

Prof. Ing. Jiří Nováček, CSc., Ing. Oldřiška Bláhová, VŠB - TU Ostrava

Ing. Pavel Rucký, VÚHU, a.s., Most

## Analýza vlivu rozdělovacích podmínek na výsledky separace hnědého uhlí v těžkých suspenzích

### Analyse der Wirkung der Scheidungsbedingungen auf Ergebnisse der Braunkohleseparation in Schwertrüben

Für eine hochwertige Scheidung eines Rohstoffes auf Produkte bei der Kohleaufbereitung ist Erfüllung von einer Reihe der Erfordernisse die Bedingung. Zu diesen gehören z. B. genügende Kapazität und guter technischer Zustand der Scheidungseinrichtung, ausreichende Stabilität der Suspension usw. Eine Verringerung der Wirksamkeit des Scheidungsprozesses im Folge der Nichteinhaltung dieser Voraussetzungen ist nicht möglich bei der Bewertung der Wirksamkeit durch gewöhnliche Methode der Tromp-Kurven zu erfassen. Die Beurteilung der Bedingungen und der Qualität der Scheidung ermöglicht die Bewertung der Wirksamkeit durch die Methode der Ausbeuten im Vergleich mit der Kurve der theoretischen Scheidungswirksamkeit. Das Maximum der Wirksamkeitskurve ermöglicht die Bestimmung der optimalen Scheidungsparameter. Die Analyse der Ergebnisse der Braunkohlescheidung in SM-Sichtern bestätigte hohe Separationswirksamkeit, die sich der optimalen Wirksamkeit eines gegebenen Rohstoffes nähert.

### Analysis of separation conditions influence on results of brown coal separation in dense liquids

The process of superior raw material separation into products during coal preparation is conditioned by completion of many requirements. Among the requirements belong for example sufficient capacity and usable technical condition of classifier, sufficient suspension stability,

etc. Separation efficiency deterioration due to breach of the conditions cannot be monitored in efficiency evaluation if common method of Tromps' separation curves is used. Assessment of separation quality and conditions allows evaluating the efficiency using yield method in comparison to curve of separation theoretical efficiency. The maximum of efficiency curve allows determining optimal separation parameters. Analysis of results of brown coal separation in SM classifiers confirmed high separation efficiency that approximates to the ideal efficiency in the case of the raw material separation.

### Анализ влияния условий сепарации на результаты процесса сепарации бурого угля в тяжелых суспензиях

Условием качественного процесса разделения сырья на продукты при обогащении угля является выполнение ряда требований, к которым относятся например достаточная мощность и хорошее техническое состояние устройства сепарации, достаточная устойчивость суспензии ит. п. Ухудшение к.п.д. сепарации в результате несоблюдения этих предпосылок нельзя зарегистрировать при оценке к.п.д. обыкновенным методом кривых Тромпа. Обсуждение условий и качества сепарации позволяет дать оценку к.п.д. при помощи метода выходов в сравнении с кривой теоретического к.п.д. сепарации. Максимум кривой к.п.д. позволяет установление оптимальных параметров сепарации. Анализ результатов сепарации бурого угля в сепараторах СМ подтвердил высокий к.п.д. сепарации, который

приближается оптимальному к.п.д. при сепарации данного сырья.

#### Analýza vlivu rozduřovacích podmínek na výsledky separace hnědého uhlí v těžkých suspenzích

Podmínkou kvalitního dělicího procesu suroviny na produkty při úpravě uhlí je splnění řady požadavků. K nim patří např. dostatečná kapacita a dobrý technický stav rozduřovacího zařízení, dostatečná stabilita suspenze apod. Zhoršení účinnosti rozduřování v důsledku nedodržení těchto

předpokladů nelze zachytit při hodnocení účinnosti obvyklou metodou dělicích Trompových křivek. Posouzení podmínek a kvality separace umožňuje hodnocení účinnosti metodou výtěžností v porovnání s křivkou teoretické účinnosti rozduřování. Maximum křivky účinnosti umožňuje stanovení optimálních parametrů rozduřování. Analýza výsledků rozduřování hnědého uhlí v rozduřovacích SM potvrdila vysokou účinnost separace blízkou optimální účinnosti při rozduřování dané suroviny.

