

ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Л. Галиновский, В.М. Елфимов



**ГАЛИНОВСКИЙ
Андрей
Леонидович**

Кандидат технических наук, доцент кафедры СМ-12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов – технология машиностроения, технология гидроабразивного резания. Автор более 100 научных и научно-методических работ, в том числе 6 монографий, 4 учебных пособий и 2 патентов.

Введение

Технология гидроструйного и гидроабразивного резания (ГАР) труднообрабатываемых материалов компактной сверхскоростной гидроабразивной струей интенсивно развивается. В первую очередь как средство раскрытия листовых заготовок она появились сравнительно недавно и уверенно вошла в арсенал самых современных универсальных способов физико-технической обработки материалов, отличающихся широкими технологическими возможностями [1].

Значительное количество и взаимосвязанность технологических параметров, характеризующих эффективность ГАР, а также недостаточный теоретический аппарат их полномасштабного анализа, не позволяет априори выбирать рациональные режимы обработки материалов в разных производственных условиях. Поэтому технико-экономическая результативность ГАР в значительной мере определяется опытом применения данной технологии на конкретном предприятии. Таким образом, разработка соответствующего методического обеспечения технологии ГАР, позволяющего определять оптимальные режимы обработки, является весьма актуальной задачей, решение которой напрямую связано с повышением конкурентоспо-



**ЕЛФИМОВ
Владимир
Михайлович**

Соискатель МГТУ им. Н.Э. Баумана. Выпускник (магистр) Московского государственного института международных отношений (2007 г.) по специальности «Экономика». Область научных интересов: оценка технико-экономической эффективности машиностроительных технологий

способности ГАР по сравнению с другими высокотехнологичными способами резания, например лазерной обработкой [2] или традиционной механической обработкой материалов.

Краткий обзор работ

Анализ научной литературы показал, что до сих пор большинство решаемых оптимизационных технологических задач ГАР было связано с определением значения ряда параметров, в частности массовой концентрации абразива [3], вида абразива [4], расстояния между соплом и поверхностью обрабатываемого материала [5] и пр., при которых обеспечивалась максимальная скорость подачи гидроабразивной струи относительно поверхности заготовки.

Так, классическая оптимизационная задача гидрорезания, связанная с оценкой возможности повышения режущей способности гидроструи за счет введения в рабочую жидкость водорастворимых полимеров, увеличивающих длину ее активной части, решалась в работе [6], где было убедительно показано, что при добавлении в рабочую жидкость полиоксиэтилена в концентрации около 0,01%, скорость подачи возрастет с 23,5 до 27,5 мм/с, т.е. производительность резания увеличивается в 1,15 раза. Эта концентрация является оптимальной по критерию производительности процесса обработки, так как при меньших или больших ее значениях производительность падает. Однако отсутствие технико-экономического анализа внедрения данных нововведений не позволяет сделать однозначного вывода об эффективности их применения на практике.

Исходя из анализа изменения кинетической энергии гидроабразивного потока в толще обрабатываемой заготовки и вводя несколько физически обоснованных допущений, авторам работы [7] удалось получить аналитический вид профиля реза, описываемый уравнением в полярных координатах:

$$\rho(\varphi) = \frac{V_0^2}{C_M} (\sin \varphi + K_P \cos \varphi) \exp(-2K_P \varphi), \quad (1)$$

где $\rho(\varphi)$ – функция текущего профиля реза; V_0 – начальная скорость струи на поверхности

заготовки; C_M – постоянный коэффициент, также уравнивающий размерности в формуле (1); K_P – коэффициент резания, представляющий собой отношение силы резания, направленной по касательной к поверхности реза, к силе нормального давления, обусловленной центробежным ускорением массы движущегося потока по криволинейной поверхности реза.

Далее было показано, что при изменении K_P , т.е. технологических условий реализации ГАР, оптимальный кинематический угол атаки гидроабразивной струи, равен приблизительно 60° , что соответствует данным экспериментальных исследований. Однако изложенные результаты однопараметрической оптимизации не адаптированы к конкретным производственным условиям и имеют весьма ограниченную область применения, связанную с прямолинейным раскрытием заготовок. В случае же сложного профиля раскрытия листовых материалов наблюдается весьма существенное и практически трудно устранимое координатное рассогласование между входом струи и ее выходом из обрабатываемой заготовки.

Другая оптимизационная задача, связанная с оценкой возможности обеспечения максимальной скорости перемещения струи относительно поверхности заготовки в зависимости от экспериментально определенной массовой концентрации абразива и использования струеформирующих насадок различного диаметра, решалась в работе [3], где были представлены рекомендуемые параметры проточной части режущего инструмента и системы дозированной подачи абразива в зависимости от диапазона используемых струеформирующих насадок. При этом вопросы технико-экономической эффективности и целесообразности использования предложенного гидроабразивного инструмента не рассматривались, поэтому полученные выводы не могут однозначно свидетельствовать о его работоспособности.

