

УДК 622.232

**О.Е. Шабаетв**, канд. техн. наук, доц., **А.К. Семенченко**, д-р техн. наук, проф., **Н.В. Хиценко**, канд. техн. наук, доц.,  
Донецкий национальный технический университет  
**Н.И. Стадник**, д-р техн. наук, первый зам. директора  
института «Донгипроуглемаш»

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА КПД**

*Получены средние значения и диапазоны возможных значений с доверительной вероятностью 0,95 коэффициентов машинного времени и использования мощности, удельных энергозатрат, теоретической производительности проходческого комбайна КПД в условиях АП «Шахта Белицкая». Установлена недостаточная эффективность использования потенциальных возможностей проходческого комбайна вследствие отклонения от рациональных режимов обработки забоя, недостаточного использования мощности привода и перебора породы по контуру выработки, обусловленных ручным управлением.*

**проходческий комбайн, коэффициент машинного времени, коэффициент использования мощности, удельные энергозатраты, теоретическая производительность, рабочий процесс, адаптивная оптимизация**

***Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.*** Потребность в повышении темпов проходки приводит к необходимости повышения производительности и надежности проходческой техники. Существующие математические модели и методы оптимального проектирования этих машин могут быть применены лишь при условии корректного задания режимов их работы, которые могут быть получены только в результате натурного эксперимента. Данные эксперимента также могут быть использованы при проверке адекватности математических моделей рабочих процессов и обосновании путей дальнейшего совершенствования проходческих комплексов.

***Анализ исследований и публикаций.*** Рабочий процесс проходческих комбайнов характеризуется значительным уровнем и высокой динамикой нагруженности элементов конструкции. Для получения сведений о рабочем процессе в настоящее время разработаны и внедряются устройства для непрерывной регистрации характеристик рабочего процесса, например, блок регистрации произошедших событий на комбайне [1]. Такая реализация натурного эксперимента, в отличие от известных методик лабораторного эксперимента [2] и натурного эксперимента с применением специальной измерительной

аппаратуры [3], установка которой требует изменения конструкции машины («тензокулак»), позволяет осуществлять эксперимент в реальных условиях в течение достаточно длительного времени, что позволяет получить статистически достоверные данные без ущерба для нормальной работы проходческого участка. В настоящее время такие данные отсутствуют в публикациях. Также отсутствуют методики, позволяющие по данным блока регистрации определить такие характеристики рабочего процесса как режим работы привода, коэффициент машинного времени, коэффициент использования мощности, удельные энергозатраты процесса разрушения забоя, теоретическая производительность комбайна.

**Постановка задачи.** Целью работы является экспериментальное получение и анализ характеристик рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна КПД в представительных условиях эксплуатации. Для достижения данной цели также необходима разработка методики обработки данных блока регистрации произошедших событий на комбайне.

**Изложение материала и результаты.**

*Условия проведения эксперимента*

Исследования проводились при прохождении проходческим комбайном КПД, оснащенного двигателем привода исполнительного органа мощностью 90 кВт с синхронной частотой вращения 1000 об/мин (рис. 1), вентиляционного штрека северной коренной лавы, пласта  $l^1_2$  АП «Шахта «Белицкая» ГП «Добропольеуголь» в период с 18.11.08 по 22.11.08. Структура забоя приведена на рис. 2. Выработка сечением  $13 \text{ м}^2$  в проходке крепилась арочной крепью с шагом 0,8 м. Суточный режим работы забоя – три рабочие смены по 6 часов и одна ремонтная.



Рисунок 1. – Проходческий комбайн КПД



Рисунок 2. – Структура забоя

### Измерительная аппаратура

Измерения тока двигателя привода исполнительного органа проводились посредством блока регистрации произошедших событий [1]. Схема подключения в силовую цепь электродвигателей приведена на рис. 3.

