

Шабает О.Е., докт. техн. наук (ДонНТУ)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОМБАЙНОВОЙ ПРОХОДКИ ВЫРАБОТКИ

Обгрунтовані маса, ресурс і потужність приводу виконавчого органу прохідницького комбайна, що забезпечують підвищення темпів проходки. Показано, що реалізація мехатронної конструкції комбайна дозволить знизити вимоги до потужності приводу виконавчого органу і маси на 40-60 % для всього діапазону застосування комбайнів з різцевим робочим інструментом.

Обоснованы масса, ресурс и мощность привода исполнительного органа проходческого комбайна, обеспечивающие повышение темпов проходки. Показано, что реализация мехатронной конструкции комбайна позволит снизить требования к мощности привода исполнительного органа и массе на 40-60 % для всего диапазона применения комбайнов с резовым рабочим инструментом.

Grounded the mass, resource, and power of the drive of the cutting machine performing organ, providing the increase of the tempo of the working face. Shown that the realization of the cutting machine mechatronic construction allows to decrease the demands for the drive power of the performing organ and mass up to 40-60 percent for the range of the cutting machine usage with the cutting working instrument.

КС: мехатроника, проходческий комбайн, математическая модель, рабочий процесс, темп проходки, ресурс.

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. В настоящее время требует решения задача создания угледобывающих предприятий типа «лава–шахта» с увеличением добычи угля из очистного забоя до уровня 10 000 т/сут и более. Для достижения такой добычи важно обеспечить своевременную подготовку очистных забоев на основе ускорения темпов проведения подготовительных выработок.

В результате сравнительного анализа технических характеристик последних моделей проходческих комбайнов как отечественного, так и зарубежного производства обнаружилось, что общая энерговооруженность комбайнов среднего типа (масса 30–45 т) составляет порядка 170–230 кВт при мощности привода резания 75–140 кВт [1]. Данные показатели не могут рассматриваться как окончательные и требуют уточнения с учетом необходимости существенного повышения темпов проходки выработок [2, 3], а также перспектив развития выемочной техники [4], комплексной взаимосвязи и параллельности во времени ведения очистных и подготовительных работ на горнодобывающем предприятии. В то же время экспериментально установлено [5], что производительность разрушения горного массива проходческим комбайном среднего типа обеспечивается на среднем уровне в 38% и не более 60% от потенциально возможной производительности вследствие неэффективного управления. Повышение эффективности использования потенциальных возможностей проходческих комбайнов можно обеспечить на основе мехатронного подхода к их созданию, предусматривающего параллельное проектирование силовых и управляющих систем машины и компьютерное управление ее рабочими процессами [6, 7].

Анализ исследований и публикаций. К основным принципам мехатроники относятся:

- системное объединение элементов различной физической природы и функционального назначения;
- сбор и накопление информации о внешней среде и состоянии технического объекта;
- интеллектуализация управления рабочими процессами.

В угольном машиностроении вопросы использования принципов мехатроники впервые рассмотрены в 1997-2004 гг. [8]. В этих работах было сформулировано концептуальное положение о необходимости новой философии при проектировании сложных горных машин на основе мехатронного подхода. Развитию мехатронных подходов при создании горных машин посвящается все большее количество научных работ. Так, в работе [9] на основе анализа специфических особенностей применения горных машин разработаны функциональные модели мехатронной системы очистного комплекса и составляющих его мехатронных агрегатов – горных машин, рассмотрены особенности и методологические основы проектирования комплекса синергетически связанных между собой мехатронных машин, обеспечивающих механизацию подземной добычи угля при высокой степени безопасности работ.

Работа [10] направлена на создание методов и моделей оптимального проектирования мехатронных подсистем привода проходческих комбайнов. Однако на самом первом этапе при разработке F-модели не учитываются такие весьма существенные функции мехатронного комбайна, как:

- обеспечение автоматизированного выбора рациональной схемы обработки забоя;
- адаптивная оптимизация режимов разрушения забоя исполнительным органом;
- исключение перебора породы по контуру выработки;
- максимально быстрое крепление выработки в непосредственной близости к забою;
- прогнозирование отказов оборудования и др.

