

показатели по стране в целом (таблица 2). Причем доля породных отвалов в МТН достигает 30-40% [1].

Поэтому проблема оставления шахтной породы под землей приобрела большую актуальность. Ее успешное разрешение не только улучшит экологическую обстановку в угледобывающих районах, но и позволит:

– усовершенствовать технологию очистных работ на пластах с сложными горно-геологическими условиями;

– снизить концентрацию напряжений во вмещающих породах и повысить их устойчивость в призабойном пространстве и в окрестности очистного забоя [3,4], уменьшить вывалообразование при добыче угля [5];

– дополнительно стимулировать применение сплошной системы разработки и проведения выработок широким забоем;

– возможность отработки предохранительных целиков, запасы которых составляют по ГКХ «Донсцкуголь» 76 млн. т, по ГКХ «Максвуголь» - 55 млн. т, ГКХ «Октябрьуголь» - 14 млн. т. а по Донбассу около 2,2 млрд. т угля [6];

– улучшить температурный режим в очистных забоях (полная закладка выработанного пространства позволяет снизить температуру воздуха в очистных забоях на 5-7 °С)

В настоящее время имеется ряд технических решений, которые позволяют частично оставлять породу в шахте, по ее объем не превышает 8 млн. т (примерно 9% от ее годового объема), но данные решения касаются в основном разработки крутых пластов. Но даже в них не до конца были решены вопросы транспортирования закладочного материала к очистным забоям и размещения его в выработанном пространстве. В связи с этим большинство смонтированных закладочных комплексов не были введены в эксплуатацию (шахты «Юнком», им. Ленина, им. Гагарина, «Углегорская») или работали непродолжительное время с низкими нагрузками (шахты «Кочегарка», им. Стаханова, им. Калинина, «Александр-Запад»).

Таким образом, для разрешения проблематики оставления пустой породы в шахте необходимо разрабатывать новые технико-организационные предложения по сокращению выхода породы при ведении горных работ, высокоэффективные средства доставки, переработки и размещения породы в выработанном пространстве, создать технологию с комплексной механизацией сбора, переработки и размещения породы в подземных полостях.

Таблица 1. Объемы получения породы в ГКХ «Добропольеуголь», т

Предприятие	1995 г.	1996 г.	1997 г.	1998 г.	1999 г.
Шахта «Добропольская»	343344	299595	302515	248223	209690
Шахта «Алмазная»	454000	250805	225457	139753	84663
Шахта «Белозерская»	584000	85791	193305	180000	53939
Шахта «Новодонецкая»	93000	87300	50234	74208	59795
Шахта «Белицкая»	550000	331000	245906	70154	16808
Шахта «Красноармейская»	50000	53967	77219	57400	-
Шахта «Пионер»	287000	444000	115000	109906	164501
ЦОФ «Добропольская»*	1111912	854584	1078580	883482	-
ЦОФ «Октябрьская»*	710296	714185	784656	701666	-
ГОФ «Красноармейская»*	249323	64495	118924	59556	-
Итого по ГКХ «Добропольеуголь»	4432875	3185722	3191796	2524348	589396**

Примечание: * - объемы полученных хвостов обогащения, ** - без учета шахт и фабрик, не предоставивших данные.

Таблица 2. Значения МТН по угледобывающим районам стран СНГ

Страна, регион	Наполнено отходов, млрд. т.		Модуль техногенной нагрузки			
	Всего	В угледобывающих регионах	МТНп, тыс. т/км ²		МТНн, т/чел.	
			Всего	В угледобывающих регионах	Всего	В угледобывающих регионах
Украина	25	4,6	41,4	355	462	1700
в том числе:						
Донбасс	10	4,2	250	1940	2150	3100
Львовско-Волинский бассейн	3	0,3	76	770	830	1150

Библиографические ссылки

1. Білявський Г.О., Падун М.М., Р.С. Фурдуй. Основи загальної екології. - К.: Либідь, 1995 - 368 с.
2. Звіт лабораторії ВГРЧ за 1997 рік. - Донецьк, 1998. - 38 с.
3. Зборщик М.П., Подкопаев С.В. Механизм повышения устойчивости кровли в лавах при закладке выработанного пространства // Уголь Украины. 1992. №5.
4. Шалаберидзе Ф.Ф. О влиянии закладки на интенсивность динамических проявлений горного давления // Научные сообщения ИГД им. Скопинского. - 1986.-Вып. 244.
5. Бондаренко Ю.В., Макеев А.Ю. Влияние заполненности выработанного пространства рядовой породой на вмещающий массив весьма тонких пластов // Уголь Украины. - 1990. - №12.
6. Бондаренко Ю.В., Салицкий К.Ф., Кравченко А.А. О целесообразности отработки брошенных запасов // Уголь Украины. - 1998. - №3.