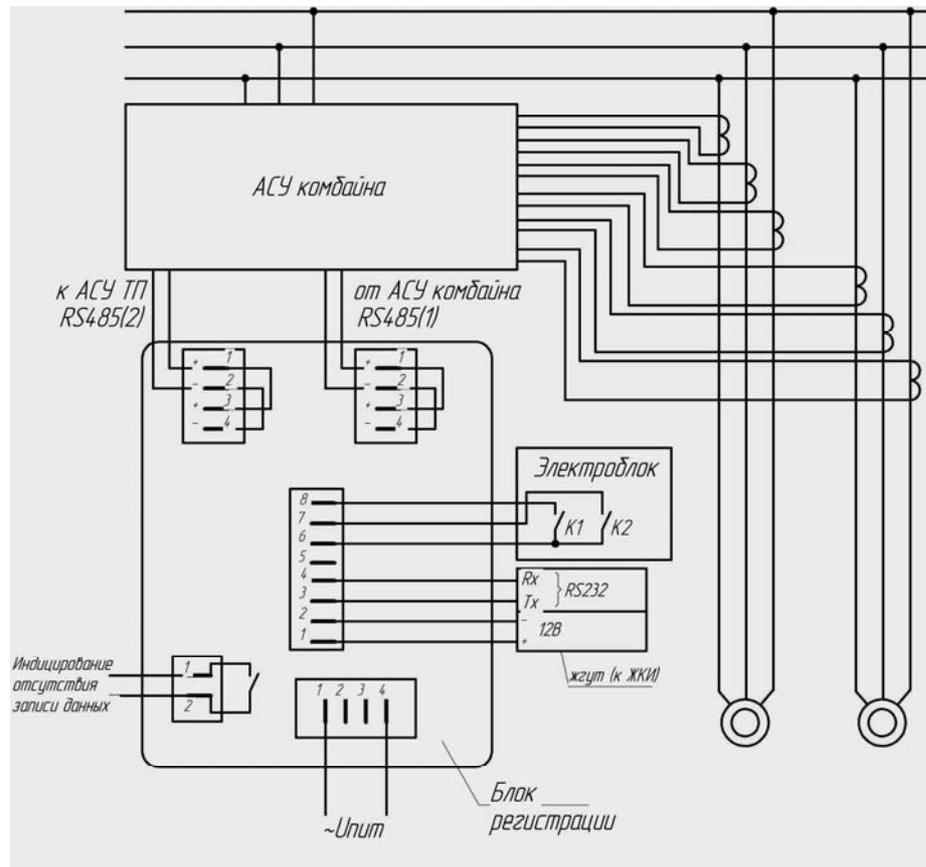


Рисунок 3. - Схема включения блока регистрации в силовую цепь

### Реализация эксперимента

Для проведения эксперимента была разработана методика, в соответствии с которой в течение 120 часов (5 суток) осуществлялась непрерывная регистрация с шагом 1 с действующего значения тока двигателя, усредненного за 1 с. С целью возможности дальнейшей обработки полученных массивов данных одновременно осуществлялся хронометраж работы комбайна. За период проведения эксперимента комбайном было пройдено 15,2 м выработки (соответственно посуточно: 2,4 м, 3,2 м, 3,2 м, 3,2 м, 3,2 м).

Пример реализации тока двигателя приведен на рис. 4. График построен в относительных единицах, за базу принят номинальный ток двигателя.

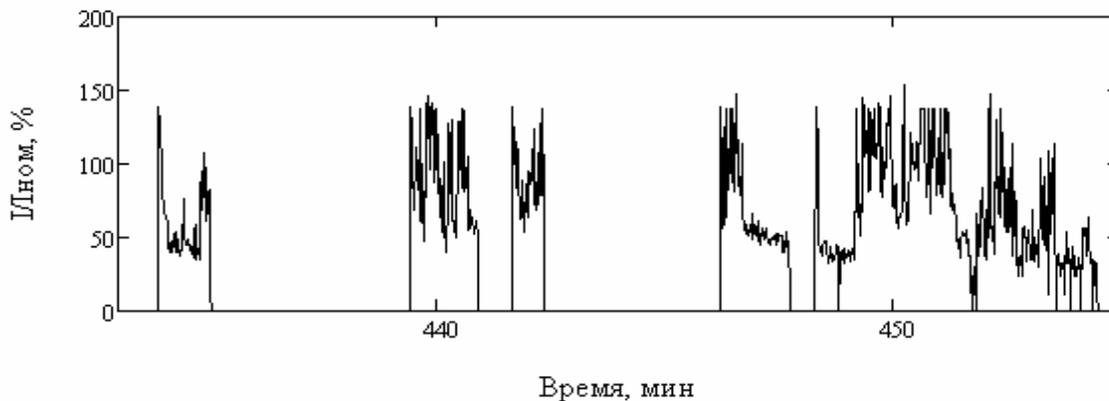


Рисунок 4. – Фрагмент записи тока двигателя

Согласно методике проведения эксперимента предусматривалось определение следующих характеристик:

а) для оценки интенсивности использования машины во времени в составе проходческого комплекса с учетом принятой технологии работ:

- коэффициент машинного времени за смену;

б) для оценки режима работы привода исполнительного органа (согласно [4]) в каждый момент времени его работы («скользящее среднее»):

- количество пусков приводного двигателя в час;

- продолжительность включения приводного двигателя за период времени 10 минут;

в) для оценки полноты использования тепловой мощности приводного двигателя:

- коэффициенты использования мощности, определяемые как отношение эквивалентной по нагреву двигателя мощности к номи-

нальному значению мощности двигателя за 10 минут («скользящее среднее») и за смену;

- средней за цикл обработки забоя коэффициент использования мощности двигателя (без учета пауз между включениями двигателя в пределах цикла);

г) для оценки эффективности разрушения забоя исполнительным органом:

- удельные энергозатраты процесса разрушения забоя за цикл обработки забоя, за сутки, а также за весь период проведения эксперимента;

д) для оценки совместного влияние удельных энергозатрат процесса разрушения забоя и уровня использования мощности приводного двигателя на эффективность работы комбайна:

- среднюю за цикл обработки забоя теоретическую производительность комбайна.

