

УДК 621.3:622.232

**В.В. КОСАРЕВ**, канд. техн. наук, институт «Донгипроуглемаш»  
**Н.И. СТАДНИК**, д-р техн. наук, институт «Донгипроуглемаш»  
**В.А. ДЕЙНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, институт «Донгипроуглемаш»  
**В.С. ВОСКРЕСЕНСКИЙ**, инженер, институт «Донгипроуглемаш»  
**М.С. ВАСИЛЕНКО**, инженер, институт «Донгипроуглемаш»

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РЕДУКТОРОВ ГОРНЫХ МАШИН**

Розглядається проблема створення редукторів гірничих машин в обмежених габаритах. Виконується розрахунок об'ємного пружно-деформованного стану й усталостної довговічності корпусів редукторів гірничих машин методом кінцевих елементів. Приведені результати розрахунків пружно-деформованного стану й усталостної довговічності корпусу з використанням сучасних комп'ютерних засобів. Приведено спосіб оцінки ресурсу корпусів редукторів гірничих машин.

Рассматривается проблема создания редукторов горных машин в ограниченных габаритах. Выполняется расчет объемного напряженно-деформированного состояния и усталостной долговечности корпусов редукторов горных машин. Приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния и усталостной долговечности корпуса с использованием современных компьютерных средств. Приведен способ оценки ресурса корпусов редукторов горных машин.

The problem of creation of reducers of mining machines in restricted dimensions is considered. Calculation volumetric is intense - deformed states and fatigue life of tanks of reducers of mining machines is fulfilled. Outcomes of calculation is intense - deformed states and fatigue life of tank with usage of modern computer resources are reduced. The mode of an estimation(a rate) of a resource of tanks of reducers of mining machines is reduced.

Постановка проблемы. Повышение передаваемой мощности и увеличение расчетного ресурса редукторов в ограниченных габаритах требуют применения современных методов расчета и анализа прочности и долговечности элементов редукторов.

**Цель статьи.** Повышение долговечности и ресурса элементов редукторов, т.ч. корпусов горных машин.

За 2000-2005 гг. заводами угольного машиностроения по проектам и при научно-техническом сопровождении института «Донгипроуглемаш» освоено производство всех базовых видов очистного, проходческого и транспортного оборудования, отвечающего современным требованиям по

производительности, безопасности, эргономике, надежности, расчетный ресурс которого составляет 15-40 тыс. часов против 2,5-5 тыс. часов у заменяемых аналогов [1].

Вновь созданные очистные комбайны для технического переоснащения угольной промышленности Украины имеют повышенную в 2-3 раза энерговооруженность.

Особенностью угольных комбайнов и комплексов является их ограничения в габаритах.

Так, вертикальный габарит по корпусу комбайнов для отработки тонких пластов мощностью от 0,85 до 1,2 м составляет 400 мм, а у комбайнов для отработки пластов мощностью 1,35-3,2 м – 500 мм. Учитывая толщины стенок корпусов, необходимые зазоры и конструктивные особенности, диаметры зубчатых колес и наиболее габаритных элементов планетарных передач в этих условиях не превышают 310 - 410 мм. Передаточные числа редукторов привода исполнительных органов составляют  $u \leq 30$ , а для редукторов привода подачи  $u \leq 125$ , при этом, передаваемые крутящие моменты составляют 30000-60000 Н·м.

Поэтому, увеличение энерговооруженности приводов, при сохранении тех же габаритов машин, естественно, вызывает большие трудности. К ним нужно отнести: создание редукторной группы, размеры которой напрямую зависят от передаваемых моментов; разработка компактных встраиваемых преобразователей частоты привода подачи; отработка компоновочных решений, обеспечивающих передачу вращающих моментов на приводные звезды с помощью длинных валов; проектирование приводных электродвигателей повышенной мощности. При этом угольные комбайны должны оснащаться отвечающими современным требованиям встроенными средствами безопасности, управления и диагностики, требующими дополнительного пространства.