Авторы работы [8] провели комплекс теоретико-экспериментальных исследований по изучению оптимального соотношения между массовыми расходами абразива и воды и ус-

тановили, что при заданном давлении воды и скорости перемещения инструмента это соотношение обеспечивает получение максимальной глубины нарезаемой щели и минимальной удельной энергоемкости процесса щелеобразования. Однако отсутствие в предлагаемой модели учета типа абразивного материала снижает значимость полученных результатов с точки зрения технико-экономической эффективности, так как она описывает гидроабразивное разрушение горных пород и сориентирована на использование только одного типа абразива – кварцевого песка. Поскольку известно, что стоимостные и технологические показатели абразивных материалов сильно различаются [7], нельзя говорить о рациональных технико-экономических характеристиках предложенной модели.

Изучение влияния расстояния между соплом и поверхностью обрабатываемого материала на производительность процесса гидро-резания показало, что при небольшом увеличении расстояния скорость подачи гидроструи сначала остается постоянной, а затем быстро убывает по зависимости, близкой к линейной [5]. В результате экспериментальных исследований было установлено, что поскольку при увеличении расстояния между соплом и обрабатываемым материалом ширина реза возрастает за счет расширения струи, то увеличивается площадь контакта струи с материалом, уменьшается удельное давление резания, объем разрушаемого материала в единицу времени и скорость подачи гидроструи, приводящие к снижению производительности процесса гидро-резания. Авторами были даны рекомендации по выбору расстояния между соплом и образцом.

Результаты аналогичных исследований приведены и в работе [9], где изучалось влияние расстояния от среза сопла до поверхности разрушаемой горной породы на глубину щели. Было показано, что величина расстояния, со-

ответствующая наибольшей глубине прореза, составляет 4–6 мм.

Отмеченное выше подтверждает практическую неоднозначность, возникающую при попытке оптимизировать технологические параметры ГАР. Обеспечить выбор наиболее эффективного режима обработки в зависимости от условий и возможностей решения конкретной производственной задачи может позволить только полномасштабное технико-экономическое обоснование, базирующееся на построении и анализе соответствующих целевых функций, связывающих технологические и стоимостные показатели ГАР.

Методика оптимизации массовой концентрации абразива по стоимостным показателям

Представим достаточно сложные взаимосвязи между оптимизируемыми физико-технологическими и стоимостными параметрами ГАР в виде структурной схемы (рис. 1).

Для более детального анализа изучаемых взаимосвязей между параметрами ГАР целесообразно воспользоваться структурной схемой типа диаграммы Исикава [10] (рис. 2).

Для физико-технологического анализа и оптимизации параметров ГАР схему, изображенную на рис. 2, необходимо дополнить структурной схемой поэтапных масс-энергетических превращений (рис. 3).

Рассмотрим модель оптимизации ГАР по стоимостным параметрам процесса обработки, в первую очередь технологической себестоимости. В данном случае целевой функцией является стоимостное выражение удельных затрат C_T на обработку (удаление, съем) единицы массы (объема) материала заготовки, оптимальное значение которого соответствует его минимуму:

$$C_T(J_{OM}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где J_{OM} – интенсивность разрушения (резания) обрабатываемого материала (ОМ), кг/с.

