,5	1	0,2	10148,8	52,7	2241,8	54,1	2606,4	52,8	5299,5	52,2			
1	0,5	0,5	1	0,2	1056,4	5,5	340,8	8,2	27,5	5,6	437	4,3			

Окончание табл. 5.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,5	0,5	0,5	1,5	0,2	10157,6	52,8	2243,5	54,1	2607	52,8	5306	52,5
1	0,5	0,5	1,5	0,2	1073,9	5,6	343,8	8,3	279,7	5,7	450	4,4
0,5	0,5	0,5	2	0,2	10161,9	52,8	2244,4	54,2	2607,3	52,8	5309,1	52,2
1	0,5	0,5	2	0,2	1082,7	5,6	345,5	8,3	280,3	5,7	456,3	4,5
0,5	0,5	0,5	2,5	0,2	10164,5	52,8	2244,9	54,2	2507,5	52,8	5311,1	52,3
1	0,5	0,5	2,5	0,2	1087,9	5,7	346,5	8,4	280,7	5,7	460,1	4,5
0,5	0,5	0,5	3	0,2	10166,3	52,8	2245,3	54,2	2607,6	52,8	5312,4	52,3
1	0,5	0,5	3	0,2	1090,4	5,7	347,2	8,4	280,9	5,7	462,7	4,6
0,5	1	1	1	5	9615,2	50	2068	49,9	2469,9	50	5079,9	50
1	1	1	1	5	-10,7	-0,05	-6,1	-0,15	-2,5	-0,05	-1,9	-0,01
0,5	1	1	1	0,2	9621,6	50	2072,3	50	2467,4	50	5081,2	50
1	1	1	1	0,2	2,1	0,01	1,2	0,03	0,5	0,05	0,4	0,004

Данные, показанные в виде графиков на рис. 5.14-5.19, могут быть использованы при выборе варианта ЦСО, обеспечивающего получение тех или иных технологических эффектов. Так внедрение ЦСО СОЖ, сопровождаемое дополнительными капитальными затратами ΔK и затратами на эксплуатацию Z_3 , может быть эффективно лишь в том случае, когда будет выполняться условие:

$$\Delta c_T > E_H \cdot \Delta K + Z_3. \quad (5.1)$$

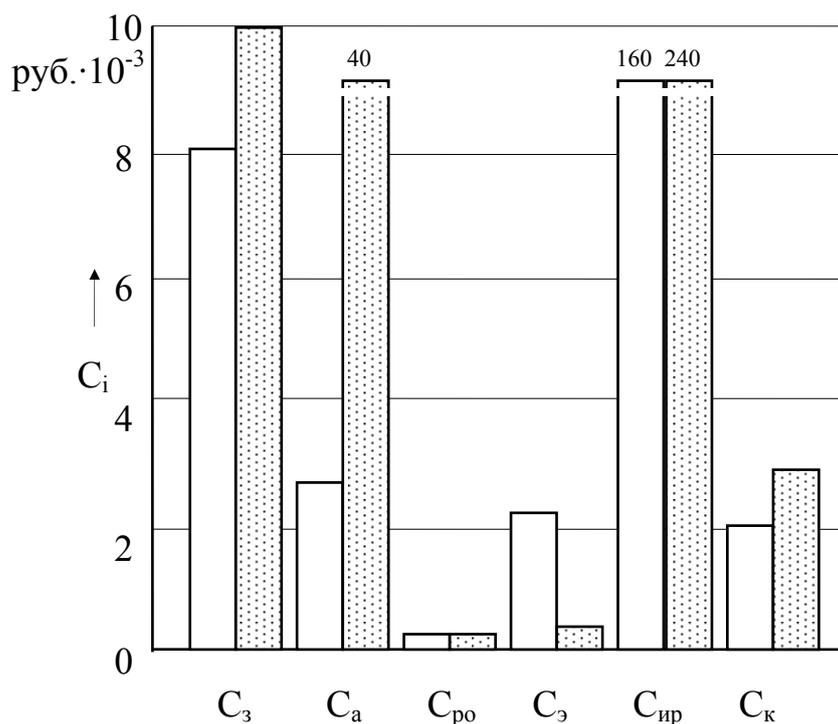


Рис. 5.11. Сравнение затрат на станциях растачивания при изготовлении картера 452-2401012 \square (линия КМ-029, станция 7) и картера 3741-2401012 \square (линия ЛМ1173, станция 4): обозначения см. в табл. 5.4

При известных ΔK и Z_3 можно выбрать вариант ЦСО СОЖ, обеспечивающий технологические эффекты, при которых будет выполняться условие (5.1). Так (см. рис. 5.15), при $\Delta K \leq 1024$ тыс. руб. и при $Z_3 \leq 243,4$ тыс. руб. [65], например, эффективно использование ЦСО СОЖ, обеспечивающей снижение T_M более чем на 2,5 % ($K_M < 0,975$). Другим вариантом эффективного использования ЦСО СОЖ является снижение T_M не менее чем на 1,5 % ($K_M < 0,985$) и снижение расхода электроэнергии более чем на 50 % ($K_N < 0,5$). Возможны и другие варианты.

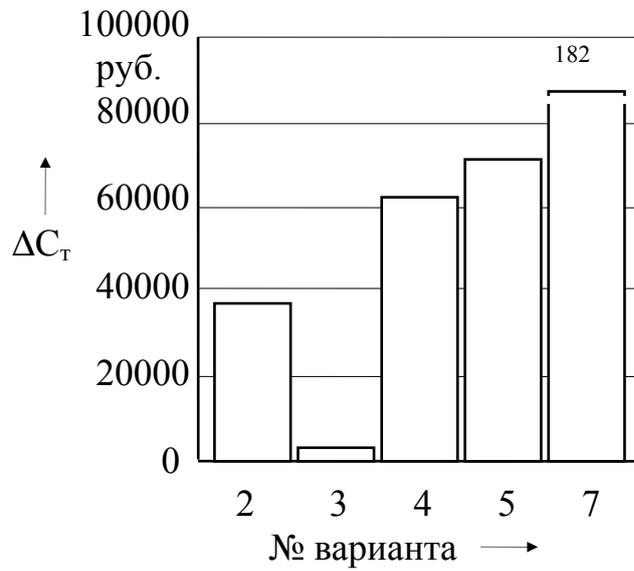


Рис. 5.12. Изменение технологической себестоимости ΔC_T изготовления картера при внедрении мероприятия по вариантам 2-5, 7 по табл. 5.3

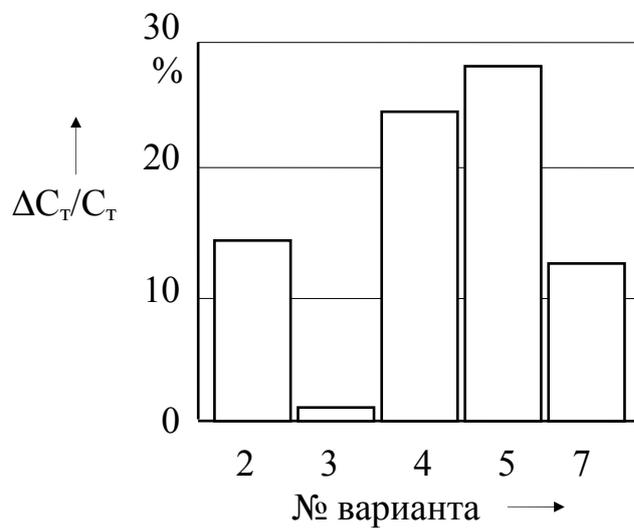


Рис. 5.13. Относительное изменение технологической себестоимости ΔC_T изготовления картера при внедрении мероприятия по вариантам 2-5, 7 по табл. 5.3

