

УДК 621.923.01

К.С. Балабанов

K.S. Balabanov

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОИМОСТИ
ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ТУГОПЛАВКИХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE VALUE
OF HYDROABRASIVE CUTTING OF NON-METAL REFLECTIVE
AND METAL MATERIALS**

Гидроабразивная резка является перспективным направлением в обработке различных материалов и металлов в том числе, однако внедрение этого технологического процесса является дорогостоящим инвестиционным мероприятием для предприятия, поэтому возникает потребность оценки экономической целесообразности этого решения. Статья посвящена математической модели определения инвестиционных расходов и текущих затрат по эксплуатации оборудования для гидроабразивной резки, позволяющей оценить её доходность. Диапазоны затрат служат основой для оценки стоимости работ и принятия решения о целесообразности покупки гидроабразивной установки.

Ключевые слова: экономическая эффективность, отраслевая экономика, оптимизация расходов, себестоимость, инвестиции, экономические показатели производства, затраты, технико-экономическая эффективность, основные фонды, резка металла, гидроабразивная обработка, гидроабразивная резка, эрозионная обработка.

Waterjet cutting is a promising area in the processing of various materials and metals, including, however, the introduction of this process is an expensive investment measure for the enterprise, so there is a need to assess the economic feasibility of this solution. The article is devoted to a mathematical model for determining investment costs and operating costs for the operation of equipment for waterjet cutting, which allows to evaluate its profitability. Cost ranges serve as the basis for assessing the cost of work and for deciding on the feasibility of purchasing a waterjet installation.

Keywords: economic efficiency, industry economy, cost optimization, cost, investments, economic production indicators, costs, technical and economic efficiency, fixed assets, metal cutting, waterjet processing, waterjet cutting, erosion treatment

Введение

Метод гидроабразивной резки обладает уникальными возможностями и преимуществами, которые позволяют оптимизировать затраты предприятия.

Среди преимуществ отмечается возможность резания с помощью данной технологии любых, даже труднообрабатываемых, материалов различных толщин, а также высокая точность и чистота обработки, низкие потери материала в процессе резания, отсутствие выделения тепла и экологичность процесса. Оборудование для гидроабразивной резки часто доступнее, чем для лазерной или плазменной, а значит, ее внедрение позволит сократить расходы на приобретение специального оборудования для резки различных материалов [1, 5, 6, 9, 10].

1. Параметры, влияющие на стоимость гидроабразивной резки

Процесс гидроабразивной резки зависит от нескольких факторов: давление струи воды, ее начальный диаметр на выходе, расстояние между обрабатываемой поверхностью и источником струи, скорость струи с абразивом, скорость резания (движения струи по траектории резания) и т.д. (рис. 1).

Стоимость абразива составляет 1/3 от величины текущих расходов на эксплуатацию оборудования. При гидроабразивной резке считается, что уменьшение расхода абразива экономит денежные средства. Наоборот, это пустая трата денег. Существует пиковая производительность, когда работают гидроабразивные струи. По мере увеличения расхода абразива скорость резки увеличивается, а стоимость одного погонного метра реза уменьшается. Скорость резки и стоимость за метр являются параметрами оптимизации.

Скорость резки является ключевым параметром для снижения эксплуатационных расходов. Суть в том, чтобы резать как можно быстрее, самая быстрая скорость резки – самая низкая стоимость за метр. Скорость, с которой гидроабразивная резка может прорезать материал, будет варьироваться в зависимости от множества параметров – от материала, толщины, качества обработки кромки и допусков, а также от геометрии формы частиц абразива. Скорость резки увеличивается при увеличении скорости гидроабразивного потока и давления воды.

Техническое обслуживание гидроабразивного оборудования является одним из параметров, влияющих на стоимость одного метра реза. Как и любой другой станок, станок для гидроабразивной резки имеет детали, которые изнашиваются и должны периодически заменяться. Техническое обслуживание гидроабразивного оборудования в основном определяется обслуживанием и заменой расходных материалов в режущей головке и насосе.