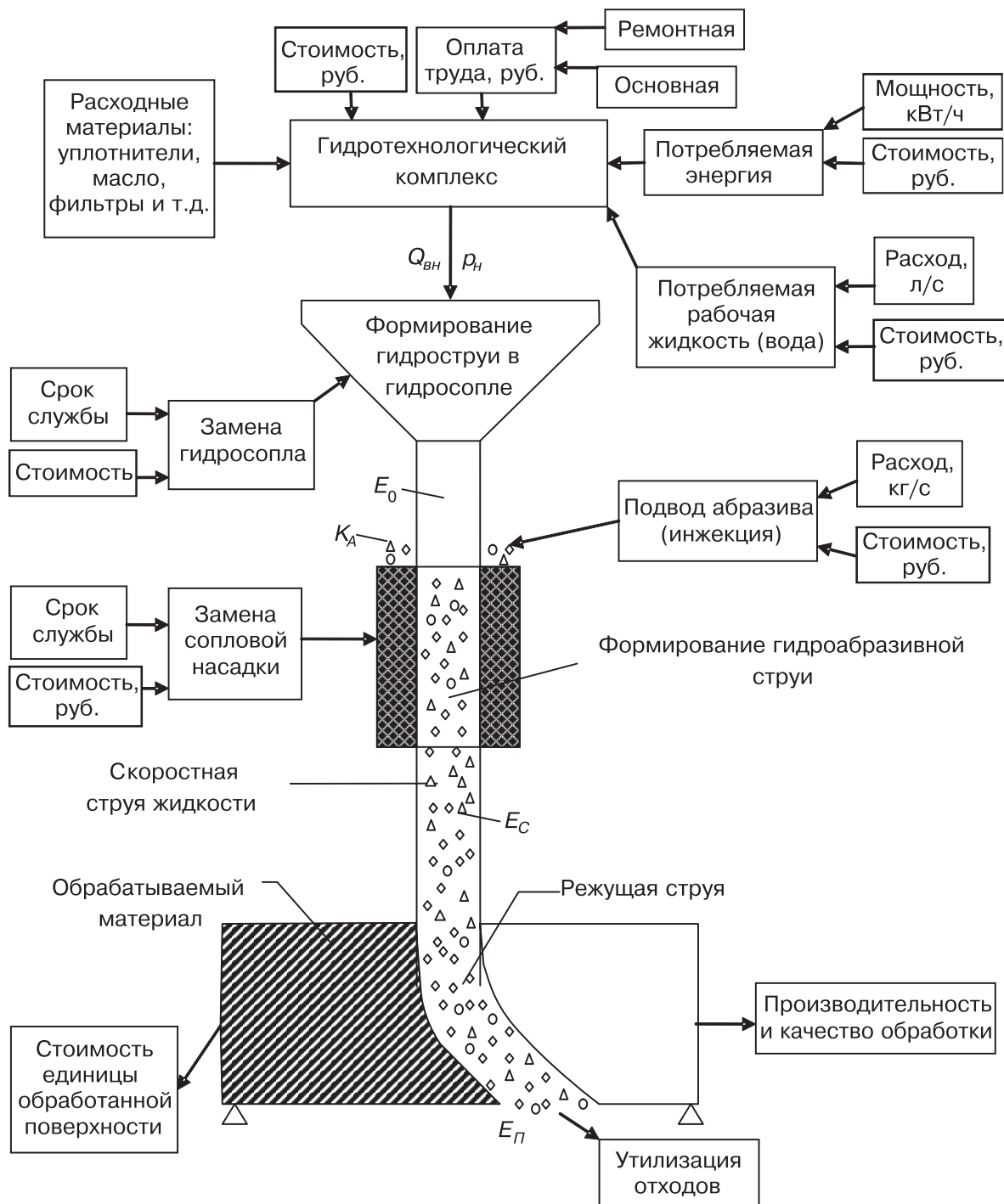


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязей между технологическими и технико-экономическими параметрами гидроабразивного резания:

ρ_n – номинальное рабочее давление используемой жидкости (воды);
 $Q_{вн}$ – расход воды (кг/с); K_A – концентрация (массовая) абразива, применяемого для формирования гидроабразивной суспензии;
 E_0 – начальная кинетическая энергия гидроструи;
 E_c – кинетическая энергия режущей гидроабразивной струи;
 E_n – кинетическая энергия отработанной струи;
 $(E_c - E_n)$ – фактические потери энергии, определяющие КПД процесса гидроабразивного резания в целом



Заметим, что исходя из общего характера решаемой задачи, соотношение (3) допускает дальнейшую детализацию: например, в структуру $C_{\text{ОБЩ}}$ надо будет включить затраты на обслуживание и ремонт ЭВМ, наладку системы ЧПУ и т. д.

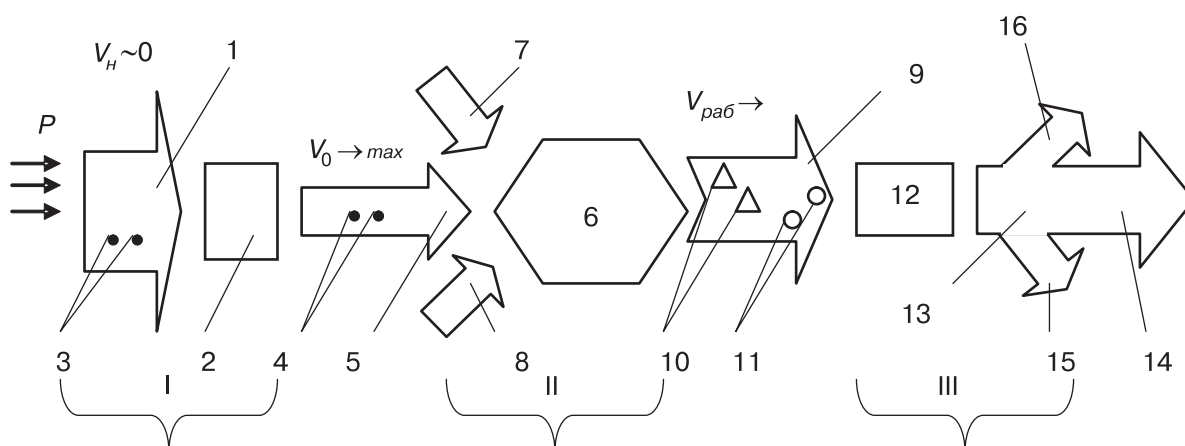


Рис. 3. Структурная схема поэтапных масс-энергетических превращений при ГАР:

I – создание высокого давления в мультипликаторе технологической установки; II – этап формирования гидроабразивной рабочей струи, связанный с образованием трехфазного потока: жидкость – твердая фаза – газ; III – этап взаимодействия рабочей струи с обрабатываемым материалом и образование конечных продуктов обработки; 1 – исходная рабочая жидкость (вода), находящаяся под рабочим давлением p_r , имеющая малую кинетическую энергию ($V_H \sim 0$) в начальный момент движения по струеформирующему тракту; 2 – специально спрофилированное струеформирующее сопло, обеспечивающее получение сверхскоростной гидроструи; 3 – микрочастицы износа уплотнений, прошедшие через фильтры технологического оборудования; 4 – микрочастицы износа струеформирующего сопла; 5 – сверхскоростная компактная гидроструя, имеющая максимальную скорость движения $V_0 \rightarrow \max$; 6 – сопловая насадка, обеспечивающая формирование режущей гидроабразивной струи; 7 – инжекция атмосферного воздуха в сопловую насадку; 8 – инжекция абразива в сопловую насадку; 9 – режущая гидроабразивная струя, имеющая скорость движения к заготовке $V_{\text{раб}}$; 10 – частицы абразивного материала, прошедшие через сопловую насадку; 11 – абразивные микрочастицы износа сопловой насадки; 12 – обрабатываемая заготовка; 13 – отработанная гидроабразивная струя, содержащая абразивные частицы и продукты разрушения заготовки, имеющая конечную скорость V_k ; 14, 15, 16 – условное разделение отработанной гидроабразивной струи 13 на жидкостную составляющую 14, продукты разрушения заготовки 15 и отработанные абразивные частицы 16

Сумму слагаемых с $i=1-10$ можно считать условно-стабильными, поэтому постоянную по величине группу затрат на текущее обеспечение процесса ГАР обозначим как $C_{\Pi} = \sum_{i=1}^{10} C_i$.

Два последних слагаемых – $C_{\text{ЗАМ}}$ и $C_{\text{ЗСН}}$ – существенным образом зависят от расхода абразива – основного изменяемого параметра оптимизации ГАР, в связи с чем в общей структуре себестоимости ГАР, определяемой соотношением (3), должны учитываться отдельно в виде переменных параметров.

Основываясь на экспериментальных данных [5], определяющих влияние концентрации абразива на производительность ГАР, а также на взаимосвязи технологических и экономических показателей и особенностях масс-энергетического взаимодействия при ГАР, проведем

конкретизацию соотношения (3).

Определим стоимостное выражение затрат на обеспечение работы установки ГАР, назвав их внешними номинальными затратами. Рассмотрим достаточно малый промежуток времени эксплуатации оборудования $\Delta\tau$, в течение которого все внешние затраты можно принять постоянными. Тогда:

$$\dot{C}_{\text{ВН}} = \frac{1}{\Delta\tau} \sum_{i=1}^{10} C_i, \quad (4)$$

где $\dot{C}_{\text{ВН}}$ – стоимость (цена) функционирования гидротехнологического комплекса в единицу времени (руб./с), т.е. удельные затраты.

Определим удельные затраты на износ сопловой насадки и расход абразивного материала, назвав их внутренними затратами ($\dot{C}_{\text{ВНУТР.}}$) на обеспечение процесса формирования режущей гидроабразивной струи:

$$\begin{aligned} \dot{C}_{\text{внутр}} &= \dot{m}_{\text{CH}} \bar{C}_{\text{CH}} + \dot{m}_A C_A, \\ \dot{m}_{\text{CH}} &= \frac{\Delta m_{\text{CH}}}{\Delta \tau}; \quad \bar{C}_{\text{CH}} = \frac{C_{\text{CH}}}{m_{\text{KP}}}; \quad \dot{m}_A = \frac{\Delta m_A}{\Delta \tau}, \end{aligned} \quad (5)$$

где C_{CH} – стоимость одной сопловой насадки; m_{KP} – критическая масса (величина) износа насадки, при потере которой в процессе формирования гидроабразивной струи она теряет свои нормальные (заданные) струеформирующие свойства; C_A – стоимость единицы массы абразива (руб./кг); Δm_{CH} – массовый износ сопловой насадки; Δm_A – расход абразивного материала.