#### *Методика обработки эксперимента*

Ток двигателя, фиксируемый блоком регистрации, пересчитывался по зависимостям:

- для определения продолжительности включения:

$$ПВ(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \text{sign}(I(\tau)) d\tau,$$

где  $T$  - расчетный интервал времени, принятый равным 10 мин;

- для сменного коэффициента машинного времени:

$$K_M = \frac{1}{T_{см}} \int_{T_{см}} \text{sign}(I(t)) dt,$$

где  $T_{см}$  - длительность смены;

- для текущего значения коэффициента использования мощности двигателя

$$K_{uP}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left( \frac{I(\tau)}{I_{ном}} \cos(\varphi(I(\tau))) \right)^2 d\tau};$$

где  $\cos(\varphi(I))$  - зависимость коэффициента мощности двигателя от полного тока, полученная экспериментально для данного двигателя;

- для сменного коэффициента использования мощности двигателя

$$K_{uP_{cm}} = \sqrt{\frac{1}{T_{cm}} \int_{T_{cm}} \left( \frac{I(t)}{I_{ном}} \cos(\varphi(I(t))) \right)^2 dt};$$

- для удельных энергозатрат за цикл обработки забоя

$$W_{ци} = \frac{P_{ном}}{3600SB_{ци}} \int_{T_{ци}} \frac{I(t)}{I_{ном}} \cos(\varphi(I(t))) dt,$$

где  $P_{ном}$  - номинальная мощность двигателя привода исполнительного органа;  $S$  - площадь сечения выработки;  $B_{ци}$  - суммарная глубина зарубки исполнительного органа в  $i$ -том цикле.

Аналогично рассчитывались удельные энергозатраты за сутки и за время проведения эксперимента.

- для среднего за цикл обработки забоя коэффициента использования мощности двигателя (без учета пауз между включениями двигателя в пределах цикла)

$$K_{uP_{ци}} = \sqrt{\frac{1}{T_{ци}} \int_{T_{ци}} \left( \frac{I(t)}{I_{ном}} \cos(\varphi(I(t))) \right)^2 dt},$$

где  $T_{ци}$  - длительность  $i$ -го цикла без учета пауз между включениями двигателя в пределах цикла;

- для средней за цикл обработки забоя теоретической производительности:

$$Q_{ци} = \frac{P_{ном} K_{uP_{ци}}}{60W_{ци}}.$$

При расчете теоретической производительности не учитывается охлаждение двигателя в течение пауз между включениями двигателя в пределах цикла обработки забоя. Такое допущение обосновано тем, что имели место циклы обработки забоя, в течение которых приводной двигатель не выключался.

#### *Результаты эксперимента*

С использованием специализированного программного обеспечения были получены характеристики рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна КПД. При этом известными методами математической статистики были определены с доверительной вероятностью 0,95 диапазоны средних и возможных значений коэффициентов машинного времени и использова-

ния мощности, а также удельных энергозатрат и теоретической производительности.

#### *Коэффициент машинного времени за смену*

На рис. 5 приведена диаграмма изменения сменного коэффициента использования комбайна в различные смены его работы. Смены 2, 6, 10, 14 и 18 являются ремонтными и к расчету не принимались. Среднее значение сменного коэффициента машинного времени составляло  $0,18 \pm 0,04$ , а диапазон возможных значений с доверительной вероятностью 0,95 – от 0,01 до 0,34. Высокая неравномерность значений коэффициента машинного времени говорит о наличии резервов в повышении темпа проходки за счет более четкой организации работ на участке. Вместе с тем, достаточно низкий уровень среднего значения коэффициента машинного времени говорит о значительной длительности операций проходческого цикла, не совмещенных с процессом разрушения забоя. Поэтому существенным резервом повышения темпа проходки является совершенствование технологии проходческого цикла и разработка соответствующего вспомогательного оборудования.

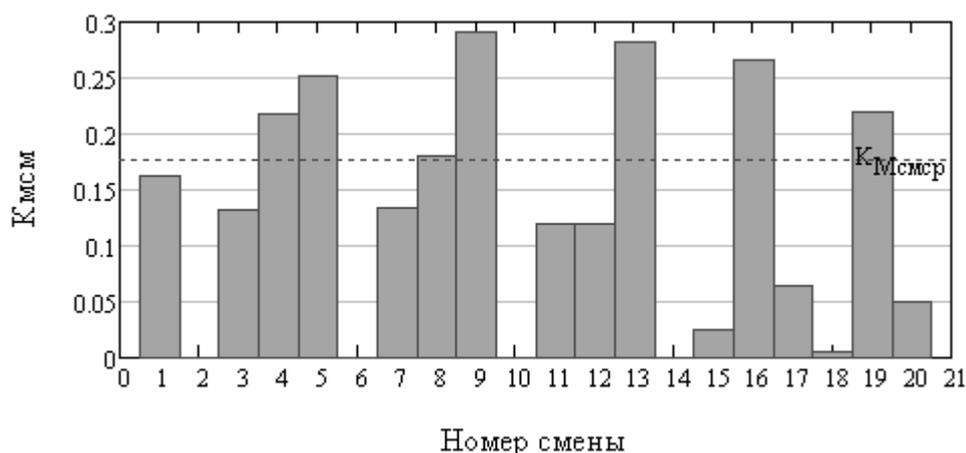


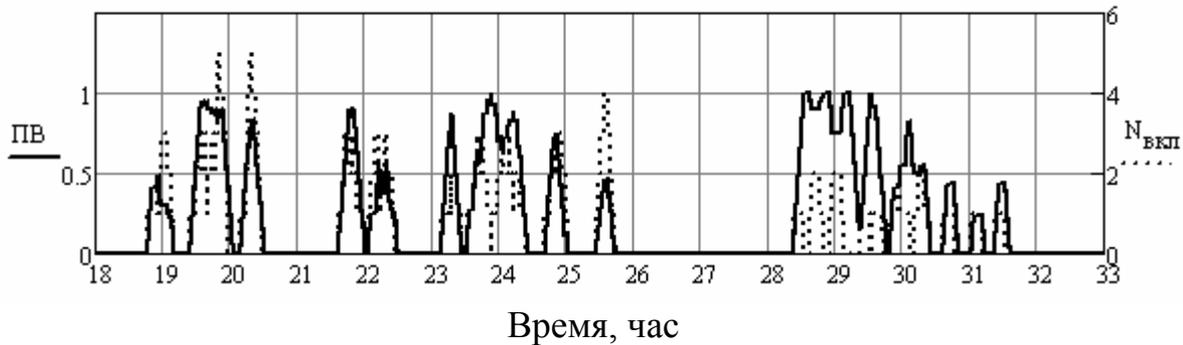
Рисунок 5. – Изменение сменного коэффициента использования комбайна

