© Т.Т. Исмаилов, 2006

УДК 622.014.3:502.76

Т.Т. Исмаилов

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ПРИ ПОДХОДЕ КАРЬЕРА К ПРОЕКТНОЙ ГЛУБИНЕ

Физико-механические свойства горных пород карьеров России и стран СНГ, их структура и гидрогеология весьма разнообразны и в значительной мере предопределяют степень дробления горных пород энергией взрыва.

На общее состояние и степень разрушения пород существенно влияют горнотехнические условия разработки. Уменьшение ширины рабочих площадок на нижних горизонтах карьера приводит к сокращению числа рядов взрываемых скважин, что сводит на нет преимущества многорядного короткозамедленного взрывания, и ведет к ухудшению дробления пород. Возрастают требования к управлению шириной развала.

Взрываемые породные и рудные массивы на глубоких горизонтах обычно характеризуются сложной геологической текстурой, представленной различным направлением плоскостей наслоения, складчатостью и пространственной системой трещин различных размеров и густоты.

Правильный учет анизотропии, механической прочности массива пород, трещиноватости и напластований имеет большое значение при; производстве буровзрывных работ, т. к. породы при взрыве всегда разрушаются по ослабленным плоскостям.

Наличие в массиве различного рода напластований, прослоек и целых включений с различными физико-механическими свойствами, пор, микро- и макротрещин и т.д. приводит к необратимым поглощениям и рассеиваниям энергии распространяющейся волны. В результате действия этих факторов наблюдается сильное затухание энергии взрыва, что приводит к неравномерности дробления горной массы.

Специфика отработки глубоких горизонтов выдвигает особое требование к результатам взрывной отбойки горной массы. С учетом перспективы развития циклично-поточной технологии на карьерах и ограниченных размеров рабочих площадок на глубоких горизонтах будут предъявляться повышенные требования к качеству дробления горной массы, её гранулометрическому составу, а также к параметрам развала взорванной горной массы.

Решение проблемы получения взорванной горной массы заданного гранулометрического состава невозможно без всестороннего и глубокого изучения физических основ действия взрыва в твердой среде. Поэтому изучением механизма разрушения при взрывном нагружении твердых сред, а также разработкой новых методов, повышающих интенсивность дробления горной массы, занимаются многие ученые, как в нашей стране, так и за рубежом. Именно последние десятилетия знаменуется разработкой, освоением и широким внедрением в производство новых методов взрывных работ, позволивших в значи-

тельной мере решить проблему высококачественного дробления скальных пород.

Большой вклад в решение указанной проблемы внесли академики Н.В. Мельников, В.В. Ржевский, К.Н. Трубецкой, д.т.н. Е.Г. Баранов, О.Е. Власов, Г.П. Демидюк, М.Ф. Друкованный, Э.И. Ефремов, Б.Н. Кутузов, В.М. Кузнецов, Ф.И. Кучерявый, В.И. Комащенко, В.Н. Мосинец, В.Н. Родионов, В.К. Рубцов, Н.Я. Репин, В.П. Тарасенко, А.Н. Ханукаев и другие ученые.

Анализ зависимостей, определяющих возможность оценки наступления разрушения и его масштабов, а также данные наблюдений в условиях массивов показывают, что при решении этой задачи значительную роль играют физико-механические характеристики горных пород. Вообще расчет на прочность любой конструкции, любой механической системы не может быть закончен на стадии определения напряжений и деформаций в произвольной точке системы. Сами напряжения и деформации рассчитываются по формулам, включающим определенные прочностные и деформационные характеристики материалов.

Вильямом Р. Джюддом получена зависимость между динамическим E_q и статическим $E_{ст.}$ модулем Юнга в широком диапазоне свойств горных пород. Значения динамического модуля получены по результатам опытов, проведенных в условиях массива горных пород, а не на образцах в лаборатории. Несмотря на значительный разброс экспериментальных данных, коэффициент корреляции составляет 0,93. Анализ полученной зависимости показывает, что с достаточной степенью точности она может быть аппроксимирована линейной функцией

$$E_q = 1{,}15 E_{cm} + 5 \cdot 10^3, \text{МПа} \qquad (1)$$

Эти экспериментальные данные позволяют высказать предположение, что массив горных пород оказывается "менее чувствительным" к приложению динамических нагрузок в смысле изменения его деформационных свойств. Он является менее "жестким" по отношению к действию динамических нагрузок, чем слагающие его породы в некотором интегральном смысле, когда длины распространяющихся в нем волн велики по сравнению с элементами структуры самой породы, слоистости и трещиноватости.