Решение вопросов, определяющих вписываемость, производительность и ресурс машин нового технического уровня в кратчайшие сроки, было бы практически невозможно без использования современных методов компьютерного моделирования и инженерного анализа на базе метода конечных элементов (МКЭ), который является фактически мировым стандартом для прочностных и других видов расчетов. Программы инженерного анализа на базе МКЭ позволяют с достаточной оперативностью и точностью оценить поведение конструкций, не укладывающихся в каноны аналитических и «полуаналитических» зависимостей.

В настоящее время в институте «Донгипроуглемаш» используется ряд программных продуктов компании MSC.Software: MSC.visualNastran 4D; MSC.AFEA и MSC.Fatigue.

Работы по компьютерному моделированию, анализу и расчетам ведутся в институте непрерывно на всех стадиях создания машин – техническое задание, проектирование, изготовление, испытания, сопровождение в шахтных условиях.

Особенно важным условием проведения компьютерного моделирования и расчетов с применением указанных программных продуктов является научно-обоснованный подход к выбору исходных данных для угольных комбайнов. Выбор последних базируется на разработанных совместно институтом «Донгипроуглемаш», ИГД им. А.А.Скочинского и др. организациями, методических материалах [2, 3, 4], в соответствии с которыми определяются:

- силы резания и подачи при разрушении массива, производится оценка влияния прослоек породы и присечек;
- максимальные нагрузки в трансмиссии, используемые для расчета на статическую прочность элементов, в случае прорезания твердых включений в угольном пласте;
- коэффициент вариации изменчивости нагрузки в приводах горных машин, соответствующий нормальному закону распределения нагрузок, полученных на основании шахтных исследований;
- диаграмма нагрузок для расчета типовых элементов (зубчатых колес, валов, подшипников) на выносливость и долговечность.

Полученные исходные данные используются для расчетов прочности и долговечности типовых элементов и узлов горных машин. Статические прочностные расчеты позволяют оценить максимальную прочность детали (результаты расчетов представляются в виде напряженно-деформированного состояния (НДС) или запасов прочности). Оценка ресурса элементов позволяет получить долговечность в часах машинного времени, в виде запасов прочности при заданных часах работы машины (зубчатых колес, валов и др.) или в фактических циклах, которые проработает исследуемый элемент.

Дальнейшие расчеты можно условно разделить на две группы:

- оценка прочности и долговечности типовых деталей (зубчатых колес, валов, подшипников и др.). Для этого используются существующие нормативные материалы (ГОСТы, ОСТы, нормали и др.);
- моделирование и расчет оригинальных деталей (корпусов, шнеков приводных звезд, рамных конструкций и др.) на прочность и долговечность с использованием МКЭ.

Все исследования – компьютерное моделирование и инженерный анализ с использованием МКЭ, производятся на трехмерных моделях сборочных узлов, созданных при помощи известных пакетов трехмерного моделирования.

Моделирование проводится с целью:

- оценки устойчивости комбайна на скребковом конвейере;
- определения нагрузок в основных узлах и элементах комбайнов (опор на конвейере, домкратов подъема шнека, соединений корпусных деталей и др.);

- кинематического и силового анализа движущихся элементов узлов (передаточного привода подачи очистных комбайнов, храповых механизмов, погрузочных устройств и др.);
- оценки компоновочных решений, обеспечивающих вписываемость угольных комбайнов в комплекс.

На рис. 1 показана трехмерная модель комбайна, которая в процессе исследования (моделирования) подвергается внешним воздействиям от исполнительных органов и системы подачи для определения нагрузок в различных элементах – опорах, гидродомкратах, проушинах соединений поворотных корпусов и др.

