

УДК 622.232.72:004.942

Н.И. Стадник (д-р техн. наук, проф.),
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»,
А.В. Бубликов (канд. техн. наук),
Национальный горный университет

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАШТЫБОВКИ ШНЕКА ДОБЫЧНЫХ КОМБАЙНОВ НА ТОНКИХ ПЛАСТАХ СЛОЖНОГО СТРОЕНИЯ

В работе на основе имитационных моделей процессов резания и погрузки угля шнеком малого диаметра добычного комбайна исследуются закономерности изменения во времени мощности электродвигателя привода резания. Сформулировано условие наступления заштыбовки шнека для системы автоматического управления.

Ключевые слова: математическая модель, разрушение, погрузка, уголь, заштыбовка, шнек, идентификация.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

На данный момент во всех системах автоматического управления добычными комбайнами применяются два способа оптимизации режимов работы. Эти способы выбираются оператором добычного комбайна. Первый способ – стабилизация скорости подачи комбайна ($V = \text{const}$). Скорость перемещения комбайна устанавливается оператором на основе заданной производительности. Добычной комбайн работает в данном режиме пока мощность электродвигателя привода резания не превысит устойчивое значение. После этого система автоматического управления осуществляет стабилизацию мощности электродвигателя привода резания ($P = \text{max}$) путем регулирования скорости подачи комбайна ($V = \text{var}$). Когда мощность становится меньше устойчивого значения, система автоматического управления восстанавливает скорость подачи. Оператор комбайна может применить второй критерий оптимизации, в таком случае система автоматического управления постоянно поддерживает мощность электродвигателя привода резания на максимальном уровне.

Известный алгоритм автоматического управления скоростью подачи был разработан с учетом конструктивных особенностей комбайнов, шнековые исполнительные органы которых имеют достаточную погрузочную способность. В данном алгоритме не учитываются

суммарные удельные энергозатраты комбайна несмотря на то, что современный добычной комбайн является одним из энергоемких горных машин. На тонких пластах, которых в Украине подавляющее большинство, при увеличении скорости подачи комбайна заштыбовка шнека наступает до момента максимального использования мощности электродвигателя привода резания. Это приводит к тому, что комбайн работает в режиме затянувшейся заштыбовки шнека с завышенными удельными энергозатратами и формированием повышенного содержания штыба. Особенно это актуально для современных добычных комбайнов, которые характеризуются ростом энерговооруженности и скорости их перемещения более чем в 2 раза. Оба эти обстоятельства также провоцируют заштыбовку шнека, который из-за уменьшенного диаметра имеет низкую погрузочную способность.

Анализ исследований и публикаций. На рис.1. с помощью математической модели «забой – шнек – электродвигатель привода резания» [1] получен характер появления во времени повышенного значения мощности электродвигателя привода резания по отношению к четвертям периода оборота шнека при формировании нагрузки на шнеке только вследствие транспортирования и погрузки угля в режиме заштыбовки без его резания.

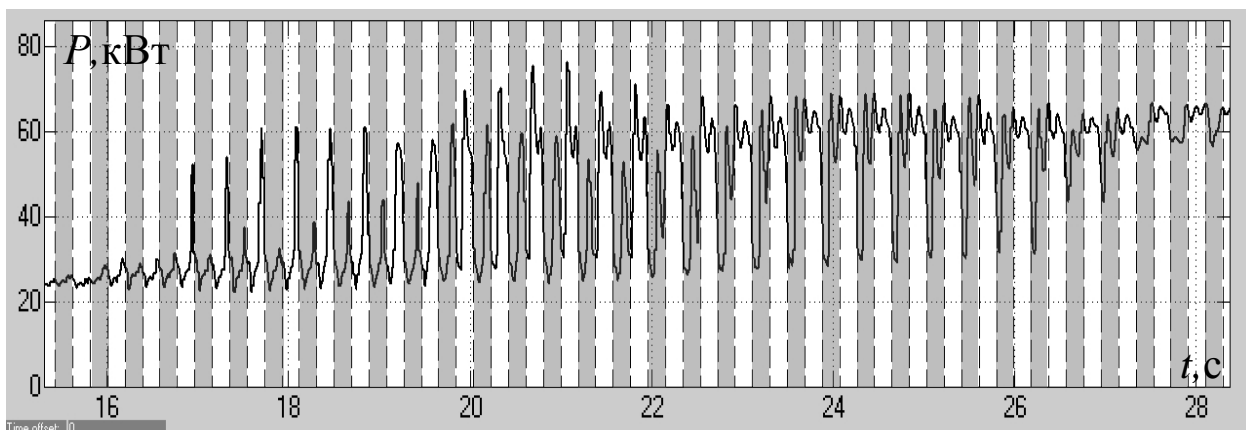


Рис.1 - Изменение во времени мощности электродвигателя привода резания по отношению к четвертям периода оборота шнека

Для того чтобы выделить только те временные интервалы в периоде оборота шнека с двумя лопастями, на которых имеют место повышенные значения мощности, необходимо рассматривать два конечных участка полупериодов оборота шнека. Для выделения выше-названных временных интервалов в периоде оборота шнека, весь период для двухзаходных шнеков делится на четыре равных участка, как показано на рис. 2. За начальное положение шнека принимается

момент, когда конечный участок одной из лопастей выходит из зоны скопившегося угля возле разгрузочного торца (линия N на рис. 2). С серой заливкой на рис. 1 представлены временные интервалы, соответствующие первой и третьей четвертям периода оборота (области I и III на рис. 2).