Рассматривая физико-механичес-кие свойства горных пород, следует отметить, что весьма важной их динамической характеристикой является скорость распространения в них продольных волн. Для большинства горных пород она изменяется в довольно широких пределах - от 1000 до 9000 м/с.

Основными факторами, определяющими механические процессы в массиве горных пород при проведении БВР на глубоких горизонтах, являются постоянно и повсеместно действующие: гравитация, физико-меха-нические свойства массива, а также временно или локально действующие тектонические силы.

Наиболее важными характеристиками, определяющими указанные фак-торы, являются: геометрические - глубина заложения заряда, размеры блоков, слагающих массив; физико-механические свойства пород массива; показатели исходного напряженного состояния массива горных пород - величины и знаки тензора напряжений в "нетронутом" горными работами (взрывом) массиве горных пород.

Приведенные характеристики, определяющие механические процессы разрушения горных пород взрывом, оцениваются сравнительно полно. Это, в пер-

вую очередь, относится к геометрическим характеристикам, которые или задаются условиями задачи (глубина заложения заряда), или определяются при геологическом изучении массива горных пород по кернам скважин (степень естественной трещиноватости).

Что касается физико-механических свойств пород массива, то они могут быть определены при наличии доста-точного числа образцов в лаборатор-ных условиях с имитацией температуры и напряженно-деформированного сос-тояния, свойственного глубине их зале-гания. Основные показатели, определяющие трудоёмкость и эффективность ведения горных работ – это прочность и трещиноватость, от которых непосредственно зависят технико-экономи-ческие показатели буровзрывных работ, устойчивость бортов и уступов карьеров, а также показатели работы погрузочного и транспортного оборудования.

По практическим данным проч-ность горных пород, как правило, с глубиной увеличивается, причем более интенсивно в верхней зоне скаль-ных пород до глубины (100-150 м), при дальнейшем увеличении глубины прочность возрастает менее интенсивно (рис. 1, 2).

Кроме того, с глубиной изменяются соотношения пород с резко отличающейся прочностью в сторону увеличения крепости вмещающих пород в среднем на 0,4-0,6 единиц на каждые 100 м глубины. Вследствие влияния этого фактора установлено снижение производитель-ности буровых станков на 15-25 % и возрастание себестоимости бурения на каждые 100 м углубления.

Другой важной характеристикой физико-механических свойств пород является трещиноватость, характеризующая структуру массива горных пород, неоднородность и анизотропию их свойств. Трещиноватость влияет на прочность, устойчивость, деформируемость и разрушаемость горных пород, на их водонасыщаемость, влагоёмкость и водопроницаемость, а также на интенсивность и глубину проникновения процессов выветривания и окисления.

Форма и величина отдельностей могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от числа трещин, их направления.

Простейшей характеристикой трещиноватости пород является кусковатость керна, отнесенная к интервалу скважины:

$$K_m = \frac{n}{l \cdot \nu}, \qquad (2)$$

где n – число кусков в интервале l м; ν – выход керна в долях единицы.

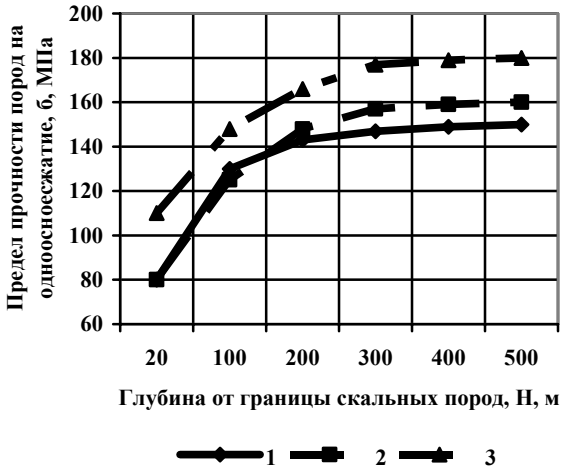
Для глубины 300, 600, 900 м были рассчитаны КТ с учетом глубины и сопоставлены с фактическими измерениями густоты трещиноватости (табл. 1).