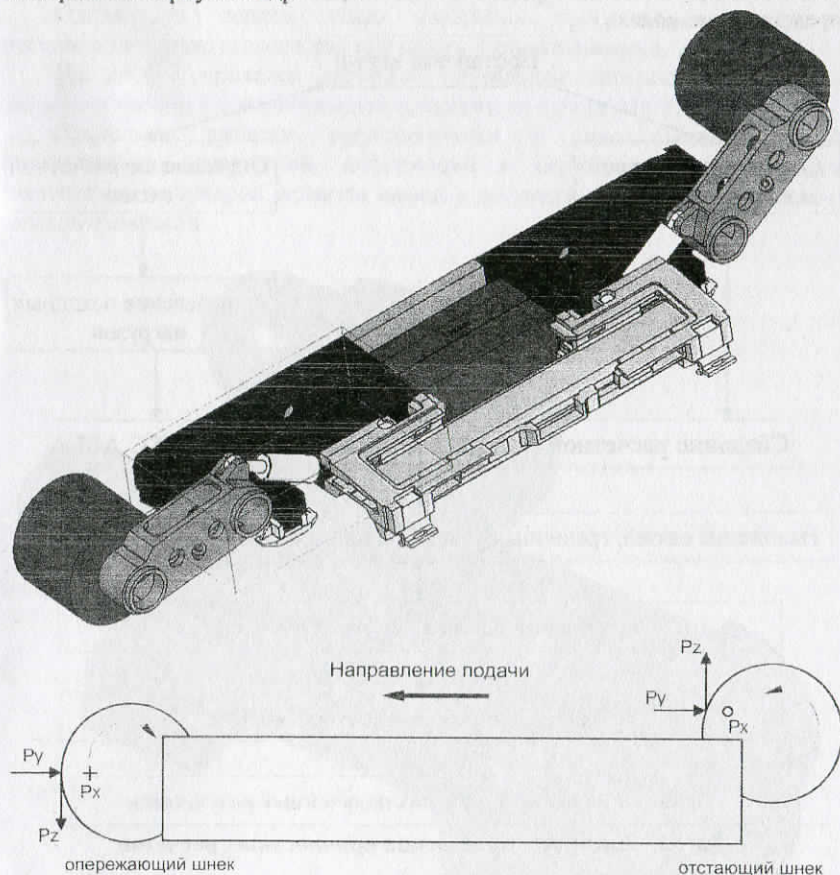
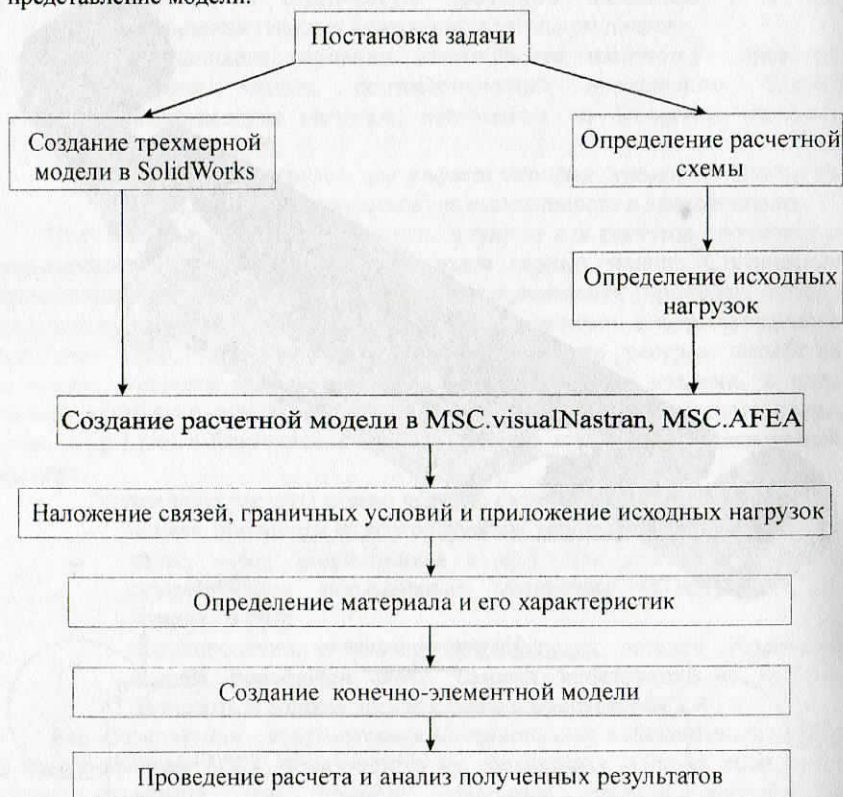


Рис. 1 – Общий вид трехмерной модели очистного комбайна и схема его нагружения в вертикальной плоскости.

