

## ОТНОСНО ХИДРОАБРАЗИВНОТО ИЗНОСВАНЕ НА ЕЛЕМЕНТИ ОТ МЕХАНИЗАЦИЯТА ЗА ХИДРОТРАНСПОРТ НА ОТПАДЪЧЕН ПУЛП ОТ ОБОГАТИТЕЛНИТЕ ФАБРИКИ

**Илия Йочев**

*"Рудметал" АД, 4960 гр. Рудозем*

**РЕЗЮМЕ.** В доклада е изследван механизма на хидроабразивното износване. На база на известни аналитични и експериментални зависимости са определени факторите влияещи върху този вид износване. Извършени са експерименти в реални промишлени условия на системата за хидротранспорт на хвостохранилище „Рудозем – 2“. Разработен и внедрен е вариант за увеличаване на техническия ресурс на части от механизацията.

### ABOUT HYDROABRASIVE DETERIORATION OF ELEMENTS OF MECHANISATION OF SYSTEMS FOR HYDROTRANSPORT OF A WASTE OF CONCENTRATING FACTORIES

**Ilia Iochev**

*"Rudmetal" AD, 4960 Rudozem, Bulgaria*

**ABSTRACT.** In the report the mechanism of hydroabrasive deterioration is surveyed. On base known analytical and experimental dependences, are defined factors which influence on hydroabrasive deterioration. Experiments and supervision in real industrial conditions on system for hydrotransport finding on storehouse for a waste of enrichment of minerals „Rudozem 2“ are made. The variant for increase to a technical resource of the cores has been developed and introduced are frequent mechanisation.

### Увод

Хидротранспортът е процес, при който воден поток или поток на смес носи със себе си в тръбопровод продукти с малка едрина. В повечето случаи транспортирането се извършва чрез нагнетяване на хомогенната смес. Този вид транспорт намира широко приложение при транспорт на полезни изкопаеми (въглища, нефт, пясък, разтвори на соли и много други) от мястото на добиване към това на преработване или складиране на отпадъчни суспензии от обогатителните фабрики, сгуропепелни отпадъци от топло-електрическите централи и др. Средата, която се пренася представлява смес от вода (или други течни среди) и диспергирани частици на минерални продукти или наситнени твърди или влакнести материали с органичен или неорганичен произход.

Реализирането на хидротранспортна схема е възможно и при големи разстояния – до над 400 km (Самарко Бразилия) и масова производителност 12 000 000 t/год. В минно-обогатителните предприятия транспортната дължина обикновено е няколко десетки метра.

Този вид транспорт притежава следните основни предимства пред останалите видове:

- сравнително ниска себестойност на транспортиране;
- по-малки капитални разходи за построяване на системата;
- възможност за постигане на пълна автомати-

зация и непрекъсваемост на процеса;

- малък брой на експлоатационния персонал;
- липса на отрицателно въздействие върху околната среда поради невъзможност за разсипване или разпрашаване на транспортираните продукти;
- безшумност и висока ефективност;
- минимална заемана територия за изграждане.

Един от основните недостатъци на хидротранспорта е същественото износване на отделните елементи – помпи, тръбопроводи, тръбна арматура и др. Освен това съществува опасност от утаяване на пренасяните частици, което води до затлачване на тръбопровода.

Процесът на износване на хидротранспортната система е много интензивен когато се транспортират отпадъчни пулпове от обогатителните фабрики поради наличието на кварцови частици, които притежават висока абразивност. В подобни случаи се налага употребата на облицовки от гума, полиуретан или други еластомери или брони от твърди сплави или базалтови продукти. Тези материали предотвратяват в значителна степен износването.

Подобни проблеми съществуват в процеса на флотация на полезни изкопаеми. Въпросът за намаляване на разходите за работни органи на обогатителните машини, както и за подмяна на елементи на системата за хидротранспорт на отпадъчните пулпове е постоянна задача пред минно-обогатителните дружества. Разходите за подмяна на износените части достигат до 50% от всички

експлоатационни разходи. Подобни данни са публикувани в различни източници (Смолдырев и Сафонов 1989) и др.

## Същност на процеса на хидроабразивно износване

Под износване в техниката се разбира постепенното изменение на геометричните размери на детайлите в резултат на действието на силите на триене, което се съпътства с отделяне на материал от триещата се повърхнина и (или) с остатъчна деформация (Мърхов, 1991).

За детайли работещи в среда на абразивна хидросмес, основната причина за достигане на гранично състояние е механичното и по-точно абразивното износване без забележимо влияние на другите видове износване.

Абразивното износване е такъв процес, който се предизвиква при взаимодействие на определен детайл и твърди абразивни частици, в резултат на което по повърхността на детайла се образуват драскотини, резки и др. Обикновено частиците имат минерален произход – скални късчета полезно изкопаемо и др. Възможно е обаче твърдите абразивни частици да се получат и чрез отделяне на микрообемни от твърди наклепни частици от триещите се детайли или да са продукти от различни оксиди, образувани при износването. От минералните абразивни частици най-голяма твърдост имат кварцовите и поради тази причина те предизвикват най-интензивно износване.

Разглеждайки процеса на взаимодействие на износващата се повърхност и твърдите частици, М. М. Тененбаум приема, че за елементите на хидро-транспортната система е характерен механизъм на контакт, вследствие на което се появява хидроабразивно износване. При това интензивността на процеса силно се влияе от хидравличните характеристики на течението, физико-механичните свойства на абразивните частици и износваната повърхност, както и от динамиката на тяхното взаимодействие (Тененбаум, 1976).

Хидроабразивното износване според интензивността на протичането бива общо и местно. Общото хидроабразивно износване се характеризира с относителна гладкост на износваната повърхност, докато местното се развива като микронеравности с последващото им преобразуване в отвори с немалки размери – 1 – 5 см. Общото хидроабразивно износване, според интензивността, е няколко пъти по-слабо от местното.

Разглеждайки механизма на хидроабразивното износване на детайли работещи в поток с абразивни частици, в най-общия случай трябва да се отчетат проявата на следните видове „чисто“ износване:

- разрушаването на метала чрез срязване;
- разрушаването в резултат на повторна пластична деформация;
- разрушаването вследствие на умора на материала;

- разрушаването в резултат на крехкост на материала.

Развитието на разрушаване в резултат на крехкост на материала се среща много рядко при хидроабразивното износване, понеже нормалната сила на взаимодействие на твърдите частици със стените на детайла е недостатъчна за поява на разрушаваща деформация превишаваща границата на провлачване на материала (а не на отделни микроструктури).

Обикновено не се развива и разрушаването в резултат на умора на материала поради високата интензивност на протичане на другите видове износване. По този начин следва да се отчитат основно два вида разрушаване – чрез микростружки и чрез отделяне на отделни микроструктури в резултат на първична или повторна пластична деформация. В най-общия случай двата основни вида износване протичат едновременно.

Интензивността на развитието на процеса на хидроабразивно износване се определя от масата и скоростта на абразивните частици, а също и от ъгъла под който те атакуват износваната повърхност.

Върху интензивността на процеса влияят също така износоустойчивостта на материала на износваната повърхност и абразивността на твърдите частици. Аналитичното определяне на стойностите на тези два фактора понастоящем е трудно. Съществуват зависимости, които дават само качествени резултати, но не и количествени. Ето защо определянето на стойностите на тези параметри се извършва по експериментален път. Подобни данни са публикувани в Гочиташвили и др. (1984). Също в този източник е изложена формула, чрез която се определя интензивността на износването на повърхността, т.е. загубата на маса на метал от единица износвана повърхност за единица време, предизвиквана от  $n$ -брой частици:

$$\Delta = \rho_T v_T^3 S (1 - S) d \cdot [f_1 (\sin 2\alpha - 2\mu \sin^2 \alpha) + f_2 \sin^2 \alpha] \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \quad (1)$$

където  $\rho_T$  е плътността на твърдата фаза,  $\text{kg/m}^3$ ;

$v_T$  - скоростта на твърдите частици в момента на удара им с износваната повърхност,  $\text{m/s}$ ;

$S$  - обемната концентрация на пулпа;

$d$  - диаметърът на твърдите частиците,  $\text{m}$ ;

$f_1$  и  $f_2$  – коефициентите отчитащи якостните качества на износвания материал и абразивните свойства на частиците,  $\text{s}^2/\text{m}^3$ ;

$\alpha$  - ъгълът между вектора на скоростта на твърдата частица и износваната повърхност,  $^\circ$ ;

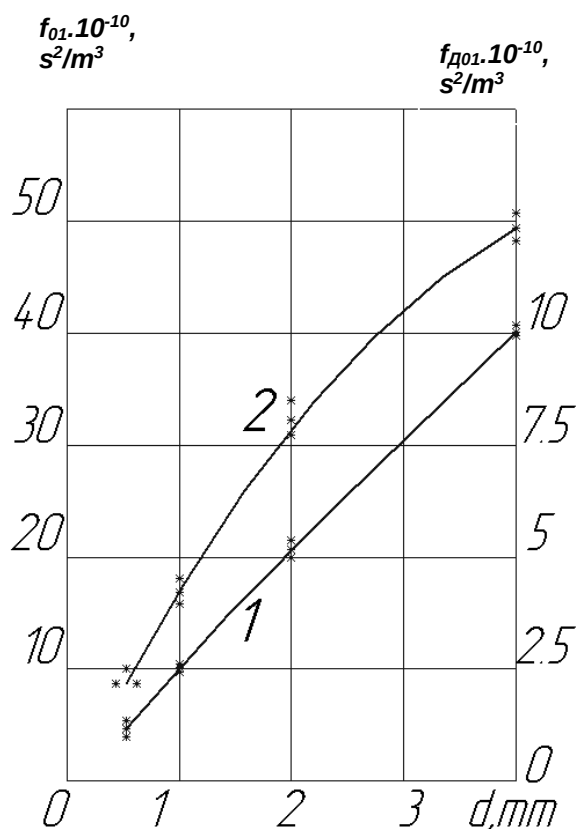
$\mu$  - коефициентът на триене при пързаяне между абразива и износваната повърхност.

Във формула (1) стойностите на коефициентите  $f_1 = f_{01}/4$  и  $f_2 = f_{02}/2$  се определят опитно на струйно-ударна установка. Тези коефициенти са постоянни за определена взаимодействаща двойка (абразив и повърхнина) със

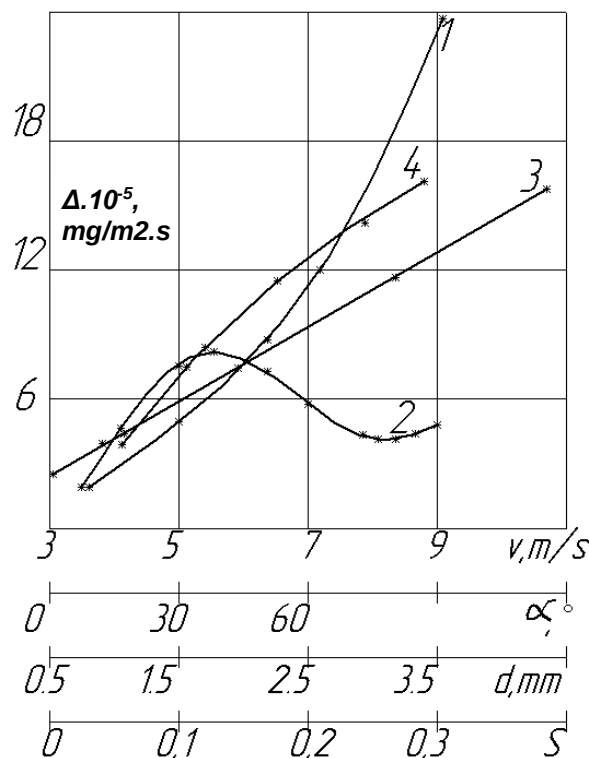
съответни физикомеханични свойства.

Достоверността на зависимост (1) е проверена експериментално като разликата в експерименталните и аналитичните резултати е в границите между 2 и 14%. На фиг. 1 и 2 са изобразени експерименталните зависимости публикувани в Гочиташвили и др. (1984).

Хидроабразивната износваща способност на твърдите частици е възприето да се представя чрез т.нар. коефициент на относителна хидроабразивност. Този показател значително се променя в зависимост от ъгъла, под който се атакува дадена повърхност. Затова при определяне на стойностите на относителната хидроабразивност за различни материали е необходимо да се съблюдава равенство на ъглите образувани от направлението на движение на потока от хидросмес и повърхността, която се износва.



Фиг. 1. Зависимости на абразивните способности на частиците от тяхната едрина. Крива 1- износван материал Ст3, абразив кварцов пясък,  $V_t=6.5\text{m/s}$ ,  $S=0.06$ ,  $\alpha=12^\circ$ . Крива 2 - износван материал 40X, абразив кварцов пясък,  $V_t=6.5\text{m/s}$ ,  $S=0.06$ ,  $\alpha=90^\circ$



Фиг. 2. Зависимости на интензивността на хидроабразивното износване от скоростта (крива 1), ъгъла на атака на частиците (крива 2), едрината на частиците (крива 3) и концентрацията на сместа (крива 4)

В табл. 1 са дадени стойностите на коефициента на относителна хидроабразивност (публикувани в Гочиташвили 1980) за различни строителни и отпадъчни материали, транспортирани по тръбопроводи. Стойностите са усреднени за десетки обогатителни фабрики, ТЕЦ-ове, минно-обогатителни комбинати, кариери за инертни материали и др.

Таблица 1. Коефициенти на относителна хидроабразивност на различни абразивни материали К

| № по ред | Вид на абразивния материал                 | коефици-ент. К |
|----------|--------------------------------------------|----------------|
| 1        | Пясък за изпитване на цименти - еталон     | 1.00           |
| 2        | Речен пясък 0-5mm                          | 2.05           |
| 3        | Чакъл 5-20mm                               | 3.90           |
| 4        | Ситен пясък 0.8mm                          | 2.50           |
| 5        | Натрошена шлака течна                      | 1.20           |
| 6        | Натрошена шлака твърда                     | 0.50           |
| 7        | Пепел                                      | 0.40           |
| 8        | Шлакопепел 20% течна шлака + 80% пепел     | 0.80           |
| 9        | Шлакопепел 20% твърда шлака + 80% пепел    | 0.50           |
| 10       | Отпадък от обогатителна фабрика за въглища | 0.40-0.90      |
| 11       | Отпадък от обогатителна фабрика за руда    | 0.15-1.40      |

Коефициентът на изнosoустойчивост е параметър, характеризиращ способността на материала, от който е изработена износващата повърхност да се противопоставя на въздействието на абразивните частици, движещи се в течна среда. Колкото е по-висока стойността на този коефициент, толкова е по-устойчив определен материал. Данни за коефициента на изнosoустойчивост на различни конструкционни материали са публикувани в Гочиташвили (1980) и представени в табл. 2. При избор на материал за детайли подложени на хидроабразивно износване е необходимо да бъдат подбрани такива с възможно най-висок коефициент.

Върху хидроабразивното износване оказва влияние и дължината, на която се транспортира материала. В процеса на движението на пулпа (плъзгане и търкаляне) се изменят формата и едрината на частиците. Това определя значителното намаляване на абразивната способност с увеличаване на транспортното разстояние. Така например, при увеличаване на транспортната дължина от 0 до 20 km относителната хидроабразивност на частиците (за кварцов пясък, какъвто е основния отпадък от обогатителните фабрики) намалява с около 40%. При отпадък от каменни въглища този показател намалява с около 80%, а при натрошен варовик – с около 60%. Подобни данни са публикувани в Гочиташвили (1980), като изследванията са извършени в среда от химически неутрална вода.

Важен фактор, определящ относителната абразивност на частиците е тяхната плътност. Този фактор се увеличава с увеличаване на плътността им.

Таблица 2. Коефициенти на изнosoустойчивост на различни конструкционни материали  $K_i$

| № по ред | Вид на материала             | коефициент. $K_i$ |
|----------|------------------------------|-------------------|
| 1        | Ст 3 еталон                  | 1                 |
| 2        | Ст 5                         | 1.10-1.15         |
| 3        | Стомана 20                   | 1.00-1.10         |
| 4        | Стомана 40                   | 1.30              |
| 5        | Стомана 40Х                  | 1.35              |
| 6        | Стомана 25Г2                 | 1.35              |
| 7        | Стомана 3Х13                 | 1,13              |
| 8        | Стомана 30ХГСА               | 1.50              |
| 9        | Стомана 55Л                  | 1.08              |
| 10       | Сив чугун Сч 28-48           | 0.50              |
| 11       | Хроммолибденов чугун ИЧХ16МТ | 3.30              |
| 12       | Технически порцелан          | 6.50              |
| 13       | Базалт                       | 6.50              |
| 14       | Меден шлак                   | 10.00             |
| 15       | Шперплат                     | 1.00              |
| 16       | Термоустойчиво стъкло        | 10.00             |
| 17       | Полиуретан                   | 3.00-8.00         |
| 18       | Гума                         | 3.00-6.00         |
| 19       | Стъклоплакно                 | 2.90              |

## Намаляване на степента на хидроабразивно износване за конкретен обект

### Общо описание на обекта

Както беше споменато, на механизма на хидроабразивно износване оказват комплексно влияние множество фактори, определени от конкретните условия на работа. Изследването на този механизъм в лабораторни условия води до приблизително верни резултати и е трудно приложими за даден обект. Ето защо е подходящо проблемите свързани с хидроабразивно износване на елементи за хидротранспорт да се решават в промишлени условия за всеки конкретен случай.

На фиг. 3 е изобразена системата за хидротранспорт на отпадъчен пулп на хвостохранилище „Рудозем – 2“. Отпадъкът от обогатителния продукт достига гравитачно по бетонов канал да аванкамерата 1 с обем 2500m<sup>3</sup>. Посредством два помпени агрегата (работен и резервен) всеки един включващ два броя едностъпални центробежни бронирани помпи работещи в последователна схема. Помпите са с производителност 1250m<sup>3</sup>/h. Помпените агрегати осъществяват сумарен напор (геодезичен плюс съпротивлението на тръбопровода) 92m. Честотата на въртене на помпите от втора степен се регулират посредством турбосъединител. Брониранияте шибърни кранове 3 служат за превключване на работния и резервния агрегат, както и за секционирание на работния 4 (базалтиран) и резервния 5 (стоманен) напорен тръбопровод. По-нататък пулпът постъпва в изливната шахта 6, откъдето посредством бетонов канал се отвежда до стената на хвостохранилището.

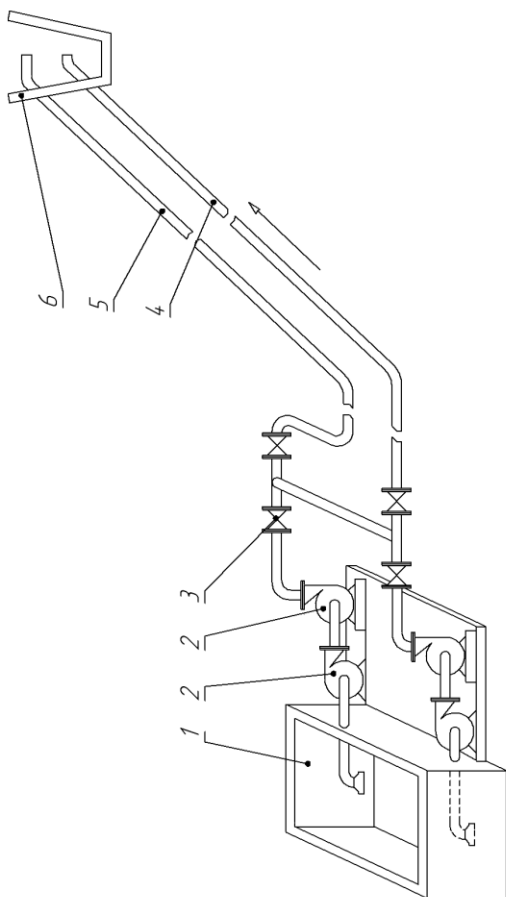
Основен проблем при експлоатацията на помпите е високата степен на хидроабразивно износване на следните елементи (фиг. 4):

- плоча предна;
- плоча задна;
- компенсатор входен и изходен.

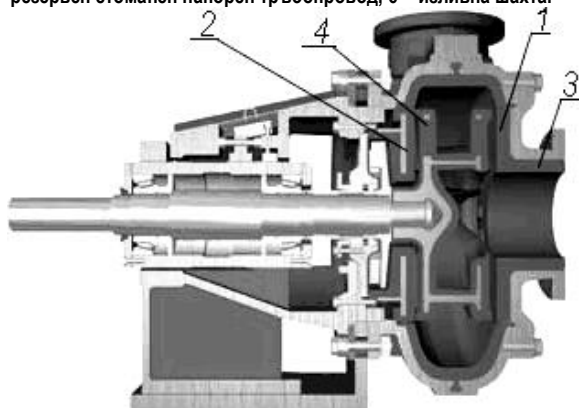
На силно износване са подложени и брониранияте шибърни кранове – фиг. 5 .

Броните на помпите първоначално са произведени от полиуретан, а шибърите са изработени от стомана с твърдосплавно покритие.

Високата степен на износване на споменатите елементи води до честата им подмяна, която е свързана със значителни разходи.



Фиг. 3. Схема за хидротранспорт на отпадъчен пулп на хвостохранилище „Рудозем-2“: 1- аванкамера, 2- бронираны помпи, 3- бронираны шибъри, 4 – работен базалтиран напорен тръбопровод, 5- резервен стоманен напорен тръбопровод, 6 – изливна шахта.



Фиг. 4. Бронирана центробежна едностъпална помпа: 1- плоча предна, 2- плоча задна, 3 – компенсатор входен (изходен), 4 – колело работно.



Фиг. 5. Добре изразено хидроабразивно износване на бронирано тяло (горе) и плоча предна (долу) на центробежна едностъпална помпа.

### Изследване на възможностите за намаляване на интензивността на хидроабразивното износване на основните елементи на помпите от системата за хидротранспорт на хвостохранилище „Рудозем 2“

Във връзка с изложените по-горе аналитични и графични зависимости за интензивността на хидроабразивното износване е извършен анализ и са направени следните изводи за възможностите за влияние върху основните фактори определящи процеса (1):

- плътността на твърдата фаза – остава относително постоянна за определен технологичен режим;
- скоростта на твърдите частици – върху този фактор не може да се оказва влияние в момент на експлоатация на съоръжението и при определен дебит на отпадъчния пулп;
- обемната концентрация на пулпа – върху този фактор също не съществува възможност за въздействие;
- диаметърът на твърдите частици – определя се от технологията на обогатителния процес;
- ъгълът на вектора на скоростта на частиците и атакуваната повърхност – определя се от теченията и вихрите в съоръженията. Няма възможност за въздействие;
- коефициентът на триене при плъзгане – не може да се изменя;
- якостните качества на материала на износващите се повърхности – върху този параметър може да се влияе, като се променя вида на материала или качествата му.

За намаляване на износването е решение за изработване на брони за помпите, както и разработване на нов шибър с брони от гума. За вземането на това решение спомага обстоятелството, че в непосредствена близост до хвостохранилище „Рудозем 2“ се намира завод за каучукови смеси и изделия – „Хевей КИМ“ гр. Мадан. Така с помощта на специалисти от този завод са разработени два вида каучук (условно наречени K1 и K2) с различен химичен състав.

Изработени са матрици за най – износващите се части на помпите, както и е изработен шибър с брониращи износващи се части. Всички брони са изработени от двата вида каучукови смеси. В продължение на три години тези брони, както и оригиналните такива са подложени на изпитания в производствени условия. Броните от даден вид каучук се залагат на един помпен агрегат, като за елиминиране на каквито и да е различия в условията на експлоатация, през шест месеца броните от даден вид каучук сменят мястото си на монтаж върху съответния помпен агрегат. Работните часове стриктно се отчитат от апаратурата за управление на помпената станция.

#### Резултати от експериментите

В табл. 3 са обобщени резултатите от изследванията като са посочени и отработените часове за основните елементи на помпите преди внедряване на гумени бронии.

Таблица 3. Резултати от експериментите при внедряване на гумирани работни органи на помпите

| № по ред | Наименование на детайла | Отработени часове до подмяна, h |                    |                    |
|----------|-------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
|          |                         | Оригинална броня                | Каучукова броня K1 | Каучукова броня K2 |
| 1        | Плоча предна            | 1005                            | 1000               | 1800               |
| 2        | Плоча задна             | 1835                            | 1900               | 2100               |
| 3        | Компенсатор             | 1920                            | 2000               | 2520               |

От направените експерименти следват изводите:

- експлоатационният срок на оригиналните брони изработени от полиуретан е незадоволително кратък, имайки предвид тяхната цена;
- броните изработени от експериментална каучукова смес K1 имат сходен с оригиналните експлоатационен срок, но цената им е около пет пъти по - ниска;
- броните изработени от експериментална каучукова смес K2 имат значително по-дълъг експлоатационен срок от оригиналните при цена около четири пъти по – ниска;
- рационално е решението за окончателно преминаване към изработване на брони от каучукова смес K2, чийто химичен състав е показан в табл. 4. Изработването на броните и необходимата за това инструментална екипировка става изцяло в ремонтно-механичния цех на дружеството собственик на хвостохранилище „Рудозем 2”

Необходимо е да се подчертае, че с внедряването на каучуковите брони е постигнат значителен икономически ефект.

Основната разлика между химичния състав на възприетата каучукова смес спрямо други такива е високото съдържание на естествен каучук, който придава значителна еластичност и абразивоустойчивост на изделията.

Препоръчана за публикуване  
от катедра „Механизация на мините”, МЕМФ

Таблица 4. Химичен състав на каучукова смес K2

| № по ред | Вид на съставките     | Тегловна част, kg |
|----------|-----------------------|-------------------|
| 1        | Естествен каучук      | 105.000           |
| 2        | Сажда полски активни  | 47.000            |
| 3        | Цинквейс              | 5.200             |
| 4        | Стеарин               | 1.570             |
| 5        | Пиролон               | 3.200             |
| 6        | Асфалт                | 1.500             |
| 7        | Мазут                 | 4.000             |
| 8        | Неозон „Д”            | 1.260             |
| 9        | Вулканизатор „Ц”      | 0.840             |
| 10       | Дифенилгуанидин „ДФГ” | 0.210             |
| 11       | Сяра                  | 2.300             |
| 12       | ПВИ                   | 0.430             |
| 13       | Твърдост по Шор       | 65-70             |

#### Изводи

Всеки един конкретен случай на хидроабразивно износване се характеризира с комплексно влияние на множество фактори и е необходимо да се изследва отделно.

За дадено място, възможностите за въздействие върху механизма и степента на хидроабразивното износване са минимални. Един от възможните варианти е използването на материали с висока устойчивост на износване.

Използването на гумирани работни органи на елементите от хидротранспортните системи е приложимо в ремонтните цехове на обогатителните дружества, като по този начин е възможно постигане на висок икономически ефект определен от ниската цена на резервните части, по дългите експлоатационен и междуремонтен срок.

#### Литература

- Гочишвили Т. Ш., Алехин Л. А., Махарадзе Л. И., Сулаберидзе Д. Г. 1984. *Надежность и долговечность напорных гидротранспортных систем*. М., Недра.
- Гочиташвили Т. Ш. 1980. Исследование абразивных отходов промышленности предприятий. *Транспорт и складирование отходов производства*. Ленинград. 15-20.
- Мърхов Н. Б. 1991. *Поддържане и ремонт на минната механизация*. С., Техника, 63-65.
- Смолдырев А. Е., Ю. К. Сафонов. 1989. *Трубопроводный Транспорт концентрированных гидросмесей*. М., Машиностроение, 28.
- Тененбаум М. М. 1976. *Сопротивление абразивному изнашиванию*. М., Машиностроение..