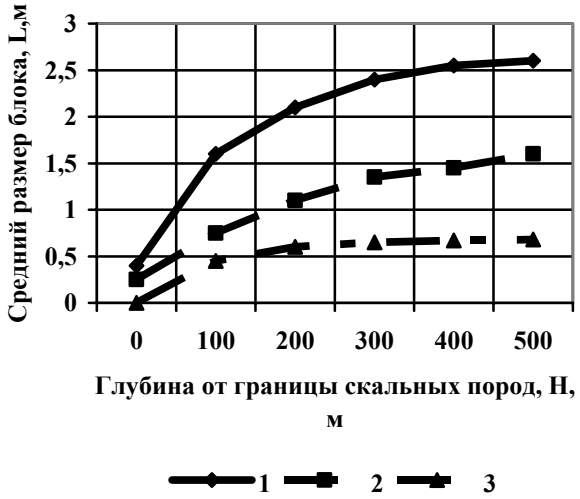
На основании представленных результатов можно сделать вывод о том, что горный массив обладает свойством периодической неоднородности.

При переходе на более глубокие горизонты разработки происходит увеличение размера отдельностей. Соотношение пород по трещиноватости в пределах карьерного поля зависит от геологического строения месторождения: соотношение пород изменяется в зависимости от глубины, направления

Таблица 1

Глубина Н, м	300	600	900	1200
$К_т$ расчетный	1,85	2,5	2,7	3,3
$К_т$ фактический	1,85	2,2	2,4	-





и скорости подвигания горных работ. Поэтому соотношение пород по трещиноватости с учетом их прочностных характеристик должно быть основой планиро

вания показателей взрывных и горных работ.

Замерами и наблюдениями, проведенными в отраслевой лаборатории МГГУ, установлено, что блочность пород увеличивается с возрастанием глубины разработки (табл. 2; 3). По всем исследованным карьерам (более 20) установленная зависимость имеет линейный характер.

В результате наших исследований установлено, что на глубоких карьерах с увеличением глубины разработки происходит изменение физико-механических харак-

теристик пород.

Таблица 2

Показатель трещиноватости и прирост блочности пород (среднего диаметра отдельности) при среднем темпе углубления карьеров 15м в год

№№ пп	Карьер	Показатель трещинноватости пород	Прирост среднего диаметра отдельности на глубине 15м, м	Средний коэффициент неоднородности пород
1	Кальмакырский	2,8	0,034	1,280
2	Коунрадский	2,5	0,060	1,180
3	Сорский	2,5	0,060	1,115
4	ЦГОКа	2,3	0,065	1,297
5	Оленегорский	2,0	0,075	0,546
6	Сев. ГОКа	1,9	0,079	1,037
7	Северо-Джезгазганский	1,8	0,083	0,958
8	Сарбайский	1,4	0,107	0,696
9	Кавдорский	1,10	0,150	0,850
10	Гайский	0,80	0,187	0,858
11	Ждановский	0,70	0,214	0,709
12	Каджаранский	0,40	0,375	1,150
13	Лебединский	0,350	0,428	0,480

Рис. 2. Характер изменения блочности пород железорудных месторождений с увеличением глубины карьера: *1* - магматические месторождения (Ковдорское, Качканарское); *2* - контактово-метасоматические и гидротермальные месторождения (Сарбайское, Соколовское, Гороблагодатское, Высокогорское и др.); *3* - метаморфогенные месторождения (Оленегорское, Криворожское, КМА).