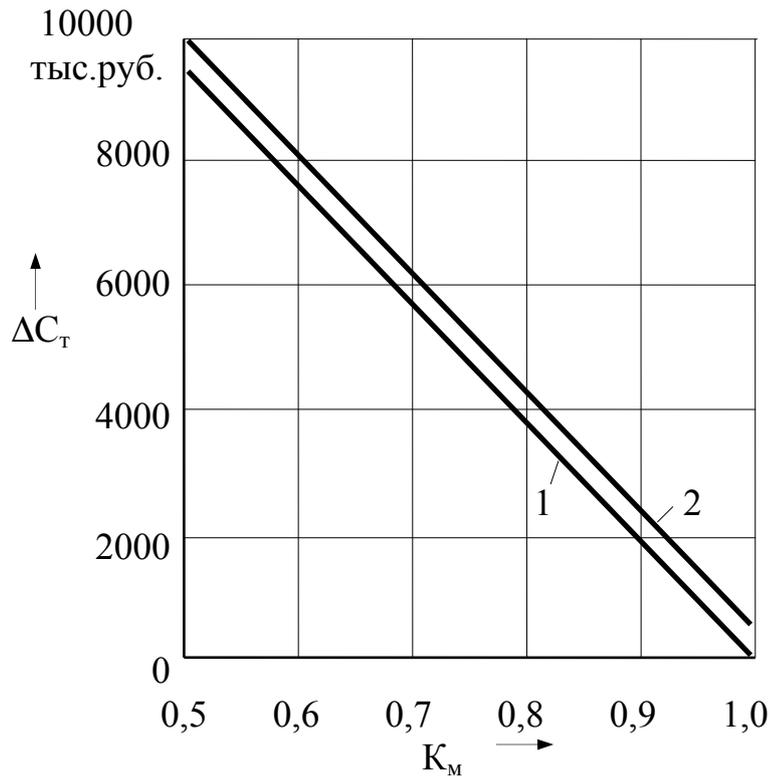


Рис. 5.14. Изменение технологической себестоимости годового объема продукции, выпускаемой цехом № 37 УМЗ, в зависимости от критериев изменения машинного K_M и вспомогательного времени K_B :
 $K_\tau = K_N = K_{ж} = 1$; 1 – $K_B = 1$; 2 – $K_B = 0,5$

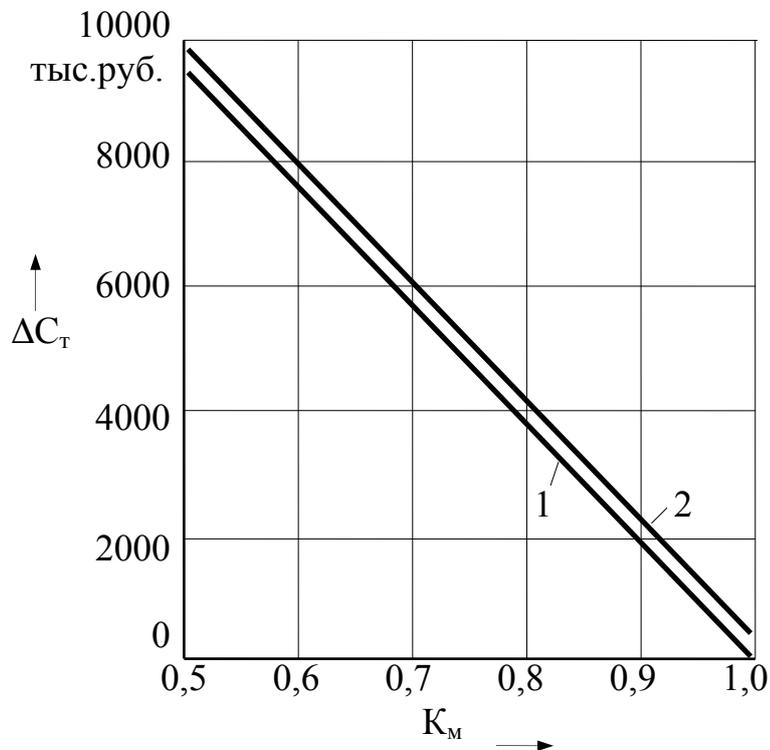


Рис. 5.15. Изменение технологической себестоимости годового объема продукции, выпускаемой цехом № 37 УМЗ, в зависимости от критериев изменения машинного K_M и потребляемой мощности K_N :
 $K_B = K_\tau = K_{ж} = 1$; 1 – $K_N = 1$; 2 – $K_N = 0,5$

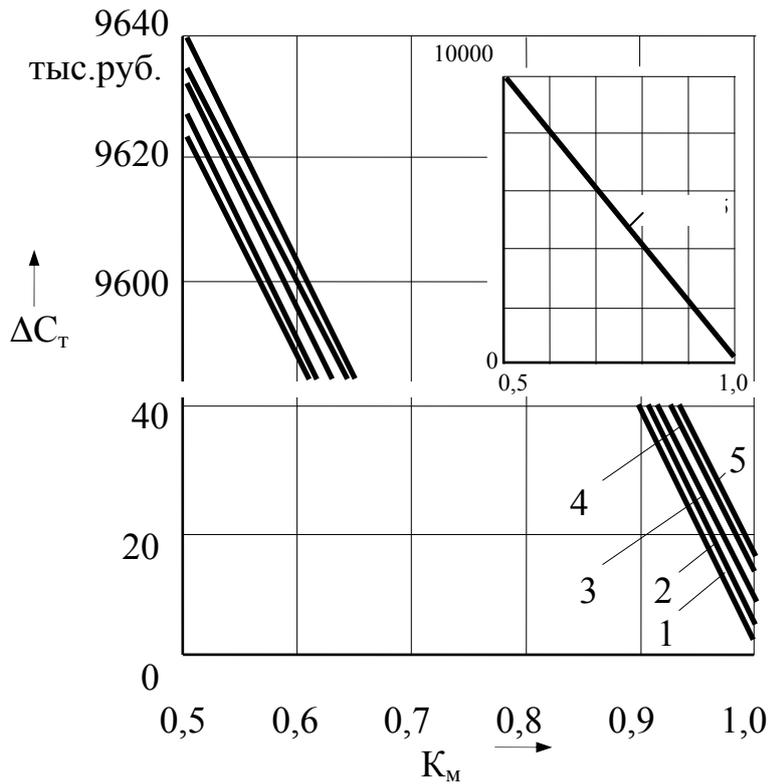


Рис. 5.16. Изменение технологической себестоимости годового объема продукции, выпускаемой цехом № 37 УМЗ, в зависимости от критерия изменения машинного времени K_M :

$K_B = K_N = K_{ж} = 1$; 1 – 5 соответственно $K_T = 1; 1,5; 2; 2,5; 3,0$

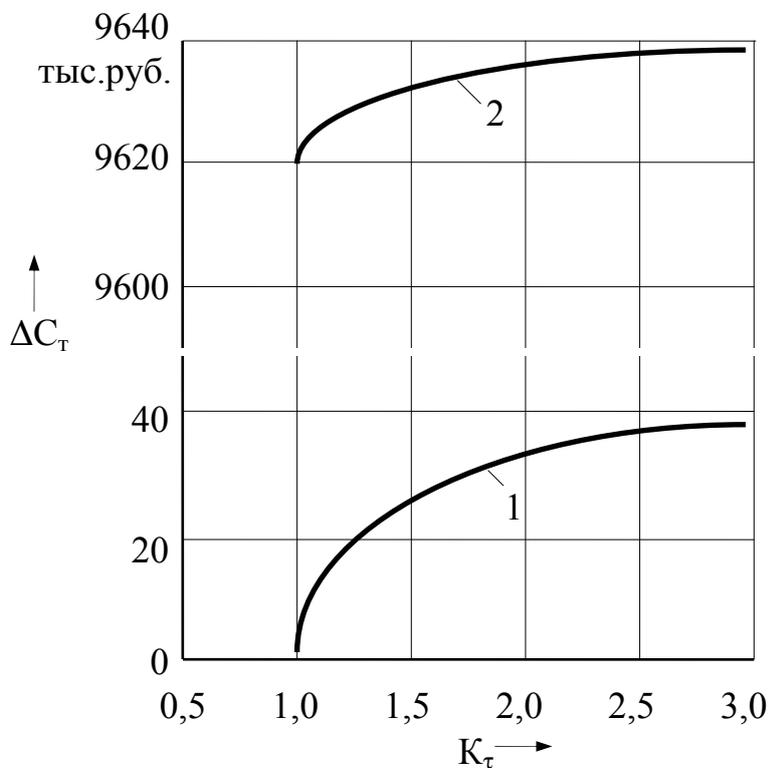


Рис. 5.17. Изменение технологической себестоимости годового объема продукции, выпускаемой цехом № 37 УМЗ, в зависимости от критерия изменения стойкости инструмента K_T :