### Úvod

Praktická aplikace rozduřování uhlí v těžkých suspenzích přinesla vedle zvýšení výkonů jednotlivých rozduřovacích zařízení také zpřesnění dělicího procesu ve srovnání s jinými rozduřovacími operacemi (např. rozduřování v sazečkách nebo hydrocyclonech). Je to dáno možností vytvoření rozduřovacího prostředí požadované hustoty a jeho relativně vysokou stabilitou (automatická regulace hustoty). Tato skutečnost dovoluje zvolit úroveň dělicího řezu (dělicí hustotu) v místě maximální teoretické účinnosti separace, pokud si obchodní nebo ekonomické podmínky nevyžadují jiné rozduřovací prostředí.

Předpoklady vysoké účinnosti rozduřovací operace však podmiňuje dodržování dalších důležitých podmínek, mezi které např. patří

- dobrý technický stav rozduřovacího zařízení
- dostatečná kapacita vynášecích zařízení
- rovnoměrný přívod rozduřovaného materiálu do zařízení s vyloučením jeho přetížení
- dostatečná stabilita rozduřovací suspenze a její přiměřená viskozita apod.

Nejsou-li tyto podmínky dodrženy, dochází k poruchám rozdělovacího procesu, které se projeví ohyby nebo prohnutími (distorzemi) dělicí křivky rozduřovacího zařízení v jejich okrajových oblastech. Tyto distorze signalizují zhoršené dělení těch frakcí rozduřovaného uhlí, které mají výrazně vyšší nebo nižší hustotu než je hodnota dělicího řezu a jejich přechod do produktů by měl být bezproblémový. Hodnocení účinnosti separace standardním způsobem, pomocí ukazatelů vypočtených z hodnot odečtených z dělicí křivky ( $E_p$  resp.  $I$ ), tyto poruchy separačního procesu většinou nezachytí, protože k nim dochází převážně mimo oblast křivky, ve které jsou zjišťovány (odečítány) údaje pro výpočet těchto ukazatelů. Vliv těchto poruch dělicího procesu však může být velmi významný a lze jej vyhodnotit pouze z celého průběhu dělicí křivky. Vedle ohybu křivky se zhoršení procesu rozduřování projeví rovněž zvýšením hodnot ukazatelů  $E_p$  (resp.  $I$ ), tedy větším odklonem křivky od kolmice k ose  $x$ . Pomocí

hodnot dělicích čísel pro jednotlivé frakce rozduřované suroviny lze matematicky stanovit pravděpodobné výsledky separace při dodržování technických a technologických podmínek i při zhoršeném režimu separace a z jejich rozdílu vyčíslit ztráty vzniklé z důvodu existence problémů v procesu separace.