Следует также заметить, что практическая оценка сводится по сути к измерению диаметров выходной (фокусирующей) части сопловой насадки до начала работы и после снятия изношенного сопла со станка:

$$\Delta h_{\text{KP}} = d_k - d_H,$$

где d_k – диаметр выходной части сопловой насадки изношенного сопла, d_H – диаметр выходной части сопловой насадки до начала работы.

Заметим, что

$$\dot{m}_A = \dot{m}_B \cdot K_A; \quad \dot{m}_B = \frac{\pi}{4} V_{\text{ОВ}} d_c^2 \rho_B,$$

где $\dot{m}_B$ – расход воды; K_A – массовая концентрация абразива; $V_{\text{ОВ}}$ – скорость гидроструи на входе в сопловую насадку; d_c – диаметр калибрующей части гидросопла; ρ_B – плотность воды.

Изменение объема воды под действием гидростатического давления, равное ~10 %, не учитывается. Можно отметить, что формула (5) характеризует немонотонную зависимость $\dot{C}_{\text{внутр}}$ от массовой концентрации абразива.

Учитывая вышеизложенное и проведя ряд преобразований, запишем выражение для удельной технологической стоимости единицы массы обрабатываемого материала C_T (руб./кг), удаленной (снятой, срезанной) с заготовки, представляющее собой исходную оптимизационную модель конкретной технологической операции ГАР в математически формализованном виде:

$$C_T = \frac{\dot{C}_{\text{BH}} + J_{\text{CH}} \bar{C}_{\text{CH}} + \dot{m}_B K_A C_A}{J_{\text{OM}}}, \quad (6)$$

где J_{CH} – интенсивность протекания процессов гидроабразивной эрозии сопловой насадки, кг/с.

Условно назовем данную модель дифференциальной, так как она, по сути, описывает

изменение C_T в каждый конкретный момент времени обработки τ , что обусловлено неявной зависимостью J_{CH} и J_{OM} от текущего времени обработки.

Если, вполне обоснованно, допустить, что за период времени τ_{CH} , равный стойкости сопловой насадки, изменениями $\dot{C}_{\text{BH}}$, J_{CH} , J_{OM} можно пренебречь, а подача абразива и воды равномерна, то выражение (6) с учетом (5) можно представить в виде:

$$C_T^{\text{II}} = \frac{\tau_{\text{CH}} (\dot{C}_{\text{BH}} + \dot{m}_B K_A C_A) + C_{\text{CH}}}{\tau_{\text{CH}} J_{\text{OM}}}, \quad (7)$$

где C_T^{II} – стоимостное выражение затрат за время τ_{CH} на удаление с заготовки массы обрабатываемого материала $\Delta M_T = \tau_{\text{CH}} J_{\text{OM}}$.

Выражения (6) и (7), позволяющие оценить стоимостную эффективность процесса ГАР, представляют собой математическое выражение связи между основными входными ($\dot{C}_{\text{BH}}$, C_{CH} , K_A , $V_{\text{ОВ}}$, C_A) и выходными (J_{OM} , J_{CH}) технико-экономическими и технологическими параметрами обработки.

Согласно (2) необходимое условие минимума затрат C_T , описываемое дифференциальной моделью (6), с учетом принятых допущений по параметру K_A (массовой концентрации абразива) будет определяться соотношением:

$$\frac{\partial J_{\text{OM}}}{\partial K_A} (\dot{C}_{\text{BH}} + J_{\text{CH}} \bar{C}_{\text{CH}} + \dot{m}_B K_A C_A) = \frac{\partial J_{\text{CH}}}{\partial K_A} J_{\text{OM}} \bar{C}_{\text{CH}}. \quad (8)$$

Аналогично (6) и (7) получим:

$$\begin{aligned} \frac{J_{\text{OM}} \dot{m}_A C_A}{K_A} - \frac{\partial J_{\text{OM}}}{\partial K_A} (\dot{C}_{\text{BH}} + \dot{m}_A) C_A &= \\ = \frac{C_{\text{CH}}}{\tau_{\text{CH}}^2} \left(\frac{\partial \tau_{\text{CH}}}{\partial K_A} J_{\text{OM}} + \frac{\partial J_{\text{OM}}}{\partial K_A} \tau_{\text{CH}} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Последнее выражение в явном виде не содержит интенсивности износа сопловой насадки, поэтому его использование на практике может быть более предпочтительным, чем структурно менее сложного соотношения (8).