В режущей головке изнашиваются отверстия, сопла, вкладыши, игла и седла, а также абразивные трубки. Для насосов понадобятся уплотнения высокого давления, обратные клапаны и уплотнения низкого давления, которые будут обслуживаться и заменяться по мере износа. Расход изнашиваемых деталей зависит от типа машины гидроабразивной резки и области применения

(рисунок). Расходы на техническое обслуживание растут с увеличением давления и скорости резания [3, 4, 7, 8, 11, 12].

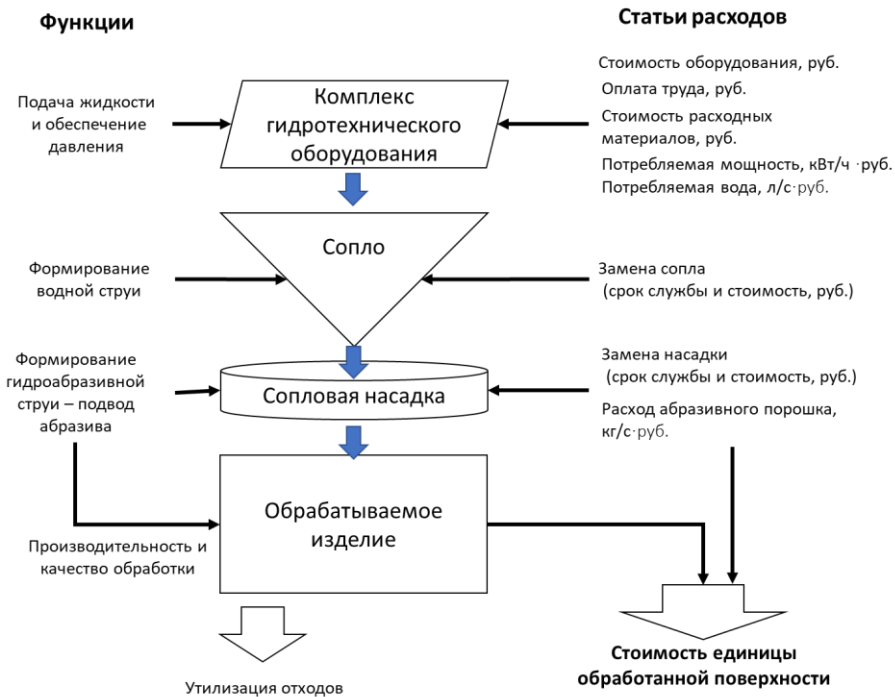


Рис. 1. Схема взаимосвязи экономических затрат и технологических параметров гидроабразивной резки

2. Математическая модель определения стоимости гидроабразивной резки

Стоимость гидроабразивной резки складывается из трех составляющих: амортизационные отчисления, эксплуатационные расходы и стоимость рабочей силы.

Расходы на амортизацию связаны с приобретением оборудования. Это начальная цена оборудования, амортизированного в течение определенного периода времени. Поскольку амортизационные отчисления фиксированы, они возникают независимо от того, работает машина или простаивает. Инвестиционные затраты на гидроабразивную установку зависят от мощности насоса, размера обрабатываемой заготовки и количества осей, необходимых для манипулирования заготовкой во время выполнения операции. Инвестиционные затраты зависят не только от размера рабочей зоны, но и требуемых характеристик скорости гидроабразивной струи и скорости резания, а также от точности

систем позиционирования. В зависимости от технических характеристик оборудования резания инвестиционные затраты могут значительно различаться, даже если размер рабочей зоны одинаков. Хотя инвестиционные затраты на гидроабразивные машины высоки, повышение производительности и качества продукции в сочетании с низкими затратами на инструмент и техническое обслуживание часто делают систему экономичной, особенно для предприятий, которые производят широкий ассортимент деталей.

Эксплуатационные расходы связаны с эксплуатацией процесса, включая потребление электроэнергии, потребление воды, расход абразивных материалов, износ расходных деталей, а также техническое обслуживание и ремонт. Эти затраты возникают только при работе машины. Эксплуатационные расходы зависят от конкретных случаев применения резки. Эксплуатационные расходы включают расходные материалы, запчасти, оплату электроэнергии и водоснабжения. Они не включают оплату труда, аренду, амортизацию оборудования и услуги. Прямые затраты на эксплуатацию гидроабразивного оборудования составляют около 1400–2000 руб/ч.