Таблица 3

Изменение среднего размера отдельностей с глубиной железорудных карьеров

Глубина, м	Средний размер отдельностей (м) по месторождениям:					
	Качканарский ГОК	Соколовское	Сарбай-ское месторождение	Ковдорское месторождение	Коршуновское месторождение	Оленегорское месторождение
0-50	0,32	0,30	0,45	0,40	0,30	0,30
50-100	0,80	0,70	0,80	0,80	0,62	0,52
100-150	1,70	0,90	1,10	1,50	0,90	0,52
150-200	1,80	1,10	1,30	2,20	1,10	0,60
200	2,30	1,20	1,40	2,80	1,20	-

Изменение размеров естественной отдельности с глубиной выражается следующей корреляционной зависимостью (экспериментальные зависимости получены для условий Кальмакырского карьера):

$$d_{ср} = 0,306 + 0,0036\,H,\ м \qquad (3)$$

где H – глубина расположения исследуемого слоя, м.

Экспериментальные данные обработаны на ЭВМ методом наименьших квадратов. Коэффициент корреляции $r_к = 0,98$.

Изменение плотности пород с глубиной подчиняется следующей корреляционной зависимости:

$$\rho = 1,5 \cdot H + 2390, \ кг/м^3. \qquad (4)$$

Коэффициент корреляции $r_к = 0,88$.

Изменение модуля Юнга пород с глубиной описывается корреляционным уравнением

$$E_{ст} = 0,015 \cdot H + 3,4 \cdot 10^3, МПа \qquad (5)$$

Коэффициент корреляции $r_к = =0,76$.

С увеличением уплотнения увеличивается сцепление по контактам, по которым передается давление и энергия, и поэтому возрастают такие параметры, как упругость, упругие свойства, теплопроводность и т.д.; одновременно уменьшается площадь сечения пор, трещин, поэтому такие параметры, как влагоемкость и проницаемость уменьшаются.

Однако эти исследования относятся в основном к статическому напряженному состоянию пород.

Что касается изменения физико-механических свойств горных пород при совместном воздействии на них статических и динамических нагружений, в особенности в объемном трехмерном напряженно-деформирован-ном состоянии, то можно констатировать явный недостаток исследований в этом направлении. Вместе с тем измененные характеристики прочности горных пород в этих сложных условиях оказывают решающую роль при оценке радиусов соответствующих зон механического действия взрыва.

Из вышеизложенного следует, что характер блочности, трещиноватости изменяется с увеличением глубины разработки, трещины на нижних горизонтах плотно сомкнуты, а некоторые залечены. Следовательно, распространение и воздействие взрывных волн на массив иное, чем на верхних горизонтах. Поэтому при расчетах удельного расхода ВВ и параметров рыхления необходимо учитывать изменение блочности, предела прочности пород на растяжение в функции глубины. Кроме того, можно ожидать, что в зоне забойки скважин 2-го и 3-го рядов прочностные характеристики массива горных пород будут зависеть от горного давления.

Коротко об авторах

Исмаилов Т.Т. – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный горный университет.

© Т.Т. Исмаилов, 2006

УДК 622.014.3:502.76

Т.Т. Исмаилов

ОБОСНОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ВВ С УЧЕТОМ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Многими исследованиями доказано, что горное давление влияет на изменение физико-механических свойств горных пород с глубиной разработки. Это обстоятельство, особенно, необходимо учитывать при переходе горных работ на комбинированный способ разработки месторождений

Горное давление повышает прочность с ростом нормального напряжения, причем максимальное увеличение прочности наблюдается у хрупких пород. Для расчета сдвиговой прочности касательных напряжений (τ_n) горных пород в зависимости от значений нормального напряжения (σ_n) автором предложено выражение

$$\tau_n = \tau_0 + \frac{\mu\sigma_n \cdot \left(\tau_i - \tau_0\right)}{(1 + \mu\sigma_n)}, \text{ МПа} \quad (1)$$

где τ_0 – предел прочности породы на сдвиг, МПа; μ – коэффициент бокового давления; τ_i – константа горной породы, МПа.

