

Рис. 6. Область центральной цапфы усовершенствованной конструкции, в которой напряжения превышают предел текучести материала (0,04% от объема рассчитываемой конструкции)

Данная картина свидетельствует о снижении рабочих нагрузок на элементы опорно-поворотного устройства в 10 раз, соответственно будут снижены внеплановые отказы по причине разрушения конструкции, следовательно возрастет коэффициент технической готовности экскаватора в целом.

Литература.

1. Подэрни, Р. Ю. Механическое оборудование карьеров: учеб. для вузов. – 6-е изд. – М.: МГГУ, 2007. – 680 с.
2. ПО «Ижорский завод им. Жданова» «Расчет моментов инерции экскаватора ЭКГ-10. 3532.00.00.000 PP1» (1983 г.)
3. Хорешок, А.А. Исследование причин наклона поворотной платформы экскаватора-мехлопаты и оценка их воздействия на нагрузки опорно-поворотного устройства. / А.А. Хорешок, Е.К. Соколова, П.В. Буянкин // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – №3. – С. 11–14.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГЕОХОДА

*М.Ю. Блащук, к.т.н., доц., А.А. Дронов, асп., Д.А. Михеев, студент*

*Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского*

*Томского политехнического университета*

*652055, Кемеровская область, г.Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. 8(38451)-6-05-37*

*E-mail: mby.tpu@gmail.com*

### Введение

Геоход – новый класс горной техники в основу конструктивных решений которого положена общая концептуальная модель, разработанная авторами [1]. В основе работы модели лежит принцип ввинчивания ограждающей оболочки в массив, т.е. окружающий массив выполняет функцию гайки, а оболочка – винта, что является принципиальной отличительной особенностью геоходов. При таком перемещении геоход, в отличие от проходческих щитов не отталкивается от торцевой поверхности монолитной или другой крепи, а использует для перемещения предварительно сформированную систему винтовых законтурных каналов.

Основные отличия геоходов от традиционного проходческого оборудования [2,3]:

- принцип работы;
- наличие новых функционально-конструктивных элементов;
- общая функционально-компоновочная схема;
- конструктивные особенности геоходов позволяют реализовать постоянное по величине и непрерывное во времени напорное усилие на исполнительном органе, при этом разрушение массива горных пород будет происходить с постоянным контактом исполнительного органа с поверхностью забоя, что обеспечит устойчивость, как самого забоя, так и призабойной зоны;
- возможность реализации на исполнительном органе любых напорных усилий (возможность создания исполнительных органов (ИО) для разрушения крепких пород);
- качественно новые функциональные возможности, т.е. геоход может выполнять свои функции при любом пространственном положении.

### **Требования к трансмиссии геохода.**

Одной из основных систем геохода, создающих тяговое усилие на внешнем движителе и напорное усилие на исполнительном органе является трансмиссия [4]. Именно трансмиссией определяются силовые параметры геохода и скорость его продвижения в геосреде, поэтому особое значение приобретают вопросы, связанные с разработкой конструкции трансмиссии геоходов и определением её технико-эксплуатационных показателей.

На основании отличительных особенностей геохода были сформированы требования к трансмиссиям геоходов нового поколения [5]:

- трансмиссия должна обеспечивать непрерывную подачу геохода на забой;
- трансмиссия должна обеспечивать вращающий момент на головной секции, достаточный для формирования на внешнем движителе усилий для перемещения всего геохода, а также, достаточный для отделения горной породы от массива исполнительными органами;
- размеры и расположение трансмиссии и привода должны оставлять достаточно свободного пространства внутри агрегата для удаления отделенной горной массы, прохода людей для обслуживания узлов, а также размещения других элементов и систем;
- трансмиссия должна обеспечивать возможность реверсирования движения геохода;
- трансмиссия должна обеспечивать работу геохода при любом его пространственном положении;
- трансмиссия и привод должны быть смонтированы на единой конструктивной базе геохода.

При рассмотрении возможных вариантов компоновочно-конструктивных решений трансмиссий геохода необходимо определить граничные условия применения того или иного вида трансмиссии на основе анализа соответствия сформированным требованиям.

Также требования к развиваемым силовым и кинематическим характеристикам трансмиссии требуют уточнения в зависимости от ожидаемых усилий взаимодействия геохода с геосредой, а также на основании особенностей геосреды и технологии проведения выработки.