#### *Режим работы привода исполнительного органа*

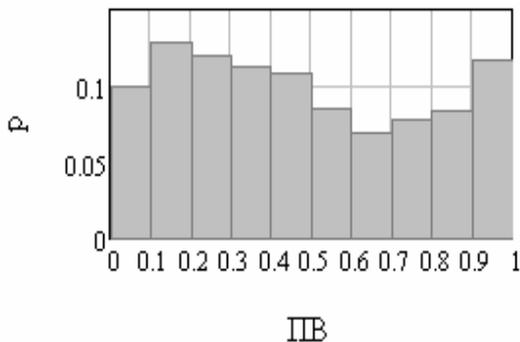
Анализ изменения продолжительности включения и количества пусков в час в ходе эксперимента (рис. 6,а) показал, что продолжительность включения изменяется в диапазоне от 0 до 1, причем распределение этой величины равномерное (рис. 6,б). Число включений в час за время проведения эксперимента не превышало 5, причем в 98% случаев число включений не превышает 3 (рис. 6,в). С учетом случайного характера нагрузки приводного двигателя (рис. 4), относительно небольшого числа пусков и широкого диапазона изменения

продолжительности включения, режим работы привода не относится ни к одному из предусмотренных стандартом [4].

а)



б)



в)

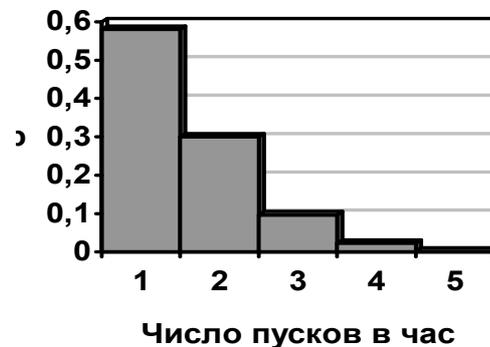


Рисунок 6. – Изменение продолжительности включения и количества пусков двигателя в ходе эксперимента (а) и их гистограммы распределения (б, в)

### *Использование тепловой мощности приводного двигателя.*

Уровень использования потенциальных возможностей приводного двигателя комбайна может быть охарактеризован коэффициентом использования его тепловой мощности. На рис. 7 приведена диаграмма изменения сменного коэффициента использования мощности двигателя привода исполнительного органа в различные смены его работы. Среднее значение этого коэффициента (исключая ремонтные смены) составляло  $0,29 \pm 0,05$ , а диапазон возможных значений с доверительной вероятностью 0,95 – от 0,09 до 0,48. На рис. 8 приведен фрагмент изменения скользящего среднего (за 10 мин) значения коэффициента использования мощности (а), а также гистограмма распределения этой величины за период проведения эксперимента. Очевидно, значительную долю времени (порядка 80%) составляет работа привода с уровнем нагрузки не более 70% от номинальной. Сменный коэффициент использования мощности имеет еще более низкие значения. Вместе с этим имели место режимы работы комбайна с мощ-

ностью в 1,6-1,8 раз превышающей номинальную мощность приводного двигателя.

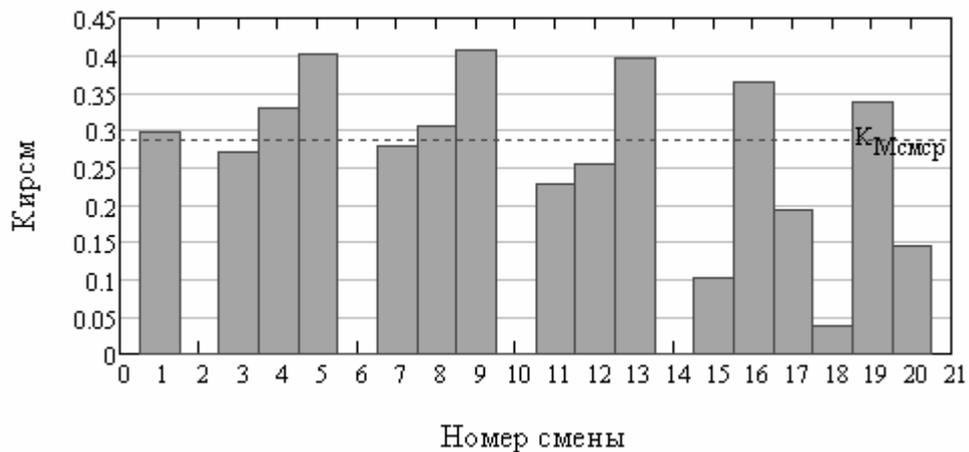
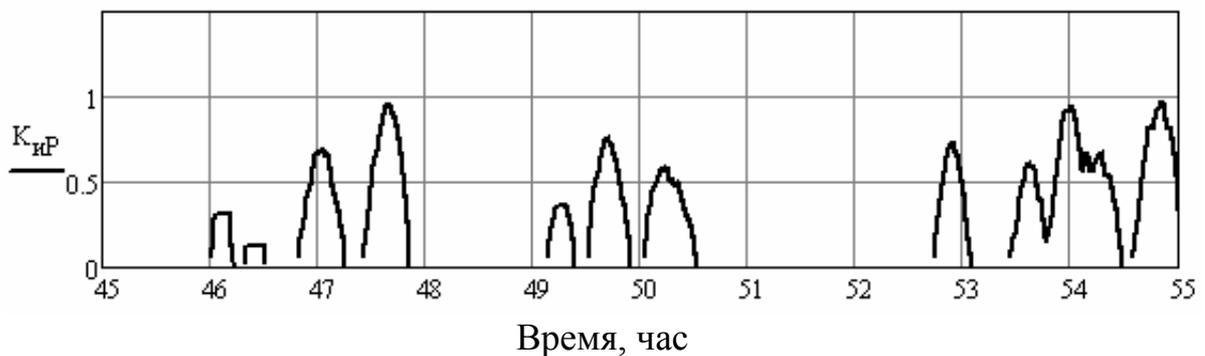