Таким образом, определив функции $J_{\text{CH}}(K_A)$ и $J_{\text{OM}}(K_A)$ путем решения уравнений (8) и (9) относительно K_A , определяем расход абразива

(m_A), обеспечивающий минимальную величину затрат на единицу массы обрабатываемого материала, удаленного с заготовки.

Полученные достаточно общие соотношения позволяют проанализировать характер изменения параметров оптимизации, что указывает на их практическую значимость и достаточно широкие функциональные возможности.

В частности, из рассмотрения структуры стоимостной оптимизационной модели (8) следует, что каждому уровню интенсивности протекания процессов ГАР (J_{OM}) соответствует свое, строго определенное значение, обеспечивающее максимальную технико-экономическую эффективность процесса обработки. Действительно, полагая, что $J_{OM} = f_{OM}(K_A)$ и $J_{CH} = f_{CH}(K_A)$, а значения других параметров обработки постоянны, из (8), опуская промежуточные преобразования, получим:

$$J_{OM}(K_{A,opt}) = \exp \left[\bar{C}_{CH} \int \frac{dJ_{CH}}{\dot{C}_{BH} + J_{CH} \bar{C}_{CH} + \dot{m}_B K_{A,opt} C_A} \right] + C_0. \quad (10)$$

Последнее выражение, где $C_0 = \text{const}$ и определены функции $J_{OM}(K_A)$ и $J_{CH}(K_A)$, позволяет в аналитической форме получить

$$K_{A,opt} = f(J_{OM}, J_{CH}, \bar{C}_{CH}, \dot{C}_{BH}, \dot{m}_B, C_A).$$

Таким образом, на основе анализа полученных математических моделей с учетом схем (см. рис. 1–3), отражающих взаимосвязи между основными стоимостными и функционально-экономическими элементами, участвующими в формировании технико-экономических показателей процесса ГАР, сформирован укрупненный алгоритм оптимизации (рис. 4) и методика поэтапного определения оптимальной массовой концентрации абразива по стоимостным показателям обработки (рис. 5).

Заключение

Отметим основные особенности вышеизложенной методики оптимизации массовой концентрации абразива по стоимостным показателям, которые необходимо учитывать при ее реализации.

1. Объем экспериментальных исследований может быть крайне незначителен или полностью исключен, если имеется аналог изучаемого материала по обрабатываемости. Причем необходимые данные для корректировки методики (см. рис. 5) могут быть получены при реальной обработке первой партии деталей, в частности для получения неизвестной заранее зависимости интенсивности гидроабразивного износа фокусирующего сопла.

2. Оперативность применения методики может быть существенным образом повышена вплоть до экспресс-оптимизации режимов обработки конкретной детали. Для этого в вычислительной программе, реализующей предложенную методику, необходимо использовать не абсолютные значения параметров согласно зависимости (3), трудно определяемых в условиях единичного и малосерийного производства, а их относительные значения. В этом случае может быть выбрана величина затрат на электроэнергию, составляющая 13% общей суммы затрат на обеспечение процесса ГАР. Такой подход является достаточно общим, так как позволяет адекватно адаптировать разработанный аппарат оптимизации даже в условиях изменения цен на электроэнергию и расходные материалы.

3. При использовании в методике известных данных по обрабатываемости различных материалов гидроабразивным резанием необходимо устранить неоднозначность в технологических режимах их обработки, которая может быть связана с тем, что исследователи обычно оперируют не массовой концентрацией абразива $K_A = \dot{m}_A / \dot{m}_B$, а просто расходом абразивного материала $\dot{m}_A$ (кг/с) при постоянстве расхода воды $\dot{m}_B$. В связи с этим имеющиеся значения по расходу абразива необходимо привести в соответствие с разработанными выше моделями производительности ГАР, в структуре которых используется массовая концентрация абразива как наиболее рациональная с энергетической точки зрения.