### **Формирование условий для разработки математической модели.**

При движении геохода в геосреде на величину развиваемого вращающего момента трансмиссии геохода существенное влияние оказывают проявления различного рода сил, возникающих из-за взаимодействия элементов геохода с окружающей геосредой. Возникающие силы оказывают сопротивление передвижению секций [6]. Характер взаимодействия геохода с окружающей породой неоднозначен и зависит от большого числа факторов: геометрических (конструктивных) параметров геохода, физико-механических характеристик и строения массива, начального поля напряжений и др. Методы определения нагрузок от этих сил на геочод, работающий в жесткопластической среде, основываются на расчетных схемах, предусматривающих режим заданной нагрузки. Математическая модель для определения усилий, необходимых для перемещения геохода, предложенная в работе [1] разработана с учетом существующей трансмиссии с гидроцилиндрами. В данной математической модели определяются  $P_d$  – усилие, развиваемое всеми гидроцилиндрами вращения геохода и тяговое усилие при совмещенном режиме перемещения  $P_T$ . Данная математическая модель не учитывала сформированные требования к трансмиссии геоходов нового технического уровня [5], в части обеспечения непрерывности вращения и совмещенного режима перемещения секций.

В модели приняты следующие допущения:

- цилиндрические секции геохода обладают достаточной жесткостью при действии внешних нагрузок, т.е. не допускаются значительные деформации оболочек секций, которые могут привести к их самозаклиниванию при перемещении;
- вертикальная и горизонтальная составляющие горного давления равномерно распределены соответственно по горизонтальной и вертикальной проекциям геохода;
- режим перемещения – совмещенный, т.е. одновременно передвигаются обе секции геохода;
- первоначально геометрические параметры геохода принимаются аналогично параметрам геохода ЭЛАНГ-4;

Для определения усилия  $P_{сш}$  необходимо рассмотреть схему сил, действующих на секции геохода при рабочем ходе в выработке с углом подъёма  $\alpha$  (рисунок 1). Обозначения, использованные на схеме и в последующих выражениях, приведены в таблице 1.

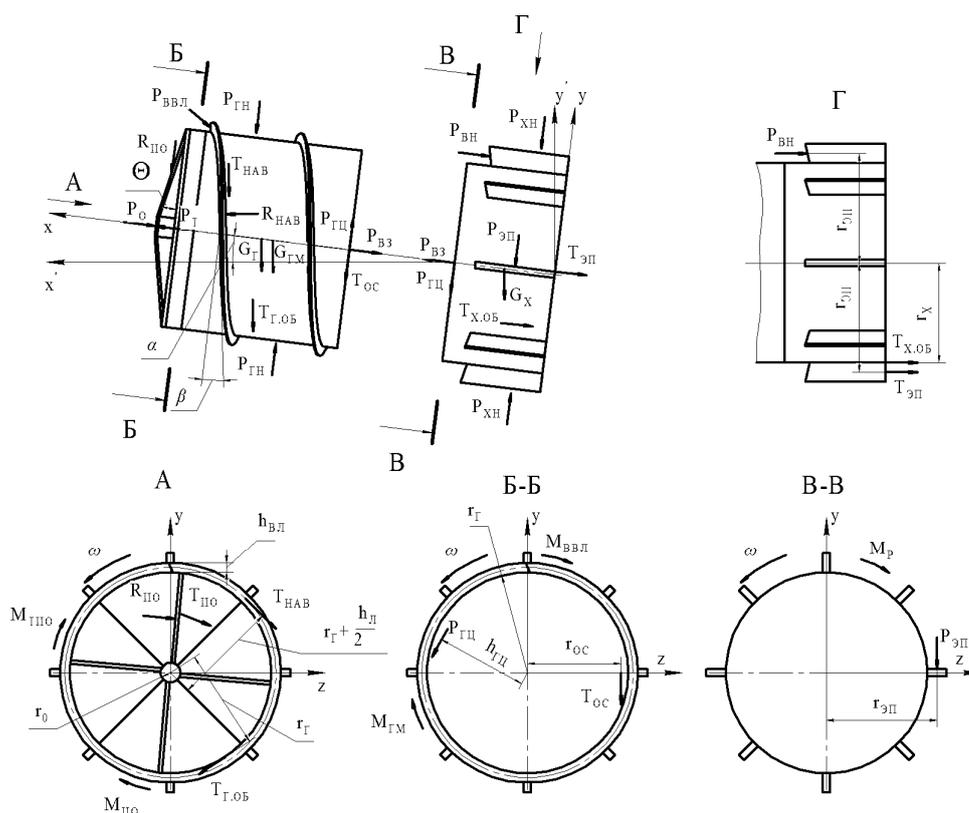


Рис. 1. Расчетная схема к определению необходимых усилий перемещения двухсекционного геохода