Такие исследования проводятся при задании номинальных и максимальных внешних нагрузок. Этот вид моделирования позволяет оценить силовую картину всего комбайна в целом и, при необходимости, оперативно оптимизировать компоновку и его вписываемость в комплекс. Далее полученные нагрузки в основных узлах комбайна используются для определения напряженно-деформированного состояния элементов редуктора. Возможно также совмещение этих процессов во времени, однако для силовой оценки используются упрощенные трехмерные модели элементов (убраны фаски, скругления, неотчетливые отверстия и т.д.), что значительно сокращает процесс моделирования, а для НДС необходимо более точное представление модели.



**Рис. 2 – Алгоритм проведения прочностных расчетов**

Результаты моделирования НДС показали высокую сходимость (более 90%) с практикой: сравнение с замерами, проводимыми в заводских и шахтных условиях, и с элементами, выходящими из строя при эксплуатации в шахте. Была проведена работа по упрочнению десятков элементов, таких

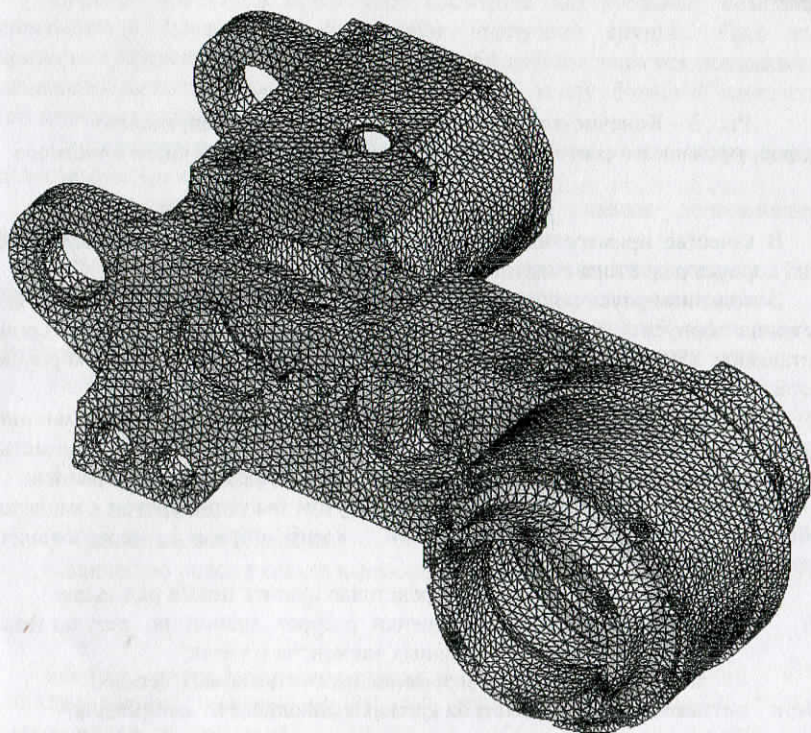
как: приводных звезд, водил планетарных передач, элементов тяговых цепей, валов, осей, проушин, элементов реечной дороги навесного оборудования и т.п. Стоит заметить, что высокая сходимость зависит от ряда факторов, а именно – адекватности исходных данных, правильности выбора схемы нагружения (расчетной схемы), точности представления трехмерной модели, качества конечно-элементной сетки.

Проведение таких исследований уже прочно вошли в практику конструирования горных машин в институте «Донгипроуглемаш». Эти результаты неоднократно докладывались на различных ежегодных международных форумах и получили там высокую оценку.

Однако на первом этапе внедрения программных продуктов оценивалась только статическая прочность элементов машин.