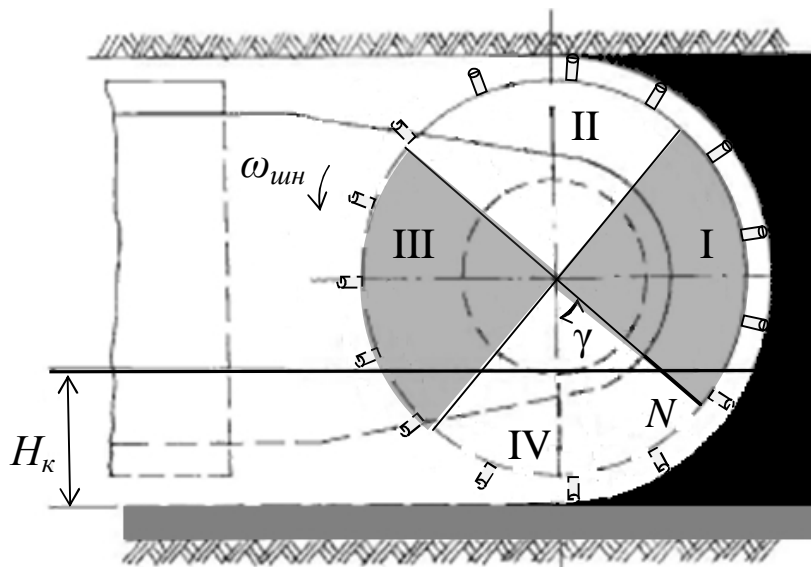


Рис.2 - Конструктивная схема шнека (вид со стороны разгрузочного торца); линия N показывает положение конечного участка лопасти, $\gamma = 50^{\circ}$

Как видно из рис. 1, повышенные значения мощности с 17 по 27 с имеют место как на первой и третьей четвертях периода оборота шнека, так и на второй и четвертой (области II и IV без заливки на рис.2). Однако на первой и третьей четвертях периода оборота шнека скачок мощности не такой интенсивный, и его длительность существенно меньше. Это объясняется тем, что на первой и третьей четвертях периода оборота шнека имеет место выгрузка угля, в то время, как на второй и четвертой уголь заклинивается между лопастью и корпусом редуктора при приближении конечного участка лопасти у разгрузочного торца к почве. В последнем случае давление угля на поверхность лопасти существенно превышает аналогичный параметр при выгрузке угля. Таким образом, на ранней стадии заштыбовки мощность на второй и четвертой четвертях периода оборота шнека оказывается больше мощности на первой и третьей четвертях.

Данная закономерность в работе [2] используется для обнаружения начала процесса заштыбовки шнека на основе статистического анализа мощности электродвигателя привода резания. В качестве критерия заштыбовки шнека предложено отношение средней мощно-

сти, потребляемой электродвигателем привода резания за вторую и четвертую четверти периода оборота шнека, к средней мощности, потребляемой электродвигателем привода резания за первую и третью четверти:

$$k_{заш.і} = \frac{\sum_{x=i-T_{уср}}^i \begin{cases} \frac{P_{x-0,25 \cdot T_{пер}}}{P_x}, & \text{если } \left[\frac{x}{0,25 \cdot T_{пер}} \right] - (2 \cdot k + 1); \\ \frac{P_x}{P_{x-0,25 \cdot T_{пер}}}, & \text{если } \left[\frac{x}{0,25 \cdot T_{пер}} \right] - (2 \cdot k) \end{cases}}{T_{уср}},$$

где $T_{уср}$ – количество мгновенных значений мощности электродвигателя привода резания, которое используется для скользящего усреднения; $T_{пер}$ – количество мгновенных значений мощности, замеренных в течение периода оборота шнека; $2 \cdot k + 1$ и $2 \cdot k$ – соответственно нечетное и четное числа; i – номер текущего мгновенного значения численного критерия $k_{заш.і}$; P_x – мгновенное значение мощности электродвигателя привода резания при усреднении, кВт; $P_{x-0,25 \cdot T_{пер}}$ – мгновенное значение мощности, смещенное во времени относительно значения мощности P_x на четверть периода оборота шнека, кВт.

Рассмотренный в работе [2] численный критерий заштыбовки шнека основывается на различии средних значений мощности, потребляемой электродвигателем привода резания, усредненных на разных четвертях периода оборота шнека. Таким образом, если на первой или третьей четверти периода оборота шнека будет иметь место контакт резца с включением, это может привести к выходу численного критерия из установленных в работе [2] пределов изменения ($0,918 \cdot k_{заш.ср} < k_{заш.і} < 1,082 \cdot k_{заш.ср}$, где $k_{заш.ср}$ – среднее значение численного критерия заштыбовки шнека, усредненное в течение всей работы добычного комбайна) и ложному фиксированию автоматической системой начала процесса заштыбовки шнека. Следовательно, необходимо исследовать величину отклонения численного критерия от своего среднего значения при встрече резцов шнека с включениями или прослойком породы высокой крепости и пересмотреть условие наступления заштыбовки шнека для пластов сложного строения.