Рисунок 7. – Изменение сменного коэффициента использования мощности

а)



б)

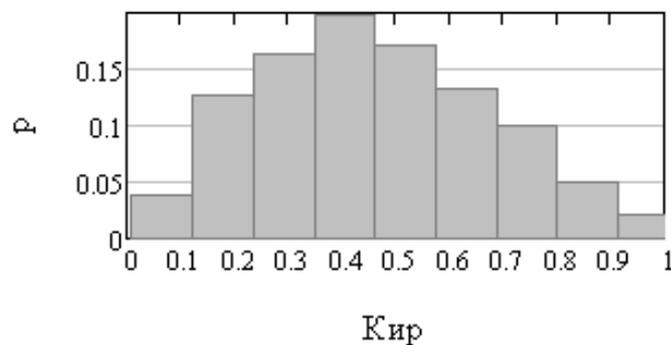


Рисунок 8. – Изменение коэффициента использования мощности в ходе эксперимента (а) и ее гистограмма распределения (б)

Существенное недоиспользование мощности может быть вызвано как технологическими паузами в работе комбайна, так и неэффективным ручным управлением. Для оценки значимости этих факторов были рассчитаны значения коэффициента использования мощности для циклов обработки забоя без учета пауз между включениями дви-

гателя в течение цикла (рис. 9). Среднее значение этого коэффициента составляло  $0,74 \pm 0,05$ , а диапазон возможных значений с доверительной вероятностью 0,95 – от 0,55 до 0,93. Таким образом, при ручном управлении недоиспользование мощности в среднем составляет 26%, а значительный разброс этой величины приводит к неравномерности нагрузок, формируемых в циклах разрушения забоя, и, как следствие, к снижению ресурса комбайна.

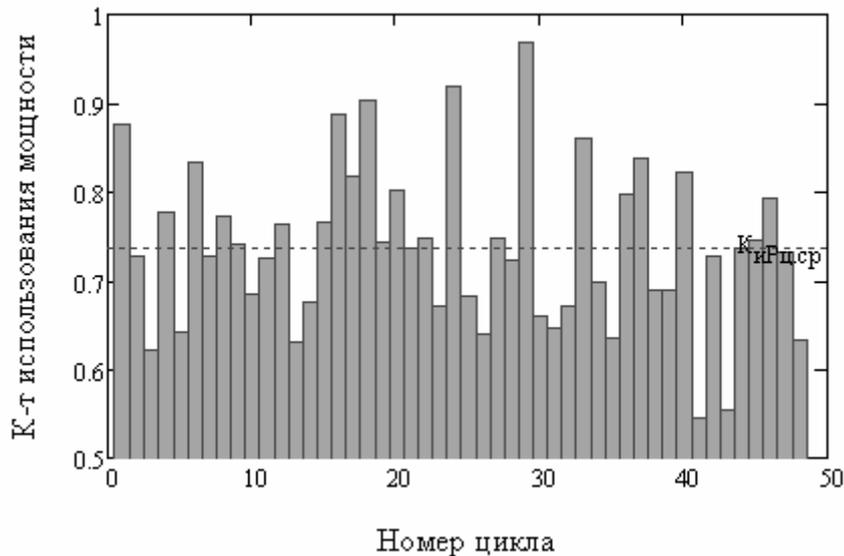


Рисунок 9. - Коэффициент использования мощности для циклов обработки забоя без учета пауз между включениями двигателя в течение цикла