На рис. 2 приведен алгоритм проведения прочностных расчетов элементов машин с использованием программ на основе МКЭ.

Результаты расчетов представляются в виде цветowych полей распределения напряжений, деформаций и перемещений с близкими значениями, из которой делается вывод о достаточности (недостаточности) запасов прочности.



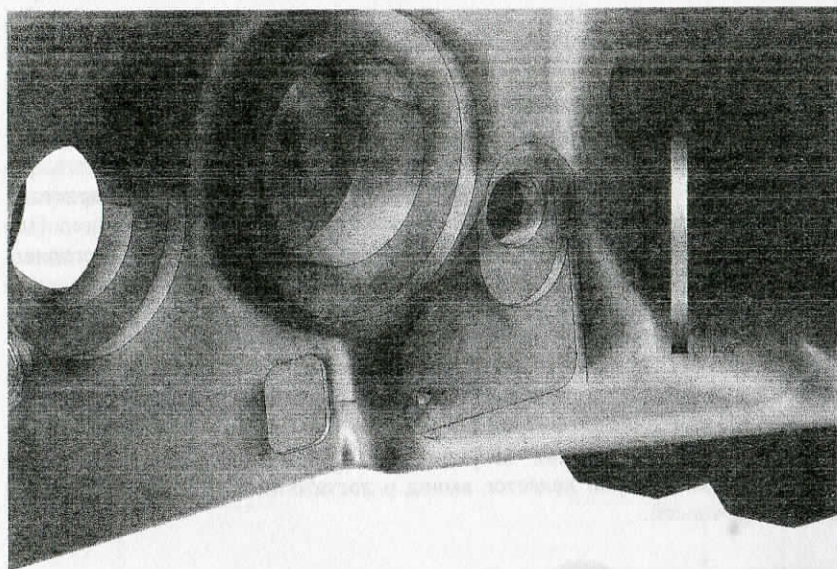


Рис. 3 – Конечно-элементная модель и фрагмент напряженно-деформированного состояния корпуса редуктора режущей части очистного комбайна

В качестве примера на рис. 3 показана конечно-элементная модель и НДС корпуса редуктора очистного комбайна.

В модели корпуса получены наибольшие напряжения, равные 350 МПа, материал корпуса – литая сталь типа 35МАФЛ, предел текучести которой составляет 550 МПа. Запас по пределу текучести для этого корпуса составил 1,57.

В то же время опыт эксплуатации и обслуживания горных машин показал, что кроме обеспечения статической прочности необходимо иметь достаточный ресурс машин, определяемый долговечностью всех элементов.

Для работы в этом направлении институтом был приобретен комплекс программ, позволяющий проводить компьютерные исследования долговечности и ресурса.

При освоении этого комплекса предстояло решить целый ряд задач:

- создание основы для оценки ресурса машин по результатам расчета усталости отдельных элементов и узлов;
- получение истории нагружения рассчитываемых деталей;
- нахождение параметров кривых выносливости материалов;
- оптимизация конструкции по критериям долговечности.

Оценка долговечности позволяет перейти к оценке ресурса создаваемых машин на стадии проектирования.

Расчетный ресурс определяется до предельного состояния конструкции, т.е. до появления усталостной трещины.

Ресурс до первого капитального ремонта и гарантийный ресурс для горных машин назначается в величинах произведенной работы - в тоннах добытого или транспортируемого угля, в метрах проходки и т.д.

Исходя из опыта эксплуатации, конкретных горно-геологических и технологических шахтных условий, назначается ресурс до ПЕРВОГО капитального ремонта, который указывается в технической документации. Число капитальных ремонтов определяется сравнением расчетного ресурса и ресурса до первого капитального ремонта.

Гарантийный ресурс устанавливается всегда ниже ресурса до первого капитального ремонта и для разных отраслей промышленности составляет от 40 до 80% величины ресурса до первого капитального ремонта.

В качестве оценки расчетного ресурса принимается, как правило, его среднее значение равное, 80%. При необходимости могут быть приняты другие значения.