Кроме того, при рассмотрении вопросов, связанных с оценкой взрываемости горных пород, необходимо учитывать их пластические свойства, в частности, вязкость. С целью оценки вязкости в развитие подхода, сформулированного проф. В.П. Тарасенко, и с учетом известной зависимости сдвиговой прочности от величины предела прочности пород на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$) получено эмпирическое выражение для определения относительной вязкости горных пород (λ):

$$\lambda = 6{,}5 - 0{,}5 \cdot \left(\frac{\sigma_{сж}}{\tau_n} - 3 \right) \quad (2)$$

С учетом (1) выражение (2) примет вид:

$$\lambda = 6{,}5 - 0{,}5 \times \left[\frac{\sigma_c \cdot (1 + \mu \cdot \sigma_n)}{\tau_o \cdot (1 + \mu \cdot \sigma_n) + \mu \cdot \sigma_n \cdot (\tau_i - \tau_0)} - 3 \right] \quad (3)$$

Основное влияние пластических свойств пород и вязкости наиболее целесообразно учитывать при определении удельного расхода ВВ. С учетом вязкости удельный расход может быть определен следующим образом:

$$q_B = (Af)^n \cdot K_\lambda \cdot e, \text{ кг/м}^3 \quad (4)$$

где $q_в$ – удельный расход ВВ, учитывающий изменение вязкости горных пород под действием нормальных нагрузок, кг/м^3; А – акустический показатель трещиноватости массива; f – крепость пород по шкале М.М. Протодьяконова; n – показатель, определяемый экспериментально (на основании обобщения опыта взрывной отбойки (n = 0,25); e - коэффициент относительной работоспособности применяемого ВВ; K_λ – поправка, учитывающая относительную

вязкость пород, рассчитываемая по формуле

$$K_{\lambda} = \left(\frac{\lambda_{баз}}{\lambda_{факт.}} \right)^{\frac{2}{3}} \qquad (5)$$

Здесь $\lambda_{баз.}$ – базовый показатель относительной вязкости ($\lambda_{баз.} = 5{,}5$); $\lambda_{факт.}$ – фактический показатель относительной вязкости.

С учетом (3) и (5) выражение (4) примет вид:

$$q_{в} = \left(A \cdot f\right)^{n} e \left\{ \frac{5{,}5 \cdot \left[\tau_{o} \cdot (1 + \mu \cdot \sigma_{n}) + \mu \cdot \sigma_{n} \cdot (\tau_{i} - \tau_{0}) \right]}{6{,}5 - 0{,}5 \cdot \sigma_{c} \cdot (1 + \mu \cdot \sigma_{n}) - 1{,}5 \cdot [\tau_{o} \cdot (1 + \mu \cdot \sigma_{n}) + \mu \cdot \sigma_{n} \cdot (\tau_{i} - \tau_{0})]} \right\}^{1,5} \qquad (6)$$

Анализ полученного выражения (6) показывает, что оно учитывает основные физико-механические характеристики пород: крепость, трещиноватость, предел прочности пород на сжатие, на сдвиг, а также изменение удельного расхода ВВ за счет увеличения относительной вязкости пород.

Для оценки влияния относительной вязкости горных пород при действии нормального давления σ_n и без него определим значение удельного расхода ВВ при отсутствии нагрузки, т.е. при $\sigma_n = 0$ и с учетом того, что для рудных карьеров средние значения констант горных пород $\mu = 2{,}0$; $\tau_0 = 60$ МПа; $\tau_i = 610$ МПа:

$$q_{B(0)} = \left(Af\right)^{n} \left[\frac{165}{285 - \sigma_{c}} \right]^{1,5} \cdot e, \qquad (7)$$

Относительное изменение удельного расхода ВВ за счет увеличения вязкости пород (для условий рудных карьеров и принятых средних значений констант горных пород) и с учетом того, что $\sigma_n = \gamma H$ (γ – удельный вес пород МН/м^3) примет следующий вид:

$$K_{B} = \frac{q_{B_H}}{q_{B_0}} = 15{,}3 \times \left\{ \frac{16 - \dfrac{\sigma_{c}\left(275 + \gamma H\right)}{610 \cdot \gamma H + 16500}}{960 - \sigma_{c}} \right\}^{1,5}, \qquad (8)$$

где K_B – коэффициент, учитывающий изменение удельного расхода ВВ за счет изменения относительной вязкости пород.

Таким образом, коэффициент K_B характеризует необходимое увеличение проектного расхода ВВ за счет влияния горного давления на относительную вязкость пород.

Для научного обоснования рационального роста величины энергетических затрат на взрывное дробление горных пород с увеличением глубины разработки был проведен комплекс работ, включающий анализ и обобщение широкого опыта взрывной отбойки на открытых горных работах, аналитические исследования и промышленные взрывы.

В результате выполненных исследований было определено, что увели-чение горного давления способствует повышению сопротивляемости пород и относительному перемещению отдельностей и элементарных блоков породы при взрыве и приводит к ухудшению качества дробления горной массы. Кроме того, с увеличением глубины разработки существенно изменяется характер и вели-

Таблица 1

Значения поправочного коэффициента K_H

Глубина разработки, м	100-200	200-300	300-400
Значение коэффициента K_H	1,05	1,10	1,15

Таблица 2

Значения поправочного коэффициента K_B

Глубина разработки, м	**100-200**			**200-300**			**300-400**		
	Группа месторождений								
	А	**Б**	**В**	**А**	**Б**	**В**	**А**	**Б**	**В**
Значения коэффициента K_B	1,02	1,03	1,05	1,06	1,1	1,12	1,15	1,18	1,2

Таблица 3

Значения поправочного коэффициента K_T

Глубина разработки, м	100-200	200-300	300-400
Значение коэффициента K_T	1,1	1,15	1,20

чина трещиноватости массивов горных пород и их вязкость.

С учетом проведенных исследований нами рекомендуется определять удельный расход ВВ для предельной глубины и глубоких горизонтов карьеров по следующей формуле:

$$q_r = q \cdot K_H \cdot K_B \cdot K_T, \qquad (9)$$

где K_H – коэффициент, характеризующий влияние горного давления на степень разрушения пород и трудность выведения отдельностей из зацепления; K_B – коэффициент, учитывающий изменение удельного расхода ВВ за счет изменения относительной вязкости пород; K_T – коэффициент, учитывающий изменение удельного расхода ВВ при изменении трещиноватости на глубоких горизонтах.

Значения коэффициентов, входящих в формулу (9), приведены в табл. 1-3.

Значение коэффициента K_T, входящего в выражение (9), определялось из следующего соотношения:

$$K_T \sim \left(\frac{A_Ф}{A_T} \cdot \frac{f_Ф}{f_T} \right)^{1/4}, \qquad (10)$$

где $A_Ф$ – акустический показатель трещиноватости на глубине, м; A_T – акустический показатель трещиноватости на глубине 150-200 м; $f_Ф$ – коэффициент крепости на глубине Н, м; f_T – коэффициент крепости на глубине 150 м.

При этом изменение характера и интенсивности трещиноватости с глубиной оцениваются акустическим показателем трещиноватости $A_Ф$, который является объективным комплексным показателем.

Анализ зависимости (10) показывает, что с увеличением глубины разработки до 400-500 м удельный расход должен быть увеличен в 1,2÷1,7 раза.

Однако, например, опыт работ на Тишинском месторождении показал, что при подходе глубины карьера к предельной глубине 300м даже увеличение удельного расхода ВВ до 1,4 кг/м^3 (вме-

сто рекомендуемого нормами технологического проектирования максимального удельного расхода 1,2 кг/м^3) не даст существенного улучшения качества дробления.

Данное обстоятельство определило необходимость изменения подхода к выбору удельного расхода ВВ (как основного показателя взрывной отбойки) на основе оценки сопротивляемости пород действию взрыва.

На основании исследований установлено, что:

- коэффициент относительного изменения удельного расхода ВВ характеризует необходимое увеличение проектного расхода ВВ за счет влияния горного давления на относительную вязкость пород и изменяется по степенному закону;
- основная энергетическая характеристика ВВ – удельный расход для предельной глубины дна и глубоких горизонтов карьера должен определяться с учетом произведения коэффициентов влияния горного давления на степень разрушения пород, относительную вязкость пород и изменение трещиноватости пород с глубиной.

Коротко об авторах

Исмаилов Т.Т. – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный горный университет.

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ЗАСЬКО Юрий Евгеньевич	Экономический механизм стратегического управления угольной отраслью в составе ТЭК для обеспечения энергетической безопасности России	08.00.05	д.э.н.