$K_B = K_N = K_{ж} = 1$; 1 – $K_M = 1$; 2 – $K_M = 0,5$

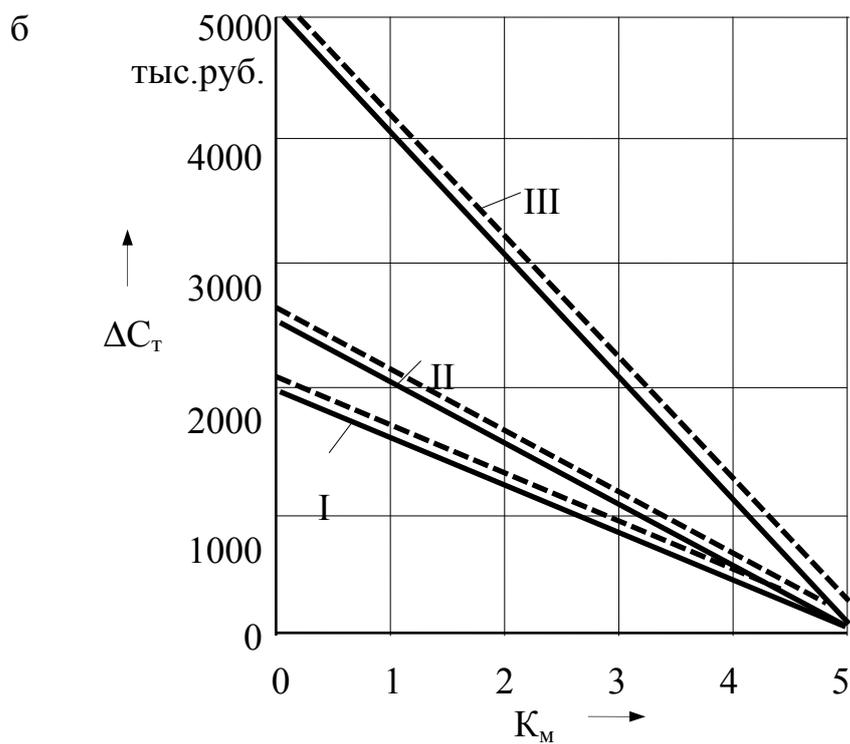
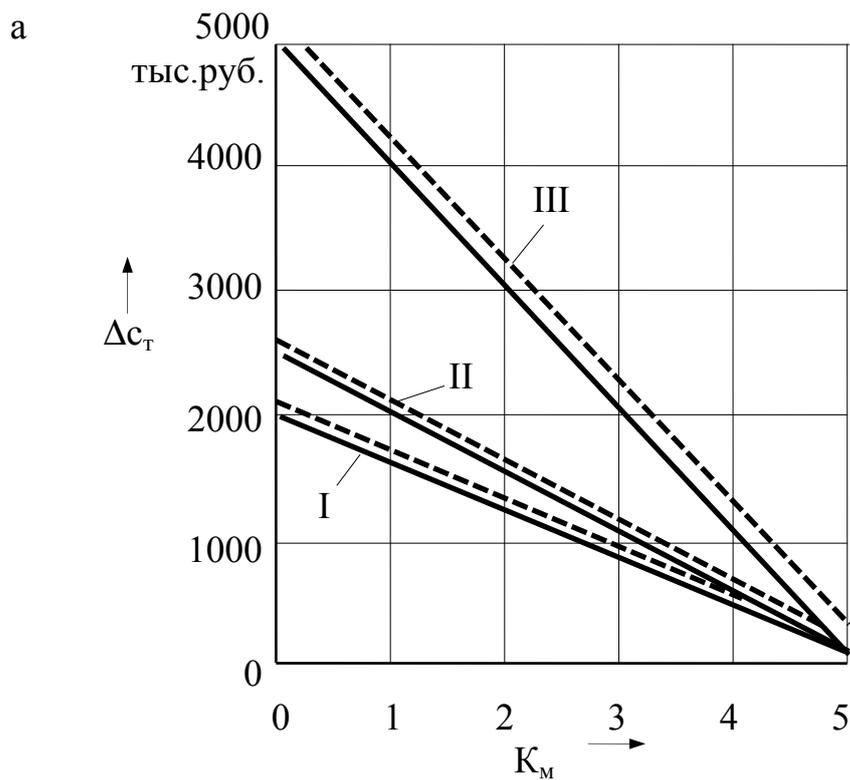


Рис. 5.18. Изменение технологической себестоимости годового объема продукции, выпускаемой участками I, II, III цеха № 37 УМЗ, в зависимости от критериев изменения машинного времени K_M , вспомогательного времени K_B (а), потребляемой мощности K_N (б):

а – $K_N = K_\tau = K_{ж} = 1$; – $K_B = 1$; --- $K_B = 0,5$;
 б – $K_B = K_\tau = K_{ж} = 1$; – $K_N = 1$; --- $K_N = 0,5$

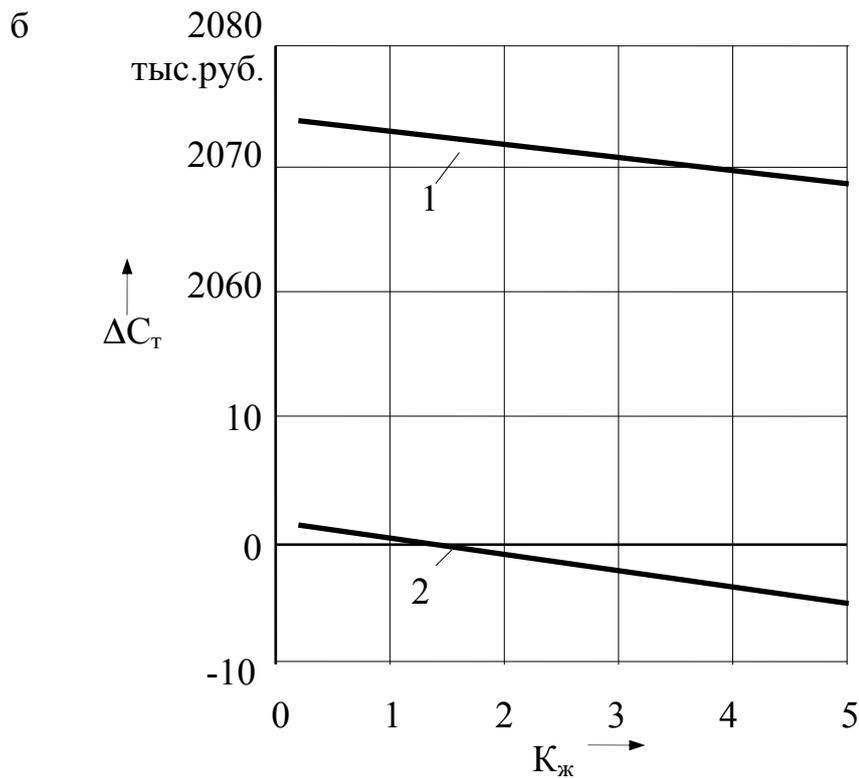
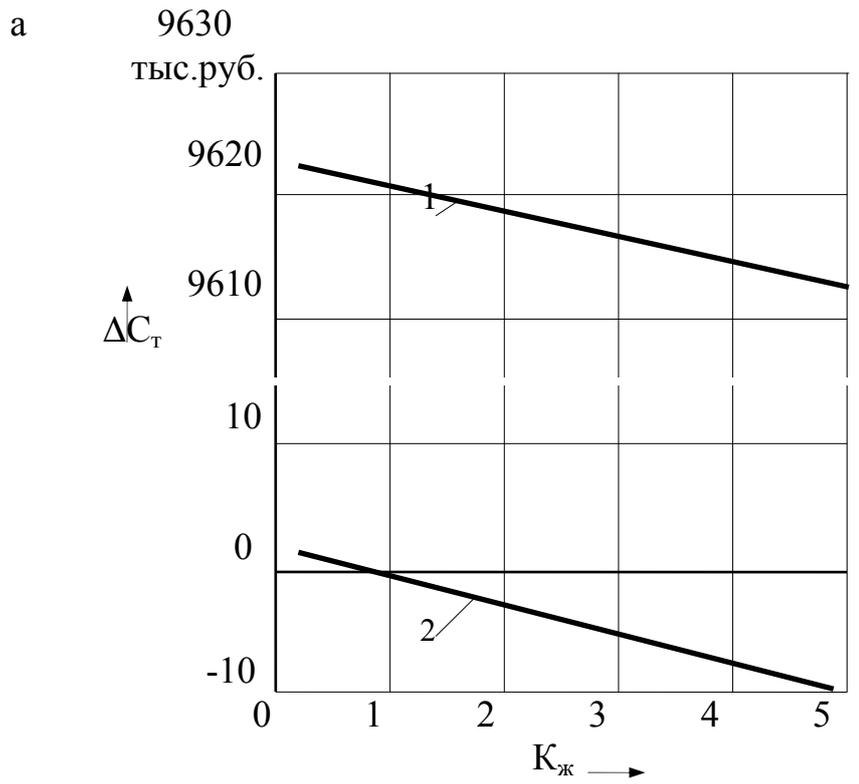


Рис. 5.19. Изменение технологической себестоимости годового объема продукции, выпускаемой цехом № 37 (а) и участком I цеха № 37 УМЗ (б), в зависимости от критериев изменения машинного времени K_M и стоимости СОЖ $K_{ж}$:

$K_B = K_\tau = K_N = 1$; 1 – $K_M = 1$; 2 – $K_M = 0,5$

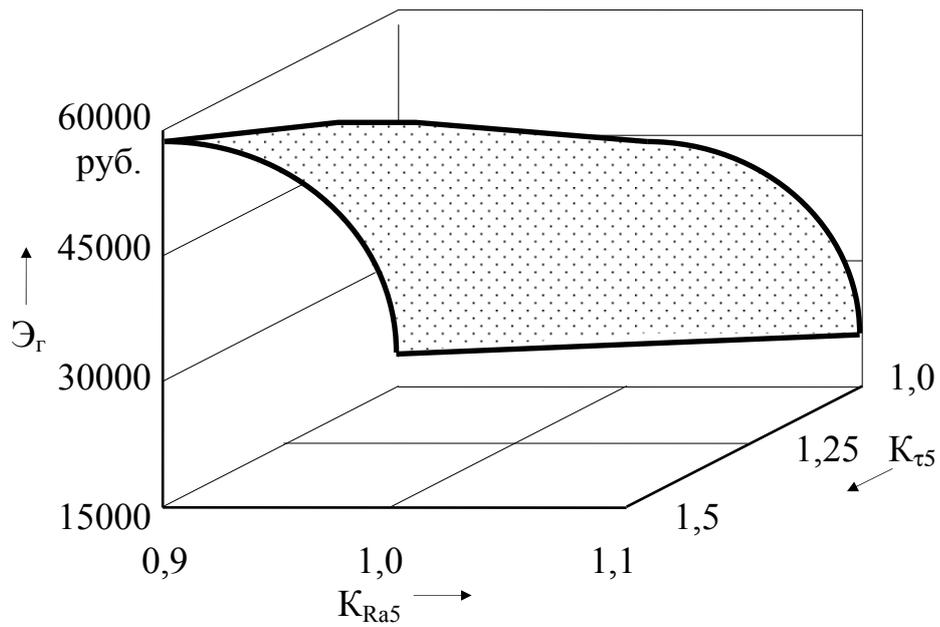


Рис. 5.20. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения периода стойкости $K_{\tau 5}$ и параметра шероховатости K_{Ra5} на линии КМ-029 (станция 5)

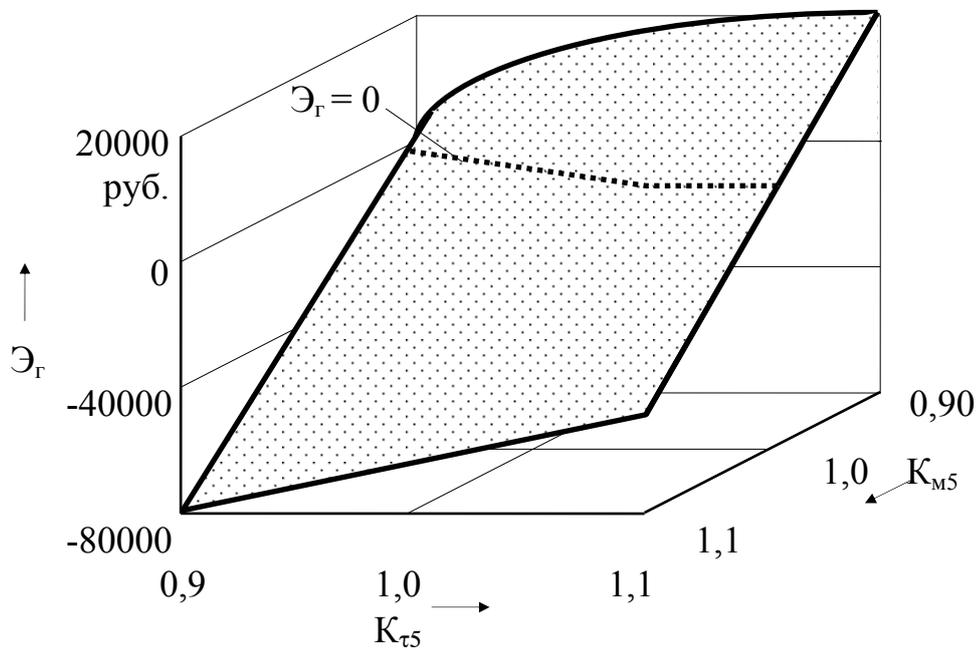


Рис. 5.21. Зависимость экономического эффекта \mathcal{E}_r от критериев изменения периода стойкости $K_{\tau 5}$ и машинного времени K_{m5} на линии КМ-029 (станция 5)

5.4. Расчет технико-экономических характеристик систем очистки СОЖ

Ниже, в качестве примера, представлены расчеты технико-экономических характеристик устройства очистки СОЖ от механических примесей для автоматической линии КМ-029 Ульяновского автомобильного завода. Для этого использовали результаты расчета затрат базового варианта Z_i (см. табл. 5.1) и затрат на эксплуатацию системы очистки СОЖ. С целью уменьшения трудоемкости расчетов определили характеристики очистителя для 3, 5 и 11 станций линии КМ-029, на которых соответственно производится обработка заготовок сверлением, зенкерованием и развертыванием.

Автоматическая линия должна обеспечить заданное качество обработанных отверстий по шероховатости: $R_a \leq 2,5$ мкм при развертывании, $R_a \leq 5,0$ мкм при зенкерованием и $R_a \leq 12,5$ мкм при сверлении отверстий в чугунной заготовке. На вход очистителя, обслуживающего указанные станции автоматической линии, поступает СОЖ, содержащая механические примеси с параметрами: $C_{и} = 1,57$ г/л; $\bar{d}_{и} = 92$ мкм; $\sigma_{и} = 88$ мкм.

Рассчитали предельно допустимую концентрацию механических примесей в СОЖ после ее очистки для обеспечения заданных значений R_a . Расчет вели с использованием регрессионных зависимостей, полученных в разд. 4 (табл. 4.1).

Для станции 11 (развертывание отверстий) по зависимости № 27 (табл. 4.1):

$$R_a \leq 2,36 + 0,411C_o; 2,5 \leq 2,36 + 0,411C_o; C_o \leq 0,34 \text{ г/л.}$$

Для станции 5 (зенкерование отверстий) по зависимости № 26 (табл. 4.1):

$$R_a \leq 4,95 + 0,129C_o; 5,0 \leq 4,95 + 0,129C_o; C_o \leq 0,38 \text{ г/л.}$$

Для станции 3 (сверление) по зависимости № 25 (табл. 4.1):

$$R_a \leq \exp(1,979 + 0,065C_o); 12,5 \leq \exp(1,979 + 0,065C_o); C_o \leq 0,6.$$

Принимаем (с некоторым запасом) $C_o = 0,3$ г/л, тогда согласно ГОСТ Р 50558-93 [14], остальные параметры: $\bar{d}_{и} = 15$ мкм; $\sigma_{и} = 10$ мкм.

Определим критерии технологической эффективности по параметру шероховатости R_a для перечисленных видов обработки. Используя те же зависимости № 25-27 (см. табл. 4.1), получим:

Для сверления (станция 3)

$$K_{\text{Раз}} = \frac{R_a(0,3)}{R_a(1,57)} = \frac{\exp(1,979 + 0,065 \cdot 0,3)}{\exp(1,979 + 0,065 \cdot 1,57)} = 0,92.$$

Для зенкерования (станция 5)

$$K_{Ra5} = \frac{R_a(0,3)}{R_a(1,57)} = \frac{(4,951 + 0,129 \cdot 0,3)}{(4,951 + 0,129 \cdot 1,57)} = 0,97.$$

Для развертывания (станция 11)

$$K_{Ra11} = \frac{R_a(0,3)}{R_a(1,57)} = \frac{(2,36 + 0,411 \cdot 0,3)}{(2,36 + 0,411 \cdot 1,57)} = 0,82.$$

Такое сочетание критериев K_{Rai} при ужесточении режимов резания ($K_M = 0,95$) или увеличении периода стойкости режущих инструментов ($K_T = 1,5$) обеспечит наибольшую эффективность использования на этих станциях (см. рис. 5.20, 5.21).

Рассчитаем по зависимости (2.39) среднюю степень очистки $\bar{\varepsilon}$

$$\bar{\varepsilon} = 1 - \frac{C_o}{C_{и}} = 1 - \frac{0,3}{1,57} = 0,8 \text{ или } 80\%.$$

Далее рассчитали параметры \bar{d}_ε и σ_ε очистителя. Из формулы (2.69)

$$\sigma_\varepsilon = \frac{\beta \sqrt{\bar{\varepsilon}}}{\sigma_o - \sigma_{и}} \cdot \sigma_{и}^2 = \frac{-0,26874 \cdot \sqrt{0,8}}{10 - 88} \cdot 88^2 = 23,86 \text{ мкм.}$$

Из формулы (2.68)

$$\bar{d}_\varepsilon = \bar{d}_{и} - \sqrt{\sigma_{и}^2 + \sigma_\varepsilon^2} \cdot \Phi(\bar{\varepsilon}) = 92 - \sqrt{88^2 + 23,86^2} \cdot \Phi(0,8) = 15,22 \text{ мкм}$$

где $\Phi(0,8) = 0,842$ по Приложению 2 [34].