Рекомендовано к публикации д.т.н. А.Н. Шащенко

УДК 622.023.623: 556.332

ХАРАКТЕР РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В СЛОИСТЫХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Носач А.К., Рязанцева Н.А., Бачурин Л.Л.,
Красноармейский филиал ДонНТУ, Красноармейск
Рязанцев Н.А., ПО «Красноармейскуголь»

Розглядаються фізичні особливості процесів тріщинотворення в неоднорідному шаруватому масиві гірських порід і їхній вплив на зміну водопроникності приробленого масиву при розробці вугільних шарів довшими очистними вибоями.

Physical features of processes cracking in a non-uniform layered file of rocks and their influence on change of water penetration earn additionally a file are examined by development of coal layers long clearing working faces.

1. Физические основы разрушения неоднородных горных пород
Осадочная толща карбоновых отложений Донбасса представлена переслаиванием пород различного литологического состава: известняка, угля, глинистого и песчаного сланцев, песчаника, реже гравелита. Кроме того, внутри каждого слоя в процессе катагнеза формируются структурные блоки размером примерно в три раза больше мощности пласта.

Осадочные породы имеют очень много различных плоскостей раздела как на структурном, так и на тектурном уровнях: границы зерен, микро- и макротрещины, границы слоистости, серий, пластов, блоков и т.д.

Если на зарождение трещин в породах оказывают влияние неоднородности малого масштаба (порядка размера зерна), то на распространение трещин, как показано в [1], влияют неоднородности масштаба более 3 см, т.е. границы, серий, слоев (пластов), блоков и т.д.

С точки зрения разрушения неоднородность горных пород характеризуется изменением физико-механических свойств. Дискретные, кусочно-неоднородные массивы характеризуются резким изменением свойств при переходе от одного слоя к другому, а также в пределах между блоками.

С химической точки зрения разрушение твердых тел рассматривается как постепенное накопление в деформируемом объеме дефектов, который заканчивается образованием критического размера, способных распространяться самопроизвольно [2]. При этом неизвестен способ разрушения (химический, термический, механический), все они энергетически подобны.

Любому разрушению предшествует пластическая деформация. Энергия же пластической деформации, требуемой для создания зоны перед фронтом трещины, не зависит от механических условий разрушения, а определяется физико-химической природой материала и его структуры [2].

Ряд исследователей даже считают, что процесс пластической деформации и разрушения происходит за счет локального плавления либо других структурных переходов в слое скольжения [3-5]. Поэтому критерием разрушения горных пород и, наоборот, характеристикой неоднородности свойств в наиболее общем случае является удельная внутренняя энергия как суммы энергий всех составляющих породу частиц.

Изменение внутренней энергии под действием внешних сил и подводимого тепла можно представить в виде:

$$dU = \partial Q - \partial A,$$

где dU - изменение внутренней энергии; Q - подводимое тепло; A - работа внешних сил, совершаемая при деформировании горной породы.

С учетом порового давления флюида (воды, пара, газа)

$$\partial A = \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} - P f d\omega,$$

где σ_{ij} - компоненты поля напряжений в горном массиве; ϵ_{ij} - компоненты поля деформации; P - давление флюида в порах; f - пористость породы; ω - объемная деформация.