Постановка задачи. Данная статья является продолжением работы [2]. Целью этого исследования является изучение закономерностей изменения во времени предложенного численного критерия за-

штыбовки шнека при работе комбайна УКД300 на пластах сложного строения для уточнения условия наступления заштыбовки.

Изложение материала и результаты.

Исследования в статье проводятся с помощью имитационной модели «забой – шнек – электродвигатель привода резания», в основу которой заложены известные методики расчета силовых характеристик добычного комбайна [3], математическое описание преобразования энергии в электроприводе и результаты многочисленных исследований статистической динамики добычного комбайна для имитации нагрузки на исполнительном органе [4, 5]. Имитационная модель описана в работах [1, 6].

В работе [6] также проведена проверка на адекватность имитационной модели «забой – шнек – электродвигатель привода резания» по отношению к статистическим оценкам экспериментальной и имитированной выборок мощности электродвигателя привода резания, на основе которых создан численный критерий заштыбовки шнека. Экспериментальная выборка получена при испытании комбайна УКД300 в реальных условиях на шахте «Павлоградская».

С помощью критериев Пирсона, Стьюдента и F-критерия доказано, что как экспериментальная, так и имитированная выборка мощности, потребляемой электродвигателем привода резания, взяты из нормально распределенных генеральных совокупностей, для которых мощность в среднем показывает одинаковую линейную зависимость от скорости подачи. Также доказано сходство дисперсий экспериментальной и имитированной выборок мощности. Благодаря этому можно утверждать, что закономерности изменения во времени предложенного критерия заштыбовки шнека, установленные с помощью имитационной модели, справедливы для экспериментальной выборки мощности, поскольку в основу критерия заложены свойства дисперсии мощности, потребляемой электродвигателем привода резания.

Рассмотрим закономерности изменения во времени численного критерия заштыбовки шнека при встрече шнека с включением. Для имитации процесса резания включения резцом применяется математическая модель расчета среднепиковой силы резания на резце [3], которая добавлена в имитационную модель «забой – шнек – электродвигатель привода резания». Принят самый неблагоприятный случай с позиции максимального отклонения численного критерия при встрече резца с включением:

– сцепление между включением и массивом больше, чем сцепление частиц угля (имеет место на вязких углях средней и большой сопротивляемости резанию) [3];

– каждый раз резец производит центральное перерезание включения;

– включение расположено в середине серповидного среза стружки;

– удельное содержание включений максимальное для Донбасса (2,6 %) [3];

– резец встречается с включением, имеющим максимальные для Донбасса размеры – мощность 6 см, длина 25 см [3];

– момент встречи резца с включением подобран таким образом, чтобы скачки мощности, потребляемой электродвигателем привода резания, при перерезании включения резцом приходились только на первую и третью четверти периода оборота шнека.

Рассчитаем продолжительность контакта резца с включением мощностью 0,06 м:

$$t_{\text{конт}} = \frac{0,06 \cdot T_{\text{об}}}{2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot D} = \frac{0,06 \cdot 0,768}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,45} = 0,016 \text{ , с,}$$

где $T_{\text{об}}$ – период оборота шнека, с; D – диаметр исполнительного органа по резцам, м (приняты для добычного комбайна УКД300). Рассчитаем расстояние, которое пройдет резец при поступательном движении за полуоборот шнека:

$$T_{\text{конт}} = \frac{V_n \cdot T_{\text{об}}}{2 \cdot 60} = \frac{2,77 \cdot 0,768}{2 \cdot 60} = 0,018 \text{ , м,}$$

где V_n – текущая скорость подачи комбайна (принята работа комбайна УКД300 на грани заштыбовки). Следовательно, учитывая, что в линии резания находится два резца и длина включения 25 см, число контактов резца с включением:

$$K = \frac{0,25}{0,018} = 13,89.$$

Таким образом, при имитировании встречи резца с включением сила резания угля на соответствующем резце заменяется на среднепиковую силу резания включения в течение 0,016 секунд 14 раз с периодом, равным времени полуоборота исполнительного органа.

На рис. 3 представлены результаты имитационного моделирования работы комбайна при встрече резца с включением, которая произошла между 23 и 29 с моделирования. Как видно из рис. 3,а, имен-

но в этот промежуток времени наблюдаются резкие кратковременные скачки мощности, потребляемой электродвигателем привода резания, до 220–250 кВт. В контакт с включением вступает первый забойный резец со стороны отрезного диска.