Таким образом, в техническом задании на проектирование очистителя для обслуживания станций №3, 5 и 11 линии КМ-029 необходимо указать следующие характеристики:

1. Исходная концентрация механических примесей $C_{и}$, г/л 1,57
2. Остаточная концентрация механических примесей C_o , г/л 0,3
3. Средняя степень очистки $\bar{\varepsilon}$, % 80
4. Тонкость очистки \bar{d}_ε , мкм 15,22
5. Среднее квадратическое отклонение σ_ε , мкм 23,86
6. Стоимость очистителя K_o , тыс. руб. 20
7. Годовые затраты по эксплуатации Z_3 , тыс. руб. 9,52

Для определения оптимального очистителя или системы очистки, обслуживающих всю линию КМ-029, необходимо произвести серию подобных расчетов по всем станциям и критериям технологической эффективности.

5.5. Выводы

Разработанная методика оценки экономической эффективности систем очистки СОЖ от механических примесей, обслуживающих технологические операции и линии механической обработки заготовок, позволяет:

1. Выбрать вариант системы очистки СОЖ по наибольшему экономическому эффекту (наименьшим суммарным затратам на механическую обработку заготовок и очистку СОЖ).

2. Выполнить анализ действующих систем очистки СОЖ с целью определения целесообразности и направления их совершенствования.

3. Рассчитать технико-экономические характеристики систем очистки СОЖ: сочетание критериев технологической эффективности K_{ji} , обеспечивающих наибольший экономический эффект от внедрения системы очистки; степень ε_d и тонкость \bar{d} очистки СОЖ в системе; максимально допустимую стоимость K_0 и затраты на эксплуатацию Z_3 системы очистки.

Значительный экономический эффект можно получить при внедрении тех систем очистки СОЖ, которые обеспечивают максимальные технологические эффекты для наиболее дорогостоящих операций технологических линий и по наиболее значимым составляющим технологической себестоимости операций механической обработки заготовок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований получены новые научные выводы и практические результаты:

1. Разработана система универсальных критериев технологической эффективности K_{ji} , которая позволяет оценить эффективность различных по видам обработки и техническому оснащению операций и линий механической обработки заготовок, выполняемой с применением СОЖ.

2. Предложенная система универсальных критериев положена в основу методики оценки экономической эффективности систем очистки СОЖ, обслуживающих технологические линии механической обработки заготовок.

В общем случае разработанная система универсальных критериев технологической эффективности может быть применена для оценки эффективности внедрения любой новой техники на технологических линиях, участках и в цехах машиностроительных предприятий.

3. Получены зависимости для расчета экономической эффективности технологических операций (2.20), (2.29) и линий механической обработки заготовок (2.30) без брака и с учетом возможного снижения брака.

4. Разработан алгоритм расчета оптимальных значений критериев K_{ji} , обеспечивающих наибольший экономический эффект от внедрения систем очистки на отдельной операции и на технологической линии в целом.

5. Предложены зависимости (2.56)-(2.59), (2.65)-(2.69) для расчета степени и тонкости очистки СОЖ очистителя и системы очистителей в зависимости от концентрации и распределения частиц механических примесей в СОЖ по размерам. Адекватность зависимостей (2.56)-(2.59), (2.65)-(2.69) доказана на основе результатов обследования действующего производства УАЗ.

6. Экспериментально установлено, что увеличение концентрации механических примесей в СОЖ приводит к снижению работоспособности сверл, зенкеров и разверток на (20-30) %, увеличению энергозатрат на (5-15) %, ухудшает макро- и микрогеометрию обработанных отверстий соответственно на (15-25) % и (20-40) %. Получены регрессионные зависимости технологических показателей эффективности операций обработки отверстий в заготовках мерным инструментом от изменения концентрации механических примесей в СОЖ (табл. 4.1).

7. Рассчитаны значения K_{ji} (табл. 4.2) изменения технологических показателей эффективности операций сверления, зенкерования, развертывания и точения стальных и чугунных заготовок для различных значений концентрации механических примесей в СОЖ, необходимые для оценки эффективности систем очистки СОЖ по зависимостям (2.20), (2.29), (2.30).

8. При обследовании действующего производства УАЗ определены размеры \bar{d} , σ и концентрация C механических примесей в СОЖ, образуя-

щихся при одновременной обработке заготовок на автоматических линиях точением, сверлением, зенкерованием и развертыванием. Установлено, что распределение частиц механических примесей по размерам описывается нормальным законом распределения Гаусса.

9. По предложенной методике выполнены расчеты экономической эффективности применения различных систем очистки СОЖ от механических примесей на автоматических линиях механической обработки заготовок Ульяновского автомобильного завода (массовое производство) и в цехе станков с ЧПУ Ульяновского машиностроительного завода (мелкосерийное производство). Установлено, что экономическая эффективность систем очистки СОЖ зависит от обеспечиваемых ими параметров чистоты СОЖ и, соответственно, критериев технологической эффективности K_{ji} .

10. Разработанная методика используется в проектно-технологическом отделе ПКТБ “Экосистема” при проектировании систем очистки СОЖ от механических примесей, обслуживающих технологические линии механической обработки заготовок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, В.М. Сборник задач по оптимизации: Теория, примеры, задачи [Текст] / В.М. Алексеев, В.М. Голеев, В.М. Тихомиров. – М.: Наука, 1984. – 398 с.
2. Белянин, П.Н. Промышленная чистота машин [Текст] / П.Н. Белянин, В.М. Данилов. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
3. Богданов, В.В. Повышение эффективности операций шлифования путем ресурсосберегающего обеспечения чистоты технологических жидкостей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Богданов. – Ульяновск: УлПИ, 1988. – 383 с.
4. Бровин, И.Л. Эффективность использования новых СОЖ при шлифовании [Текст] / И.Л. Бровин, Ю.С. Дубровский // Абразивы. – 1981. – № 2. – С. 1-3.
5. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1980. – 976 с.
6. Булыжев, Е.М. Исследование возможности повышения эффективности обработки деталей шлифованием путем наложения магнитного поля на СОЖ, загрязненную механическими примесями [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Е.М. Булыжев. – Ульяновск: УлПИ, 1979. – 311 с.
7. Булыжев Е.М., Богданов В.В., Обшивалкин М.Ю. Исследование вакуумного фильтрования СОЖ на операциях обработки заготовок резанием [Текст] / Е.М. Булыжев, В.В. Богданов, М.Ю. Обшивалкин // Смазочно-охлаждающие жидкости в процессах абразивной обработки: сборник научных трудов. – Ульяновск: УлПИ, 1992. – С. 77-82.
8. Булыжев, Е.М. Система применения СОЖ в гибком автоматизированном производстве [Текст] / Е.М. Булыжев, М.Ю. Обшивалкин // Повышение эффективности станков с ЧПУ и ОЦ в составе специализированных участков: Тезисы отраслевого семинара. – М.: ЦНИИИТЭИ, 1989. – С. 10-12.
9. Валеев, С.Г. Регрессионное моделирование при обработке наблюдений [Текст] / С.Г. Валеев. – М.: Наука, 1991. – 275 с.
10. Ведров, С.Е. Повышение производительности обработки и качества обработанных деталей путем удаления стружки из рабочей зоны металло-режущего станка [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С.Е. Ведров. – Ульяновск: УлПИ, 1992. – 245 с.
11. Веткасов, Н.И. Исследование и разработка технологических основ унификации технологических жидкостей для операций шлифования стальных заготовок деталей машин [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Н.И. Веткасов. – Ульяновск: УлПИ, 1983. – 305 с.
12. Вильсон, А. Фильтрация смазочно-охлаждающей жидкости [Текст] / А. Вильсон // Машиностроение США. – 1963. – № 10. – С. 3-8.

13. Глушенков, А.П. Прогнозирование технологической эффективности СОЖ по их функциональным свойствам [Текст] / А.П. Глушенков // Известия вузов. Машиностроение. – 1978. – № 3. – С. 176-179.

14. ГОСТ Р 50558-93. Промышленная чистота. Жидкости смазочно-охлаждающие. Общие технические требования [Текст]. – Введен 01.01.94. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 14 с.

15. ГОСТ Р 50815-95. Промышленная чистота. Жидкости смазочно-охлаждающие. Требования к чистоте СОЖ на операциях круглого наружного и плоского шлифования периферией круга [Текст]. – Введен 01.01.96. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 9 с.