#### *Удельные энергозатраты процесса разрушения забоя*

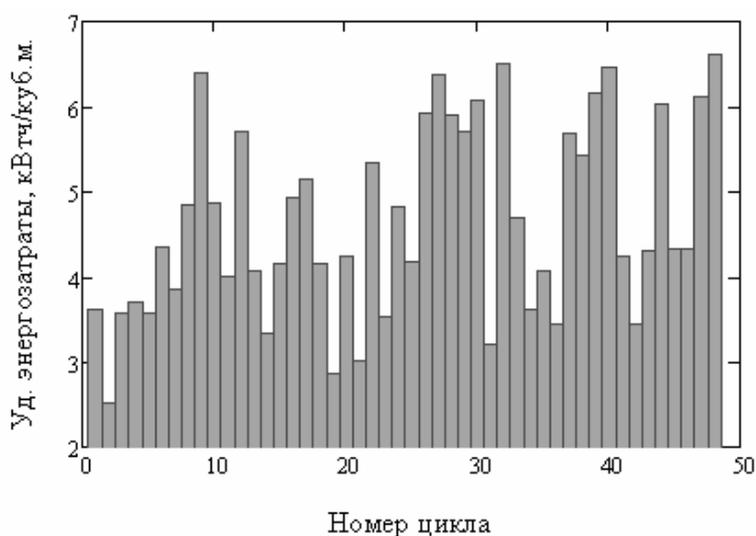
Удельные энергозатраты характеризуют эффективность процесса разрушения забоя с учетом физико-механических свойств разрушаемой породы, структуры забоя, конструкции исполнительного органа и режущего инструмента, а также режимных параметров (скорости подачи, резания, глубины зарубки и шага фрезерования исполнительного органа [5]) и перебора породы по контуру выработки. Режимные параметры и перебор определяются управляющими воздействиями на машину, которые в существующих конструкциях комбайнов формируются человеком-оператором. В результате недостаточно эффективного управления удельные энергозатраты могут варьироваться в широких пределах. В таблице 1 приведены среднесуточные значения удельных энергозатрат процесса разрушения забоя, полученные в результате обработки данных эксперимента. Как видно из приведенных данных, удельные энергозатраты изменялись более чем в 2 раза при среднем значении  $4,68 \text{ кВтч/м}^3$ .

Таблица 1 - Среднесуточные значения удельных энергозатрат процесса разрушения забоя

Дата	18.11.08	19.11.08	20.11.08	21.11.08	22.11.08
Удельные энергозатраты, кВтч/м <sup>3</sup>	6,62	4,83	4,29	4,87	3,30

На рис. 10 приведены диаграмма изменения средних за цикл обработки забоя удельных энергозатрат и гистограмма распределения этой величины. Среднее значение составляло  $(4,68 \pm 0,61)$  кВтч/м<sup>3</sup>, а диапазон возможных значений с доверительной вероятностью 0,95 – от 2,29 кВтч/м<sup>3</sup> до 7,03 кВтч/м<sup>3</sup>.

а)



б)

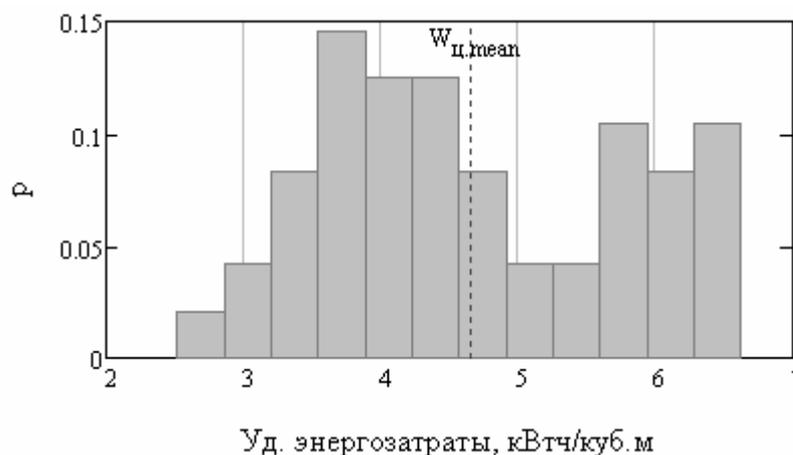


Рисунок 10 – Изменение средних за цикл обработки забоя удельных энергозатрат в ходе эксперимента (а) и их гистограмма распределения (б)

Так как в процессе проведения эксперимента горно - геологические условия изменялись незначительно, колебания удельных энергозатрат вызваны переборами и случайным характером воспроизведе-

ния цикла обработки забоя машинистом комбайна, а также износом и поломками режущего инструмента. Одним из путей обеспечения стабильных минимальных значений удельных энергозатрат является применение мехатронного подхода при проектировании комбайна, обеспечивающего адаптивную оптимизацию рабочих процессов [5].

*Теоретическая производительность разрушения забоя.*

Теоретическая производительность является интегральным показателем эффективности работы комбайна, который учитывает совместное влияние удельных энергозатрат процесса разрушения забоя и уровня использования мощности приводного двигателя. На рис. 11а приведены диаграмма изменения средней за цикл обработки забоя теоретической производительности и гистограмма распределения этой величины. Анализ диаграммы показал существенную неравномерность теоретической производительности разрушения забоя. Среднее значение составляло  $(0,25 \pm 0,04) \text{ м}^3/\text{мин}$ , а диапазон возможных значений с доверительной вероятностью 0,95 – от  $0,11 \text{ м}^3/\text{мин}$  до  $0,39 \text{ м}^3/\text{мин}$ . На рис. 11б приведена гистограмма распределения нормированных значений средней за цикл обработки забоя теоретической производительности. В качестве базы принята теоретическая производительность при полном использовании мощности привода и минимальном из полученных значений удельных энергозатрат. Из гистограммы видно, что производительность составляет в среднем 40 %, а как максимум 70 % от максимально возможной в данных условиях эксплуатации величины. Данный результат подтверждает вывод, сделанный в работе [6] о недостаточной эффективности ручного управления проходческим комбайном.