Тепловой эффект пластической деформации

$$dQ = T dS - T dS_i,$$

где dS_i - возрастание энтропии при неупругом деформировании.

$$dS_i = \frac{1}{T} \sigma_{ij} \partial \epsilon_{ij}.$$

Как показано в [6], деформация твердого тела квантована, не зависит от химической природы вещества, а только от степени возбужденности атомов, молекул и может быть представлена в виде:

-- для малых деформаций

$$\epsilon = \sqrt{\frac{n - n_0}{n_0 - 0,5}},$$

где n_0 , n - число фононов до и после возбуждения (деформирования);

-- для больших деформаций

$$\epsilon = \frac{3n^2 - l(l+1)}{3n_0^2 - l_0(l_0+1)} - 1,$$

где n_0 , l - соответственно главное и азимутальное квантовые числа исходного состояния -- то же, деформированного состояния.

Для адиабатического процесса деформирования, когда $Q = 0$, $dU = A$, т.е. вся работа деформирования идет на изменение внутренней энергии.

Для изотермического процесса, вводя свободную энергию F , имеем:

$$dF = dU - T dS.$$

Если представить свободную энергию в виде суммы поверхностной и объемной энергии, отнеси их к единице объема породы, получим закон разрушения Рибайндера [5]:

$$W = m + \gamma_0 S_V,$$

где m - удельная объемная энергия разрушения, определяющая зарождающиеся (активацию) трещины, Дж/м³; γ_0 - удельная поверхностная энергия разрушения, характеризующая затраты энергии на распространение трещин (образование новых поверхностей), Дж/м²; S_V - удельная поверхность разрушенного материала, м²/м³.

С учетом локализации деформации

$$m = m_0 - \mu_0 A_f - \frac{A_f}{1 + \mu_0^2},$$

$$m_0 = Q_0 N_L \theta_V.$$

где m_0 - удельная энергия активации в отсутствие деформации, Дж/м³; Q_0 - энергия активации молекулы, Дж; $N_L = 2,68 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ - число Лошмидта; $\theta_V = 10^2 \dots 10^4$ - величина относительного активационного объема; A_V , A_f - плотность энергии изменения объема и формы

соответственно; $\mu_0 = \frac{2(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1 - \sigma_3} \cdot l$ - параметр вида напряженного состояния Надаи-Лоде; σ_1 , σ_2 , σ_3 - главные напряжения.

При разрушении горных пород экспериментально очень трудно разделить момент активации трещины, срабатывания её с места и распространения. Поэтому для характеристики свойств пород с точки зрения трещиностойкости вводится эффективная поверхностная энергия разрушения:

$$\gamma = \gamma_0 + \left[m_0 - \mu_0 A_f - \frac{A_f}{1 + \mu_0^2} \right] \frac{\Delta V}{S_H},$$

где ΔV - величина пластически деформируемого объема (активированного объема), м³; S_H - величина вновь образованной поверхности, м².

Чем меньше пластически деформированный объем, тем более крупные фрагменты (блоки) породы образуются при разрушении.

Величина эффективной поверхностной энергии может характеризовать трещиностойкость макронееднородной (слоя, блока). Характер и механизм разрушения таких сред определяется, в основном, видом напряженного состояния.

При наличии непрерывной неоднородности (постепенное изменение свойств пород с глубиной) с увеличением величины объемного сжатия (глубины) трещины отрыва все менее склонны к распространению, но облегчается распространение сдвиговых трещин. Плотность плоскостей скольжения при этом растет, наблюдается фрагментация (разделение породы на отдельные блоки, фрагменты), а при больших степенях деформации возникают ротационные эффекты, связанные с поворотом фрагментов друг относительно друга [6-7]. В целом же непрерывная неоднородность мало влияет на прочность и трещиностойкость породного массива [1].

Скачкообразная неоднородность, характеризуемая резким изменением упругости и трещиностойкости между слоями, неодинаково влияет на распространение трещин отрыва и сдвига [1]. При приближении к границе раздела слоев с различными свойствами, когда трещина находится в более жестком слое, ей более выгодно распространяться в сторону границы раздела при отрыве, и в противоположную сторону -- при сдвиге. Если же трещина находится в менее жестком слое, наблюдается обратная картина. Другими словами, для трещины, находящейся в более жестком слое, отрыв идет параллельно границе раздела, а сдвиг -- перпендикулярно ей.