16. Гульнов, Е.П. Влияние чистоты СОЖ на эффективность процесса абразивного резбонарезания [Текст] / Е.П. Гульнов // Смазочно-охлаждающие жидкости в процессах абразивной обработки. Теоретические основы и техника применения. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1986. – С. 22-27.

17. Гульнов Е.П. Исследование механизма взаимодействия твердых частиц, содержащихся в СОЖ, с рабочей поверхностью шлифовального круга и поверхностью шлифуемой детали [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Е.П. Гульнов. – Ульяновск: УлПИ, 1979. – 270 с.

18. Гутер, Р.С. Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта [Текст] / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский. – М.: Наука, 1970. – 432 с.

19. Деришева, Э.М. Расчет экономической эффективности от внедрения новых СОЖ [Текст] / Э.М. Деришева // Теория трения, смазки и обрабатываемости материалов: межвуз. сб. науч. тр. – Чебоксары: Чувашский гос. ун-т, 1980. – С. 76-81.

20. Дрейпер, М. Прикладной регрессионный анализ [Текст] / М. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

21. Дубровский, Ю.С. Техника применения смазочно-охлаждающих технологических сред в металлообработке [Текст] / Ю.С. Дубровский, А.К. Маскаев. – Киев: Знание, 1986. – 20 с.

22. Ефимов, В.В. Модель процесса шлифования с применением СОЖ [Текст] / В.В. Ефимов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1992. – 132 с.

23. Ефимов, В.В. Научные основы повышения технологической эффективности СОЖ на операциях шлифования [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / В.В. Ефимов. – Ульяновск: УлПИ, 1988. – 451 с.

24. Жидкости смазочно-охлаждающие. Нормы чистоты. Стандарт предприятия СТП 37.212.133-78 [Текст]. – Ульяновск: УАЗ, 1978. – 6 с.

25. Зажигаев, Л.С. Методы планирования и обработка физического эксперимента [Текст] / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян. Ю.И. Романиков. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.

26. Ивченко, Г.И. Математическая статистика [Текст] / Г.И. Ивченко, Ю.Н. Медведев. – М.: Высшая школа, 1984. – 254 с.

27. Инструкция по испытаниям новых СОЖ на технологическую эффективность при шлифовании [Текст]. – Киев: ВНИИПКнефтехим, 1981. – 72 с.

28. Карев, Е.А. Исследование возможности повышения эффективности операций шлифования путем гидроциклонной сепарации технологических жидкостей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Карев. – Ульяновск: УлПИ, 1981. – 281 с.

29. Карманов, В.Г. Математическое программирование [Текст] / В.Г. Карманов. – М.: Наука, 1986. – 340 с.

30. Клушин, М.И. О связи функциональных и технологических свойств СОЖ при резании металлов [Текст] / М.И. Клушин [и др.] // Вопросы теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки резанием. – Горький: Горьковский политех. институт, 1975. Сб. 3. – С. 77-100.

31. Клушин, М.И. Экономическая эффективность применения новых СОЖ [Текст] / М.И. Клушин [и др.] // Машиностроитель. – 1977. – № 7. – С. 37-39.

32. Коваленко, В.П. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений [Текст] / В.П. Коваленко, А.А. Ильинский. – М.: Химия, 1982. – 272 с.

33. Коновалов, В.М. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков [Текст] / В.М. Коновалов, В.Я. Скрицкий, В.А. Рокшевский. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.

34. Коузов, П.А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей [Текст] / П.А. Коузов, Л.Я. Скрязина. – Л.: Химия. 1983. – 144 с.

35. Кузнецов, Ю.М. Математическое программирование [Текст] / Ю.М. Кузнецов, В.И. Кузубов, А.В. Волощенко. – М.: Высшая школа, 1980. – 412 с.

36. Латышев, В.Н. Повышение эффективности СОЖ [Текст] / В.Н. Латышев. – М.: Машиностроение, 1975. – 88 с.

37. Литвиненко, С.К. Установка для приготовления и очистки СОЖ [Текст] / С.К. Литвиненко // Машиностроитель. – 1978. – № 1. – С. 30.

38. Маскаев, А.К. Разработка и применение смазочно-охлаждающих средств для обработки металлов резанием и давлением [Текст] / А.К. Маскаев, Е.В. Лебедев, Г.Т. Малиновский. – Киев: Знание, 1978. – 44 с.

39. Микулик, Н.А. Руководство к решению технических задач по теории вероятностей и математической статистике [Текст] / Н.А. Микулик, Г.Н. Рейзина; под. ред. Е.И. Гурского. – Минск: Высшая школа. 1977. – 144 с.

40. Муслина, Г.Р. Экономический анализ применения СОЖ в технологических процессах механообрабатывающих цехов [Текст] / Г.Р. Муслина,

М.Ю. Обшивалкин // Смазочно-охлаждающие средства при механической обработке заготовок из различных материалов: тезисы докладов международной НТК. – Ульяновск: УлПИ, 1993. – С. 82-83.

41. Муслина, Г.Р. Экономический анализ технологических возможностей производства в механообрабатывающих цехах машиностроительных предприятий [Текст] / Г.Р. Муслина, М.Ю. Обшивалкин // Техника машиностроения. – М.: Вираз-Центр, 1994. – № 1. – С.51-53.

42. Муслина, Г.Р. Экономическое обоснование выбора системы применения СОЖ в ППО Ульяновского машиностроительного завода [Текст] / Г.Р. Муслина, М.Ю. Обшивалкин // Тезисы докладов 28-й НТК УлПИ. – Ульяновск: УлПИ, 1994. – С. 5-6.

43. Муслина, Г.Р. Экономическая оценка технологического потенциала автоматических линий [Текст] / Г.Р. Муслина, Ю.М. Правиков, М.Ю. Обшивалкин // Ресурсосберегающие технологии машиностроения: сб. научных трудов. – М.: МГААТМ, 1994. – С. 82-86.

44. Норенков, И.П. Основы теории и проектирования САПР [Текст] / И.П. Норенков, В.Б. Маничев. – М.: Высшая школа, 1990. – 366 с.

45. Обшивалкин, М.Ю. Влияние механических примесей, содержащихся в СОЖ, на показатели качества отверстий, обработанных мерным инструментом [Текст] / М.Ю. Обшивалкин // Тезисы докладов 30-й НТК УлГТУ. – Ульяновск: УлГТУ, 1996. – С. 17.

46. Обшивалкин, М.Ю. Устройства вакуумной очистки СОЖ от механических примесей для централизованных и групповых систем [Текст] / М.Ю. Обшивалкин // Тезисы докладов 29-й НТК УлГТУ. – Ульяновск: УлГТУ, 1995. – С. 25.

47. Общемашиностроительные нормативы режимов резания [Текст]: Справочник: в 2-х т.: Т.1 / А.Д. Локтев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.

48. Определение экономической эффективности от внедрения новых смазочно-охлаждающих жидкостей для обработки металлов резанием [Текст]. – М.: НИИМаш, 1980. – 42 с.

49. Определение экономической эффективности от внедрения новых СОЖ для обработки резанием. Межотраслевые методические рекомендации [Текст]. – М.: Миннефтехимпром СССР, 1989. – 34 с.

50. Островский, В.И. Теоретические основы процесса шлифования [Текст] / В.И. Островский. – Л.: ЛГУ, 1981. – 144 с.

51. Паничкина, В.В. Методы контроля дисперсности и удельной поверхности металлических порошков [Текст] / В.В. Паничкина, И.В. Уварова. – Киев: Наукова думка, 1973. – 168 с.

52. Полянсков, Ю.В. Индивидуальные, групповые и централизованные системы очистки и стабилизация свойств СОЖ для операций абразивно-алмазной обработки [Текст] / Ю.В. Полянсков // Теория трения, смазки и

обрабатываемости материалов. Межвузовский сборник. – Чебоксары: Изд-во Чуваш, гос. ун-та, 1980. – С. 11-20.

53. Полянсков, Ю.В. Основы выбора и построения систем очистки СОЖ при абразивно-алмазной обработке [Текст] / Ю.В. Полянсков // Вестник машиностроения. – 1981. – №2. – С. 56-59.

54. Полянсков, Ю.В. Повышение эффективности операций шлифования путем стабилизации свойств СОЖ [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Ю.В. Полянсков. – Ульяновск: УлПИ, 1982. – 419 с.

55. Полянсков, Ю.В. Стабилизация свойств СОЖ при шлифовании [Текст] / Ю.В. Полянсков // Станки и инструмент. – 1978. – № 4. – С. 28-30.

56. Полянсков, Ю.В. Централизованная система очистки СОЖ [Текст] / Ю.В. Полянсков [и др.] // Машиностроитель. – 1980. – № 3. – С. 31-32.