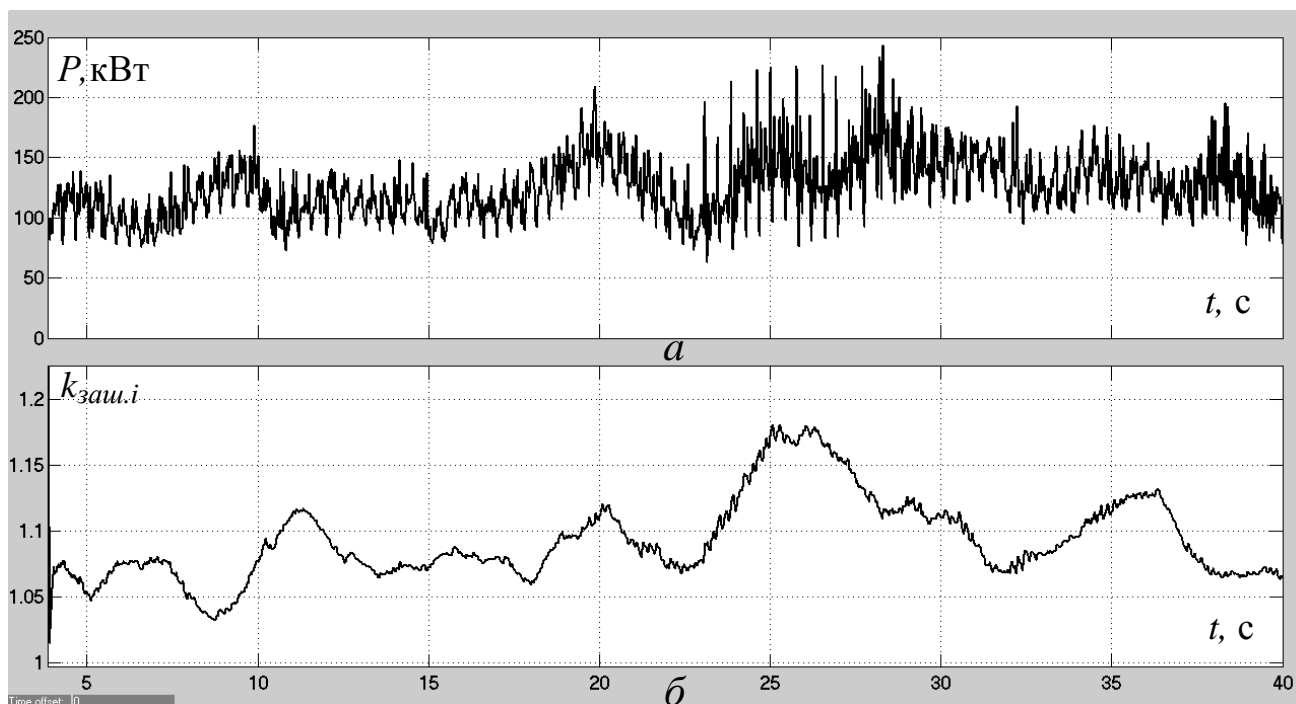


Рис. 3 - Изменение во времени: *а* – мгновенной мощности, потребляемой электродвигателем привода резания; *б* – численного критерия заштыбовки шнека при встрече шнека с карбонатным включением

Как видно из рис. 3,б, резкие увеличения мощности привели к росту численного критерия заштыбовки шнека, максимальное значение которого при отклонении составило 1,176 (максимальное относительное отклонение от среднего значения равно 6,9%). Для оценки границ диапазона изменения значений численного критерия при работе добычного комбайна на пласте с включениями, произведен замер мгновенных значений численного критерия при скорости подачи добычного комбайна 2,77 м/мин в течение длительного времени. Построена гистограмма распределения замеренных мгновенных значений численного критерия по интервалам, на которые разбит диапазон изменения численного критерия.

На рис. 4 одновременно представлены две гистограммы – для работы комбайна на пласте без включений (с серой заливкой) и с включениями, при контакте с включениями только одного резца (без заливки). Как видно из гистограммы с серой заливкой, характер распределения значений численного критерия заштыбовки шнека по ин-

тервалам с большой вероятностью соответствует нормальному закону распределения случайной величины. Явно выраженное среднее значение равно 1,1. Частоты попадания значений численного критерия в интервалы, находящиеся за пределами диапазона изменения значений $1,01 \div 1,19$, равны «0».