Переход объекта в предельное состояние для угольных комбайнов определяется предельным состоянием корпусной группы. При этом критерием предельного состояния корпусной группы является поломка или нецелесообразность дальнейшей эксплуатации ввиду большой сложности (стоимости) восстановления.

Следовательно, ресурс комбайнов, в конечном счете, определяется долговечностью корпусной группы.

Отсюда возникает первостепенная задача оценки долговечности корпусной группы машин на стадии проектирования.

Исходными данными для определения долговечности элемента (узла) является история нагружения и усталостные характеристики материалов.

История нагружения (блок нагрузок, определяющий изменчивость нагрузок) принимается для цикла выемки – снятия одной полосы угля.

Количество добытых тонн с одной полосы составляет:

$$Q_{\text{полосы}} = m_{\text{пл}} \cdot B_z \cdot l_l \cdot \gamma, \text{ т} \quad (1)$$

где  $m_{\text{пл}}$  – вынимаемая мощность пласта, м;

$B_z$  – ширина захвата исполнительного органа выемочной машины, м;

$l_l$  – длина лавы, м;

$\gamma$  – удельный вес угля, т/м<sup>3</sup>;

Количество полос в одном выемочном столбе:

$$n_{\text{полос}} = \frac{L_{\text{ст}}}{B_z}, \quad (2)$$

где  $L_{\text{ст}}$  – длина вынимаемого поля, м.

Перемножив выражения (1) и (2), получим количество тонн, добываемых с одного столба:

$$Q_{\text{столба}} = m_{\text{на}} \cdot l_{\text{з}} \cdot L_{\text{ст}} \cdot \gamma, \text{ т} \quad (3)$$

Если принять вынимаемую мощность пласта 1,5 м, длину лавы 300 м и длину вынимаемого поля 2000-2500 м, то получим количество добытого угля с одного столба – 1,26-1,57 млн.т.

Это значение должно быть определяющим для назначения ресурса до капитального ремонта, т.к. в процессе выемки одного столба нецелесообразно проводить капитальный ремонт добычной машины. Если учесть, что машина должна выдержать, как минимум, 2 капитальных ремонта, то ее общий ресурс до списания должен составлять 3,8-4,7 млн.т.

На рис. 4 показан результат расчета долговечности корпуса угольного комбайна, НДС которого приведено на рисунке 3. Общее расчетное число циклов в местах возможного появления трещин, определяющих долговечность корпуса с учетом запаса, составило  $N_{\text{цикл}} = 7,91 \cdot 10^3$ .

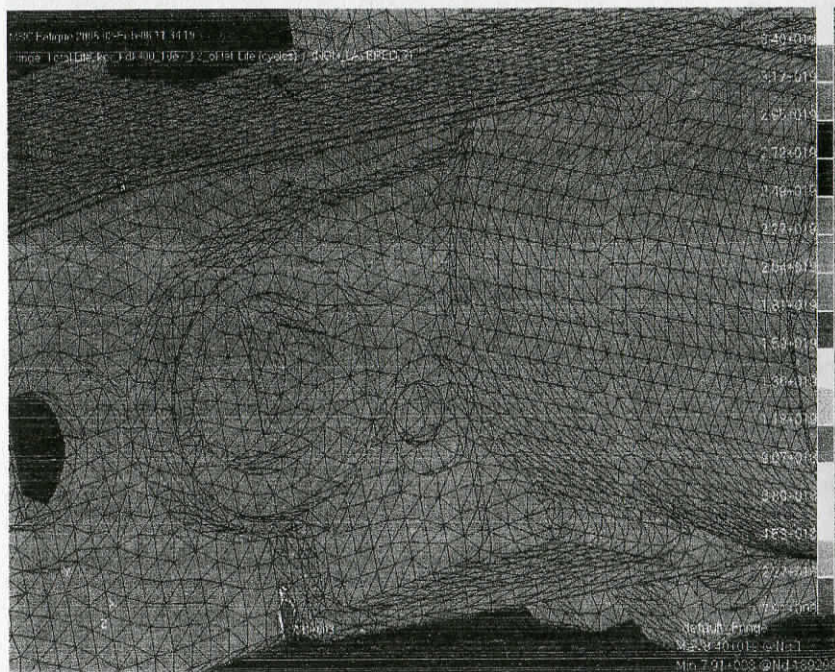


Рис. 4 – Место возможного появления усталостных трещин в корпусе редуктора режущей части очистного комбайна.