Следует отметить, что необходимым условием эффективного функционирования мехатронной горной машины, обеспечивающим новое качество функционирования, является интеллектуализация управления рабочими процессами. Именно интеллектуализация позволяет обеспечить эффективную адаптацию рабочего процесса горной машины к изменчивым условиям ее эксплуатации. В этих условиях структура и параметры мехатронной горной машины должны определяться на стадии проектирования совместно с обоснованием рациональных алгоритмов ее функционирования и управления. Этому фактору не уделяется в настоящее время достаточного внимания.

Целью данной статьи является обоснование основных макроуровневых параметров проходческого комбайна – его массы, ресурса и мощности привода исполнительного органа, обеспечивающих требуемые темпы проходки с учетом фактического уровня эффективности использования его потенциальных возможностей, а также перспектив применения мехатронного подхода к проектированию таких машин.

Изложение материала и результаты исследований. Между массой M и мощностью привода исполнительного органа (ИО) P проходческого комбайна (рис. 1) существует корреляционная связь:

$$M = k_1 P + k_0,$$

где $k_0 = 10,7 \text{ т}$, $k_1 = 0,27 \text{ т/кВт}$ – коэффициенты уравнения регрессии. При этом доверительный интервал с вероятностью 95% составляет $[M - 2\sigma_M, M + 2\sigma_M]$, где $\sigma_M = 13,6 \text{ т}$ – среднеквадратическое отклонение.

Для прогнозирования требуемых параметров проходческого комплекса была разработана математическая модель процесса комбайновой проходки выработки с учетом следующих допущений:

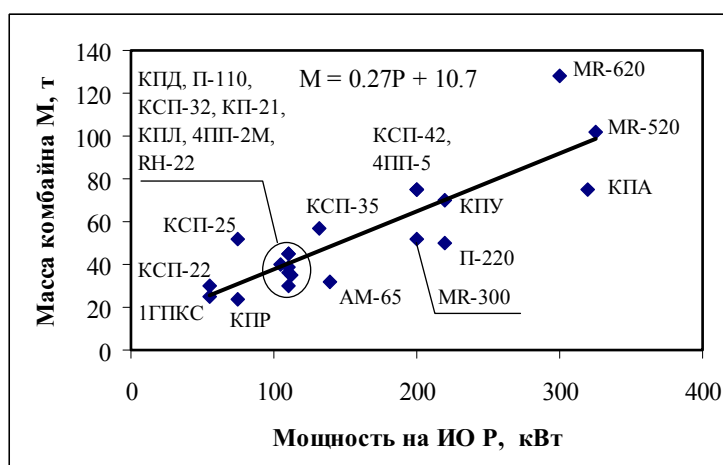


Рис. 1. Корреляция между энерговооруженностью и металлоемкостью проходческих комбайнов

- фактическое значение наработки комбайна до капитального ремонта - величина постоянная и соответствует паспортному значению ресурса для работы по породам соответствующей крепости;
- коэффициенты готовности и организации работ – постоянные в пределах рассматриваемого временного интервала проходки выработки;
- при неизменной технологии ведения проходческих работ длительность не совмещенных с разрушением забоя вспомогательных операций на 1 м проходки выработки – величина постоянная (не зависит от темпа проходки);
- масса комбайна линейно зависит от мощности привода его исполнительного органа и не зависит от диапазона площади сечений выработок, на который рассчитан комбайн, а также конструктивных решений его узлов.

На основании приведенных допущений модель процесса комбайновой проходки выработки имеет вид:

$$\begin{cases}
 V_c = L / (n_{pd} L V_m^{-1} - T_{nb} - T_{m-d} n_{m-d}); & n_{m-d} =] L S k_s / R [+ 1; \\
 Q_T = \begin{cases}
 V_c S k_s / 60 T_c k_m & \text{— при ускорении или совмещении операций;} \\
 V_c S k_s / 60 T_c [k_{ope} k_z + V_c V_{c0}^{-1} (k_m - k_{ope} k_z)] & \text{— при отсутствии ускорения} \\
 & \text{или совмещения операций;}
 \end{cases} \\
 (P/W) = 60 Q_T / k_{up}; & P = (P/W) W k_w; & M = k_1 P + k_0,
 \end{cases}$$