Экспериментально установлено, что если более жесткий слой породы имеет меньшую трещиностойкость, то, при переходе трещины в более трещиностойкий слой, граница раздела является стопором, трещина распространяется по границе раздела или вдоль неё, и трещиностойкость многослойного массива близка к слою с максимальной трещиностойкостью. При переходе трещины в менее трещиностойкий слой, она сечет его по нормали, а трещиностойкость многослойного массива близка к наименьшей величине. То есть, энергоёмкость разрушения многослойного массива близка к тому слою, в который стремится трещина.

Если же более жесткий слой является одновременно и более трещиностойким, то энергоёмкость разрушения многослойного массива всегда близка к слою с большей трещиностойкостью, а трещина распространяется перпендикулярно границе раздела.

Коэффициент упрочнения (ослабления) за счет влияния границы раздела может быть представлен в виде:

$$k_{(n)} = \sqrt{(\gamma_1/\gamma_2)(\gamma_2/\gamma_3)\dots(\gamma_{n-1}/\gamma_n)},$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ — трещиностойкости смежных слоёв, в которые стремится трещина.

Если более жесткий слой (блок) породы является одновременно и более трещиностойким, располагается ближе к поверхности обнажения, то трещины в нём распространяются параллельно плоскости обнажения, а прочность слоистой среды в объёмном поле сжимающих напряжений находится в промежутке между прочностями составляющих слоёв. Разрушение более жесткого и трещиностойкого слоя вызывает автоматически и разрушение менее трещиностойкого соседнего слоя.

Если ближе к поверхности обнажения находится менее трещиностойкий слой, то трещины распространяются под углом к поверхности обнажения.

Когда большую трещиностойкость имеет менее жесткий слой, который не является концентратором напряжений, возможны два противоположных эффекта. Если он расположен ближе к поверхности обнажения, то зародившиеся в менее трещиностойком слое сдвиговые трещины распространяются под углом к границе раздела, но, поскольку граница является стопором, слой не разрушается до тех пор, пока не разрушится более трещиностойкий слой. В этом случае прочность многослойного массива может быть даже больше наиболее прочного слоя (эффект композиционных материалов). Если же более трещиностойкий, но менее жесткий слой удален от поверхности обнажения вглубь массива, разрушение идет по слабому слою, прилегающему к поверхности обнажения, трещины распространяются параллельно поверхности обнажения, но, поскольку граница раздела является стопором, более трещиностойкий слой может оказаться вовсе не разрушенным.

Таким образом, разрушение слоистого массива не всегда идет по «слабому» звену. Все зависит от соотношения свойств слоёв. При этом реальные свойства пород могут существенно отличаться от теоретических моделей. Если теория предполагает, что слой с большей упругостью является одновременно и более трещиностойким, то в реальности трещиностойкости угля сланца и песчаника могут быть одинаковыми, несмотря на значительное отличие их упругих свойств. В результате при сдвигении пород вокруг очистных и подготовительных выработок, трещины, распространяющиеся в подрабатываемой толще, могут быть как прямолинейными (криволинейными), так и ступенчатыми. Однако, с точки зрения обводнения выработок, большее значение имеет раскрытие (зияние) этих трещин.

2. Характер и механизм распространения трещин в горных породах

При малом всестороннем (боковом) давлении сопротивление сдвигу по границам раздела на порядок меньше, чем внутри структурного блока (по границам зерен меньше, чем по зерну; по границе раздела слоёв меньше, чем по слою; по границе структурных блоков меньше, чем внутри блока). При сдвиге, в этом случае, может происходить смещение структурных элементов перпендикулярно поверхностям трещины.

При высоких боковых давлениях и невозможности смещения перпендикулярно поверхностям трещины, прочность на сдвиг по границе раздела приближается к прочности структурного элемента, а когда они сравниваются по величине, скол по структурному элементу становится более вероятным, чем по границе раздела [1].

Учитывая, что субширотная горизонтальная составляющая поля напряжений в горном массиве является максимальной, а вертикальная — промежуточной или минимальной, характер разрушения слоёв во многом будет определяться направлением выемки, способом управления кровлей и др. При этом немаловажную роль имеет направление и количество зародышевых трещин в породах, минеральный состав пород.