Таблица 1

Обозначение величины	Наименование, единицы измерения
$f_{TP}$	Коэффициент трения стали о вмещающую породу.
$f_{TP.K}$	Коэффициент трения качения в узле сопряжения.
$G_G$	Вес головной секции, с учетом смонтированных на ней исполнительных органов, погрузочного устройства и другого оборудования, Н
$G_{GM}$	Вес отбитой горной массы, находящейся внутри агрегата, Н
$G_X$	Суммарный вес хвостовой секции с оборудованием, Н
$h_{ВЛ}$	Высота винтовой лопасти, м
$h_{ГЦ}$	Плечо приложения силы от гидроцилиндров вращения, м
$M_{ВВЛ}$	Момент сопротивления, создаваемый винторезом винтовой лопасти при внедрении в приконтурный массив, Н·м
$M_{GM}$	Момент, необходимый для перемещения разрушенной породы из нижней части геохода вверх, Н·м
$M_{ИО}$	Момент сопротивления резанию на исполнительном органе, Н·м
$M_P$	Реактивный вращающий момент на хвостовой секции, Н·м
$M_{ТНО}$	Момент сопротивления, создаваемый трением исполнительного органа по породе, Н·м
$P_{ВВЛ}$	Усилие внедрения винтовой лопасти в приконтурный массив при движении агрегата, Н
$P_{ВЗ}$	Усилие взаимодействия головной и хвостовой секций при движении агрегата, Н

Обозначение величины	Наименование, единицы измерения
$P_{BH}$	Суммарное усилие внедрения элементов противовращения в приконтурный массив, Н
$P_{ГН}$	Нормальная составляющая нагрузок от горного давления на головную секцию, Н
$P_{ГЦ}$	Суммарное усилие развиваемое гидроцилиндрами вращения для перемещения секций, Н
$P_O$	Проекция полной силы сопротивления резанию на ось вращения секций, Н
$P_T$	Сила тяги винтового движителя, Н
$P_{ХН}$	Нормальная составляющая нагрузок от горного давления на головную секцию, Н
$P_{ЭП}$	Нормальная составляющая реактивной силы на элементах противовращения от реактивного крутящего момента, Н
$R_{ИО}$	Проекция полной силы сопротивления пород резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, Н
$R_{НАВ}$	Реакция пород контура выработки на винтовую лопасть, Н
$r_G$	Радиус головной секции, м
$r_O$	Радиус стакана центральной опоры в передней части геохода, м
$r_{OC}$	Радиус окружности центров тел качения подшипникового узла, м
$r_X$	Радиус хвостовой секции, м
$r_{ЭП}$	Расстояние от оси вращения до середины элементов противовращения, м
$T_{Г.ОБ}$	Суммарная сила трения оболочки головной секции о породу, Н
$T_{ИО}$	Сила трения исполнительного органа об разрушаемую породу, Н
$T_{НАВ}$	Сила трения винтовой лопасти об вмещающую породу, Н
$T_{OC}$	Суммарные силы трения качения останова в подшипниковом узле секций, Н
$T_{X.ОБ}$	Суммарная сила трения хвостовой секции о породу, Н
$T_{ЭП}$	Суммарная сила трения элементов противовращения хвостовой секции о породу, Н
$\alpha$	Угол подъёма выработки, град
$\beta$	Угол подъёма винтовой лопасти, град
$\varphi_{ТР}$	Угол трения между породой и сталью, град
$\Theta$	Средний угол между плоскостью перекрытия исполнительного органа и плоскостью, перпендикулярной оси вращения, град
$\omega$	Угловая скорость вращения головной секции геохода, с <sup>-1</sup> .

Разработка математической модели.

Составим систему, состоящую из трех уравнений равновесия для обеих секций:

$$\begin{cases} P_T - P_O - (G_G + G_{ГМ}) \cdot \sin \alpha - T_{НАВ} \cdot \sin \beta - T_{Г.ОБ} \cdot \sin \beta - P_{ВЗ} - P_{ВВЛ} = 0 \\ P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ} - M_{ИО} - M_{ТНО} - M_{ГМ} - M_{ВВЛ} - T_{НАВ} \cdot \left( r_G + \frac{h_{ВЛ}}{2} \right) \cdot \cos \beta - \\ - R_{НАВ} \cdot \left( r_G + \frac{h_{ВЛ}}{2} \right) \cdot \sin \beta - T_{Г.ОБ} \cdot r_G \cdot \cos \beta - T_{OC} \cdot r_{OC} = 0 \\ P_{ВЗ} - P_{BH} - T_{X.ОБ} - T_{ЭП} - G_X \cdot \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (1)$$