где V_c – суточный темп проходки, м/сут; L – длина выработки, м; n_{pd} – число рабочих дней в месяц; V_m – месячный темп проходки, м/мес; T_{nb} – время подготовки выработки к монтажу проходческого комплекса, сут; T_{m-d} – длительность монтажа/демонтажа проходческого комплекса, сут; n_{m-d} – число монтажей–демонтажей комплекса за время проходки выработки; S – площадь сечения выработки в проходке без перебора, м²; k_s – коэффициент перебора породы по контуру выработки, учитывающий превышение размера обрабатываемого сечения по сравнению с требуемым; R – ресурс комбайна, м³; Q_T – теоретическая производительность разрушения забоя исполнительным органом комбайна, м³/мин; T_c – длительность рабочего времени в сутки, час; k_m – коэффициент машинного времени; k_{ope} – коэффициент, учитывающий простои комбайна из-за несовершенства организации работ; k_z – коэффициент готовности комбайна; V_{c0} – базовое значение суточного темпа проходки (принимается по опыту эксплуатации комбайна в аналогичных условиях и используется для учета изменения k_m вследствие изменения соотношения времени разрушения забоя и времени несовмещенных сопутствующих операций при неизменной технологии проходки), м/сут; (P/W) – мощность привода резания, приведенная к единице удельных энергозатрат разрушения забоя; P – мощность привода исполнительного органа, кВт; k_{up} – коэффициент использования установленной мощности двигателя привода исполнительного органа; W – удельные энергозатраты процесса разрушения забоя исполнительным органом в оптимальном режиме, кВтч/м³; k_w – коэффициент удельных энергозатрат разрушения забоя, учитывающий их повышение вследствие отклонения режима разрушения от оптимального; M – масса комбайна, т; k_0 , k_1 – коэффициенты уравнения регрессии массы комбайна от энерговооруженности его исполнительного органа.

Модель увязывает между собой основные макроуровневые параметры комбайна – энерговооруженность исполнительного органа, массу и ресурс с основным показателем его технического уровня – месячным темпом проходки выработки.

Для обоснования направлений совершенствования проходческих комбайнов на базе разработанной модели были проведены исследования для следующих условий: требуемый темп проходки 300 и 500 м/мес; длина проходимой выработки 1000 и 2000 м; площадь сечения

выработки в проходке 16 и 25 м²; среднее временное сопротивление одноосному сжатию разрушаемых пород 40 и 100 МПа (соответственно удельные энергозатраты процесса разрушения забоя 2 и 11 кВтч/м³). Для указанных условий оценивались макроуровневые параметры комбайна энергомеханической (традиционной) и мехатронной конструкций. При этом рассматривались следующие технологии проходческих работ:

- существующая технология без совмещения вспомогательных операций проходческого цикла с процессом разрушения забоя исполнительным органом. При этом длительность вспомогательных операций на 1 м проходки остается неизменной, а коэффициент машинного времени с увеличением суточного темпа проходки снижается;
- существующая технология без совмещения вспомогательных операций проходческого цикла и с ускорением выполнения вспомогательных операций на 1 м проходки пропорционально теоретической производительности разрушения забоя. При этом с увеличением суточного темпа проходки коэффициент машинного времени остается неизменным;
- технология проходки, обеспечивающая совмещение вспомогательных операций проходческого цикла с процессом разрушения забоя. В этом случае коэффициент машинного времени стремится к 1.

Для реализации модельных исследований процесса комбайновой проходки выработки необходима оценка параметров модели. Перебор породы по контуру выработки составляет до 20% от площади сечения выработки вчере $(k_S=1,2)$. Снижение k_S до 1 может быть обеспечено на основе повышения качества реализации сложных и точных движений исполнительного органа, что характерно для мехатронных машин [6, 7]. Среднее значение коэффициента машинного времени согласно результатам экспериментальных исследований [5] составляет $0,18 \pm 0,04$ при суточном темпе проходки 4 м/сут. Из опыта эксплуатации проходческих комплексов k_M находится в пределах от 0,2 до 0,4, причем большие значения обеспечиваются для более энерговооруженных комбайнов.