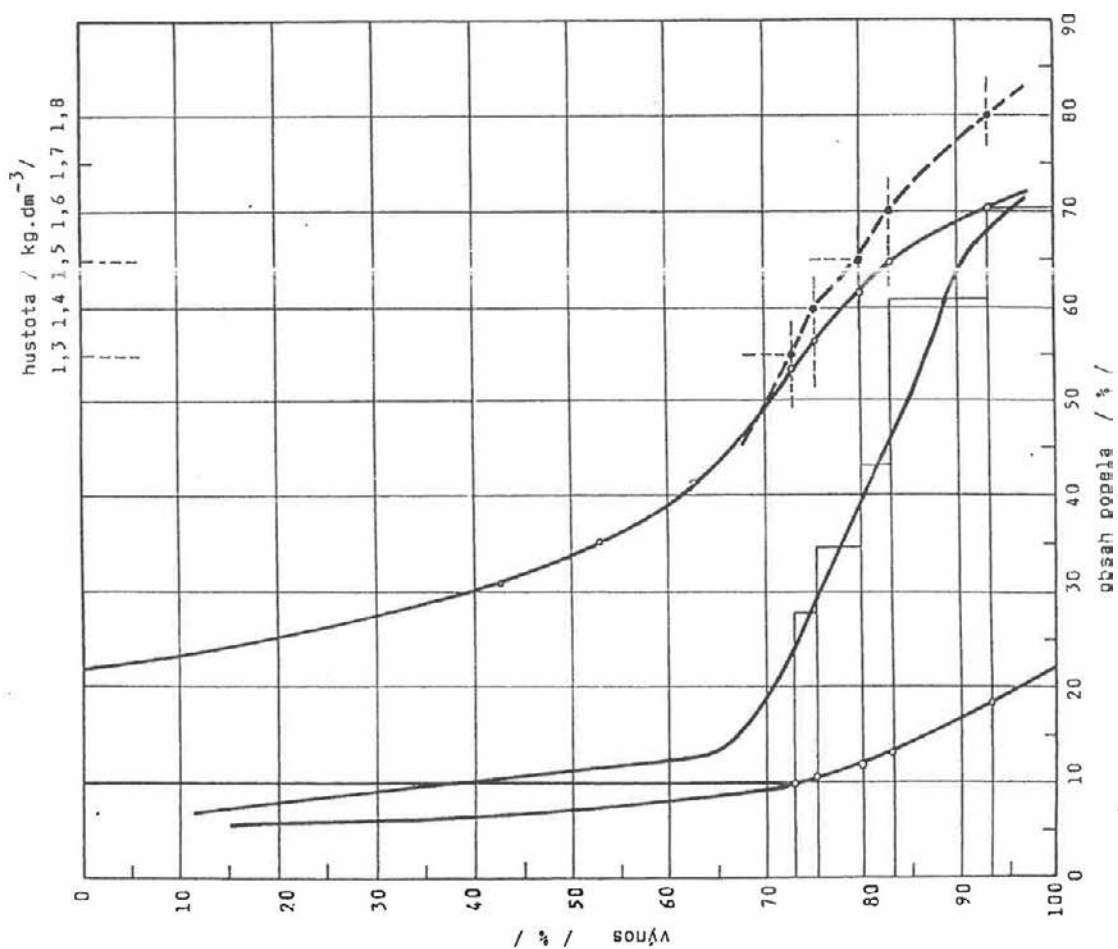
### ***Volba podmínek a kontrola účinnosti separace***

Vyhovující kvalita produktů rozduřování nepotvrzuje vždy dostatečnou účinnost procesu. Tu lze posoudit až porovnáním zjištěných (naměřených) kvantitativních a kvalitativních ukazatelů produktů separace s optimálními teoretickými hodnotami. Průběh rozduřovacího (dělicího) procesu je pak nutno vždy posoudit porovnáním jeho dělicí křivky s dělicí křivkou garantovanou pro dané rozduřovací zařízení při dodržování technických a technologických podmínek rozduřování. Pokud to dovolují podmínky, je správné vycházet při volbě dělicí hustoty z teoretické analýzy upravitelnosti zpracovávané suroviny z pohledu účinnosti rozduřování v závislosti na dělicí hustotě. Hodnoty pro sestrojení grafu závislosti účinnosti separace na hustotě dělicího řezu lze získat využitím údajů plavící frakční analýzy vzorku rozduřované suroviny. Matematicky lze pro každou hustotu, použitou při plavící analýze, určit teoretickou účinnost rozduřování metodou výtěžností. Graf závislosti účinnosti separace na hustotě dělicího řezu pak získáme vynesetím těchto hodnot do pravoúhlého souřadnicového systému, kdy na osu x vynášíme hustotu a na osu y účinnost separace. Hustota odpovídající maximální účinnosti rozduřování pak při aplikaci v provozních podmínkách zaručuje minimální ztráty hořlaviny v odpadním (těžším) produktu a současně minimum znečištění lehčího produktu částicemi hlušinových hornin. Toto optimum je na diagramu upravitelnosti většinou charakterizováno u dobře upravitelných uhlí ohybem křivky upravitelnosti.