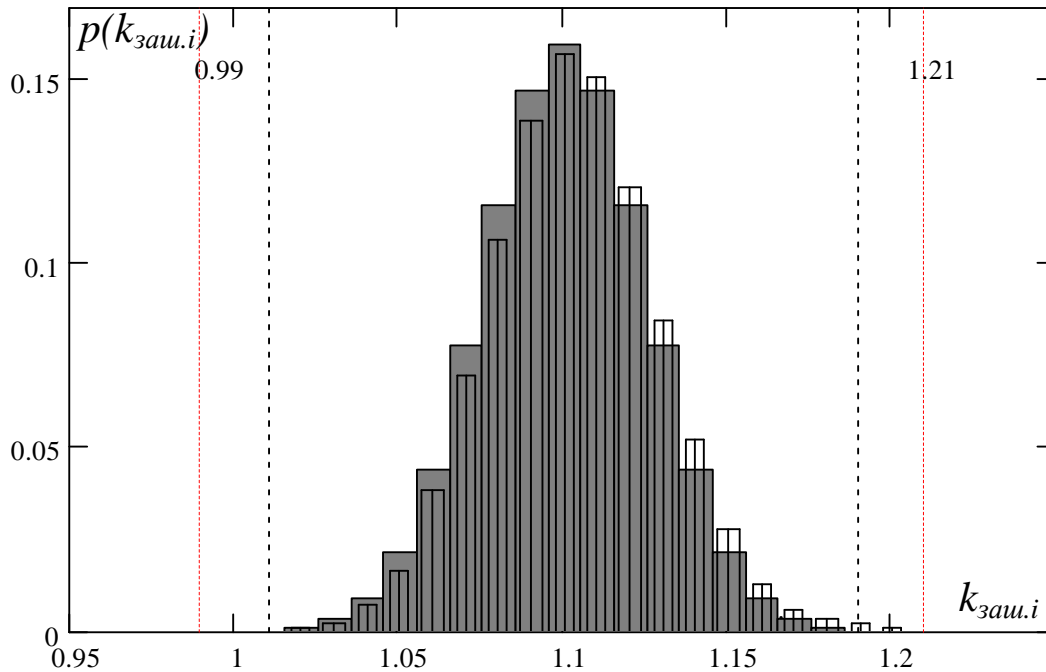


Рис.4 - Гистограмма распределения мгновенных значений численного критерия заштыбовки шнека по интервалам, на которые разбит диапазон изменения численного критерия

Если проанализировать гистограмму для случая работы комбайна на пласте с включениями, то можно сделать вывод, что наличие включений в пласте приводит к увеличению частот на интервалах правее среднего значения численного критерия, и наоборот – к уменьшению на интервалах, расположенных левее среднего значения. График гистограммы распределения значений численного критерия становится более вытянутым справа и более ниспадающим слева. Верхнее предельное значение численного критерия, после которого все частоты становятся равными нулю, увеличивается до «1,21».

Отсюда следует, что для предотвращения ложных фиксирований заштыбовки шнека автоматической системой, что приведет к потере производительности комбайна, необходимо верхнюю границу контролируемого диапазона изменения значений численного критерия без заштыбовки шнека увеличить с «1,19» до «1,21» (с $1,082 \cdot k_{зам.ср}$ до $1,1 \cdot k_{зам.ср}$).

Рассмотрим случай контакта с включениями одновременно двух резцов при работе комбайна на пласте с включениями. Соотношение контактирующих с включениями резцов и момент начала контакта (23,04 с моделирования) подобраны таким образом, чтобы временные интервалы контактов пришлись в основном на первую и третью четверти периода оборота шнека (самый неблагоприятный случай).

Для имитации встречи шнека с двумя включениями в имитационную модель «забой – шнек – электродвигатель привода резания» добавлены две модели, которые имитируют встречи резцов с включениями, заменяя силу резания угля на соответствующем резце на среднепиковую силу резания включения в течение 0,016 секунд 14 раз с периодом, равным времени полуоборота исполнительного органа.