Так, в [1] показано, что зародышевые трещины в песчанике образуются у зерен кварца за счет различия пластических свойств цемента и кварца, проскальзывания зерен относительно друг друга, а также внутри зерен путем слияния пор, раздавливания или раскалывания. В известняках карбонатом цемента песчаников, в зернах полевых шпатов зарождение трещин происходит путем раскрытия двойниковых плоскостей и плоскостей спайности.

Распространение трещин также происходит по-разному. В карбонатах, глинистых сланцах, песчаниках с базальным цементом трещины развиваются за счет слияния пор и микротрещин, которые образуются в плоскости локализации деформации на границах зерен и плоскости спайности. Когда количество микротрещин в единице объема (плотность дефектов) достигнет

критического значения, они сливаются в микротрещину. В песчаниках с поровым и контактовым цементом распространение трещин происходит путем постепенного прорастания зародышевых трещин.

Шероховатость берегов трещины сдвига составляет сотые доли миллиметра и, при шероховатости более 40 мкм, коэффициент трения берегов друг о друга от шероховатости практически не зависит. В карбонатах и песчаниках коэффициент трения составляет 0,5-0,6, в сланцах и песчаниках с глинистым цементом — 0,3-0,4.

При больших боковых давлениях происходит смена зернограницного распространения трещин на транскристаллитное, шероховатость берегов трещин и их раскрытие уменьшится, а коэффициент трения берегов друг от друга начинает зависеть от шероховатости из-за возникновения молекулярных связей.

На фотографиях представлены трещины в аншифах и прозрачных шлифах, свидетельствующие о различных механизмах разрушения и различном раскрытии трещин в породах с увеличением глубины и величины бокового давления.

После раскрытия трещины её берега удалены на расстояние [7]:

$$\delta = \frac{\gamma}{\tau_c},$$

где γ — удельная поверхностная энергия разрушения, Дж/м²; τ_c — предел текучести породы, МПа.

До тех пор, пока разрушение идет по границам зерен, раскрытие трещины может достигать нескольких миллиметров. После смены зернограницного разрушения транскристаллитным, раскрытие трещин уменьшается до десятых и даже тысячных долей миллиметра.

Глубина, на которой происходит смена механизма разрушения, может быть определена по формуле:

$$H = \frac{\tau_c}{0,8 \rho g \delta}$$

где ρ — объёмный вес, кН/м³; $g\delta$ — коэффициент внутреннего трения.

Расчеты и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в угле смена механизма разрушения происходит на глубинах 150-160 м, в глинистых сланцах — 400 м, песчаных сланцах — 500-600 м, песчаниках — 900-950 м.

Когда трещина распространяется в слоистой среде, раскрытие её может меняться в зависимости от напряженного состояния и трещиностойкости слоёв.

Ещё в нетронутом массиве сжатие перпендикулярно слоистости вызывает растяжение и разрыв на блоки жестких слоёв (будинаж), течение слабых пластичных слоёв. Сжатие параллельно слоям вызывает раздувы и пережимы. Из-за различия напряженного состояния отдельных блоков и слоёв ориентация трещин относительно разрушающего максимального напряжения также может отличаться. Однако общая закономерность уменьшения раскрытия трещин с увеличением глубины сохраняется и для нетронутого массива.

В блоках, где вертикальная компонента горного давления превалирует над горизонтальной, при выемке полезного ископаемого в первую очередь проявляется раскрытие вертикальных трещин, а расслоение слоёв проявляется уже вследствие их прогиба и обрушения. В таких случаях отработка выемочных участков характеризуется повышенными притоками воды из подработанных толщ.

В случае, когда субширотная составляющая горного давления превалирует над вертикальной, раскрытие трещин параллельно напластованию увеличивается, а перпендикулярно напластованию — уменьшается. Выемка полезного ископаемого с полным обрушением по простиранию в таких условиях приводит к интенсификации расслоения слоёв, раскрытию трещин перпендикулярно напластованию и обрушению, что облегчает поддержание подготовительных выработок, но увеличивает водо- и газопитоки из подработанной и надработанной толщ. Выемка полезного ископаемого по восстанию приводит к задержке обрушения слоёв кровли из-за распора в субширотном направлении, ухудшению состояния подготовительных выработок и уменьшению водопритоков.