Затраты на оплату труда связаны с эксплуатацией машины, включая время обработки заготовок, готовых деталей и остатков, а также с управлением техники во время её работы. Чтобы оценить эти затраты, необходимо знать почасовую стоимость оператора, количество времени, необходимое для выполнения изделия на гидроабразивной установке, процент времени, выделенного для настройки станка, и процент времени, которое оператор фактически затрачивает при работе на машине. Все эти факторы могут быть различными в зависимости от конкретного изделия. Стоимость гидроабразивной резки может быть расчётной исходя из инвестиций, эксплуатационных и трудовых затрат. Стоимость гидроабразивной резки в час может быть рассчитана по уравнению [2]

$$C = C_{и} + C_{эп} + C_{т}, \quad (1)$$

где C – стоимость гидроабразивной резки в час, руб/ч; $C_{и}$ – инвестиционные затраты, руб/ч; $C_{эп}$ – эксплуатационные расходы, руб/ч; $C_{т}$ – стоимость рабочей силы, руб/ч.

Инвестиционные затраты связаны с периодом амортизации оборудования и рассчитываются по формуле

$$C_{и} = I / (D \cdot L_{а}) \quad (2)$$

где I – стоимость капитальных вложений в оборудование, руб.; D (год) – период амортизации; $L_{а}$ (ч/г.) – коэффициент использования установки.

Расчет эксплуатационных расходов является специфическим для гидроабразивного процесса. Эксплуатационные расходы включают в себя затраты

на потребление электроэнергии, расход воды при резке, расход абразива, расход изнашиваемых деталей и обслуживание машины:

$$C_{эп} = C_э + C_в + C_a + C_{и} + C_{то}, \quad (3)$$

где $C_э$ – стоимость электрической энергии, руб/ч; $C_в$ – стоимость воды, руб/ч; C_a – стоимость абразива, руб/ч; $C_{и}$ – стоимость изнашиваемых деталей, руб/ч; $C_{то}$ – стоимость технического обслуживания, руб/ч.

Стоимость электрической энергии может быть рассчитана по формуле

$$C_э = C_{уэ} \cdot E, \quad (4)$$

где $C_{уэ}$ – удельная стоимость электрической энергии, руб/кВт·ч; E – потребление электроэнергии, кВт.

Стоимость воды может быть рассчитана по формуле

$$C_в = C_{ув} \cdot Q_в, \quad (5)$$

где $C_{ув}$ – удельная стоимость воды, руб/м³; $Q_в$ – потребление воды, м³/ч.

Стоимость абразива может быть рассчитана по формуле

$$C_a = C_a \cdot Q_a, \quad (6)$$

где C_a – единичная абразивная стоимость, руб/кг; Q_a – расход абразива, кг/ч.

Стоимость изнашивающихся деталей можно рассчитать по формуле

$$C_{и} = C_1 + C_2 = (c_1 / L_1) + (c_2 / L_2) \quad (7)$$

где C_1 – стоимость износа фильеры в час, руб/ч; C_2 – стоимость износа абразивного сопла в час, руб/ч; c_1 – цена фильеры, руб/часть; L_1 – срок службы фильеры, ч/часть; c_2 – цена абразивного сопла, руб/часть; L_2 – срок службы абразивного сопла, ч/часть.

Стоимость обслуживания может быть рассчитана по формуле

$$C = M/L_a \quad (8)$$

где M – расходы на техническое обслуживание в год, руб/год; L_a – коэффициент использования машины, ч/год.

Стоимость гидроабразивной резки в час в соответствии с расчетами от (1) до (8) рассчитывается по формуле

$$C = I/(D \cdot L_a) + C_{уэ} \cdot E + C_{ув} \cdot Q_в + C_a \cdot Q_a + C_{и} + (M/L_a) + C_{т}. \quad (9)$$

Стоимость производства может быть рассчитана по формуле

$$C_m = C \cdot t_m, \quad (10)$$

где C – себестоимость, руб; t_m – время изготовления, ч.