В данных уравнениях неизвестными являются:

$$P_{ГЦ}, R_{НАВ}, P_{ВЗ}.$$

В этих уравнениях силы  $P_T, T_{НАВ}, T_{ЭП}, T_{ОС}$  выражены через другие составляющие этих же уравнений. Сила тяги  $P_T$  представляет собой произведение:

$$P_T = R_{НАВ} \cdot \cos \beta. \quad (2)$$

Сила трения винтовой лопасти  $T_{НАВ}$  представляет собой выражение [1]:

$$T_{НАВ} = |R_{НАВ}| \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ТР}, \quad (3)$$

$$\text{где } \varphi_{ТР} = \operatorname{arctg} f_{ТР}. \quad (4)$$

С учетом выражения  $\operatorname{tg}(\operatorname{arctg}(a)) = a$  формулу (3) можно записать в виде:

$$T_{НАВ} = |R_{НАВ}| \cdot f_{ТР}. \quad (5)$$

Суммарные силы трения элементов противовращения хвостовой секции о породу [1]:

$$T_{ЭП} = \frac{P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ}}{r_{ЭП}} \cdot f_{ТР}. \quad (6)$$

Суммарные силы трения качения останова в подшипниковом узле можно определить как [1]:

$$T_{ОС} = (P_{ВН} + T_{Х.ОБ} + G_X \cdot \sin \alpha) \cdot f_{ТР.К}. \quad (7)$$

Подставим в уравнения системы (1) выражения (2) – (6) и приведем подобные:

$$\begin{cases} R_{НАВ} \cdot (\cos \beta - f_{ТР} \cdot \sin \beta) - P_O - (G_\Gamma + G_{ГМ}) \cdot \sin \alpha - T_{Г.ОБ} \cdot \sin \beta - P_{ВЗ} - P_{ВВЛ} = 0 \\ P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ} - M_{НО} - M_{ТНО} - M_{ГМ} - M_{ВВЛ} - R_{НАВ} \cdot \left( r_\Gamma + \frac{h_{ВЛ}}{2} \right) \cdot (\sin \beta - f_{ТР} \cdot \cos \beta) - \\ - T_{Г.ОБ} \cdot r_\Gamma \cdot \cos \beta - T_{ОС} \cdot r_{ОС} = 0 \\ P_{ВЗ} - P_{ВН} - T_{Х.ОБ} - \frac{P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ}}{r_{ЭП}} \cdot f_{ТР} - G_X \cdot \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Для решения системы (8) из последнего уравнения выразим составляющую  $P_{ВЗ}$ :

$$P_{ВЗ} = P_{ВН} + T_{Х.ОБ} + \frac{P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ}}{r_{ЭП}} \cdot f_{ТР} + G_X \cdot \sin \alpha. \quad (9)$$

Из первого уравнения системы (8) выразим составляющую  $R_{НАВ}$ :

$$R_{НАВ} = \frac{P_O + (G_\Gamma + G_{ГМ}) \cdot \sin \alpha + T_{Г.ОБ} \cdot \sin \beta + P_{ВЗ} + P_{ВВЛ}}{\cos \beta - f_{ТР} \cdot \sin \beta}. \quad (10)$$

Подставим в (10) вместо  $P_{ВЗ}$  выражение (9), одновременно перегруппировав члены получим:

$$R_{НАВ} = \frac{P_O + (G_\Gamma + G_{ГМ} + G_X) \cdot \sin \alpha + T_{Г.ОБ} \cdot \sin \beta + P_{ВВЛ} + P_{ВН} + T_{Х.ОБ} + \frac{P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ}}{r_{ЭП}} \cdot f_{ТР}}{\cos \beta - f_{ТР} \cdot \sin \beta}. \quad (11)$$

Поскольку выражение (11) достаточно большое и включает неизвестное  $P_{ГЦ}$ , которое придется выразить из второго уравнения системы (8), перепишем выражение (11) в более удобном виде:

$$R_{НАВ} = \frac{\Sigma P + \frac{P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ}}{r_{ЭП}} \cdot f_{ТР}}{\cos \beta - f_{ТР} \cdot \sin \beta}, \quad (12)$$

$$\text{где } - \Sigma P = P_O + (G_\Gamma + G_{ГМ} + G_X) \cdot \sin \alpha + T_{Г.ОБ} \cdot \sin \beta + P_{ВВЛ} + P_{ВН} + T_{Х.ОБ}. \quad (13)$$