Рассмотрение характера разрушения неоднородного массива на макроуровне свидетельствует о том, что механизм разрушения и раскрытие трещин существенно зависят от напряженного состояния массива, его строения и глубины ведения работ. Это, в свою очередь, существенно

влияет на величину водопритоков в горные выработки при отработке месторождений. Однако образование микро- и макротрещин в горных породах как критических структурных переходов, требует специального исследования.

Библиографические ссылки

1. Разрушение горных пород в объеме под сжимающим напряжением / А.Д. Алексеев, В.И. Рыва, Н.А. Рязанцев - К.: Наук. думка, 1989. - 168 с.
2. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. - Ташкент Фан, 1979. - 168 с.
3. Писчев В.Н. Процесс разрушения как фазовое превращение // Проблемы прочности. - 1974. - №6. - Т. 1, 2.
4. Белл Дж. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. - М.: Наука, 1982. - 140 с.
5. Мохначев М.И., Пристац В.В. Динамическая прочность горных пород. - М.: Наука, 1982. - 140 с.
6. Рязанцев Н.А., Носач А.К. Пластические деформации в горных породах // Уголь Украины. - 1990. - №12. - С. 36 - 40.
7. Шемьякин Е.И. К изучению механизма разрушения прочных горных пород ударными нагрузками // Вопросы механизма разрушения горных пород. - Новосибирск, 1976. - С. 3 - 14

Рекомендовано к публикации д.т.н. А.М. Шащенко

УДК 622.625.28.

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАХТНЫХ ЛОКОМОТИВОВ С КОМБИНИРОВАННЫМ ПРИВОДОМ

Таран А.А., АО «Днепрогетмаш», Днепропетровск

У даній роботі на підставі введеного функціоналу якості визначається ступінь досконалості локомотива з комбінованим приводом, що має додаткову футеровану полімером колісну пару.

In the given work on the basis of entered functional qualities the degree of perfection of the locomotive with the combined drive having additional polymer a wheel pair is defined.

В данной работе на основании введенного функционала качества определяется степень совершенства локомотива с комбинированным приводом, имеющего дополнительную футерованную полимером колесную пару. Определены условия минимума функционала качества позволяющие решить задачу оптимизации по выбору сцепной массы дополнительной футерованной колесной пары локомотива при заданном коэффициенте сцепления и уклоне пути.

Как известно [1], к основным параметрам шахтных локомотивов относят сцепную массу, силу тяги, скорость движения и коэффициент тяги, которые нельзя считать независимыми. Сцепная масса регламентирована типажным рядом, а сила и скорость определяются характеристикой двигателя, сцепной массой и коэффициентом тяги. При ограничениях, накладываемых на габариты, жесткую базу электровоза, типовыми электродвигателями и конструктивными решениями ходовой части и компоновки привода существенно ограничена область поиска оптимальных параметров шахтных локомотивов. Поэтому существующий на практике расчет сводится к выбору состава по сцеплению, торможению и проверки его по нагреву двигателей до заранее принятого типа локомотива [1].

Более широкие возможности поиска рациональных параметров локомотива несет секционное построение, применение ходовой части с дополнительной колесной парой футерованной полимером [2].

При таком подходе определяющим показателем эффективности работы локомотива можно считать его функционал качества, который представляет отношение энергозатрат локомотива к массе состава и может быть записан в виде:

$$\Phi(F_s, F_f) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n \frac{F_{i_s} l_i}{F_{i_s} - F_{i_s} - i_p F_{i_s}} + \frac{1}{l} \sum_{j=1}^n \frac{F_{j_f} l_j}{F_{j_f} - F_{j_f} - i_p F_{j_f}} \quad (1)$$

$$M_s = m_s + m_f$$

где M_s - полный сцепной вес локомотива, кг; m_s, m_f - соответственно, сцепной вес локомотива приходящийся на стальные и футерованные колесные пары, кг; i_p - расчетный уклон пути, ‰; l - участок пути состава без проскальзывания, м; l_s, l_f - соответственно участок пути стальной и футерованной колесной пары, м; F_{i_s}, F_{j_f} - соответственно сила тяги, развиваемая стальной и футерованной колесной парой, Н; F_{i_s}, F_{j_f} - соответственно сила сопротивления движению, создаваемая стальной и футерованной колесной парой, Н; F_{i_s}, F_{j_f} - соответственно сила тяжести, приложенная к стальной и футерованной колесной паре, Н.