В заключение отметим, что в перспективе данная методика благодаря разработанной

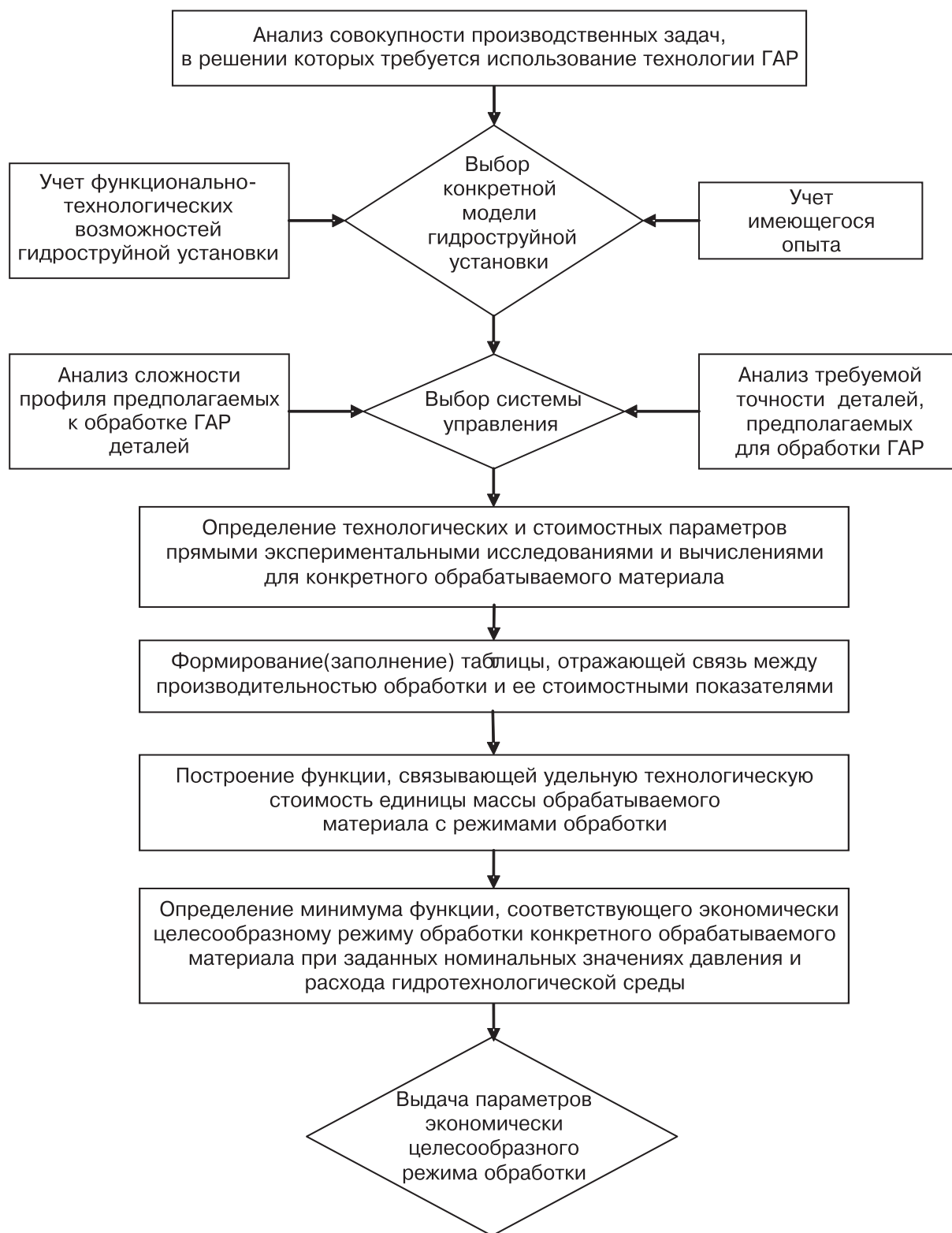


Рис. 4. Алгоритм оптимизации по стоимостным показателям обработки

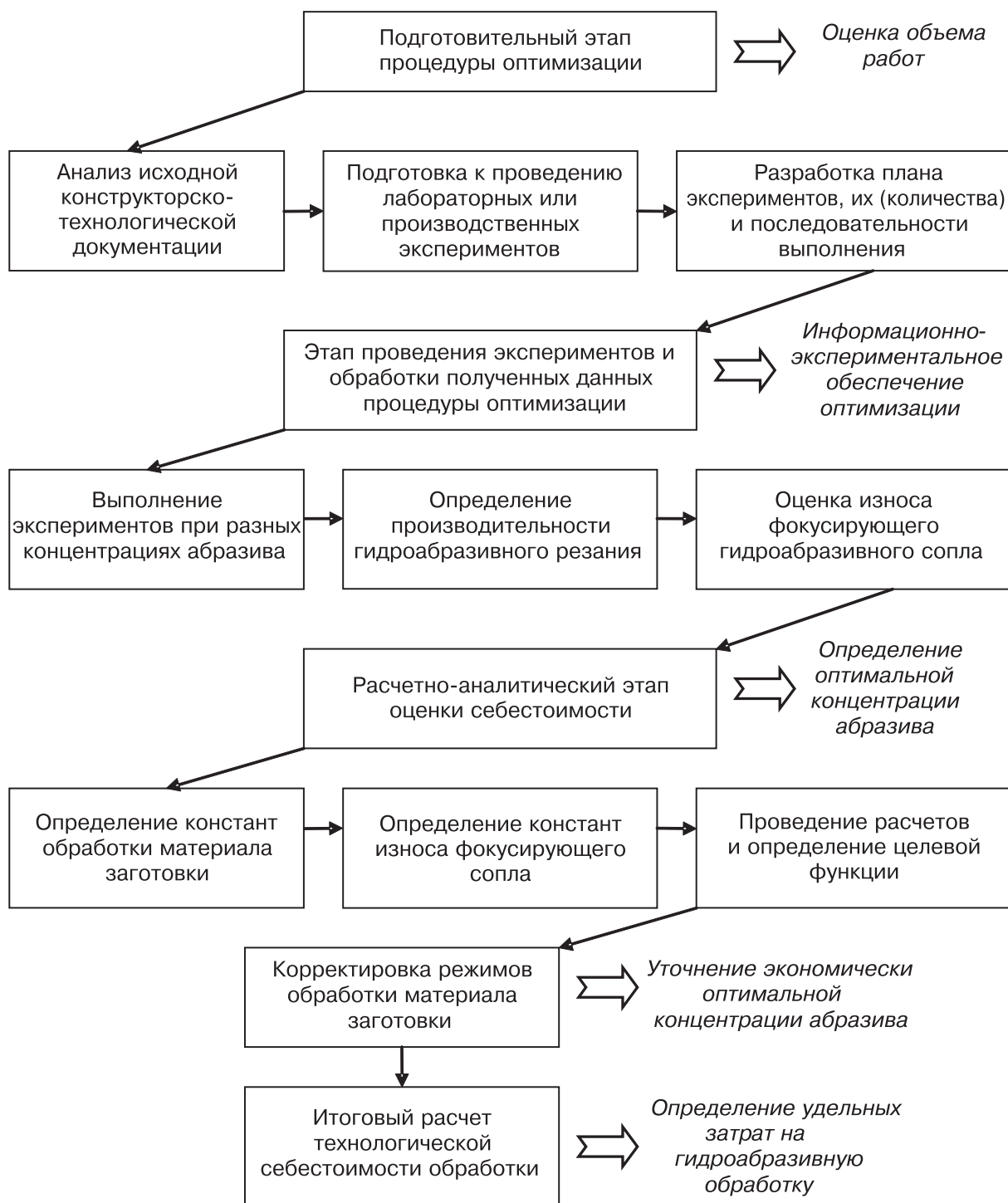


Рис. 5. Содержание методики определения оптимальной массовой концентрации абразива по стоимостным показателям обработки:

→ – основные этапы методики;

⇒ – получаемый результат выполняемого этапа

вычислительной программе позволит в лабораторных или производственных условиях достаточно оперативно осуществлять экономически целесообразное проектирование конкретной технологической операции ГАР путем определения оптимальной концентрации дорогостоящего абразивного материала.

Список литературы

1. Степанов Ю.С. Барсуков Г.В. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технологических тканей. Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2004. – 240 с.
2. Терегулов Н.Г. Лазерные технологии на машиностроительном заводе / Н.Г.Терегулов, Б.К. Соколов, Г.А. Варбанов. – Уфа: КумАПП, 1993. – 252 с.
3. Шубняков А.А. Обоснование рациональных параметров гидроабразивного агрегата для резания горных пород и других твердых материалов. Автореф. дис.....канд. техн. наук. Москва: Институт горного дела им. А.А. Сковинского, 2006. – 20 с.