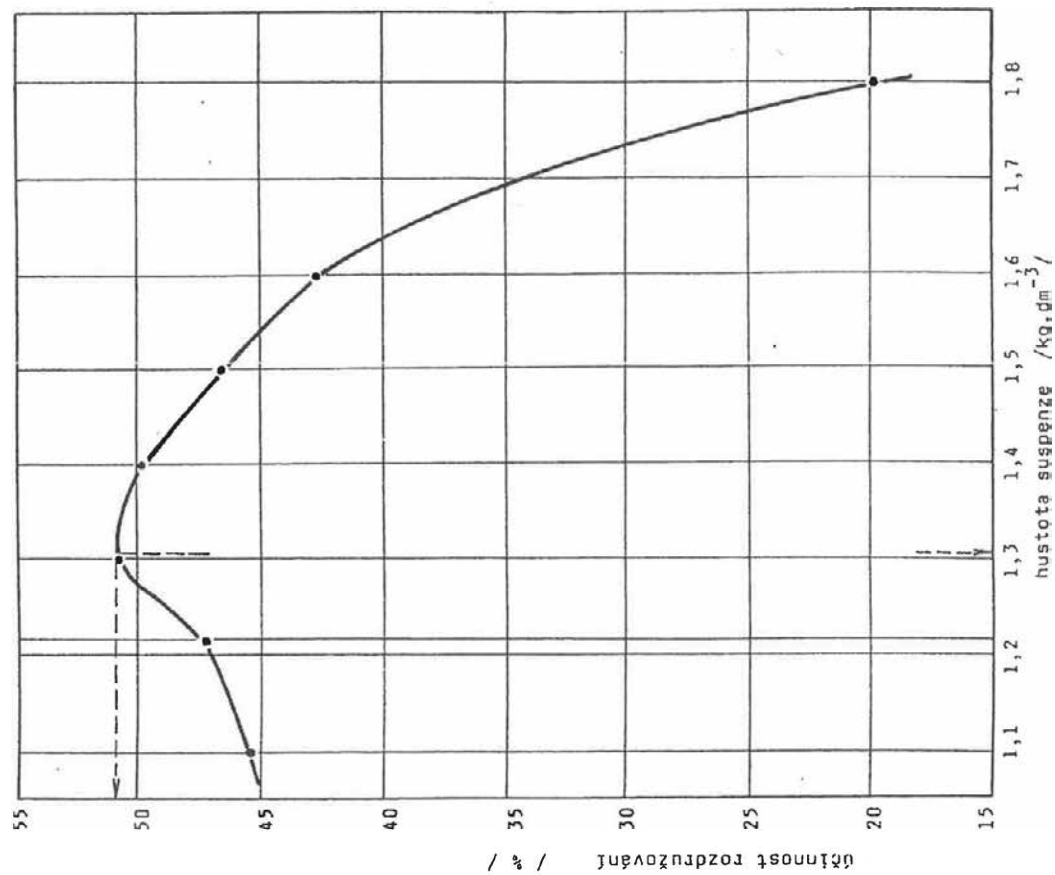
Účinnost těžkosuspendních rozduřovačů hrubozrnného uhlí je velmi vysoká, jsou-li dodržovány podstatné technické podmínky a technologické zásady. Jejím grafickým vyjádřením je dělicí křivka. K zjištění průběhu dělicí křivky a tedy výpočtu dělicích čísel je nutná frakční analýza produktů rozduřování a znalost hmotnostních výnosů produktů. Z anomálního průběhu dělicí křivky lze odhadnout příčiny zhoršeného průběhu separace a hledat opatření k nápravě. Z průběhu standardní dělicí křivky a dělicí křivky se zhoršeným průběhem lze využitím údajů z frakční analýzy vzorku rozduřované suroviny kvantifikovat ztráty a to jak v objemu získaných produktů a jejich kvalitě tak i ztráty ekonomické při znalosti jednotkových cen odbytových druhů uhlí.