Коэффициент машинного времени наряду со степенью совершенства технологии проходческих работ отражает уровень организации работ и надежность комбайна. Так как в каждом конкретном забое длительность несомещенных технологических операций проходческого цикла из расчета на 1 м проходки практически постоянна, колебания значений сменного коэффициента машинного времени обусловлены сбоями в организации работ (k_{opr}) и отказами оборудования (k_z). Поэтому максимальное зарегистрированное значение k_M соответствует работе без отказов и непроизводительных простоев, следовательно, $k_{opr} k_z = k_{Mcp} / k_{Mmax}$, где k_{Mcp} , k_{Mmax} – соответственно среднее и максимальное зарегистрированное значение сменного коэффициента машинного времени.

Для выявления путей повышения темпа проходки необходимо более подробно рассмотреть формирование коэффициента машинного времени k_M . Коэффициент машинного времени проходческого комбайна может быть рассчитан по зависимости

$$k_M = k_z k_{opr} - \frac{1}{T_{сут}} (T_{об} + T_{кр} + T_{зи} + T_{нм}),$$

где $T_{сут}$ - суточное плановое время работы по проходке выработки комбайном, мин; $T_{об}$ - суточные затраты времени на обслуживание комбайна в течение рабочих смен, не совмещенные с разрушением забоя, мин; $T_{кр}$ - суточные затраты времени на установку крепи в течение рабочих смен, не совмещенные с разрушением забоя, мин; $T_{зи}$ - суточные затраты времени на замену изношенного режущего инструмента в течение рабочих смен, не совмещенные с разрушением забоя, мин; $T_{нм}$ - суточные затраты времени на подачу и маневрирование комбайна в течение рабочих смен, не совмещенные с разрушением забоя, мин.

Суточные, не совмещенные с работой исполнительного органа затраты времени могут быть рассчитаны по формулам

$$T_{об} = \tau_{обсл} V_{сум} k_s S ; \quad T_{кр} = \tau_{креп} V_{сум} ; \quad T_{зи} = q_{резц} \tau_{зр} V_{сум} k_s S ; \quad T_{нм} = \tau_{ман} V_{сум} ,$$

где $q_{резц}$ - расход резцов (на кубометр разрушенной породы), шт./м³; $\tau_{креп}$, $\tau_{зр}$, $\tau_{обсл}$, $\tau_{ман}$ - удельные затраты времени: на анкерование кровли (на метр проходки, мин/м); на замену резца (мин/шт.); на обслуживание комбайна (на кубометр разрушенной породы, мин/м³); на маневры комбайна (на метр проходки, мин/м).

При анализе принимались следующие значения параметров: длительность смены $t_{см} = 360 \text{ мин}$, в том числе затраты времени за смену: на разрушение забоя исполнительным органом $t_{но} = 150 \text{ мин}$; на маневры комбайна $t_{ман} = 12 \text{ мин}$; на обслуживание комбайна $t_{обсл} = 30 \text{ мин}$; на замену резцов на исполнительном органе $t_{зр} = 12 \text{ мин}$; на анкерование кровли (включая маневры площадки) $t_{креп} = 156 \text{ мин}$. С учетом приведенных данных удельные затраты времени на анкерование кровли $\tau_{креп} = 39 \text{ мин / м}$; на замену резца $\tau_{зр} = 2 \text{ мин / шт.}$; на обслуживание комбайна $\tau_{обсл} = 0,26 \text{ мин / м}^3$; на маневры комбайна $\tau_{ман} = 3 \text{ мин / м}$.

Таким образом, повышение коэффициента машинного времени может быть обеспечено за счет увеличения времени разрушения забоя исполнительным органом в течение смены путем максимального сокращения и совмещения других операций проходческого цикла (удельный вес этих операций приведен на рис. 2). При этом возможными направлениями являются:

- применение более стойкого инструмента, что позволит сократить затраты времени на замену резцов;
- применение призабойной механизированной крепи, что позволит крепить кровлю выработки анкерной крепью за зоной работы комбайна параллельно с разрушением забоя;
- реализация конструкции, требующей минимального обслуживания в течение смены.