Расчет долговечности проводился с 80% точностью, т.е. другими словами, данную долговечность будут иметь 80% этих изделий из партии. Имеется возможность изменять это значение в пределах от 1 до 99%, при этом расчетная долговечность меняется логарифмически следующим

образом: при значении в 1% – долговечность будет наибольшая, но наименее точная, а при 99% – наименьшая, но наиболее точная.

Как было сказано выше, один цикл принимается равным выемке одной полосы угля, тогда умножив полученное число циклов  $N_{\text{цикл}}$  на выражение (1) получим расчетное количество тонн, которое сможет добыть машина до своего списания:

$$Q_{\text{ресурс}} = Q_{\text{полосы}} \cdot N_{\text{цикл}} \quad (3)$$

Расчетный ресурс очистного комбайна до списания по критерию предельного состояния корпусной группы в данном случае составит 3,14 млн.т.

По мере накопления сведений о фактических наработках (ресурсах) машин, эксплуатирующихся в шахтных условиях, могут быть получены данные для уточнения расчетных моделей.

Применение таких методов инженерного анализа и компьютерного моделирования помогло решить описанные выше проблемы увеличения энерговооруженности горных машин (мощности приводов резания и подачи очистных комбайнов в 1,8-2 раза) практически без увеличения габаритов, с одновременным увеличением расчетного ресурса.

Сегодня в институте «Донгипроуглемаш» создана мощная система компьютерного моделирования, включающая стадии:

- трехмерного твердотельного моделирования;
- виртуального моделирования работы горных машин (силовой и кинематический анализ);
- исследования напряженно-деформированного состояния;
- анализа ресурса и долговечности.

Такая система обеспечивает широкий спектр наукоемких инженерных задач снижения веса и трудоемкости изготовления создаваемых машин, их относительной стоимости за счет оптимизации конструкций по критериям сбалансированности нагрузок, равнопрочности, а в ближайшем будущем и по критериям долговечности. Эта система позволяет создавать подробные компьютерные модели горных машин, проводить глубокий анализ с учетом реальных условий эксплуатации. При этом еще на ранних стадиях проектирования создаются точные компьютерные модели, применение которых значительно сокращает сроки проектирования и изготовления горных машин при значительном повышении их качества.

Как следствие, значительно сокращается число натурных экспериментов путем их замены на быстрое, эффективное и высокоточное компьютерное моделирование на основе создаваемых виртуальных моделей. Компьютерные модели не только позволяют создавать новые высокопроизводительные надежные и конкурентоспособные горные машины в сжатые сроки, но и сопровождают их на всем жизненном цикле, позволяя решать различные эксплуатационные проблемы, включая аварийные ситуации, и проводить

оперативные модификации, обеспечивая постоянный высокий уровень эксплуатационных характеристик, большой ресурс и безопасность изделий.

**Список литературы:** 1. *Косарев В.В.* Новая техника Донгипроуглемаша – основа интенсификации добычи угля / Уголь Украины – 2003, № 9. – С. 5-9. 2. Руководящий нормативный документ КД12.10.040-99 Комбайны очистные. Методика выбора параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. 3. Руководящий нормативный документ КД 12.10.042-99 Комбайны очистные. Методика расчета максимальных нагрузок в трансмиссиях. 4. Руководящий нормативный материал КД12.10.041-99 Комбайны очистные. Методика выбора спектров эксплуатационной нагруженности трансмиссий. 5. MSC FATIGUE 2005 “Quick Start Guide”. 6. Материалы ежегодных конференций пользователей MSC. MSC.Software - комплексные технологии виртуального проектирования изделий (VPD). Опыт применения на предприятиях СНГ и стран Балтии