4. Билик Н.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов. – М.: Машгиз, 1960. – 198 с.
5. Гидрорезание судостроительных материалов / Р.А. Тихомиров, В.Ф. Бабнин, Е.Н. Петухов, И.Д. Стариков, В.А. Ковалев. – Л.: Судостроение, 1987. – 164 с.
6. Кузьмин Р.А. Разработка и исследование процесса гидрорезания материалов струями жидкости с добавками водорастворимых полимеров. Автореф. дис.... канд. техн. наук. Владимир: ВлГУ, 2003. – 18 с.
7. Анализ влияния кинетического параметра на эффективность ультразвуковой обработки / А.А. Барзов, С.В. Сальников, Н.Н. Сысоев и др. // Физическая гидродинамика. Вып. 19. Препринт физического факультета МГУ. 2006. № 6. – 27 с.
8. Ерухимович Ю.Е. Исследование влияния массового расхода абразива на процесс гидроабразивного нарезания щелей в горных породах. Тула: Тульский государственный университет, 1999. – 10 с.: ил. деп. в ВИНТИ. 18.08.99. № 2670-В99.
9. Гидроабразивное резание горных пород / В.А. Бренер, А.Б. Жабин, А.Е. Пушкарев, М.М. Щеголевский. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. – 279 с.
10. Исикава К. Японские методы управления качеством. – М.: Экономика, 1988 – 350 с.

Уважаемые читатели!

Журнал «Машиностроение и инженерное образование» в июле 2007 года включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степени доктора или кандидата наук.