57. Полянсков, Ю.В. Пути повышения эффективности процессов сепарации СОЖ при шлифовании [Текст] / Ю.В. Полянсков, Е.М. Булыжев, Е.А. Карев // Вестник машиностроения. – 1975. – № 10. – С. 69-72.

58. Полянсков, Ю.В. Системы очистки СОЖ от механических примесей [Текст] / Ю.В. Полянсков, Е.А. Карев, Е.М. Булыжев // Технология производства, научная организация труда и управления. – М.: НИИМаш, 1976. – № 12. – С. 48-55.

59. Полянсков, Ю.В. Техничко-экономическая эффективность систем стабилизации свойств СОЖ при обработке резанием [Текст] / Ю.В. Полянсков, Г.Р. Муслина // Технология, организация и экономика машиностроительного производства. – 1981. – № 7. – С. 14-18.

60. Полянсков, Ю.В. Выбор очистителей с учетом накопления шлама в СОЖ на операциях шлифования [Текст] / Ю.В. Полянсков, Н.В. Савинов // Теория трения, смазки и обрабатываемости материалов: межвузовский сборник. – Чебоксары: Изд-во Чуваш, гос. ун-та, 1981. – С. 65-69.

61. Прейскурант № 18-05. Оптовые цены на инструмент и средства измерения [Текст]. – М.: Прейскурантиздат, 1981. – 556 с.

62. Применение СОЖ при обработке резанием (опыт АвтоВАЗ им. 50-летия СССР) [Текст]. – М.: НИИМаш, 1975. – 87 с.

63. Применение смазочно-охлаждающих технологических сред при обработке металлов резанием [Текст]. – Киев: Знание. 1988. – 20 с.

64. Пустыльник, Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений [Текст] / Е.И. Пустыльник. – М.: Наука. 1988. – 288 с.

65. Разработка ГОСТ "Чистота промышленная. Требования к чистоте технологических жидкостей при абразивной обработке". Отчет о госбюджетной НИР № 77-01. № гос. Регистрации 0184.0001126 [Текст]. – Ульяновск, 1985. – 99 с.

66. Разработка общих технических заданий и предпроектной документации на системы очистки и подачи СОЖ для автоматизированных заводов

на основе анализа мировых тенденций в этой области. Отчет о НИР, тема № 1-68/88. Ульяновск: УлПИ, 1988. ч. 1 [Текст]. – 102 с.

67. Расчеты экономической эффективности новой техники [Текст]: справочник / под общ. ред. К.М. Великанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

68. Регрессионный анализ данных технологического процесса [Текст]: метод. указания / сост. С.Г. Валеев, П.А. Вельмисов, Е.М. Булыжев. – Ульяновск: УлПИ, 1989. – 28 с.

69. Ромашкин, В.Г. Исследование возможности повышения эффективности качества деталей на операциях круглого наружного шлифования путем тонкой очистки технологических жидкостей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.Г. Ромашкин. – Ульяновск: УлПИ, 1982. – 277 с.

70. Ромашкин, В.Г. Новые устройства для очистки СОЖ [Текст] / В.Г. Ромашкин, А.Р. Троций, М.Ю. Обшивалкин // Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки материалов. Тезисы докладов. – Киев: Знание, 1992. – С. 41-42.

71. Сазанов, В.Е. Повышение эффективности шлифования стальных заготовок путем очистки СОЖ в электромагнитных сепараторах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.Е. Сазанов. – Ульяновск: УлПИ. 1990. – 264 с.

72. СОЖ для обработки металлов резанием. Рекомендации по применению [Текст]. – М.: НИИМаш, 1979. – 96 с.

73. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием [Текст]: справочник / под ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

74. Соломенцев, Ю.М. Экономический аспект оптимизации технологических процессов обработки деталей [Текст] / Ю.М. Соломенцев [и др.] // Вестник машиностроения. – 1982. – №5. – С. 47-50.

75. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов [Текст]: учебное пособие / А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев. – Свердловск: Изд-во Уральского политех. инст., 1975. – 140 с.

76. Степанов, М.С. Обеспечение качества поверхностей и поверхностного слоя шлифованных деталей средствами тонкой очистки СОЖ от механических примесей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / М.С. Степанов. – Ульяновск: УлПИ, 1988. – 291 с.

77. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием [Текст] / под ред. М.И. Клушина. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.

78. Типовые системы сбора и централизованной регенерации отработанных СОЖ [Текст]. – М.: ГИПРОСТАНОК, 1975. Т.т. 1-6.

79. Тихонцов, А.М. Комплексные системы сбора, отделения и очистки СОЖ [Текст] / А.М. Тихонцов, И.М. Баранов // Вестник машиностроения. – 1980. – № 5. – С. – 60-64.

80. Тихонцов, А.М. Системы эксплуатации водных СОЖ [Текст] / А.М. Тихонцов, А.Н. Коробочка, А.Б. Пономаренко // Вестник машиностроения. – 1987. – № 1. – С. 48-51.

81. Тихонцов, А.М. Комплексные системы транспортирования стружки и шлама и очистки СОЖ на металлорежущих станках и автоматических линиях [Текст] / А.М. Тихонцов, М.П. Шмырев // Станки и инструмент. – 1979. – № 4. – С. 17-18.

82. Филимонов, Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов [Текст] / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 136 с.

83. Фурунжиев, Р.И. Применение математических методов и ЭВМ [Текст]: практикум / Р.И. Фурунжиев. – Минск: Высшая школа, 1988. – 198 с.

84. Худобин, Л.В. Основы выбора СОЖ при шлифовании [Текст] / Л.В. Худобин // Вестник машиностроения. – 1980. – № 7. – С. 53-55.

85. Худобин, Л.В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке [Текст] / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердический. – М.: Машиностроение, 1977. – 189 с.

86. Худобин, Л.В. Ресурсосберегающее фильтрование СОЖ при механической обработке [Текст] / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев, В.В. Богданов // Вестник машиностроения. – 1983. – № 7. – С. 38-42.

87. Худобин, Л.В. Очистка СОЖ при резбошлифовании [Текст] / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев, В.Г. Ромашкин, В.В. Богданов // Машиностроитель. – 1988. – № 4. – С. 33-34.

88. Худобин, Л.В. Влияние загрязнения СОЖ отходами шлифования на прижогообразование [Текст] / Л.В. Худобин, Е.П. Гульнов // Вестник машиностроения. – 1978. – №1. – С. 67-69.

89. Худобин, Л.В. Влияние твердых примесей, содержащихся в СОЖ, на качество шлифуемых деталей [Текст] / Л.В. Худобин, Е.П. Гульнов // Вестник машиностроения. – 1976. – № 9. – С. 70-73.

90. Худобин, Л.В. Влияние твердых примесей, содержащихся в СОЖ, на работоспособность шлифовальных кругов [Текст] / Л.В. Худобин, Е.П. Гульнов // Абразивы. – 1978. – С. 5-7.

91. Худобин, Л.В. Выбор степени очистки СОЖ от механических примесей при шлифовании [Текст] / Л.В. Худобин, Е.П. Гульнов // Станки и инструмент. – 1976. – №12. – С. 31-32.

92. Худобин, Л.В. Методика разработки норм чистоты СОЖ для шлифовальных операций [Текст] / Л.В. Худобин, Е.П. Гульнов // Качество и режимы обработки материалов. – Орджоникидзе: Кавк. горно-мет. институт, 1980. – С. 36-46.

93. Худобин, Л.В. Нормы чистоты СОЖ для шлифовальных операций [Текст] / Л.В. Худобин, Е.П. Гульнов // Машиностроитель. – 1978. – № 10. – С. 19.

94. Худобин, Л.В. О методическом подходе к оценке технологических свойств СОЖ при шлифовании [Текст] / Л.В. Худобин, В.В. Ефимов // Качество и режимы обработки материалов. Орджоникидзе: Кавк. горно-мет. институт, 1980. – С. 75-77.

95. Худобин, Л.В. Единая методика оценки эффективности СОЖ при шлифовании [Текст] / Л.В. Худобин, В.В. Ефимов, Н.И. Веткасов // Станки и инструмент. – 1984. – №3. – С. 28-29.

96. Худобин, Л.В. Методика экономической оценки эффективности технологических процессов на основе системы единых критериев [Текст] / Л.В. Худобин, Г.Р. Муслина, Е.М. Булыжев, М.А. Белов // Вестник машиностроения. – 1995. – № 6. – С. 42-45.

97. Худобин, Л.В. Математическая модель функционирования технологической системы на операции абразивной обработки в присутствии СОЖ [Текст] / Л.В. Худобин, Ю.В. Полянсков // Резание и инструмент. – Харьков, 1981. – Вып. 26. – С 132-137.