### ***Ověření výsledků těžkosuspendního rozduřování hnědé uhlí***

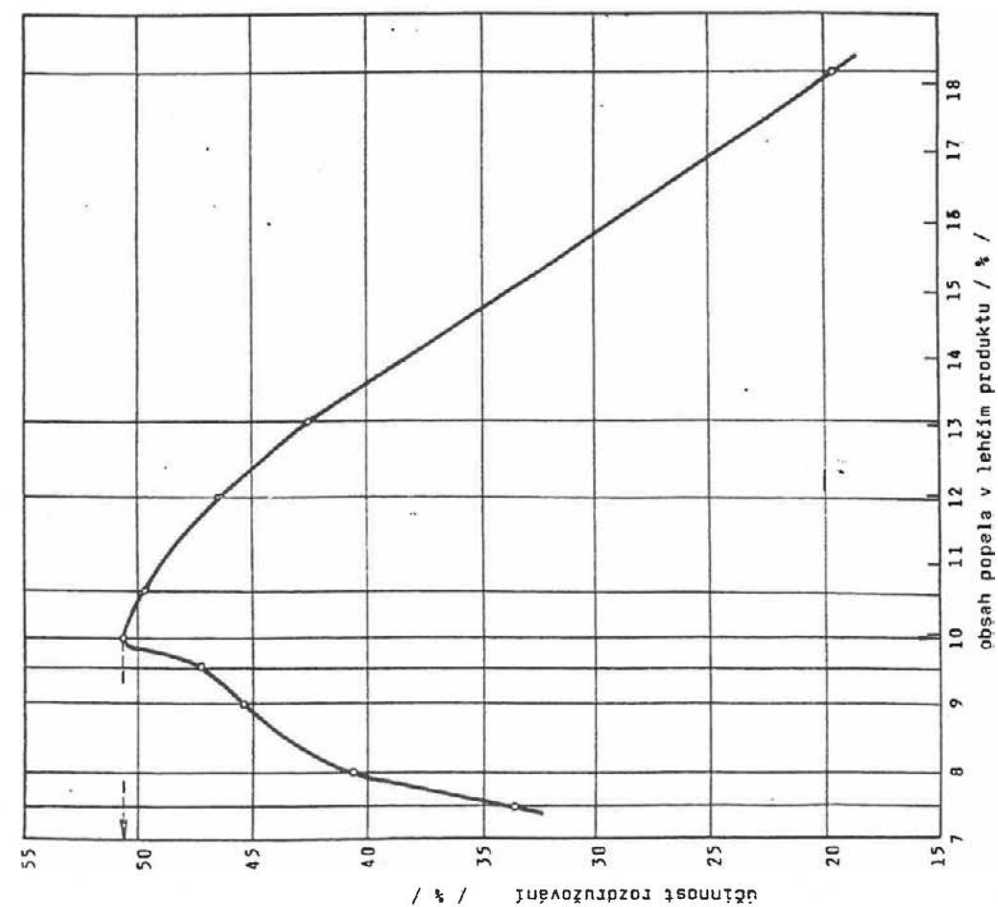
K posouzení výsledků dvouproduktového rozduřování hrubozrnného hnědé uhlí gravitačním způsobem v SM rozduřovači byly opakovaně odebrány vzorky surového uhlí a produktů rozduřování. Odebrané vzorky byly zpracovány plavící frakční analýzou a výnosy produktů byly vypočteny z frakční a popelové bilance surového uhlí a produktů separace. Výsledky frakční analýzy surového uhlí jsou uvedeny v tab. 1 a graficky zobrazeny v HR diagramu na obr. 1. Kvantitativní a kvalitativní charakteristika produktů rozduřování je uvedena v tab. 2 a je doplněna