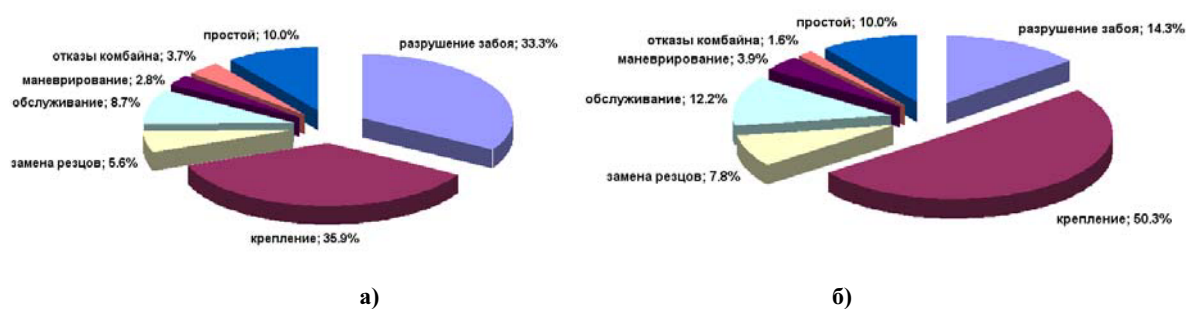


Рис. 2. Структура затрат времени по операциям проходческого цикла при существующей технологии проходки выработки сечением 25 м² при мощности привода резания 300 кВт (а) и 1000 кВт (б)

Согласно [5] $k_{орз} k_z = 0,53$. Энергоемкость процесса разрушения забоя определяется физико-механическими характеристиками разрушаемых пород, параметрами режущего инструмента и исполнительного органа а также параметрами режима разрушения забоя – скоростями подачи и вращения коронки, глубиной ее зарубки и шагом фрезерования. Выбор рациональных параметров и их точное воспроизведение в процессе обработки забоя позволяет снизить удельные энергозатраты по сравнению с ручным управлением комбайном, как минимум, на 20 % [6, 7]. Таким образом, можно принять коэффициент удельных энергозатрат k_w при традиционной и мехатронной конструкция комбайна соответственно 1,2 и 1. Коэффициент $k_{иР}$ характеризует недоиспользование установленной мощности привода исполнительного органа из-за несовершенства принятого способа регулирования нагрузки на двигатель привода исполнительного органа в заданном диапазоне изменения прочностных характеристик разрушаемых пород. В работе [5] экспериментально определено среднее значение $k_{иР} = 0,74 \pm 0,05$ при максимальном временном сопротивлении пород одноосному сжатию 80 МПа. Для забоев с менее прочными породами это значение будет несколько ниже. В то же время применение интеллектуального управления позволяет повысить $k_{иР}$ практически до 1 [6, 7].

Для наглядности и упрощения расчетов, связанных с использованием разработанной выше математической модели процесса комбайновой проходки выработки, была разработана номограмма, позволяющая осуществлять выбор основных макроуровневых параметров проходческого комбайна, исходя из заданного темпа проходки выработки. На рис. 3 приведена номограмма, соответствующая условиям: площадь сечения выработки – 16 м^2 ; длина выработки – 1000 м. Для построения номограммы приняты значения базовых темпов проходки $V_{с0} = 4, 6, 8 \text{ и } 10 \text{ м/сут}$ при соответствующих коэффициентах машинного времени $k_m = 0,2; 0,3; 0,4 \text{ и } 0,5$. Номограмма позволяет выполнять анализ прямым и обратным ходом.

При прямом ходе (рис. 3, сплошные стрелки) исходным является требуемый месячный темп проходки. С учетом различного возможного числа капитальных ремонтов за время проведения выработки определяется требуемый суточный темп проходки. По суточному темпу проходки с учетом прогнозируемого значения k_m определяется требуемая теоретическая производительность комбайна, по которой с учетом коэффициента использования мощности устанавливается ряд значений приведенной мощности (P/W). Исходя из физико-механических

свойств разрушаемых пород (средневзвешенное значение $\sigma_{сж}$), прогнозируются мощность привода исполнительного органа и масса комбайна. Из полученной совокупности комбинаций ресурса, мощности и массы отбираются технически реализуемые. В качестве технически реализуемых принимались комбинации с мощностью привода не более 1000 кВт и ресурсом, превышающим типичные значения не более чем в 2–3 раза. Обратный ход (рис. 3, пунктирные стрелки) выполняется на основе известной мощности привода исполнительного органа комбайна. При этом определяется месячный темп проходки выработки при различных прочностях разрушаемых пород и соответствующих им ресурсах.