98. Худобин, Л.В. Основные направления повышения качества шлифованных деталей путем применения СОЖ [Текст] / Л.В. Худобин, Ю.В. Полянсков // Оптимизация технологических процессов механической обработки по параметрам качества деталей и их эксплуатационных свойств. – Киев: ИСМ АН УССР, 1980. – С. 189-194.

99. Худобин, Л.В. Применение флотационной сепарации для очистки СОЖ от шлифовального шлама [Текст] / Л.В. Худобин, Г.К. Рябов // Вестник машиностроения. – 1988. – №6. – С. 54-56.

100. Чулок, А.И. Математические модели автоматизированного проектирования систем применения СОЖ [Текст] / А.И. Чулок. – М.: ВНИИТЭМР, 1987. Сер. 3, вып. 5. – 82 с.

101. Чулок, А.И. Модульный принцип построения математических моделей процессов гибкой технологии применения СОЖ [Текст] / А.И. Чулок // Технологические процессы производства режущего инструмента с применением промышленных роботов и станков с ЧПУ. – М.: ВНИИинструмент, 1986. – С. 51-58.

102. Чулок, А.И. Выбор и проектирование гибких систем эксплуатации СОЖ в автоматизированных производствах [Текст] / А.И. Чулок, В.С. Лобанцова, Г.В. Березовский // Интенсификация технологических процессов механической обработки. – Л.: ЛМИ, 1986. – С. 32-37.

103. Чулок, А.И. Совершенствование систем применения СОЖ на основе автоматизированной оценки качества и гибкой технологии [Текст] / А.И. Чулок, В.С. Лобанцова, О.В. Денисова // Химмотология – теория и практика рационального использования горючих и смазочных материалов. – М.: МДНТП, 1987. – С. 18-23.

104. Ящерицын, П.И. Шлифование металлов [Текст] / П.И. Ящерицын, Е.А. Жалнерович. – Минск: Беларусь, 1970. – 463 с.

105. Allander C.G. Ein graphisches Verfahren zur Bestimmung des mittleren Abscheidegrades gewisser mechanischer Staubabscheider // Straub. 1958. №1.s. 15-17.
106. A review of operating characteristics of clearing systems for Extending coolant life // Plant Extending. 1980. № 10. p.p. 125-127.
107. Coolants: What happens when the chips are out? // Metalworking Production. 1970. № 31. p.p. 24-26.
108. Durr H. Die Reigung der Kuhlshmiermittel fur den Sdileifprozeb. Teil 1. Filterprizipien, Kenngroben und Hiweise fur die Auswahl der Filter. // Fachberichtefur Oberflachentechnick. 1968. №4. s. 136-143.
109. Gorski Marion. Usdatnianie chlodziwa wobrobze skrawanien // Medanik. 1985. № 5. s. 291-293.
110. Knobloch H. Am Canfenden Band Reinigungsanlage fur Kuhlshmierstoffe dem Fertigungsverfahren anpassen // Maschinen marked. 1986. № 37. s. 78-81.
111. Knobloch H. Reininung von Kuhlshmierstoffen // Masch.-Aulag+Verfahr. 1985. № 9. s. 32-36, 39."
112. Knobloch H. Reininung von Kuhlshmierstoffen // Masch.-Aulag+Verfahr. 1985. № 10. s. 24-28.
113. Knobloch H. Wie wirfschoftich veinigen? // Befsieb und fisrustung. 1981. № 11.s. 68-76.
114. Trennen. Reinigen. Filtrieren, Entsorgen. Unweltschutz geht alls ann // Bech Rohre profile. 1986. 33. № 5. s. 216-220.
115. Trich J. Bandfilter modern und zuverlassihg // TZ fur Metall-learbei – tung. 1984. 78. № 4. s. 47-52.
116. Безъязычный, В.Ф. Основы технологии машиностроения [Текст] / В.Ф. Безъязычный. – Машиностроение, 2013. – 568 с.
117. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения [Текст] / Б.М. Базров. – Машиностроение, 2007. – 736 с.
118. Богодухов, С.И. Технологические процессы в машиностроении [Текст] / С.И. Богодухов, Е.В. Бондаренко, А.Г. Схиртладзе. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
119. Мычко, В.С. Основы технологии машиностроения [Текст] / В.С. Мычко. – Минск: Вышэйшая школа, 2011. – 382 с.
120. Филонов, И.П. Инновации в технологии машиностроения [Текст] / И.П. Филонов. – Минск: Вышэйшая школа, 2009. – 110 с.
121. Худобин, Л.В. Базирование заготовок при механической обработке [Текст]/ Л.В. Худобин, М.А. Белов, А.Н. Унянин. – Ульяновск: Ульяновский государственных технический университет, 2010. – 195 с.
122. Худобин, Л.В. Технологии и техника смазочно-охлаждающих жидкостей при механической обработке [Текст] / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев. – Ульяновск: Ульяновский государственных технический университет, 2013. – 232 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И СИМВОЛОВ	3
ВВЕДЕНИЕ	6
1. ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ПУТЕМ ОЧИСТКИ СОЖ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ	7
1.1. Влияние загрязнения СОЖ механическими примесями на производительность механической обработки и качество деталей	7
1.2. Современные способы и техника очистки СОЖ от механических примесей. Основные принципы разработки и выбора систем очистки, нормирование чистоты СОЖ	15
1.3. Критерии оценки технологической и экономической эффективности операций механической обработки заготовок, выполняемой с применением СОЖ	26
1.4. Выводы. Цель и задачи исследований	38
2. ВЛИЯНИЕ ЧИСТОТЫ СОЖ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ...	40
2.1. Система универсальных критериев оценки эффективности технологических линий	40
2.1.1. Критерии оценки эффективности отдельной операции (механической обработки)	41
2.1.2. Критерии оценки эффективности отдельной операции механической обработки заготовок при возможном снижении брака	47
2.1.3. Критерии оценки эффективности технологической линии	50
2.2. Определение оптимального сочетания критериев технологической эффективности систем очистки СОЖ для технологических линий механической обработки заготовок	53
2.3. Расчет параметров чистоты СОЖ и характеристик очистителя для обеспечения оптимального сочетания критериев технологической эффективности	73
2.4. Выводы	83
3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	84
3.1. Методика экспериментальных исследований влияния чистоты СОЖ на эффективность обработки отверстий мерным инструментом	84
3.1.1. Задачи экспериментальных исследований	84
3.1.2. Контролируемые показатели	85
3.1.3. Образцы	85
3.1.4. Режущий инструмент	86
3.1.5. Оборудование и аппаратура, применяемые при исследованиях. Техника проведения эксперимента	86
3.1.6. Планирование экспериментов, состав и количество опытов	88
3.2. Методика экспериментальных исследований влияния чистоты СОЖ на эффективность обработки заготовок точением	90
3.2.1. Задачи экспериментальных исследований	90
3.2.2. Контролируемые показатели	90
3.2.3. Обрабатываемый материал	91
3.2.4. Режущий инструмент, режимы резания	91
3.2.5. Оборудование и аппаратура, применяемые при исследованиях. Техника проведения эксперимента	91

3.3. Методика экспериментального определения параметров чистоты СОЖ и характеристик очистителя	92
3.3.1. Цель и задачи исследований	92
3.3.2. Контролируемые показатели	92
3.3.3. Оборудование и аппаратура, применяемые при исследованиях. Техника проведения эксперимента.....	92
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СОЖ МЕХАНИЧЕСКИМИ ПРИМЕСЯМИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК.....	94
4.1. Исследование технологической эффективности СОЖ, загрязненной механическими примесями, на операциях лезвийной обработки заготовок	94
4.1.1. Влияние чистоты СОЖ на износ лезвийного инструмента и энергозатраты	98
4.1.2. Влияние чистоты СОЖ на качество обработанных заготовок	102
4.2. Экспериментальные исследования параметров чистоты СОЖ на операциях лезвийной обработки заготовок.....	113
4.3. Выводы	120
5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОЧИСТКИ СОЖ.....	121
5.1. Методика оценки экономической эффективности систем очистки СОЖ.....	121
5.2. Выбор варианта ЦСО для автоматической линии	122
5.3. Оценка целесообразности внедрения различных ЦСО СОЖ	142
5.4. Расчет технико-экономических характеристик систем очистки СОЖ	153
5.5. Выводы	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	156
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	158

Научное издание

Родионов Юрий Владимирович
Обшивалкин Михаил Юрьевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОЧИСТКИ
СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ
ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ
Монография

В авторской редакции
Верстка Н.А. Сазонова

Подписано в печать 10.02.15. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 9,765. Уч.-изд. л. 10,5. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.
Заказ № 67.

Издательство ПГУАС.
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.