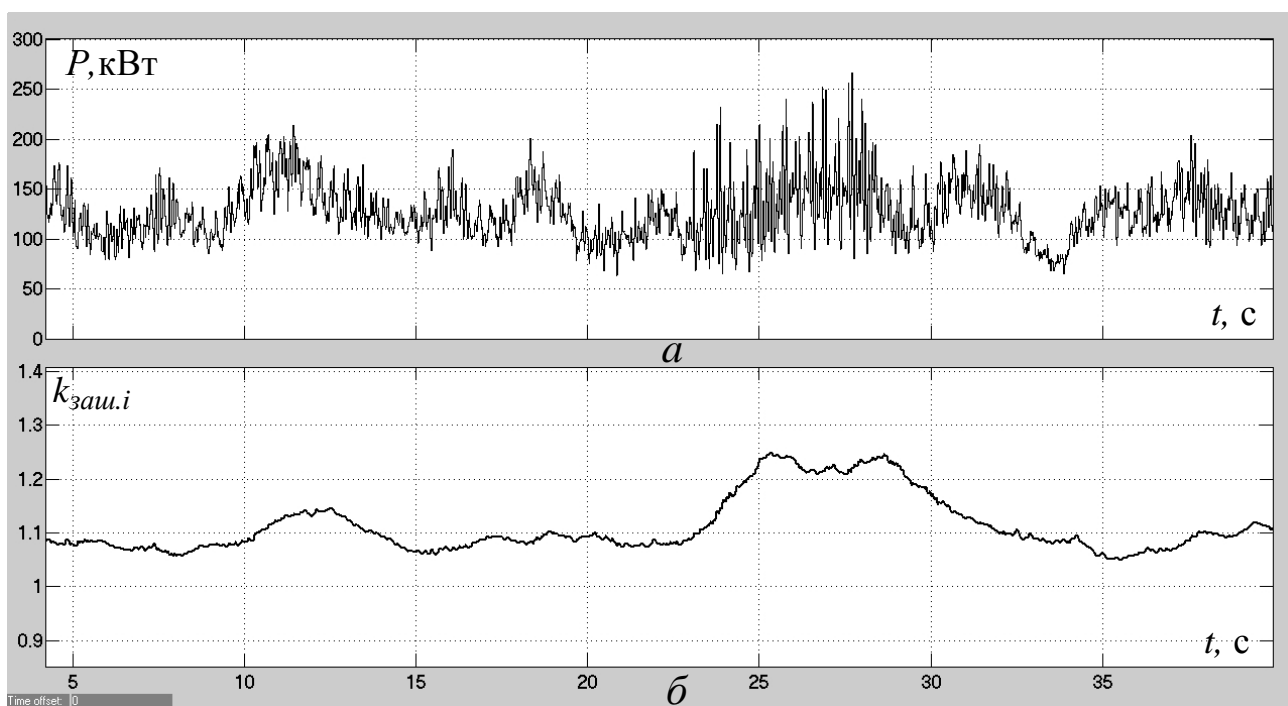


Рис. 5 - Изменение во времени: *a* – мгновенной мощности, потребляемой электродвигателем привода резания; *б* – численного критерия заштыбовки шнека при встрече шнека с двумя карбонатными включениями

Из рис. 5,а видно, что с 23 по 29 с моделирования происходят кратковременные, существенные скачки мощности. Причем максимальные значения мощности в некоторых случаях выше, чем при встрече с включением одного резца (более 250 кВт). Увеличивается и количество скачков мощности. Все это приводит к тому, что численный критерий заштыбовки шнека выходит за границы, в которых он изменялся при резании угля без включений (см. рис.5,б). Максималь-

ное значение критерия при отклонении составило «1,25» (максимальное относительное отклонение от среднего значения равно 13,6%).

Для оценки диапазона изменения значений численного критерия, на рис.6 построена гистограмма распределения значений численного критерия для работы комбайна на пласте сложного строения.

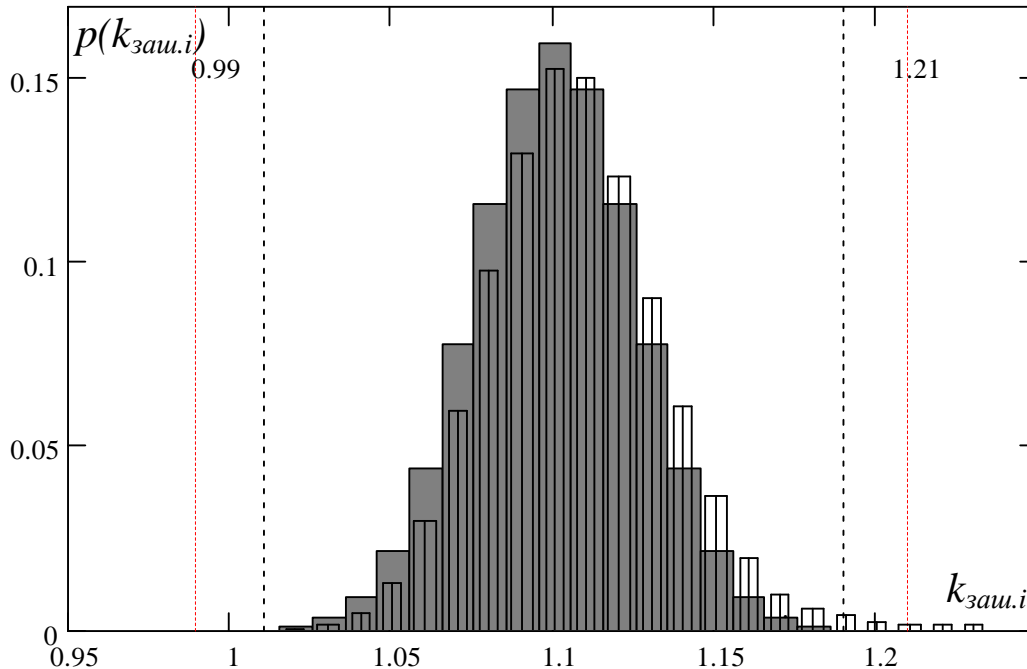


Рис. 6 - Гистограмма распределения мгновенных значений численного критерия заштыбовки шнека по интервалам, на которые разбит диапазон изменения численного критерия

Из рис.6 видно, что с учетом встреч шнека с двумя включениями одновременно при работе комбайна на пласте сложного строения симметричность гистограммы распределения значений численного критерия еще больше нарушается. Среднее значение уже не столь явно выраженное, правая часть графика гистограммы делается еще положе, а верхнее предельное значение численного критерия, после которого все частоты становятся равными нулю, увеличивается до 1,29. Поскольку при начале заштыбовки шнека численный критерий отклоняется до примерно такого же значения, отсюда следует, что по данному численному критерию невозможно определить, какое событие имело место – встреча одновременно двумя резцами включений или начало заштыбовки шнека.