Время изготовления можно рассчитать по формуле

$$t_m = L/V, \quad (11)$$

где L – длина резания; м; V – скорость резания, м/ч.

Стоимость гидроабразивной резки за метр определяется как

$$C' = C/V, \quad (12)$$

где C' – стоимость гидроабразивной резки за метр, руб/м.

В таблице представлен пример расчета стоимости гидроабразивной резки заготовки из углеродистой стали толщиной 10 мм.

Пример расчета стоимости гидроабразивной резки

| Статьи затрат | Гидроабразивная резка | | |
|--|-----------------------|---------|----------|
| | | | |
| Мощность насоса, кВт | 37 | 37 | 75 |
| Давление, мПа | 380 | 414 | 414 |
| Диафрагма/форсунка | 14/43 | 14/43 | 14/43 |
| Скорость резки, м/ч | 9,3 | 11,7 | 11,7 |
| Инвестиционная стоимость I , руб. | 8400000 | 8400000 | 10500000 |
| Амортизационный период D , лет | 5 | 5 | 5 |
| Использование машины L_a , ч/год | 4000 | 4000 | 4000 |
| Инвестиционные расходы C_d , руб/ч | 420 | 420 | 525 |
| Эл. потребляемая мощность E , кВт | 45 | 45 | 85 |
| Стоимость ед. эл. энергии c_e , руб/кВт·ч | 7,35 | 7,35 | 7,35 |
| Затраты на электроэнергию C_e , руб/ч | 330,4 | 330,4 | 624,4 |
| Расход воды Q_v , м ³ /ч | 0,20 | 0,24 | 0,24 |
| Стоимость единицы воды c_v , руб/м ³ | 35 | 35 | 35 |
| Расходы на воду C_v , руб/ч | 7,0 | 8,4 | 8,4 |
| Расход абразива Q_a , кг/ч | 33 | 42 | 42 |
| Стоимость единицы абразива c_a , руб/кг | 49 | 49 | 49 |
| Затраты на абразив C_a , руб/ч | 1617 | 2058 | 2058 |
| Стоимость износа диафрагмы C_n , руб/ч | 4,20 | 5,46 | 5,46 |
| Стоимость износа сопла C_m , руб/ч | 42,0 | 54,6 | 54,6 |
| Затраты на износ деталей C_r , руб/ч | 46,2 | 60,2 | 60,2 |
| Стоимость обслуживания в год M , руб/год | 350000 | 350000 | 350000 |
| Стоимость технического обслуживания C_M , руб/ч | 87,5 | 87,5 | 87,5 |
| Стоимость рабочей силы, руб/ч | 350 | 350 | 350 |
| Гидроабразивная стоимость в час, руб/ч | 2858,1 | 3314,5 | 3717,5 |
| Гидроабразивная стоимость за метр, руб/м | 307,3 | 283,5 | 319,9 |
| Материал заготовки: углеродистая сталь; толщина: 10 мм | | | |

Заключение

Гидроабразивная обработка – это процесс, с помощью которого можно разрезать практически любой известный материал, что делает эту технологию одним из самых универсальных и доступных способов резки. При ее внедрении могут быть получены детали высокой точности, которые обычно не требуют дальнейшей обработки.

Гидроабразивная резка в настоящее время является наиболее экономически эффективным способом резки неметаллических и металлических материалов. Знание инвестиционных, эксплуатационных и расходов на техническое обслуживание – это основа для инвестиций в гидроабразивную резку. Для различных машин гидроабразивной резки типичные инвестиционные и эксплуатационные расходы зависят от мощности насоса как самого важного компонента системы. По сравнению с традиционными методами высокие инвестиционные и эксплуатационные расходы на абразивную резку должны быть обоснованы в соответствии с экономическими критериями и соответствующими финансовыми преимуществами.