Выражение (1) представляет соотношение затраченной двигателями локомотива работы к полезной работе по перемещению состава на участке транспортирования. Слагаемые (1) соответствуют приводу со стальными и футерованными колесными парами соответственно. Подставив в функционал качества известные выражения силы тяги и скольжения от коэффициента сцепления и силы тяжести отнесенной к стальной и футерованной колесной паре, получим преобразованное выражение функционала.

Коэффициент сцепления и удельного сопротивления движению представляют в виде:

$$\begin{aligned} \psi_s(F_{i_s}) &= \psi_{0s} + K_{ws} F_{i_s}; \\ W_s(F_{i_s}) &= \psi_{0s} + K_{ws} F_{i_s}; \\ \psi_f(F_{j_f}) &= \psi_{0f} + K_{wf} F_{j_f}; \\ W_f(F_{j_f}) &= \psi_{0f} + K_{wf} F_{j_f}; \end{aligned} \quad (2)$$

а относительное скольжение сопротивления футерованной колесной пары:

$$\begin{aligned} S_s &= [b_{0s} + b_{1s} \psi_s(F_{i_s})] F_{i_s}^{0,5}; \\ S_f &= [b_{0f} + b_{1f} \psi_f(F_{j_f})] F_{j_f}^{0,5} \end{aligned} \quad (3)$$

Подставив (2 - 3) и выразив реакцию между колесами и рельсами через силу тяжести, приходящуюся соответственно на стальную и футерованную колесную пару, находящуюся на уклоне i в виде

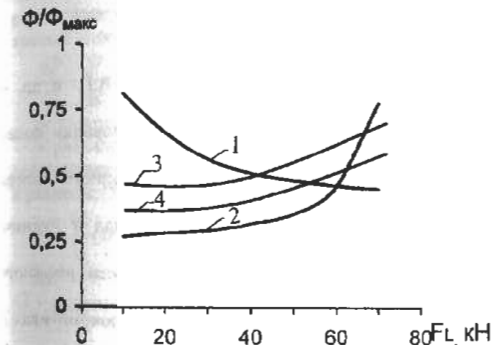


Рис. 1. Зависимость между отношением функционалов и силой тяжести, приложенной к колесной паре футерованной полимером: 1 - стальные колеса; 2 - футерованные колеса; 3 - $F_f = 10$ кН; 4 - $F_f = 20$ кН;

$F_{i_s} = F_{i_s} \cos i = F_{i_s} \left(1 - \frac{i^2}{2}\right) \approx F_{i_s}$, $F_{j_f} = F_{j_f} \cos i = F_{j_f} \left(1 - \frac{i^2}{2}\right) \approx F_{j_f}$ получим зависимость функционала качества локомотива от нагрузки, приходящейся на комбинированный привод тележки.

$$\Phi(F_{i_s}, F_{j_f}) = \sum_{i=1}^n \frac{b_{0s} (\psi_{0s} + K_{ws}) F_{i_s} + b_{1s} (\psi_{0s} + K_{ws}) F_{i_s}^2}{[\psi_{0s} - W_{0s} + F_{i_s} (k_{ws} - k_{ws}) - i_p] F_{i_s}^{0,5}} + \sum_{j=1}^n \frac{b_{0f} (\psi_{0f} + K_{wf}) F_{j_f} + (\psi_{0f} + K_{wf}) F_{j_f}^2}{[\psi_{0f} - W_{0f} + F_{j_f} (k_{wf} - k_{wf}) - i_p] F_{j_f}^{0,5}}$$

В зависимости от свойств фрикционной пары: колесо-рельс и нагрузки на стальную и футерованную колесную пару, значение функционала качества, найденного по (9) представлены на рис. 1.

Как следует из графиков для реально существующих материалов фрикционной пары и нагрузок на колесную пару, функционал качества не обладает экстремумом и для его выбора следует воспользоваться одним из ограничений по долговечности футерованных колес и устойчивости движения.