Таким образом, если автоматическое управление вести по предложенному численному критерию заштыбовки шнека, автоматическая система будет снижать скорость подачи каждый раз, когда будет

происходит встреча с включениями одновременно двух резцов. Как в режиме поиска критической по заштыбовке скорости подачи, так и в режиме ее отслеживания, это приведет к временной работе добычного комбайна (как показали результаты исследований, примерно в течение 11 с) со скоростью подачи, заниженной на 0,2 м/мин. Учитывая незначительность потери производительности, а также малую вероятность наступления данного события (0,004775), можно сказать, что эффективность автоматического управления добычным комбайном на основе предложенного численного критерия заштыбовки шнека на пластах с включениями остается такой же высокой, как и на пластах однородного строения.

Исследуем закономерности изменения во времени численного критерия заштыбовки шнека при встрече шнека с прослойком песчаника, крепость которого в 2,46 раза больше крепости угля. Прослойк имеет мощность 10 см и начинается на расстоянии 0,4 м от почвы пласта, т. е. находится в зоне максимальной толщины стружки угля.

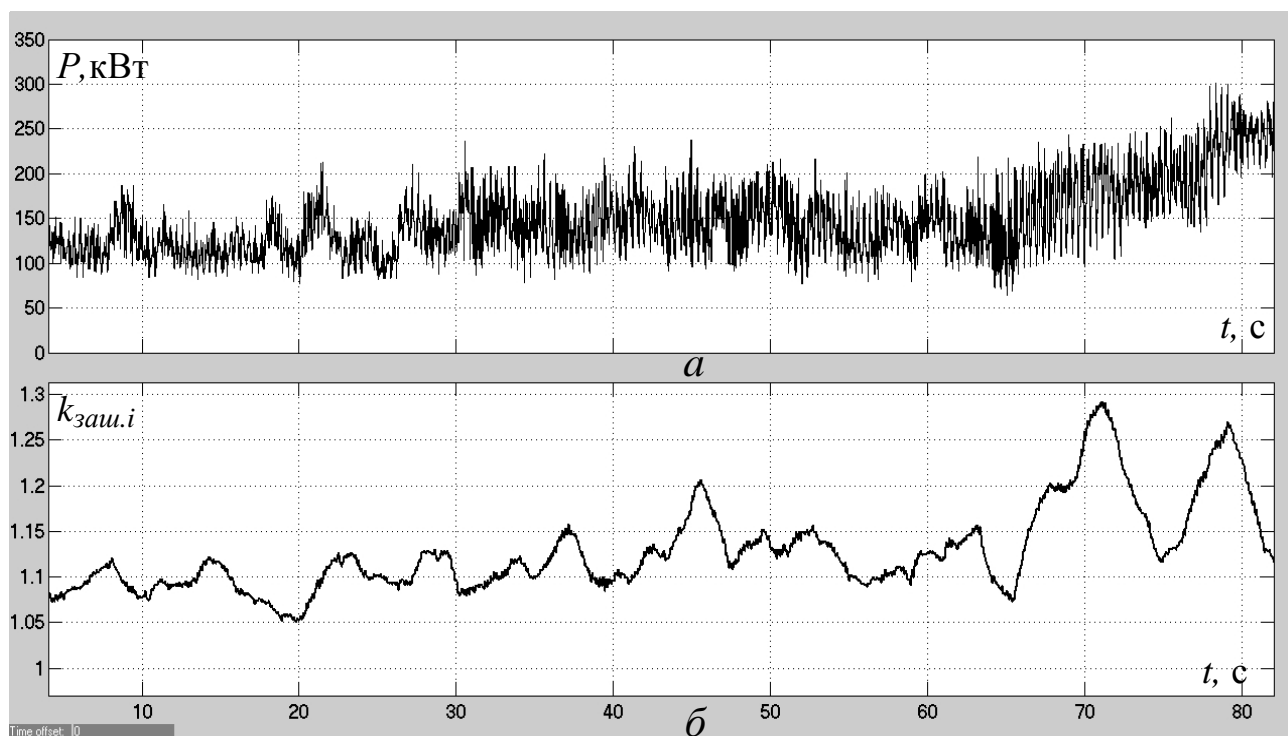


Рис. 7 - Изменение во времени: *a* – мгновенной мощности, потребляемой электродвигателем привода резания; *б* – численного критерия заштыбовки шнека при встрече шнека с прослойком песчаника

До 30 секунды моделирования (разрушение угольного массива простого строения) мощность на рис. 7,а изменяется случайным образом в пределах от 74 до 210 кВт со средним значением 124 кВт. После начала контакта шнека с прослойком песчаника (30 с) увеличи-

ваются как ширина диапазона изменения значений мощности (от 80 до 240 кВт), так и ее среднее значение (146 кВт). На 60 с скорость подачи добычного комбайна, которая до этого поддерживалась на уровне 2,77 м/мин, увеличивается на 0,1 м/мин, что вызывает заштыбовку шнека с приростом объема циркулирующего угля за оборот $0,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ или 2,2 % рабочего объема шнека. Как видно из рис. 7,а, в колебаниях мощности после этого практически исчезает высокочастотная составляющая и появляется преобладающая частота, которая соответствует полупериоду оборота шнека. С продолжением заштыбовки шнека наблюдается смещение вверх диапазона колебаний мощности и увеличение ее среднего значения.