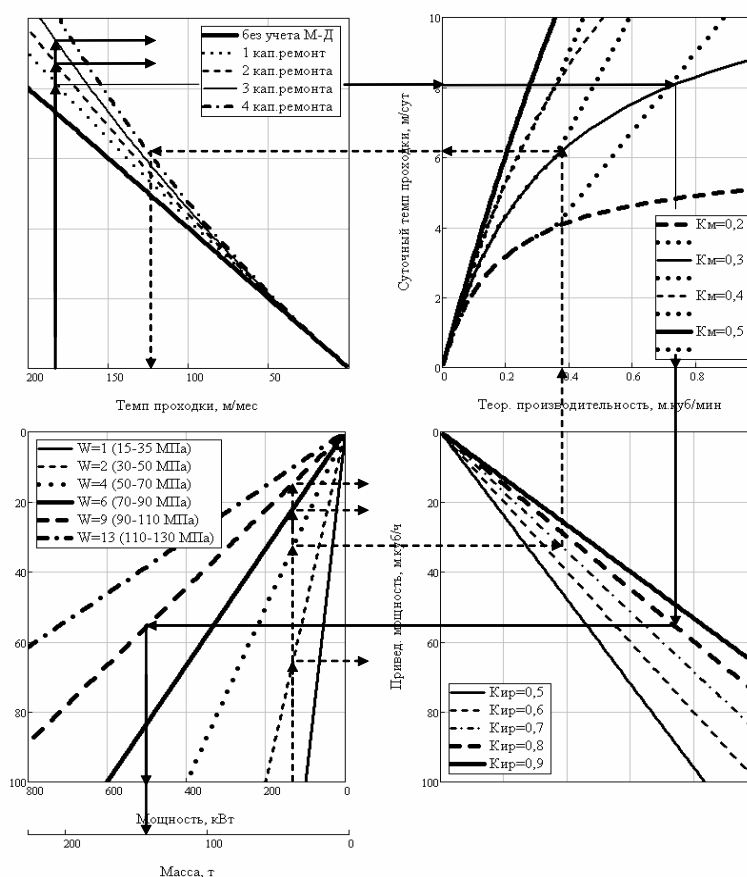


Рис. 3. Номограмма выбора макроуровневых параметров проходческого комбайна

При модельных исследованиях учитывались следующие функциональные отличия мехатронной конструкции от традиционной: повышение ресурса при неизменной металлоемкости (не менее чем в 2 раза [7]); увеличение коэффициента использования мощности привода исполнительного органа с 0,6–0,7 до 0,95; снижение удельных энергозатрат процесса разрушения забоя на 20 %; исключение перебора породы по контуру выработки.

Анализ результатов модельных исследований позволил установить следующее.

- Макроуровневые параметры проходческих комбайнов традиционной конструкции с учетом требований к увеличению темпов проходки и площади сечений выработок при характерных значениях коэффициента машинного времени 0,2–0,4 должны быть существенно повышены. Комбайн для проходки выработки площадью сечения порядка 16 м^2 по породам с $\sigma_{сж} = 100 \text{ МПа}$ и темпом 300 м/мес должен иметь мощность привода исполнительного органа

850–990 кВт и массу 240–280 т при ресурсе 10 тыс. м³ или соответственно 620–690 кВт и 180–200 т при ресурсе 20 тыс. м³. Темпы проходки 500 м/мес, а также 300 м/мес при площади сечения выработки порядка 25 м² требуют установки мощности привода исполнительного органа значительно более 1000 кВт, что технически трудно реализуемо.

• В случае повышения коэффициента машинного времени комбайна за счет ускорения и совмещения с разрушением забоя операций проходческого цикла при проведении выработки площадью сечения 16–25 м² по породам с $\sigma_{сж} = 100 \text{ МПа}$ для реализации темпа проходки 300 м/мес требуется мощность привода исполнительного органа не менее 250–420 кВт, масса комбайна составит не менее 80–130 т при ресурсе не менее 10–20 тыс. м³. В этих же условиях для реализации темпа проходки 500 м/мес требуемые минимальные значения макроуровневых параметров составят соответственно 470–730 кВт, 140–210 т и 10–30 тыс. м³.