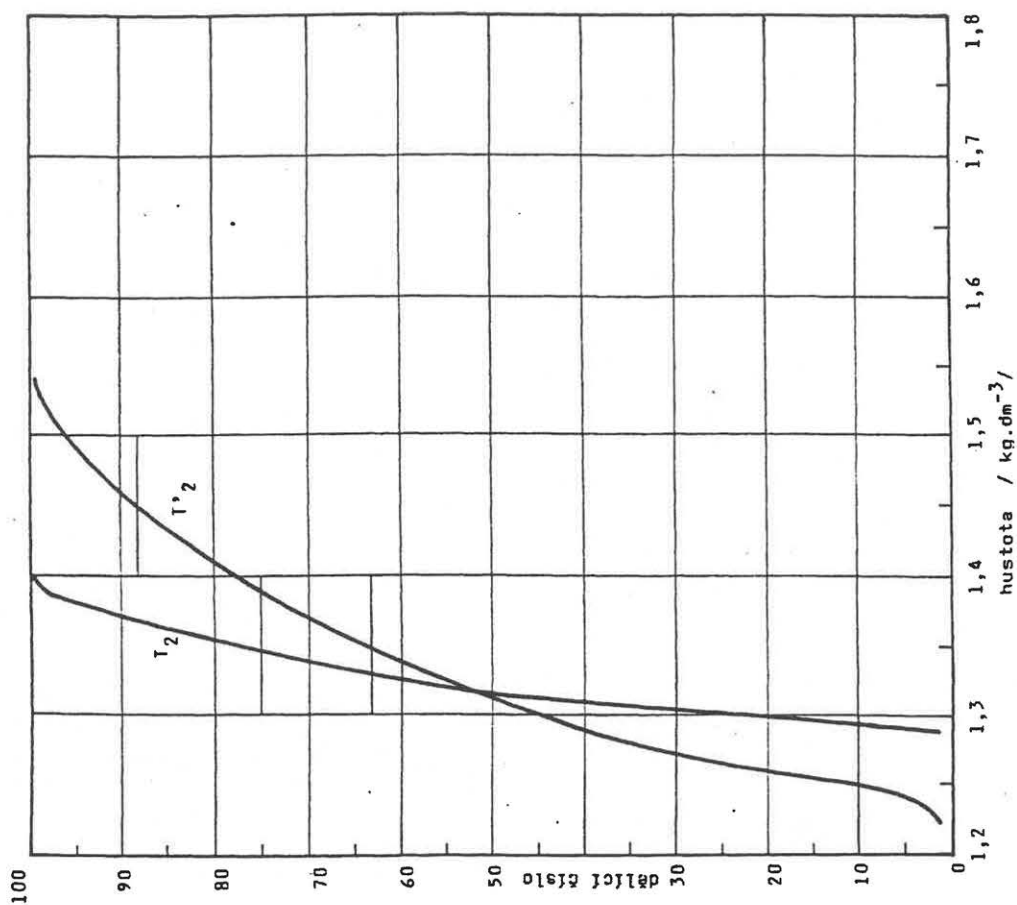
Obr. 1 Křivky upravitelnosti rozduřovaného uhlí



Obr. 2 Závislost teoretické účinnosti rozduřování na hustotě suspenze



Obr. 3 Závislost teoretické účinnosti rozdužování na obsahu popela v lehčím produktu



Obr. 4 Dělicí křivky SM rozdužovače

**Tabulka 1 Výsledky frakční analýzy rozdružovaného uhlí**

| Hustota             | výnos  | obsah popela | množství popela | $\Sigma$ množství popela ↓ | $\Sigma$ výnosů ↓ % | Ø obsah popela ↓ % | $\Sigma$ množství popela ↑ | $\Sigma$ výnosů ↑ % | Ø obsah popela ↑ % |
|---------------------|--------|--------------|-----------------|----------------------------|---------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| kg.dm <sup>-3</sup> | %      | %            |                 | plovoucí frakce            |                     |                    | kleslé frakce              |                     |                    |
| - 1,3               | 72,66  | 9,95         | 722,97          | 722,97                     | 72,66               | 9,95               | 2.190,43                   | 100,00              | 21,90              |
| 1,3 - 1,4           | 2,73   | 28,03        | 76,52           | 799,49                     | 75,39               | 10,60              | 1.467,46                   | 27,34               | 53,67              |
| 1,4 - 1,5           | 4,50   | 34,34        | 154,53          | 954,02                     | 79,89               | 11,94              | 1.390,94                   | 24,61               | 56,52              |
| 1,5 - 1,6           | 3,12   | 43,36        | 135,28          | 1.089,30                   | 83,10               | 13,12              | 1.236,41                   | 20,11               | 61,48              |
| 1,6 - 1,8           | 9,99   | 60,95        | 608,89          | 1.698,19                   | 93,00               | 18,26              | 1.101,13                   | 16,99               | 64,81              |
| + 1,8               | 7,00   | 70,32        | 492,24          | 2.190,43                   | 100,00              | 21,90              | 492,24                     | 7,00                | 70,32              |
| Součet              | 100,00 | 21,90        | 2.190,43        |                            |                     |                    |                            |                     |                    |