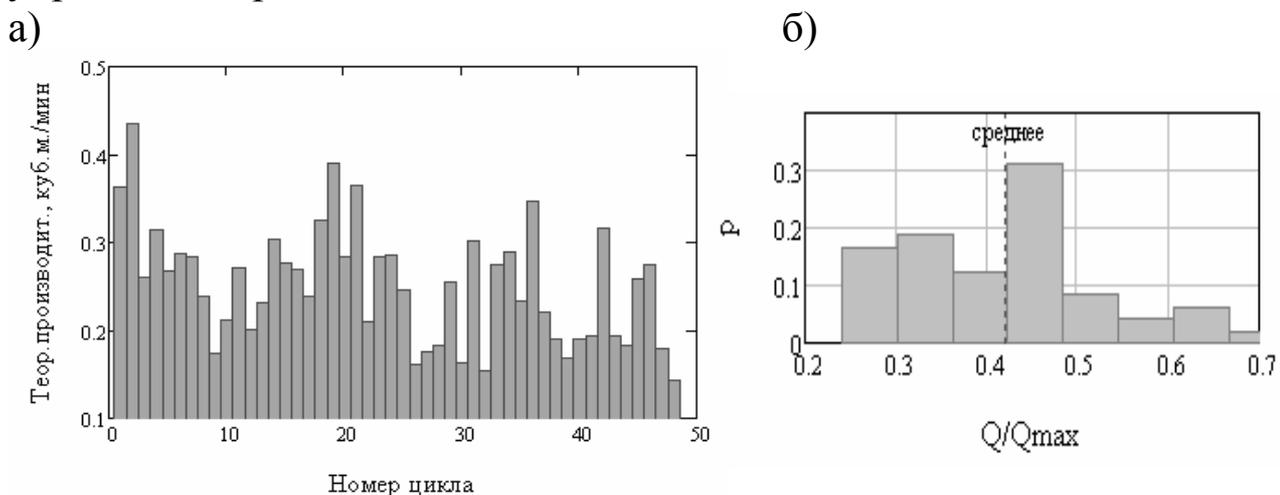


Рисунок 11 – Изменение средней за цикл обработки забоя теоретической производительности процесса разрушения забоя в ходе эксперимента (а) и гистограмма распределения ее нормированной величины (б)

Рисунок 12 иллюстрирует совместное влияние уровня использования мощности и эффективности процесса разрушения забоя на теоретическую производительность. На рисунке приведено поле значений средней за цикл обработки забоя теоретической производительности процесса разрушения забоя (линии уровня, м<sup>3</sup>/мин) в зависимости от коэффициента использования мощности и удельных энергозатрат. Анализ графика показал, что причинами низкой производительности являются как недостаточное использование мощности (точки в левой половине графика, зона I), так и неэффективный режим разрушения забоя (точки в верхней половине графика, зона II). Применение мехатронного подхода к созданию проходческих комбайнов [5] позволит работать с рациональными параметрами режима разрушения забоя, исключить перебор породы и максимально использовать мощность двигателя на основе адаптивной оптимизации рабочего процесса комбайна, что соответствует зоне III.

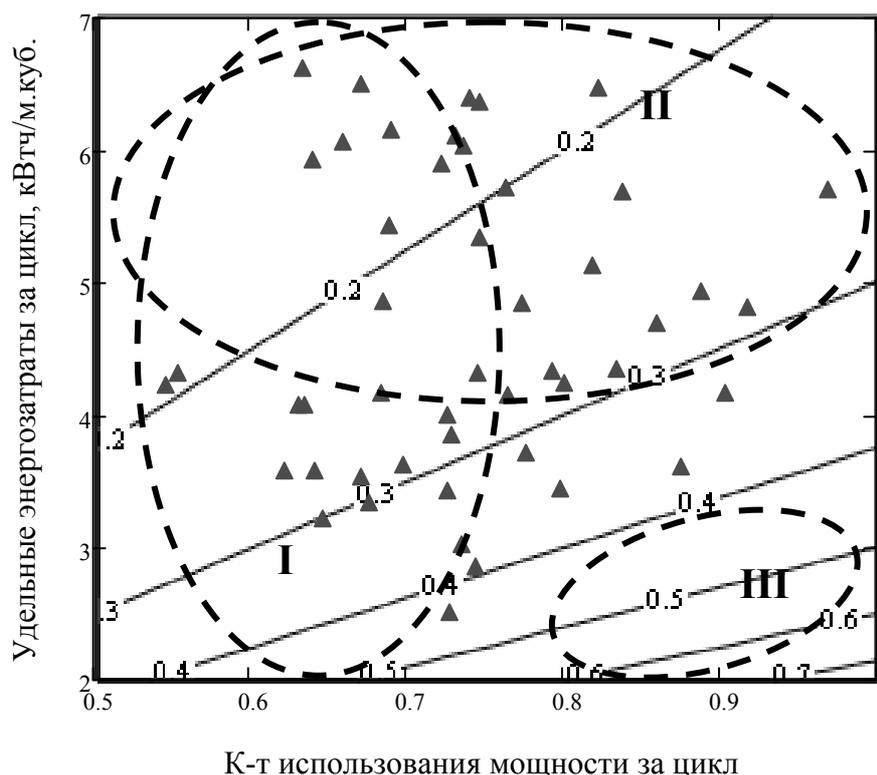


Рисунок 12 – Поле значений средней за цикл обработки забоя теоретической производительности процесса разрушения забоя в зависимости от коэффициента использования мощности и удельных энергозатрат

### ***Выводы и направление дальнейших исследований***

1. Разработана методика обработки данных натурального эксперимента, позволяющая выполнять оценку характеристик рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого

комбайна (режим работы привода, коэффициент машинного времени, коэффициент использования мощности, удельные энергозатраты, теоретическая производительность) на базе длительной непрерывной записи тока двигателя. Данная методика может быть использована для расшифровки записей данных регистраторов произошедших событий, которыми оснащаются современные проходческие комбайны.