Из рис. 7,б видно, что до встречи шнека с прослойкой породы (30 с) численный критерий изменяется случайным образом между значениями $1,01 \div 1,19$ и со средним значением 1,1. После начала резания прослойка происходит смещение среднего значения численного критерия, и оно становится равным 1,13. Это объясняется различием суммарных средних толщин стружки, которые имеют место на разных интервалах замера мощности. При разрушении прослойки породы шнеком численный критерий изменяется между значениями $1,03 \div 1,23$, то есть с максимальным относительным отклонением от среднего значения 8,8%. Увеличение максимального относительного отклонения численного критерия при работе шнека без заштыбовки объясняется увеличением дисперсии высокочастотных колебаний мощности, потребляемой электродвигателем привода резания, при разрушении крепкого прослойки породы, что вызывает увеличение ошибки скользящего усреднения отношения мощностей.

Из рис. 7,б видно, что при возникновении заштыбовки шнека (60 с) численный критерий начинает увеличиваться и достигает значения 1,29. То есть, максимальное относительное отклонение численного критерия от среднего значения при заштыбовке шнека составило 14,2%. Несмотря на увеличение максимального относительного отклонения численного критерия при работе шнека без заштыбовки, запас по отклонению численного критерия остался на достаточно высоком уровне и равен 5,4%.

Выводы и направления дальнейших исследований.

При работе комбайна на пласте с включениями, для предотвращения ложных фиксирований заштыбовки автоматической системой, что приведет к потере производительности комбайна, необходимо увеличить ширину контролируемого диапазона изменения численно-

го критерия заштыбовки с $\pm 8,2\%$ до $\pm 10\%$ от среднего значения. В случае встречи резцов одновременно с двумя включениями численный критерий заштыбовки выходит из расширенного диапазона изменения значений. Однако, учитывая незначительность потери производительности комбайна (менее 3% в течение 11 с), а также малую вероятность наступления данного события (0,004775), можно утверждать, что эффективность автоматического управления добычным комбайном на основе предложенного численного критерия заштыбовки шнека на пластах с включениями остается такой же высокой, как и на пластах однородного строения.

Наличие прослойка крепкой породы в пласте угля не влияет на закономерности изменения во времени численного критерия заштыбовки шнека. Несмотря на изменение среднего значения численного критерия, смещение и расширение диапазона его колебаний, разность между максимальными относительными отклонениями численного критерия от среднего значения при заштыбовке и без нее (запас по относительному отклонению численного критерия) остается достаточно большой (уменьшается с 6,3% до 5,4%). Следовательно, вероятность обнаружения заштыбовки на основе данного критерия остается такой же высокой, как и на пластах однородного строения.

В дальнейшем, с целью уточнения полученных закономерностей, планируется провести экспериментальные исследования в шахтных условиях.

Список литературы

1. Бубликов А.В. Определение заштыбовки шнекового исполнительного органа малого диаметра добычного комбайна на основе статистического анализа мгновенных значений нагрузки на валу электродвигателя привода резания / В. В. Ткачев, А. В. Бубликов // Академический вестник Криворожского территориального отделения Международной Академии компьютерных наук и систем. – 2007. – № 20. – С. 40-46.
2. Стадник Н.И. Алгоритм энергосберегающего управления добычным комбайном / В.В. Ткачев, Н.И. Стадник, А.В. Бубликов // Научный вестник НГУ. – 2009. – № 2. – С. 82-89.
3. Позин Е.З. Разрушение углей выемочными машинами / Е.З. Позин, В.З. Меламед, В.В. Тон. – М.: Недра, 1984. – 288 с.
4. Докукин А.В. Статистическая динамика горных машин / А.В. Докукин, Ю.Д. Красников, З.Я. Хургин. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
5. Бойко Н.Г. Погрузка угля очистными комбайнами / Бойко Н.Г. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 157 с.
6. Бубликов А.В. Автоматизация процессу управління видобувними комбайнами на основі моделювання роботи шнека: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.07 «Автоматизация процесів керування» / А.В. Бубликов. – Дніпропетровськ, 2010. – 20 с.

Стаття надійшла до редакції 18.04.2013

Н.І. Стаднік. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,

А.В. Бубліков. Національний гірничий університет

Ідентифікація процесу заштибовки шнека видобувних комбайнів на тонких пластах складної побудови

В роботі на основі імітаційних моделей процесів різання та навантаження вугілля шнеком малого діаметру видобувного комбайну досліджуються закономірності зміни у часі потужності електродвигуна приводу різання. Сформульована умова настання заштибовки шнека для системи автоматичного керування.

Ключові слова: математична модель, руйнування, навантаження, вугілля, заштибовка, шнек, ідентифікація.

N. Stadnik, Donetsk National Technical University, A. Bublikov, National Mining University

The Identification of Gumming Process of Shearer's Auger in Thin Seams of Complex Structure

The dynamics of the power consumed by the cutting drive motor is investigated on the basis of imitation models of the processes of coal cutting and loading by the auger of small diameter. The condition of auger gumming beginning for automatic system of control is formulated.

Keywords: mathematical model, cutting, loading, coal, gumming, auger, identification.