Теперь, во второе уравнение системы (8), подставим вместо  $R_{НАВ}$  выражение: (12)

$$P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ} - \Sigma M - \left( \Sigma P + \frac{P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ}}{r_{ЭП}} \cdot f_{ТР} \right) \cdot k - T_{Г.ОБ} \cdot r_\Gamma \cdot \cos \beta - T_{ОС} \cdot r_{ОС} = 0, \quad (14)$$

$$\text{где } \Sigma M = M_{HO} + M_{THO} + M_{GM} + M_{BBL}, \quad (15)$$

$$k_1 = \frac{(\sin \beta - f_{TP} \cdot \cos \beta)}{\cos \beta - f_{TP} \cdot \sin \beta} \cdot \left( r_G + \frac{h_{BL}}{2} \right). \quad (16)$$

Раскрыв скобки в выражении (14) найдем  $P_{ГЦ}$

$$P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ} \left( 1 - \frac{k_1 \cdot f_{TP}}{r_{ЭП}} \right) = \Sigma M + \Sigma P \cdot k_1 + T_{Г.ОБ} \cdot r_G \cdot \cos \beta + T_{OC} \cdot r_{OC}$$

$$P_{ГЦ} = \frac{\Sigma M + \Sigma P \cdot k_1 + T_{Г.ОБ} \cdot r_G \cdot \cos \beta + T_{OC} \cdot r_{OC}}{h_{ГЦ} \left( 1 - \frac{k_1 \cdot f_{TP}}{r_{ЭП}} \right)} \quad (17)$$

Вынося из знаменателя правой части выражения (17) плечо  $h_{ГЦ}$  в левую часть найдем требуемый вращающий момент  $M_{ВР.ТР}$ , развиваемый гидроцилиндрами:

$$M_{ВР.ТР} = P_{ГЦ} \cdot h_{ГЦ} = \frac{\Sigma M + \Sigma P \cdot k_1 + T_{Г.ОБ} \cdot r_G \cdot \cos \beta + T_{OC} \cdot r_{OC}}{1 - \frac{k_1 \cdot f_{TP}}{r_{ЭП}}} \quad (18)$$

#### **Вывод.**

Полученные аналитические выражения (1) – (18), являются математической моделью взаимодействия корпуса двухсекционного геолода с окружающими породами в условиях сухого трения. Разработанная математическая модель учитывает непрерывный поступательно-винтовой характер перемещения секций, особенности исполнительного органа, наличие винтовой лопасти на внешней поверхности оболочки секций, а также влияние забоя на величину сил горного давления. Данная модель верна для двухсекционной схемы геолода, с любым исполнительным органом и любого типа трансмиссии.

Полученные результаты достигнуты в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Договор №02.G25.31.0076.

#### **Литература.**

1. Аксенов В.В. Научные основы геовинчестерной технологии проведения горных выработок и создания винтоповоротных агрегатов: дис. док. техн. наук. – Кемерово: ИУУ СО РАН, 2004. - 307 с.
2. Аксенов В.В., Ефременков А.Б. Геовинчестерная технология и геолоды - наукоемкий и инновационный подход к освоению недр и формированию подземного пространства // Уголь/ Москва, 2009– №2. С.26-29.
3. Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Садовец В.Ю., Тимофеев В.Ю., Блащук М.Ю., Бегляков В.Ю. Формирование требований к основным системам геолода // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal). Перспективы развития горно-транспортных машин и оборудования / М.: издательство «Горная книга» – 2009. – ОВ №10. С. 107-118.
4. Ефременков А.Б., Аксенов В.В., Блащук М.Ю., Тимофеев В.Ю. Разработка требований к трансмиссии геолодов // Известия вузов. Горный журнал / Екатеринбург, 2009–№8. С. 101-103.
5. Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Бегляков В.Ю., Блащук М.Ю., Тимофеев В.Ю., Сапожкова А.В. Разработка требований к основным системам геолода // Горное оборудование и электромеханика/ Москва, 2009– №5. С.3-7.
6. V.V. Aksenov, A.B. Efremenkov, V.Yu. Beglykov. The influence of relative distance between ledges on the stress-strain state of the rock at a face // Applied Mechanics and Materials Vol. 379 (2013) pp 16-19 © (2013) Trans Tech Publication, Switzerland doi: 10.4028/ www.scientific.net/ AMM.379.16.