2. Получены средние значения и диапазоны возможных значений с доверительной вероятностью 0,95 характеристик рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна КПД в условиях АП «Шахта Белицкая»:

- сменный коэффициент машинного времени: среднее значение  $0,18 \pm 0,04$ ; диапазон от 0,01 до 0,34;

- средние за цикл обработки забоя удельные энергозатраты: среднее значение  $(4,68 \pm 0,61)$  кВтч/м<sup>3</sup>; диапазон от 2,29 кВтч/м<sup>3</sup> до 7,03 кВтч/м<sup>3</sup>;

- средняя за цикл обработки забоя теоретическая производительность: среднее значение  $(0,25 \pm 0,04)$  м<sup>3</sup>/мин; диапазон от 0,11 м<sup>3</sup>/мин до 0,39 м<sup>3</sup>/мин.

Установлено, что продолжительность включения двигателя изменяется в диапазоне от 0 до 1 (равномерное распределение), при числе включений в час не более 5. Значительную долю времени (порядка 80%) составляет работа привода с уровнем нагрузки не более 70% от номинальной. При этом имеют место режимы, в которых мощность в 1,6-1,8 раз превышает номинальную мощность приводного двигателя.

3. Выявлена значительная неравномерность значений характеристик рабочего процесса комбайна вследствие погрешностей ручного управления. В результате имеют место отклонения от рациональных режимов обработки забоя, перебор породы по контуру выработки, недостаточное использование мощности привода, что приводит к существенному снижению производительности и ресурса комбайна. Исключить указанные негативные явления позволит разработка мехатронной конструкции комбайна нового технического уровня, реализующей принципы адаптивной оптимизации рабочих процессов.

Список источников:

1. Кудлай Р.А., Мезников А.В., Стадник Н.И. Блок регистрации произошедших событий на проходческом комбайне // Решение научно-технических проблем при создании и внедрении современного горно-шахтного оборудования. – Донецк, 2008. - С. 647-660.

2. Семенченко Д.А. Влияние кинематических изменений заднего и переднего углов поворотного резца на формирование усилия подачи // Наукові праці ДонДТУ. Серія гірничо-електромеханічна. Донецьк - 2001. - Вип.27. - С.340-344.
3. Мизин В.А. Экспериментальные исследования нагруженности системы подвески исполнительного органа проходческого комбайна КПД // Наукові праці ДонНТУ. - Донецьк: ДонНТУ, 2006. - Вип. 113. - С. 192-198.
4. ГОСТ 183-74 Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия. - Введ. 01.01.1976. - М.: Изд-во стандартов, 1976. - 26 с.
5. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В. Принципы интеллектуализации рабочих процессов мехатронной горной выемочной машины / Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю, №1, 2009. – С. 207-213.
6. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В. Адаптивная оптимизация цикла обработки и параметров режима разрушения забоя проходческим комбайном избирательного действия по критерию темпа проходки // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научных трудов, Вып. 39. – Донецк, 2010. - С.210-219.

**О.Є.Шабаєв, А.К.Семенченко, М.В.Хиценко, М.І.Стаднік.** **Результати експериментальних досліджень робочого процесу прохідницького комбайну КПД.** *Отримані середні значення і діапазони можливих значень з довірчою ймовірністю 0,95 коефіцієнтів машинного часу і використання потужності, питомих енерговитрат, теоретичної продуктивності прохідницького комбайну КПД в умовах ОП «Шахта Білицька». Встановлена недостатня ефективність використання потенційних можливостей прохідницького комбайну внаслідок відхилення від раціональних режимів обробки забою, недостатнього використання потужності приводу і перебору породи по контуру виробки, обумовлених ручним управлінням.*

**прохідницький комбайн, коефіцієнт машинного часу, коефіцієнт використання потужності, питомі енерговитрати, теоретична продуктивність, робочий процес, адаптивна оптимізація**

**O.Shabaev, A.Semenchenko, N.Khitsenko, N.Stadnik.** *Results of experimental investigation of working process of heading machine KPD. It is estimated the mean values and ranges of possible values with a confidence level of 0.95 of coefficient of machine time, coefficient of power using, specific power, the theoretical performance of roadheader KPD in AP "Mine Belitskaya". It is proved low effectiveness of the potential of roadheader due to deviations from rational modes of cutting process, low using of power and subdrilling over the working contour, due to manual control.*

**heading machine, coefficient of machine time, coefficient of power use, energy intensity, theoretical productivity, working procedure, adaptive optimization**

*Стаття надійшла до редколегії 10.09.2010*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П.Кондрахин*

© О.Е.Шабаев, А.К.Семенченко, Н.И.Стадник, 2010