**Tabulka 2: Kvantitativní a kvalitativní údaje o produktech rozdružování**

| údaj                          | produkt           |                        |                  |
|-------------------------------|-------------------|------------------------|------------------|
|                               | lehčí ( L )       |                        | těžší ( T )      |
| výnos produktu / % /          | teoretický        | $v_{Lt} = 60,00$       | $v_{Tt} = 40,00$ |
|                               | skutečný          | $v_{Ls} = 58,00$       | $v_{Ts} = 42,00$ |
| obsah popela v produktu / % / | teoretický        | $a_{Lt} = 8,8$         | $a_{Tt} = 42,0$  |
|                               | skutečný          | $a_{Ls} = 8,8$         | $a_{Ts} = 40,0$  |
| účinnost separace / % /       | skutečná          | $\eta_s = 44,4$        |                  |
|                               | teoretická        | $\eta_t = 46,0$        |                  |
|                               | teoretická maxim. | $\eta_{T \max} = 50,8$ |                  |

**Tabulka 3** *Závislost teoretické účinnosti rozdělování na hustotě suspenze a obsahu popela v lehčím produktu separace*

| hustota suspenze        | obsah popela v lehčím produktu | teoretická účinnost separace |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| / kg.dm <sup>-3</sup> / | a <sub>Li</sub> / % /          | η <sub>t</sub> / % /         |
| -                       | 7,5                            | 33,7                         |
| -                       | 8,0                            | 40,7                         |
| 1,1                     | 9,0                            | 45,3                         |
| 1,23                    | 9,5                            | 47,1                         |
| 1,3                     | 9,95                           | 50,8                         |
| 1,4                     | 10,60                          | 49,8                         |
| 1,5                     | 11,94                          | 46,5                         |
| 1,6                     | 13,12                          | 42,7                         |
| 1,8                     | 18,26                          | 19,8                         |



Tabulka 4 Výpočet předpokládaných výnosů pro dělicí křivku  $T_2$ 

| frakce | hustota<br>kg.dm <sup>-3</sup> | složení suroviny |           | množství<br>popela | dělicí číslo |       | přepočet výnosů  |                  | přepočet množství<br>popela |                  |
|--------|--------------------------------|------------------|-----------|--------------------|--------------|-------|------------------|------------------|-----------------------------|------------------|
|        |                                | výnos /%/        | popel /%/ |                    | $T_2$        | $T_1$ | těžší<br>produkt | lehčí<br>produkt | těžší<br>produkt            | lehčí<br>produkt |
| 1      | - 1,3                          | 72,66            | 9,95      | 722,97             | -            | 100,0 | -                | 72,66            | -                           | 722,97           |
| 2      | 1,3 - 1,4                      | 2,73             | 28,03     | 76,52              | 75,0         | 25,0  | 2,05             | 0,68             | 57,39                       | 19,13            |
| 3      | 1,4 - 1,5                      | 4,50             | 34,34     | 154,53             | 100,0        | -     | 4,50             | -                | 154,53                      | -                |
| 4      | 1,5 - 1,6                      | 3,12             | 43,36     | 135,28             | 100,0        | -     | 3,12             | -                | 135,28                      | -                |
| 5      | 1,6 - 1,8                      | 9,99             | 60,95     | 608,89             | 100,0        | -     | 9,99             | -                | 608,89                      | -                |
| 6      | + 1,8                          | 7,00             | 70,32     | 492,24             | 100,0        | -     | 7,00             | -                | 492,24                      | -                |
| součet |                                | 100,00           | 21,90     | 2.190,43           |              |       | 26,66            | 73,34            | 1.448,33                    | 742,10           |

 $v_{Tp} = 26,66 \%$  $a_{Tp} = 54,33 \%$  $\eta_p = 50,52 \%$  $v_{Lp} = 73,34 \%$  $a_{Lp} = 10,12 \%$ Tabulka 5 Výpočet předpokládaných výnosů pro dělicí křivku  $T_2$ 