Представленная математическая модель определения стоимости гидроабразивной резки неметаллических тугоплавких и металлических материалов включает в себя конкретные параметры процесса гидроабразивной резки. Пример расчета стоимости резки углеродистой стали с помощью гидроабразивного оборудования показывает, что стоимость за метр уменьшается с увеличением давления воды. Стоимость одного метра резания многоголовых систем мощностью 75 кВт составляет чуть больше стоимости одного метра резания одноголовочных систем мощностью 37 кВт.

Список литературы

1. О возможности гидроабразивной резки синтетических минеральных сплавов (базальтового литья) и натурального камня / А.М. Игнатова, Р.Н. Шаритнов, О.В. Сидоров, О.В. Лапчинская // Базальтовые технологии. – 2014. – № 12. – С. 71.
2. Игнатова А.М., Игнатов М.Н., Шаритнов Р.Н. Классификация основных элементов технологической системы гидроабразивного резания для обеспечения точности и качества поверхности реза // Машиностроение: сет. электрон. науч. журн. – 2015. – Т. 3, № 1. – С. 17–20.
3. Балабанов С.К., Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Использование гидроабразивной резки в изготовлении художественных изделий из стеклокристаллических материалов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч. / под ред. А.В. Гадюкиной. – Новосибирск, 2018. – С. 302–306.

4. Игнатов М.Н., Корецкая Ю.В., Игнатова А.М. Оценка шероховатости поверхности реза при гидроабразивной обработке методом анализа изображений // Инновационные технологии в металлообработке: сб. науч. тр. всерос. науч.-практ. заоч. конф. с междунар. участием, посвященной 90-летию профессора Л.В. Худобина / отв. ред. Н.И. Веткасов. – Ульяновск, 2019. – С. 176–182.
5. Игнатова А.М., Балабанов С.К., Игнатов М.Н. Исследование зонированности поверхности гидроабразивного реза конструкционной стали обыкновенного качества методом анализа изображений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 83–90.
6. Ковшов А.Н. Назаров Ю.Ф., Ярославцев В.М. Нетрадиционные методы обработки материалов: электрон. мультимедийное учеб. пособие. – М.: Изд-во МГОУ, 2007.
7. Галиновский А.Л. Оценка технико-экономической эффективности гидроабразивного резания конструкционных материалов / Галиновский А.Л., Елфимов В.М. // Машиностроение и инженерное образование. 2008. №1. С. 22–32.
8. Chillman A., Ramulu M., Hashish M. Waterjet and water-air jet surface processing of a titanium alloy: a parametric evaluation // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2010. – Vol. 132. – No. 1. – P. 011012. DOI: 10.1115/1.4000837.
9. Грищенко Т.А., Рябкова Н.М., Тарабанова В.В., Речицкий В.А. Применение гидроабразивной резки при обработке деталей из ПКМ // Проблемы и перспективы развития малых городов Приморского края: материалы студ. науч.-практ. конф., Дальнегорск, 22 апр. 2016 / Дальневосточный федеральный университет; под общ. ред. Н.В. Лисичкиной. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. С. 70–75.
10. Loktiushina, Y. Influence of the working fluid properties on water jet cannon efficiency / Y. Lok-tiushina, A.N. Semko // Computers & Fluids. – 2014. – Т. 103. – P. 166–174.
11. Добровольский И.В., Лях М.М. Выбор оптимальных режимов гидроабразивного резания металла // Экспозиция Нефть Газ. 2016. №4 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-optimalnyh-rezhimov-gidroabrazivnogo-rezaniya-metalla> (дата обращения: 20.11.2019).
12. Коржов Е.Г. Некоторые особенности водоструйной обработки материалов – waterjet-технология // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. №3. С. 273–287.

Получено 14.02.2020

Балабанов Константин Сергеевич – студент, механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: iampstu@gmail.com.

Научный руководитель **Игнатов Михаил Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов, механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: imnpstu@gmail.com.

Консультант **Игнатова Анна Михайловна** – доктор технических наук, Пермский краевой центр охраны труда, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: iampstu@gmail.com.

Консультант **Ленина Валентина Васильевна** – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и управления промышленным производством, гуманитарный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail.