

**ИСАЙЧЕНКОВ Александр Борисович**

**«ОПТИМИЗАЦИЯ СОПРЯЖЕННО ВЫПОЛНЯЕМЫХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВСКРЫШНЫХ РАБОТ  
ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ ЭКСКАВАТОРНО-  
АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ»  
(на примере разреза «Тугнуйский»)**

Специальность 25.00.22 –  
«Геотехнология (подземная, открытая и строительная)»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**Москва, 2017**

Работа выполнена в Сибирском Научно-Исследовательском Институте углеобогащения и Сибирской угольной энергетической компании «СУЭК»

**Научный руководитель:**

**Опанасенко Петр Иванович,**  
кандидат технических наук, заместитель  
технического директора АО «СУЭК»

**Официальные оппоненты:**

**Анистратов Константин Юрьевич**  
доктор технических наук, директор по  
стратегии и продажам ООО «УЗТМ-  
КАРТЭКС»

**Сафронов Виктор Петрович**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры Геотехнологии Тульского  
Государственного Университета

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО Московский горный институт  
НИТУ «МИСиС»

Защита состоится «21» июня 2017г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.074.02 при ФГБУН Институте проблем комплексного освоения недр РАН по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем комплексного освоения недр РАН и на сайте: [www.ипконран.рф](http://www.ипконран.рф)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук

Жариков И.Ф.,

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Разрез «Тугнуйский» Сибирской угольной энергетической компании (СУЭК) при разработке вскрышных пород перешёл на использование новых экскаваторов большой единичной мощности с вместимостью ковша 41,3м<sup>3</sup> и большегрузных автосамосвалов грузоподъёмностью 220 т.

Переход на новое оборудование требует пересмотра ранее установленных зависимостей, составляющих методическую основу оптимизации для обеспечения высокоэффективной работы технологического оборудования экскаваторно-автомобильного комплекса. Несовершенство существующих способов оптимизации работы экскаваторно-автомобильного комплекса обусловлено использованием, как правило, эмпирических формул, установленных для расчёта производительности уже устаревшего оборудования, поэтому замена или частичная корректировка этих зависимостей, включая методы и инструментарий определения параметров процессов, являются актуальной задачей.

В работе дано решение актуальной задачи оптимизации параметров экскаваторно-автомобильного комплекса при разработке вскрышных пород экскаваторами большой единичной мощности в условиях разреза «Тугнуйский».

**Объектом исследований** являются экскаваторно-автомобильные комплексы, разрабатывающие полускальные вскрышные породы механическими лопатами большой единичной мощности и автосамосвалами грузоподъёмностью до 220 тонн.

**Предметом исследований** являются параметры и показатели основных технологических процессов с учётом возможностей применяемых технических средств и горнотехнических условий их эксплуатации.

**Целью работы** является установление параметров технологических процессов разработки полускальных вскрышных пород, обеспечивающих оптимальные показатели работы всего экскаваторно-автомобильного комплекса.

**Идея работы** заключается в использовании при оптимизации экскаваторно-автомобильного комплекса в качестве критерия средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы, что позволяет установить оптимальные параметры каждого из сопряжённо выполняемых технологических процессов, затраты по ним, а также суммарные издержки по технологии в целом.

**Методы исследований.** В работе использован комплекс методов: обобщение материалов ранее выполненных работ; экспертный анализ; анализ опыта разработки вскрышных пород на угольных разрезах; эксперименты в производственных условиях; методы прикладной математики и математической статистики; технико-экономический анализ с использованием стоимостных параметров.

### **Основные защищаемые научные положения:**

1. Для обеспечения эффективной работы экскаваторов большой единичной мощности необходим мониторинг качества подготовки взорванной горной массы по

всему сечению развала, при совместном использовании эталонных и фактических фотопланов, дополненных хронометражными наблюдениями за процессом экскавации.

2. Установлены зависимости изменения веса породы в ковше экскаватора, времени черпания и всего цикла экскавации, а также производительности экскаватора, от средневзвешенного размера кусков взорванной горной породы.

3. Предложен критерий оптимизации параметров технологических процессов разработки вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами большой единичной мощности, базирующийся на использовании средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы.

4. Разработана методика оптимизации параметров сопряжённо-выполняемых технологических процессов разработки полускальных пород, основанная на средневзвешенном размере кусков взорванной породы, позволяющая на конкретном предприятии определить минимум суммарных удельных затрат на разработку вскрыши.

#### **Научная новизна исследований:**

- разработан и запатентован «Способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации»;

- установлена зависимость изменения вместимости ковша, времени набора породы в ковш и времени цикла от средневзвешенного размера кусков взорванной породы для современного экскаватора большой единичной мощности;

- определена формула для расчёта производительности экскаватора большой единичной мощности, в зависимости от средневзвешенного размера кусков взорванной породы;

- разработана методика оптимизации параметров основных процессов технологии разработки полускальных вскрышных пород современными экскаваторно-автомобильными комплексами, которая обеспечивает суммарный минимум издержек.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечиваются: корректной постановкой задач исследований; использованием широкого диапазона научных **методов исследований**, включающих анализ и обобщение теоретических и экспериментальных работ, экономико-математическое моделирование, планирование эксперимента и обработку результатов исследований с помощью статистических методов; проведением расчётов с использованием надёжно апробированных методик; сходимостью экспериментальных данных с расчётными, полученным по установленным зависимостям.

**Научное значение работы.** Разработан способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации, который позволил установить зависимости изменения веса породы в ковше, времени набора ковша и цикла экскаватора, а также его производительности от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород; получены эмпирические зависимости изменения затрат по процессам: подготовка пород к выемке, выемка и погрузка - экскавация, транспортирование и отвалообразование от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород и суммарные издержки по технологии.

**Практическое значение работы** заключается в разработке:

- методики и оптимизации параметров сопряжённо выполняемых технологических процессов разработки полускальных вскрышных пород, обеспечивающих оптимальные результаты работы экскаваторно-автомобильного комплекса;

- рекомендаций для условий разреза «Тугнуйский» при применении экскаваторов с ковшем 41,3 м<sup>3</sup> и автосамосвалов грузоподъёмностью 220 т, которые обеспечивают минимум издержек.

**Реализация выводов и рекомендации.** Разработанная методика оптимизации параметров сопряжённо выполняемых технологических процессов разработки полускальных вскрышных пород, совокупно обеспечивающих оптимальные результаты работы всего экскаваторно-автомобильного комплекса, принята для реализации разрезом «Тугнуйский» и ООО «Управление проектных работ» АО «Красноярскуголь».

**Апробация работы.** Положения диссертационной работы докладывались на симпозиуме «Неделя горняка» в 2014 - 2016 гг., на техническом совещании Сибирской угольной энергетической компании, в 2016г. на семинаре в Институте проблем комплексного освоения недр РАН и на кафедре «Технологии, механизации и организации открытых горных работ» Московского государственного горного университета в 2014-2015 гг. На конференции международной научной школы академика К.Н. Трубецкого при Институте проблем комплексного освоения недр РАН.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, все в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Получен патент РФ на изобретение - «Способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации».

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложений, изложена на 227 страницах машинописного текста, содержит 74 таблицы, 56 рисунков и список литературы из 94 наименований.

**Автор выражает благодарность** научному руководителю кандидату технических наук Опанасенко П. И., доктору технических наук: Артемьеву В.Б., Казакову Н.Н. и Кононенко Е.А. за помощь при выполнении исследований и подготовке работы к защите, а также техническому руководству разреза «Тугнуйский» (АО «СУЭК») за содействие при проведении экспериментов в производственных условиях.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Значительный вклад в изучение проблемы оптимизации параметров процессов открытых горных работ для применяемых технических средств с учётом физико-механических свойств пород и организации работы, внесли академики: Мельников Н.В, Ржевский В.В., Трубецкой К.Н., Мельников Н.Н.; член-корреспондент РАН: Каплунов Д.Р.; профессора: Анистратов Ю.И., Арсентьев А.И., Белин В.А., Викторов С.Д., Друкованый М.Ф., Кузнецов В.А., Кутузов Б.Н., Крюков Г.М., Репин Н.Я., Ржевская С.В., Рубцов В.К. Тарасенко В.П., Тангаев И.А. Тартаковский Б.Н., Ташкинов А.С.; доктора технических наук: Анистратов К.Ю., Жариков И.Ф., Казаков Н.Н., Сеинов Н.П., Симаков Д.Б., Шапурин А.В. Штейнцайг В.М. и другие известные учёные. Анализ научной литературы по вопросам технико-экономической оценки эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов, обоснование рационального удельного расхода взрывчатого вещества показал, что сложились устоявшиеся принципы обоснования параметров буровзрывных работ для экскаваторов циклического действия. При этом вопросы оптимизации возрождались постоянно, по мере развития и совершенствования основных процессов и механического оборудования, применяемого на карьерах. Главный вопрос, требующий решения при оптимизации, это влияние горнотехнических условий и параметров БВР на производительность головной машины (учитывая изменения её конструкции, формы ковша и т.п.), которая определяет производительность экскаваторно-автомобильного комплекса и величину затрат.

Обобщение материалов ранее выполненных работ позволило в первой главе работы установить взаимосвязи горнотехнических факторов и параметров процессов исследуемой технологии, а как результат аналитического обзора - сформулировать цель и определить задачи диссертационной работы. Для того, чтобы установить параметры каждого из сопряжённо выполняемых технологических процессов разработки полускальных вскрышных пород, совокупно обеспечивающие оптимальные результаты работы всего экскаваторно-автомобильного комплекса с учётом физико-механических свойств разрабатываемых пород и принятой организации работы, в работе были поставлены и решены следующие задачи:

- Исследовать изменения производительности современных экскаваторов большой единичной мощности от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород;

- Рассчитать затраты на разработку одного кубометра вскрыши по всем основным процессам при различных параметрах БВР от величины средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы;

- Определить минимум суммарных затрат по основным процессам и соответствующие ему параметры основных процессов: БВР, экскавации, карьерного транспорта и отвалообразования, обеспечивающих оптимальные условия разработки;

- Разработать рекомендации по реализации результатов исследований для минимизации суммарных затрат по основным процессам при применении современных экскаваторно-автотранспортных комплексов.

**Первое научное положение - Для обеспечения эффективной работы экскаваторов большой единичной мощности необходим мониторинг качества подготовки взорванной горной массы по всему сечению развала, который может быть реализован при совместном использовании эталонных и фактических фотопланограмм, дополненных непосредственными хронометражными наблюдениями за процессом экскавации.**

С уменьшением величины средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы ( $D_{св}$ ), растёт производительность экскаватора и снижаются удельные затраты на процесс экскавации, но в то же время существенно увеличиваются затраты на дробление пород массива с применением буровзрывных работ. На разрезе Тугнуйский удельный расход ВВ достигает  $1,3 \text{ кг/м}^3$  для пород 3 и 4 категории по взрываемости при нормативе не более  $1,0 \text{ кг/м}^3$  (в пересчёте на эталонное - ВВ граммнит-79/21). Величина удельных затрат на БВР возрастает при уменьшении  $D_{св}$ : при  $D_{св}=0,7\text{м}$  –  $8 \text{ руб/м}^3$ , при  $D_{св}=0,4$  –  $14 \text{ руб/м}^3$ , а при  $D_{св}=0,2-31 \text{ руб/м}^3$ .

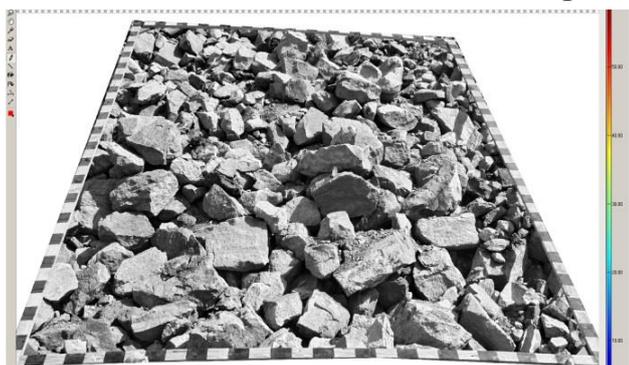
Для обеспечения эффективной работы экскаваторов большой единичной мощности необходимо обеспечить степень дробления, с достижением величины  $D_{св}$ , обеспечивающей оптимальное соотношение технологических параметров процесса экскавации и буровзрывных работ, для чего необходим мониторинг качества подготовки взорванной горной массы.

Для этого разработан и запатентован «Способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации». Способ представляет: подготовку фотопланограммы раздробленных взрывом горных пород путём многократного фотографирования развала с расположенной на поверхности забоя масштабирующей рамкой.

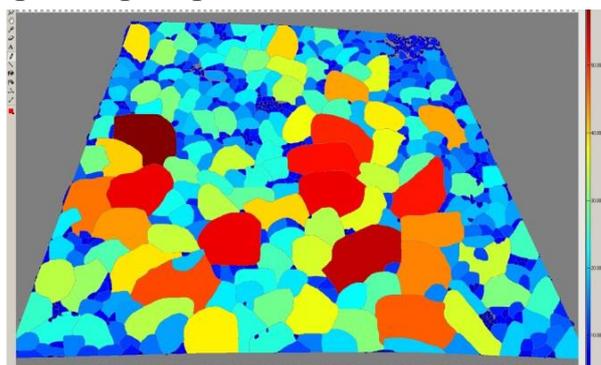
В качестве критерия, характеризующего гранулометрический состав раздробленной породы, принимается средневзвешенный размера кусков взорванной горной массы -  $D_{св}$ . Для каждой фотопанограммы определяется  $D_{св}$  и формируются эталонные фотопанограммы. Для этого весь диапазон изменения величины  $D_{св}$  делится на несколько участков, включая минимальное, максимальное и среднее значения величины  $D_{св}$ , фотопанограммы соответствующие выбранным значениям  $D_{св}$  становятся эталонными.

Сравнивая каждую новую рабочую фотопанограмму с эталонными, определяем к какой эталонной фотопанограмме она ближе и принимается соответствующее значения величины  $D_{св}$ . При этом одновременно производится хронометражное наблюдение за изменением: времени набора ковша, времени поворота, времени разгрузки, веса породы в ковше.

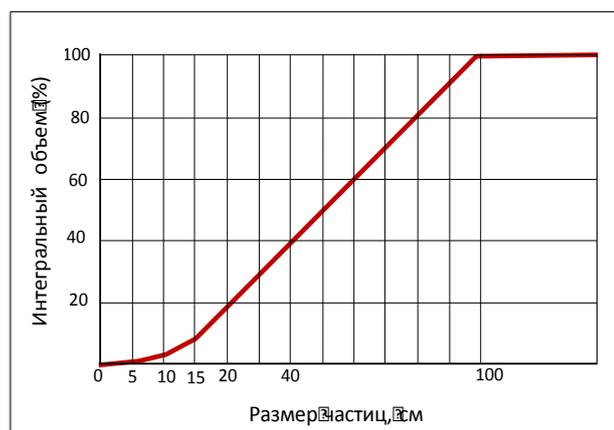
Для всех фотопанограмм с помощью программы «Split Analyzer» строится: интегральное распределение (кумулятивная кривая) и относительное распределение (гистограмма) кусков взорванной горной массы (рис.1). В этом случае величина  $D_{св}$  находится с использованием интегральной кривой распределения.



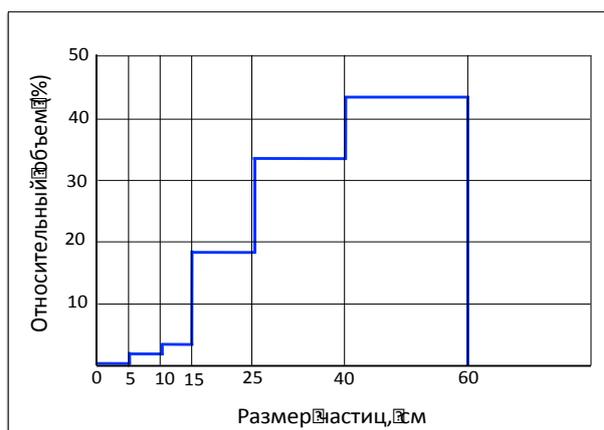
а) Исходная фотография;



б) Обработанная фотография;



в) Интегральное распределение (кумулятивная кривая);



г) Относительное распределение (гистограмма).

**Рисунок 1.** Определение гранулометрического состава взорванных пород.

На рис. 2 приведены эталонные фотопанограммы, где в качестве критерия гранулометрического состава взорванной породы принят средневзвешенный размер кусков -  $D_{св}$ , величина которого составляет 0,192 м; 0,350 м; 0,485 м; 0,700 м; 1,050 м.



$D_{св}=0,192$



$D_{св}=0,350$



$D_{св}=0,484$



$D_{св}=0,700$



$D_{св}=1,050$

**Рисунок 2.** Эталонные фотопланограммы раздробленной породы.

В качестве примера реализации «Способа определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации» приведём порядок его применения для построения зависимости изменения веса породы в ковше экскаватора Висурус-495HD с ковшом вместимостью 41,3 м<sup>3</sup> на разрезе «Тугнуйский» при разработке вскрышных пород.

Результаты исследований изменения веса породы в ковше в зависимости от изменения средневзвешенного размера кусков породы, выполненных по запатентованному способу, представлены в табл. 1.

**Таблица 1.**

Изменения веса породы в ковше экскаватора от величины средневзвешенного размера кусков.

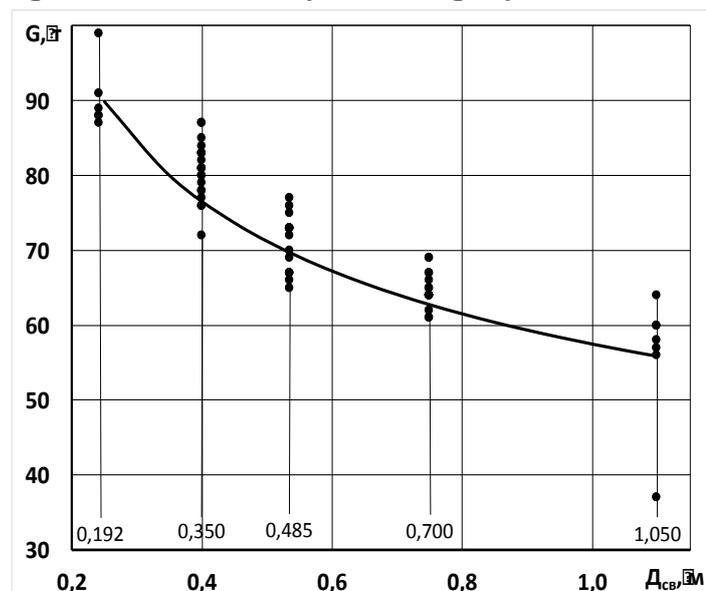
№ п/п	Группа гран-состава (эталон)	Вес породы в ковше (хроном.), тонн	№ п/п	Группа гран-состава (эталон)	Вес породы в ковше (хроном.), тонн
1	1	99	34	3	75
2	1	88	35	3	72

№ п/п	Группа гран-состава (эталон)	Вес породы в ковше (хроном.), тонн	№ п/п	Группа гран-состава (эталон)	Вес породы в ковше (хроном.), тонн
3	1	91	36	3	73
4	1	89	37	3	65
5	1	87	38	3	76
6	1	88	39	3	70
среднее	Д <sub>св</sub> =19,2см	90,33	40	3	73
7	2	87	41	3	73
8	2	72	42	3	66
9	2	82	среднее	Д <sub>св</sub> =48,5см	71,22
10	2	84	43	4	62
11	2	80	44	4	67
12	2	81	45	4	64
13	2	76	46	4	61
14	2	76	47	4	64
15	2	83	48	4	64
16	2	81	49	4	61
17	2	85	50	4	64
18	2	78	51	4	66
19	2	81	52	4	65
20	2	83	53	4	64
21	2	83	54	4	64
22	2	80	55	4	69
23	2	79	56	4	69
18	2	78	57	4	67
24	2	77	58	4	64
20	2	87	59	4	65
среднее	Д <sub>св</sub> =35,0см	80,65	среднее	Д <sub>св</sub> =70,0см	64,71
25	3	67	60	5	57
26	3	77	61	5	56
27	3	73	62	5	58
28	3	67	63	5	60
29	3	69	64	5	37
30	3	73	65	5	64
31	3	73	66	5	60
32	3	73	среднее	Д <sub>св</sub> =105,0см	56,00
33	3	67			

При проведении хронометражных наблюдений вес породы в ковше фиксировался в зависимости от средне-взвешенного размера кусков породы, величина которого определялась в соответствии с номером группы по предложенной типизации.

Возможность получения таким способом большого количества наблюдений (которые производятся из кабины машиниста экскаватора), и применение методов

математической статистики позволяет обеспечить высокую достоверность и приемлемость полученных результатов.



**Рисунок 3.** Изменение веса породы в ковше ( $E=41,3 м^3$ ) от средневзвешенного размера кусков взорванных пород

В результате эксперимента была установлена эмпирическая зависимость веса породы в ковше от средневзвешенного размера куска, график которой показан на рисунке 3:

$$G = \frac{56,65}{D_{св}^{0,287}}, m \quad (1)$$

где:  $G$  - вес породы в ковше, т

$D_{св}$  - средневзвешенный размер кусков взорванных пород, м.

Достоверность результатов расчёта по формуле (1) характеризуется значениями величин среднеквадратического отклонения  $\sigma' = 2,40$  и коэффициентом вариации  $K_{вар} = 3,31\%$ .

Таким образом, доказано, что запатентованный способ определения влияния гранулометрического состава на параметры экскавации, основанный на применении эталонных фотопланограмм, позволяет осуществлять мониторинг качества дробления пород, необходимый для установления оптимального соотношения параметров технологических процессов экскавации и БВР.

**Второе защищаемое научное положение - Установлены экспериментальные зависимости изменения веса породы в ковше экскаватора, времени черпания и всего цикла экскавации, а также производительности экскаватора, оснащённого ковшом вместимостью  $41,3 м^3$ , от средневзвешенного размера кусков раздробленной породы.**

Главным техническим средством экскаваторно-автомобильных комплексов, которое определяет производительность всей технологической цепи, является экскаватор. Задействованная на разрезе «Тугнуйский» система автоматической

диспетчеризации (АСД) осуществляет фиксацию веса породы в ковше и в кузове автосамосвала в тоннах, что позволяет избежать пересчёта этих показателей в кубометры с применением коэффициентов разрыхления породы при взрыве, в ковше экскаватора. Выразим техническую производительность экскаватора через вес породы в ковше:

$$Q_{эч} = \frac{3600G}{T_{ц}}, (m/ч) \quad (2)$$

где  $G$  – вес породы в ковше, т;

$T_{ц}$  – время цикла экскаватора в конкретных горно-технических условиях, с.

Чтобы выразить изменение производительности экскаватора от величины средневзвешенного размера кусков взорванной породы, необходимо время цикла экскаватора  $T_{ц}$ , и вес породы в ковше  $G$ , представить в виде функциональной зависимости от  $D_{св}$ .

Время цикла экскаватора представляет собой сумму времени элементарных операций:

$$T_{ц} = t_{н} + 2t_{п} + t_{р}, с, \quad (3)$$

где:  $t_{н}$  - время набора ковша, с;

$t_{п}$  - время поворота экскаватора при погрузке автосамосвала, с;

$t_{р}$  - время разгрузки ковшей экскаватора при погрузке автосамосвала, с.

Кусковатость взорванных пород в первую очередь влияет на время набора ковша ( $t_{н}$ ). Её в процессе эксперимента определяли в соответствии с требованиями патента «Способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации». В результате экспериментальных исследований, проведённых на разрезе «Тугнуйский», была установлена зависимость изменения времени набора ковша от кусковатости взорванных пород (рис. 4)

$$t_{н} = 9 \cdot e^{0,7 D_{св}}, с \quad (4)$$

где  $D_{св}$  – величина средневзвешенного размера кусков взорванной породы, м.

Сравнение результатов расчёта по формуле (4) с данными эксперимента позволило оценить её достоверность: величина среднеквадратического отклонения  $\sigma' = 2,77$ ; значение коэффициента вариации  $K_{вар} = 6,77\%$ . Значения этих критериев характеризует высокую степень достоверности результатов расчёта по установленной зависимости.

Возвращаясь к формуле (3) можно сказать, что величина  $t_{н}$  и  $t_{р}$  не зависят от кусковатости взорванных пород. Время поворота ( $t_{п}$ ) зависит в первую очередь от угла поворота экскаватора при погрузке автосамосвала, который определяется технологической схемой отработки забоя и расположением автосамосвала. В процессе эксперимента угол поворота экскаватора составлял примерно  $90^{\circ}$ .

Таким образом, для оптимизации параметров исследуемой технологической схемы зависимость (3) можно представить в виде:

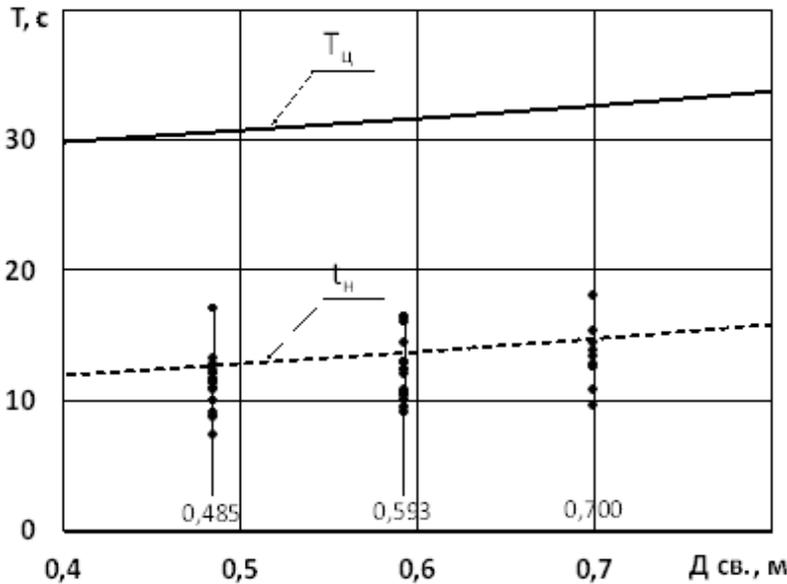
$$T_{ц} = t_{н} + A = 9 \cdot e^{0,7 D_{св}} + A, \text{ с} \quad (5)$$

где  $A=2t_{н} + t_{р}$ .

При оптимизации параметров конкретной технологической схемы, как в нашем случае, величина параметра  $A$  была определена как среднее арифметическое для всех значений времени цикла, без деления на величину средневзвешенного размера кусков взорванных пород.

В результате хронометражных наблюдений установлена зависимость изменения величины времени цикла  $T_{ц}$  от кусковатости взорванных пород на разрезе «Тугнуйский», графически зависимость представлена на рис. 4:

$$T_{ц} = t_{н} + 17,94 = 9 \cdot e^{0,7 D_{св}} + 17,94, \text{ с.} \quad (6)$$



**Рисунок 4.** Зависимость времени набора ковша и цикла экскаватора от средневзвешенного размера взорванных пород

С учётом установленных эмпирических зависимостей (1) и (6), зависимость годовой производительности экскаватора от величины средневзвешенного размера кусков взорванной приобретает вид формулы (7)

$$Q_{год} = [3600 \cdot (56,65 : D_{св}^{0,287}) \cdot T_{см} \cdot n_{см} \cdot n_{год} \cdot K_{из} \cdot K_{изг}] : (9 \cdot e^{0,7 D_{св}} + 17,94); \text{ т/год} \quad (7)$$

где:  $n_{см}$  – число рабочих смен в сутки;

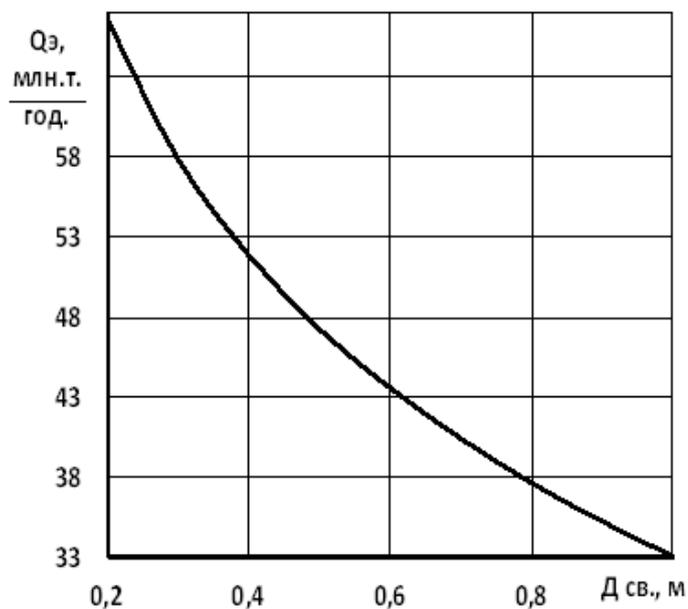
$n_{год}$  – число рабочих дней в году;

$T_{см}$  – продолжительность смены, ч;

$K_{из}$  – коэффициент использования экскаватора в течение смены;

$K_{изг}$  – коэффициент использования рабочего времени экскаватором в течение года, ч.

Для горнотехнических условий разреза «Тугнуйский» при расчёте, (рис. 5) приняты следующие значения исходных данных:  $T_{см}=12ч$ ;  $n_{см}=2$ ;  $n_{год}=365$ ;  $K_{изэ}=0,74$ ;  $K_{изг}=0,90$ .



**Рисунок 5** – Годовая производительность экскаватора ( $E=41,3 м^3$ ) от средневзвешенного размера кусков взорванной породы

Для проверки достоверности установленной зависимости влияния средневзвешенного размера кусков взорванной породы на производительность экскаватора, была проведена опытно-промышленная проверка. С помощью системы АСД «Карьер» выбирались взорванные и отработанные в разные периоды года блоки полускальных вскрышных пород по взрываемости категорий III и IV. Их объем изменялся от 0,2 млн.т. до 4,6 млн.т. Фиксировались: удельный расход ВВ, календарный фонд времени на отработку каждого блока, часы простоя и работы экскаватора и его часовая эксплуатационная производительность, которая с учётом величины коэффициента использования экскаватора в течение смены, позволяла определить его фактическую техническую производительность.

Для сравнения фактической производительности экскаватора Висургус 495HD (с ковшем  $41,3 м^3$ ) с расчётной была определена эмпирическая зависимость изменения его производительности от величины удельного расхода ВВ.

Эти зависимости представлены в виде формул:

для пород категория III

$$(Q_э = 9930 \cdot q^{0,3}), \quad (8)$$

для пород категория IV

$$(Q_э = 9000 \cdot q^{0,3}), \quad (9)$$

где  $Q_э$  - часовая расчётная техническая производительность экскаватора, т/ч;  
 $q$  - удельный расход эталонного ВВ, кг/м<sup>3</sup>.

Сравнение расчётной технической производительности экскаватора (с ковшем  $41,3 м^3$ ) с фактической, полученной в результате опытно-промышленной проверки,

показала высокую степень достоверности установленной зависимости. Она характеризуется величиной средней относительной ошибки – 2,39 и 2,65% и коэффициентом вариации - 2,90 и 3,29% (соответственно для пород III и IV категории).

Таким образом, зависимость изменения производительности экскаватора с ковшом вместимостью 41,3м<sup>3</sup> от величины средневзвешенного размера кусков взорванной вскрышной породы показывает, что при её увеличении с 0,3м до 0,8м производительность экскаватора уменьшается более чем в 1,5 раза (рис. 5).

**Третье защищаемое научное положение – Предложен критерий оптимизации параметров процессов технологии разработки вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами большой единичной мощности, базирующийся на использовании величины средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы.**

Оптимизации параметров процессов технологии разработки вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами большой единичной мощности обеспечивается применением критерия - величины средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы ( $D_{св}$ ).

Для  $D_{св}$  в интервале от 0,1 до 1,0 м с использованием программного комплекса имитационного моделирования взрывных работ «Blast Maker» (BM) были выполнены расчёты параметров буровзрывных работ и удельных затрат по процессу БВР для III и IV категорий пород по взрываемости, при различных степенях обводнения массива в зависимости от  $D_{св}$ . При этом дополнительно к расчётам затрат на бурение и ВВ, выполненным в «Blast Maker», были учтены статистические данные предприятия о затратах на: зарядание скважин, монтаж сети, забойку скважин, доставку, хранение, охрану ВВ и СВ. Для расчётов были приняты исходные данные, которые характеризуют конкретные горнотехнические условия эксплуатации комплекса оборудования. В нашем случае расчёты были выполнены для:

- двух категорий разрабатываемых пород: IV (трудно взрываемые породы) и III (средне взрываемые породы);
- структуры потребления ВВ принятой в соответствии со среднегодовым потреблением («Эмульсолит» – 3%; «Березит» – 55%; «Гранулит» – 41%);

В соответствии с полученными эмпирическими зависимостями изменения производительности оборудования от величины  $D_{св}$  и статистическим данным предприятия о стоимости 1 маш-час были получены зависимости изменения удельных затрат на кубометр разрабатываемых пород по каждому из процессов исследуемой технологии: подготовка пород к выемке, экскавация с погрузкой в автосамосвалы, транспортирование и отвалообразование от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород (рис. 6).

При этом статические данные по экономике включали все элементы затрат: материальные затраты (ГСМ, электричество, услуги производственного характера, запасные части), оплату труда, отчисления в пенсионный и социальные фонды, амортизацию и прочие затраты.



**Рисунок 6.** Графики зависимости изменения удельных затрат по основным процессам от  $D_{св.}$ , где: 1- суммарные затраты; 2 - на БВР (IV-кат.), 3 - на автотранспорт, 4 - на экскавацию, 5 - на отвалообразование

Принятый критерий —  $D_{св.}$  позволяет производить оптимизацию параметров технологии при различных типах применяемого оборудования (автосамосвалов, бульдозеров, буровых станков и т.п.), а также учитывать горнотехнические условия (степень обводнённости массива, расстояние перемещения породы).

Таким образом, предложенный критерий оптимизации величины средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы позволяет определить параметры процессов технологии разработки вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами большой единичной мощности и обеспечивающие рациональную величину удельных затрат.

**Четвёртое защищаемое научное положение — Разработана методика оптимизации параметров сопряжённо-выполняемых технологических процессов разработки полускальных пород, основанная на средневзвешенном размере кусков взорванной породы, позволяющая на конкретном предприятии определить минимум суммарных удельных затрат на разработку вскрыши.**

Установленные зависимости (1, 6 и 7), представленные на рисунке 6, составили методическую основу оптимизации параметров сопряжённо выполняемых технологических процессов разработки полускальных вскрышных пород, совокупно обеспечивающие оптимальные результаты работы всего экскаваторно-автомобильного комплекса. Они позволили разработать методику, укрупнённый алгоритм которой представлен на рис. 7.

В соответствии с порядком расчёта по алгоритму на первом этапе с использованием программы «Blast Maker» определяются параметры БВР для пород III и IV категорий по взрываемости, обеспечивающие принятые значения  $D_{св}$ . Далее рассчитываются затраты по процессам с учётом горнотехнических условий (прочностных свойств пород, типа ВВ при обводнённости блока, расстояния транспортирования вскрышных пород до отвала и т.п.) и экономических показателей (стоимости дизельного топлива, ВВ, СВ, тарифов на электроэнергию, заработной платы, отчислений в пенсионный и социальный фонды, амортизации и т.п.).

Для каждого значения  $D_{св}$  рассчитываются параметры всех основных процессов и удельные затраты. Суммарные издержки, находятся по формуле:

$$C_{эак} = C_э + C_o + C_{ac} + C_{бвр}, \quad (10)$$

где:  $C_{эак}$  - суммарные издержки работы экскаваторно-автомобильного комплекса;  
 $C_{бвр}$  - затраты на буровзрывные работы;  
 $C_э$  - затраты на процесс экскавации;  
 $C_o$  - затраты на процесс отвалообразования;  
 $C_{ac}$  - затраты на процесс транспортирования самосвалами.

Ввиду разнонаправленности затрат по процессам при изменении  $D_{св}$ ,  $C_{эак}$  имеют зону минимальных значений. Для условий разреза «Тугнуйский» при разработке пород экскаватором Bucyrus-495HD с последующим транспортированием их автосамосвалами БелАЗ-75306 на 2,3 км и укладкой в бульдозерный отвал, минимум издержек достигается при величине средневзвешенного размера кусков взорванных пород  $D_{св}=0,90$ м для трудно и средне взрывааемых пород (категория IV и III, рис. 8).

Определив величину  $D_{св}$ , соответствующую минимуму суммарных издержек, легко определить параметры каждого процесса.

Анализ полученных результатов показал, что минимальная величина суммарных издержек при оптимальном значении средневзвешенного размера кусков взорванной породы сравнительно мало отличается от соседних значений. Сопоставление основных экономических показателей работы исследуемой технологии в зоне оптимальных условий для трудно взрывааемых пород показало, что в настоящее время на разрезе «Тугнуйский» (при величине коэффициента вскрыши  $Kв=4,74$ м<sup>3</sup>/т и существующем уровне цен) при неоптимальных параметрах ( $D_{св}=0,5$  и  $0,7$ м) действительно обеспечивается дополнительный объём добычи угля и прирост выручки, но рентабельность сокращается соответственно на 50 и 20%. Вариант, соответствующий  $D_{св}=1,0$ м по всем показателям хуже базового.

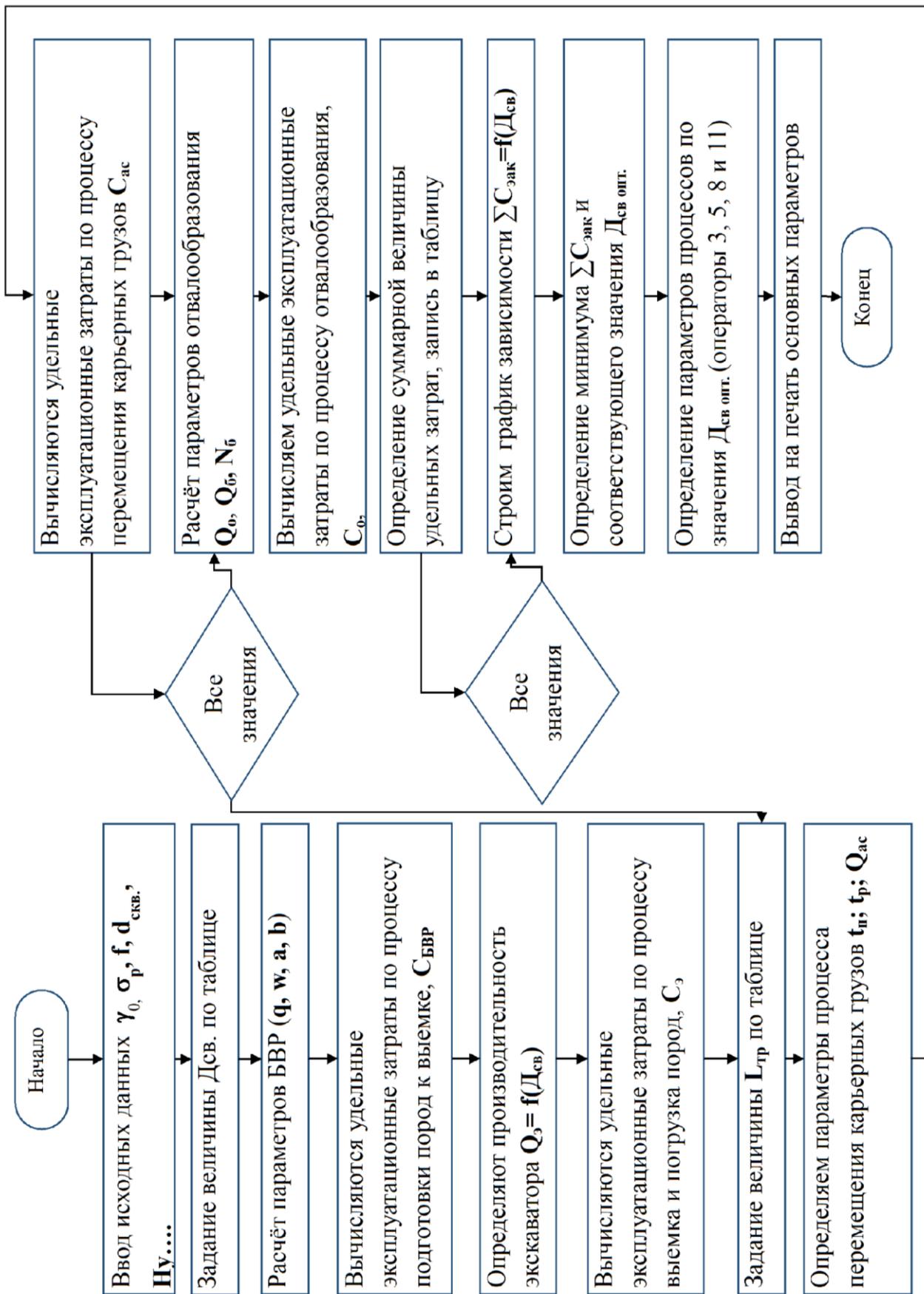
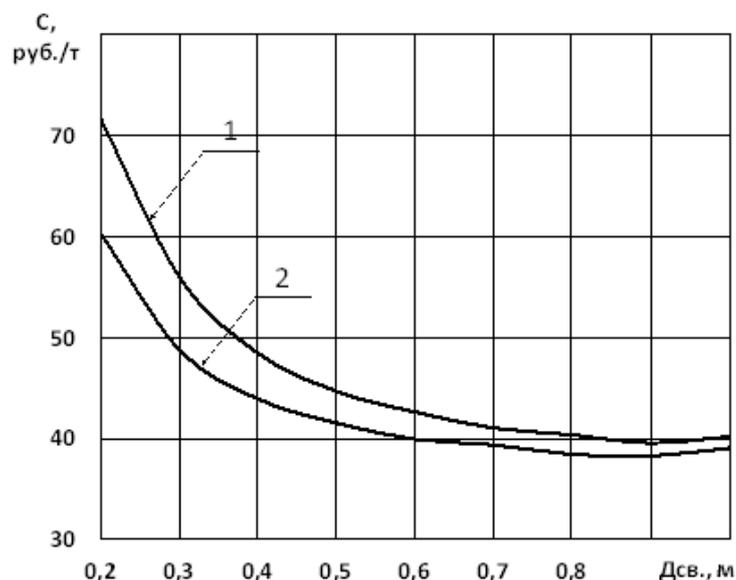


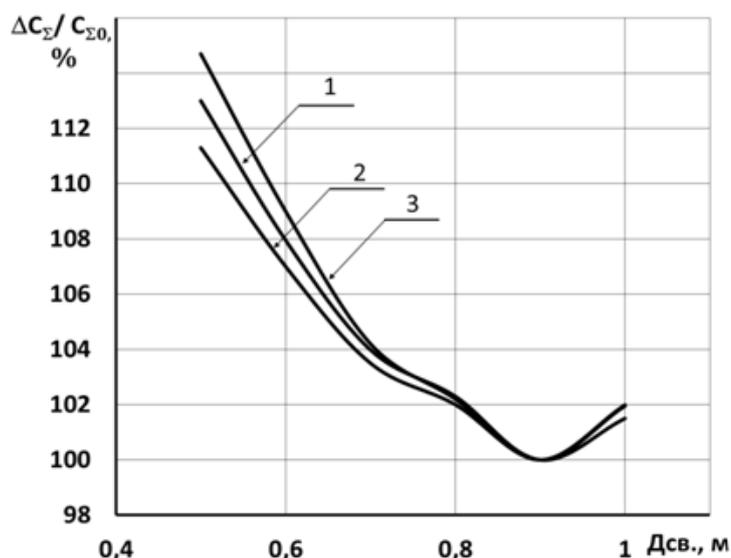
Рисунок 7. Укрупнённый алгоритм оптимизации параметров основных процессов экскаваторно-автомобильного комплекса

Существующие в настоящее время горнотехнические условия эксплуатации оборудования разреза «Тугнуйский» и сложившиеся издержки на оборудование, энергоресурсы и заработную плату определяют пологость в зоне минимума графика зависимости суммарных удельных затрат по технологии применения экскаваторно-автомобильного комплекса (рис.8).



**Рисунок 8.** Суммарные удельные затраты экскаваторно-автомобильного комплекса.

- 1 - трудно взрывааемые породы - категория IV
- 2 - средне взрывааемые породы – категория III



**Рисунок 9.** Относительное увеличение от минимума суммарных издержек для различных типов ВВ:

- 1 - по среднегодовой структуре потребления ВВ;
- 2 - ВВ для «сухих» скважин;
- 3 - ВВ для обводненных скважин

Относительное увеличение суммарных удельных затрат по технологии от минимального уровня гарантированно не будет превышать 10% в интервале  $D_{св.}$  от 0,6 до 0,9 м. В том случае целесообразно определять и рекомендовать параметры основных процессов именно в этом диапазоне.

На рис. 9 показано относительное увеличение суммарных издержек при отклонении  $D_{св.}$  от оптимального значения для пород IV категории.

На основании произведённых расчётов для условий разреза «Тугнуйский», определены и рекомендованы параметры основных процессов, которые приведены в табл. 2.

Разработанный алгоритм позволяет оперативно осуществлять корректирующий расчёт параметров основных процессов, обеспечивающих минимальные издержки на разработку вскрыши, например, при изменении расстояния транспортирования породы до отвала Lтр. Предусмотрена возможность оперативно просчитывать варианты оптимизации при изменении прочностных свойств пород, грузоподъёмности автосамосвалов, типа бульдозера и т.п. Для этого пересчитывается только одна графическая зависимость по соответствующему процессу (рис. 6), которая, в результате суммирования с остальными, определяет суммарный минимум издержек, величину  $D_{св}$  и оптимальные параметры экскаваторно-автомобильного комплекса.

Проведённые расчёты показали, что минимальные издержки при Lтр. = 3, 4 и 5 км также соответствует  $D_{св} = 0,6-0,9$  м. Причиной этого является сравнительно низкое влияние кусковатости взорванных пород на производительность автосамосвалов БелАЗ-75306 (грузоподъёмностью 220 тонн) и, соответственно, на затраты по сравнению с увеличением издержек от возрастания расстояния перемещения груза.

**Таблица 2.**

Параметры процессов экскаваторно-автомобильного комплекса обеспечивающие минимальные суммарные затраты, в условиях разреза «Тугнуйский».

Процессы	Наименование параметра	Ед. Изм.	Величина при значении $D_{св}$	
			0,6 м	0,9 м
БВР	Диаметр скважины	мм.	250	250
	Удельный расход ВВ и сетка скважин:			
	-для трудно взрывааемых пород	кг./ м <sup>3</sup> (м.)	0,75 (6,5 х6,5)	0,41 (8,5х8,5)
	-для легко взрывааемых пород	кг./ м <sup>3</sup> (м.)	0,53 (9 х9)	0,31 (10х10)
Экскавация	Время цикла	сек.	31,64	34,84
	Вес породы в ковше	т.	65,59	58,39
	Часовая производительность экскаватора (Vucyrus 495HD)	т./ч.	7 463	6 033
	Годовая производительность экскаватора (Vucyrus 495HD)	тыс.т./год	43 539	35 200
Перемещение карьерных грузов	Время погрузки	сек.	94,92	104,52
	Время рейса	сек.	1 377,12	1 386,72
	Часовая (на маш.час.) произв. автосам.	т./маш.час	549,49	545,69
	Оптимальное количество машин под экскаватором	ед.	13,58	11,1
Отвало-образование	Часовая производительность	т./ч	7 463	6 033
	Годовая производительность	тыс. т./год	43 540	35 200
Суммарные затраты:	-для трудно взрывааемых пород;-	руб./т	43,2	40,0
	-для легко взрывааемых пород	руб./т	40,4	37,9

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований решена актуальная задача оптимизации параметров экскаваторно-автомобильного комплекса при разработке полускальных вскрышных пород экскаваторами с ковшом  $41,3 \text{ м}^3$  в условиях разреза «Тугнуйский», что вносит значительный вклад в развитие открытых горных работ и обеспечивает снижение затрат для технологии в целом и максимум рентабельности.

Основные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором при выполнении исследований, заключаются в следующем:

1. Разработан и защищён патентом способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации основанный на совместном использовании эталонных и рабочих фотопланограмм, который в значительной степени снижает трудоёмкость исследований, исключает помехи ведению горных работ, обеспечивает оперативность получения результата, безопасность исследований и своевременность учёта изменения свойств пород при планировании буровзрывной подготовки пород.

2. В производственных условиях получены эмпирические зависимости изменения веса породы в ковше (ёмкостью  $41,3 \text{ м}^3$ ), времени цикла экскаватора и его производительности от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород  $D_{св}$ , которые, при применении современных компьютерных систем имитационного моделирования «Blast Maker» и автоматизированной системы диспетчеризации (АСД), позволили установить графические зависимости изменения затрат по процессам: подготовка пород к выемке, экскавация с погрузкой в автотранспорт, транспортирование и отвалообразование от величины  $D_{св}$ .

4. Разработана методика оптимизации параметров сопряжённо-выполняемых технологических процессов разработки полускальных вскрышных пород по критерию средневзвешенного размера кусков взорванной породы.

5. Разработана методика оптимизации параметров сопряжённо выполняемых технологических процессов разработки полускальных вскрышных пород, по критерию средневзвешенный размер кусков взорванной породы. Установлено оптимальное значение критерия, которое соответствует величине  $D_{св}$  0,6 и 0,9 м.

6. Научное значение работы заключается в установлении взаимосвязей между параметрами процессов технологии разработки полускальных вскрышных пород современными экскаваторно- автомобильными комплексами (с ковшем более 40 кубометров) и определении степени их влияния на затраты по процессам, что позволяет минимизировать суммарные издержки.

7. Практическое значение работы заключается в разработке:

- методики и алгоритма оптимизации параметров сопряженно выполняемых процессов разработки полускальных вскрышных пород, совокупно обеспечивающих оптимальные результаты работы всего экскаваторно-автомобильного комплекса

- рекомендаций для условий разреза «Тугнуйский» при применении экскаваторов с ковшом более 40 кубометров и автосамосвалов грузоподъемностью 220 т, которые обеспечивают суммарный минимум издержек.

8. Разработанные методика оптимизации параметров сопряженно выполняемых технологических процессов разработки полускальных вскрышных пород, совокупно обеспечивающих оптимальные результаты работы всего экскаваторно-автомобильного комплекса, и рекомендации приняты для реализации разрезом «Тугнуйский» и ООО «Управление проектных работ» АО «Красноярскуголь».

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

**в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:**

1. **Исайченков А.Б.** Новые достижения ОАО «Разрез «Тугнуйский» // Уголь. – 2011. - № 11. – С. 20-22.

2. Артемьев В.Б., Кулецкий В.Н., **Исайченков А.Б.** Исследование факторов влияющих на производительность экскаватора Висугус 495HD в условиях разреза «Тугнуйский» // Уголь. – 2014. - № 4. – С.69-71.

3. **Исайченков А.Б.** Оптимизация параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаватором Висугус 495HD на разрезе «Тугнуйском» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Издательство: Горная книга (Москва) ISSN: 0236-1493. - 2015. - №6. - С. 211-215.

4. Кононенко Е.А., **Исайченков А.Б.** Влияния кусковатости взорванных пород на производительность экскаватора Висугус 495HD. // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. - № 6 – С.17-19.

5. В.Б. Артемьев, В.А. Коваленко, А.И. Каинов, П.И. Опанасенко, А.Б. **Исайченков А.Б.** Современные информационные технологии в подготовке и проведении БВР на угольных разрезах СУЭК // Уголь 2012. - №11.- с.6-14.

6. Опанасенко П.И., **Исайченков А.Б.** Результаты применения программно-технологического комплекса «Blast Maker» для проектирования параметров БВР на разрезе «Тугнуйский» //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Издательство: Горная книга (Москва) ISSN: 0236-1493. - 2013. - №S2 - С. 38-57.

7. **Исайченков А.Б.** Алгоритм минимизации затрат при применении экскаватора Висугус 495HD на разрезе «Тугнуйский» // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Издательство: Горная книга (Москва) ISSN: 0236-1493. - 2014. - №9. - С. 251-253.

8. Опанасенко П.И., **Исайченков А.Б.** Оптимизация кусковатости взорванных полускальных вскрышных пород на разрезе «Тугнуйский» // «Горный журнал». - 2015 – №9. – С.25-35.

9. Патент на изобретение РФ № 2570797. Способ определения влияния гранулометрического состава породы на параметры экскавации / **Исайченков А.Б.**, Федотенко В.С., Кононенко Е.А.// Заявка № 2014138906, приоритет изобретения 25.09.14г., зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 17.11.15г. Оpubл. 10.12.2015 г. Бюл.№34.