| frakce | hustota<br>kg.dm <sup>-3</sup> | složení suroviny |           | množství<br>popela | dělicí číslo |       | přepočet výnosů  |                  | přepočet množství<br>popela |                  |
|--------|--------------------------------|------------------|-----------|--------------------|--------------|-------|------------------|------------------|-----------------------------|------------------|
|        |                                | výnos /%/        | popel /%/ |                    | $T_2$        | $T_1$ | těžší<br>produkt | lehčí<br>produkt | těžší<br>produkt            | lehčí<br>produkt |
| 1      | - 1,3                          | 72,66            | 9,95      | 722,97             | 10,0         | 90,0  | 7,27             | 65,39            | 72,30                       | 650,67           |
| 2      | 1,3 - 1,4                      | 2,73             | 28,03     | 76,52              | 63,0         | 37,0  | 1,72             | 1,01             | 48,21                       | 28,31            |
| 3      | 1,4 - 1,5                      | 4,50             | 34,34     | 154,53             | 88,0         | 12,0  | 3,96             | 0,54             | 135,99                      | 18,54            |
| 4      | 1,5 - 1,6                      | 3,12             | 43,36     | 135,28             | 99,0         | 1,0   | 3,09             | 0,03             | 133,93                      | 1,35             |
| 5      | 1,6 - 1,8                      | 9,99             | 60,95     | 608,89             | 100,0        | -     | 9,99             | -                | 608,89                      | -                |
| 6      | + 1,8                          | 7,00             | 70,32     | 492,24             | 100,0        | -     | 7,00             | -                | 492,24                      | -                |
| součet |                                | 100,00           | 21,90     | 2.190,43           |              |       | 33,03            | 66,97            | 1.491,56                    | 698,87           |

 $v_{Tp} = 33,03 \%$  $a_{Tp} = 45,16 \%$  $\eta_p = 44,88 \%$  $v_{Lp} = 66,97 \%$  $a_{Lp} = 10,44 \%$



o tytéž teoretické údaje pro stejný obsah popela v lehčím produktu, zjištěné z obr. 1 a bilančních výpočtů ( $a_{Ls} = a_{Lt}$ ). Hodnoty teoretické účinnosti rozdružování v závislosti na hustotě jsou vypočteny z hodnot frakční analýzy rozdružovaného uhlí a jsou uvedeny v tab. 3. Graficky je průběh teoretické účinnosti rozdružování v závislosti na hustotě suspenze znázorněn na obr. 2 a v závislosti na obsahu popela v lehčím produktu separace na obr. 3. Z křivek účinnosti je zřejmé, že maximální teoretické účinnosti separace lze dosáhnout okolo hustoty  $1,3 \text{ kg.dm}^{-3}$  a její hodnota se pohybuje okolo hodnoty 50 %.

Dělicí křivky, sestavené z údajů získaných analýzou po sobě odebraných vzorků (období jednoho měsíce), signalizují zhoršení průběhu separačního procesu větším odklonem dělicí křivky  $T_2'$  (obr. 4). Snížení přesnosti přechodu jednotlivých frakcí rozdružované suroviny do produktů separace je možno kvantifikovat výpočtem předpokládaných výnosů obou produktů separace pro obě dělicí křivky. Výpočet je proveden v tab. 4 a 5. Z hodnot výnosů lze vyčíslit ztrátu užitkových produktů v důsledku zhoršeného průběhu separace. Za předpokladu ročního objemu vsázky do úpravny 1,5 mil t představuje množství lehčího produktu podle křivky  $T_2$  hodnotu cca 1 100 tis t a podle křivky  $T_2'$  je údaj cca 1 005 tis t. Rozdíl obou hodnot představuje ztrátu kvalitního hnědého uhlí ve výši 95 tis t. Ekonomickou ztrátu lze snadno vyčíslit násobením ztráty jednotkovou prodejní cenou příslušného druhu uhlí a pohybuje se zřejmě v řádu několika desítek milionů korun.

## Závěr

Analýza výsledků rozdružování hrubozrnného hnědého uhlí v těžkosuspenzních rozdružovačích SM potvrdila, že je dělicí proces veden v podmínkách s účinností blízkou účinnosti optimální. Podmínkou vysoké účinnosti separace je vedle správné volby úrovně dělicího řezu také dodržování technických a technologických podmínek, umožňujících standardní průběh dělicího procesu všech frakcí zpracovávané suroviny. Je účelné pravidelně ověřovat účinnost separace frakční analýzou produktů rozdružování. Zhoršení průběhu dělicí křivky proti standardnímu tvaru je důvodem k ověření technického stavu rozdružovacího zařízení a kontrole dodržování technologických zásad rozdružovacího procesu. Tím lze zabránit ztrátám užitkových produktů a jejich nepříznivým ekonomickým důsledkům.