• Реализация мехатронной конструкции комбайна, обеспечивающей заданный темп проходки, позволит снизить требования к мощности привода исполнительного органа и массе комбайна на 40–60 % для всего диапазона применения комбайнов с резцовым рабочим инструментом. При характерных для существующих комбайнов параметрах применение мехатронного подхода позволит повысить месячный темп проходки от 14 до 60%. В случае ускорения вспомогательных операций проходческого цикла на 1 м проходки пропорционально теоретической производительности разрушения забоя комбайном прирост темпа проходки более существенный – от 60 до 120%. Эффект усиливается для выработок большей площади сечения (примерно пропорционально увеличению площади сечения) и практически не зависит от длины проходимой выработки.

Выводы и направления дальнейших исследований. Разработаны метод и математическая модель процесса комбайновой проходки выработки, связывающая основные макроуровневые параметры комбайна – энерговооруженность исполнительного органа, массу и ресурс с основным показателем его технического уровня – месячным темпом проходки выработки. Модель и разработанные на ее основе номограммы могут быть использованы как для оценки темпа проходки выработки комбайном с заданными параметрами, так и для обоснования значений параметров комбайна, необходимых для реализации заданного темпа проходки выработки.

Литература

1. Горбатов П.А. Горные машины для подземной добычи угля // П.А.Горбатов, Г.В.Петрушкин, Н.М. Лысенко и др. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 669 с.
2. Семенченко А.К. Перспективы развития проходческих комбайнов: Горная техника-2006: каталог–справочник / А.К.Семенченко, О.Е.Шабаев, Д.А.Семенченко, Н.В. Хиценко. – СПб: ООО «Славутич». – С. 8–15.
3. Семенченко А.К. Перспективы создания проходческих комбайнов нового технического уровня: Горная техника-2005: каталог–справочник / А.К.Семенченко, О.Е.Шабаев, Д.А.Семенченко, Н.В. Хиценко. – СПб: ООО «Славутич». – С. 60–69.
4. Косарев И.В. Комплексная механизация очистных работ и тенденции ее развития / И.В.Косарев, Г.В.Андреев, Е.В.Приседский, А.И.Ильин // Решение научно–технических проблем при создании и внедрении современного горно–шахтного оборудования: сб. науч. прац. – Вып. 113. – Донецк: ГП «Донгипроуглемаш», 2008. – С. 62–73.
5. Шабаев О.Е. Экспериментальные исследования режимов работы исполнительного органа проходческого комбайна / О.Е.Шабаев, А.К.Семенченко, Н.В.Хиценко, Н.И. Стадник // Горное оборудование и электромеханика. – №10. –С.49–59.
6. Шабаев О.Е. Адаптивная оптимизация цикла обработки и параметров режима разрушения забоя проходческим комбайном избирательного действия по критерию темпа проходки / О.Е.Шабаев, А.К.Семенченко, Н.В.Хиценко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. научн. тр. – Вып. 39. – Донецк, 2010. – С.210–219.
7. Шабаев О.Е. Адаптивная оптимизация цикла обработки и параметров режима разрушения забоя проходческим комбайном избирательного действия по критерию ресурса / О.Е.Шабаев, А.К.Семенченко, Н.В.Хиценко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2010. – № 6. –С. 36–42.
8. Горбатов П.А. Особенности формирования структурных решений современных очистных комбайнов как сложных мехатронных систем / П.А. Горбатов, В.В. Косарев, Е.А. Воробьев // Современные пути развития горного оборудования и технологий переработки минерального сырья: сб. тр. междунар. конф. – Днепропетровск: НГАУ, 1997. – С.12–13.
9. Отличительные особенности машин современных механизированных комплексов / Н.И. Стадник, А.В. Сергеев, А.В. Мезников, В.П. Кондрахин // Решение научно–технических проблем при создании и внедрении современного горно–шахтного оборудования: сб. науч. прац. – Вып. 113. – Донецк: ГП «Донгипроуглемаш», 2008. –С. 111–132.
10. Горбатов П.А. Концептуальные положения и математическая модель оптимального проектирования мехатронных подсистем привода проходческих комбайнов / П.А. Горбатов, Н.М. Лысенко, М.Н. Лысенко // Горное оборудование и электромеханика. –2009. – №10 – М.: Новые технологии, 2009. – С. 34–40.

*Статья рекомендована к публикации
докт. техн. наук Семенченко А.К.*