Seria: ENERGETYKA 2. 99

Sylvia PUDEL

VEB IKR Bitterfeld, Werk Rohrleitungsbau Karl-Marx-Stadt Hans Joachim KECKE, Hansjürgen RICHTER Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg

ZUM HYDRAULISCHEN TRANSPORT VON KALI

Zusammenfassung. Die Anwendung des hydraulischen Transportes

in der Kaliindustrie zur Verbindung einzelner Prozeßstufen ist durch die ohnehin anstehende Naßtechnologie sehr vorteilhaft. Die Förderung in gesättigten Lösungen sowie die Ausgangsparameter (Förderguteigenschaften) lassen jedoch auf andere Verhältnisse schließen, als sie durch die bisher bekannten Berechnungsmodelle für den reinen heterogenen Transport beschrieben werden. Ausgehend von den Stoffeigenschaften des Feststoffes und der Transportlösung werden das rheologische Verhalten von Salzlösungen bei verschiedenen Feststoffkonzentrationen untersucht und Schlußfolgerungen hinsichtlich der Bewegungsverhältnisse im Rohr gezogen.

1. Stoffeigenschaften

1.1. Transportlösung

Bekanntlich sind für den hydraulischen Transport vor allem die Dichte und die Zähigkeit von Interesse, da sie sowohl die Gemischeigenschaften, die Bewegungsverhältnisse während des Fördervorganges, als auch das Schubspannungsverhalten beeinflussen.

Im vorliegenden Fall dient als Trägermedium die während des Herstellungsprozesses anfallende Lauge, die eine gesättigte Lösung darstellt. Im Unterschied zum reinen Wasser kommt bei der Betrachtung der Stoffeigenschaften ein zusätzlich zu berücksichtigender Aspekt hinzu: die Löslichkeit und deren Abhängigkeit von der Temperatur.

Mit ansteigender Temperatur können durch die Flüssigkeit mehr lösbare Bestandteile bis zum Erreichen der Sättigungsgrenze aufgenommen werden. Die in Bild 1 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen die Art der Beeinflussung der genannten Stoffwerte durch diesen Sachverhalt. Die Kurve für die kinematische Viskosität der gesättigten Lösung (Kurve v_F) weist einen flacheren Verlauf auf, als die für ungesättigte Lösungen (Kurven v_F). Bei der Dichte ist sogar eine gegenläufige Tendenz der Kennlinien g_F (gesättigt) und g_F (ungesättigt) erkennbar. Insgesamt ist einzuschätzen, daß durch Lösung die Temperaturabhängigkeit von v_F und g_F vermindert wird. Die Stoffwerte liegen zwar höher

als die von ungesättigten Lösungen, die Kurvenverläufe sind jedoch flacher. Bei der Dichte kann die Temperaturabhängigkeit sogar nahezu vernachlässigt werden.

1.2. Feststoff

Das Kalisalz als Fördergut weist im Zusannenwirken mit der Trägerflüssigkeit Eigenschaften auf, die annehmen lassen, daß für den hydraulischen Transport günstige Voraussetzungen gegeben sind:

- Das Material ist relativ feinkörnig, wobei das Maximalkorn etwa 1 mm beträgt.
- 2. Mit dem schmalen Kornband (s. Bild 2) kann das Fördergut in grober Näherung als monodispers betrachtet werden.
- 3. Die geringe Feststoffdichte, gemessen mit $g_{\rm M}$ = 1930 kg/m³ (Pyknometermessung), führt zu einem geringen Dichteverhältnis von $g_{\rm M}/p_{\rm P}$ = 1,54.

Es sind Bewegungsverhältnisse im Rohr zu erwarten, die dem quasihomogenen Gemischtransport sehr nahe kommen. Des weiteren deuten die genannten Bedingungen und insbesondere die relativ hohe Zähigkeit der Trägerflüssigkeit (etwa das Zweifache der Zähigkeit von Wasser) auf eine laminare Rohrströmung hin.

Eine charakteristische Größe zur Kennzeichnung der Wechselbeziehung Partikel-Fluid stellt die Sinkgeschwindigkeit dar. In Abhängigkeit von der Kornfraktion wurden für diese, über das gesamte Kornspektrum, Werte errechnet (Einzelkorn, kugelform), die unter 0,05 m/s liegen. Durchgeführte Messungen hierzu ergaben Werte, die noch geringer sind, was auf den Einfluß des Kornformfaktors zurückführbar ist. Aus dem Verhältnis der gemessenen und der errechneten Sinkgeschwindigkeit läßt sich formal der Formfaktor bestimmen, der sich zu einem durchschnittlichen Wert von 0,76 ergab.

In /1/ wird die Reynoldszahl

$$\operatorname{Re}_{K} = \frac{\mathbf{w}_{s} \cdot \mathbf{d}_{k}}{\mathbf{v}_{F}} \cdot \frac{\mathbf{g}_{M} \cdot \mathbf{g}_{F}}{\mathbf{g}_{F}}$$
(1)

als Kriterium zur Einschätzung des Transportverhältens von Fest-Flüssiggemischen angegeben, wonach heterogenes Verhalten für $\text{Re}_{K} < 10$ und quasi-homogenes Verhalten für $\text{Re}_{K} < 0,1$ zu erwarten ist. Für das vorliegende Gemisch wurden erst ab der Korngröße $d_{k} > 900 \,\mu$ m Reynoldszahlen von 10 ermittelt. Laut Bild 2 macht dieser Anteil weniger als 5 % aus.

Das Maximalkorn, das im Zusammenwirken mit der Transportflüssigkeit ein quasi-homogenes Verhalten aufweist, läßt sich nach /1/ mit

$$\operatorname{Re}_{\mathrm{K}} = \frac{1}{1\mathrm{B}} \operatorname{Ar} \frac{\rho_{\mathrm{M}} - \rho_{\mathrm{F}}}{\rho_{\mathrm{F}}} = 0,1$$
⁽²⁾

Zum hydraulischen Transport von Kali

A

und

$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{g} \cdot \mathbf{d}_{\mathbf{k}}^{3}}{v_{\mathbf{F}}^{2}} \cdot \frac{\mathcal{G}_{\mathbf{M}} - \mathcal{G}_{\mathbf{F}}}{\mathcal{G}_{\mathbf{F}}}$$
(3)

ermitteln, woraus sich dk, nach Umformung zu

$${}^{d}{}_{k_{f}} = \begin{bmatrix} 0, 1 \cdot v_{F}^{2} & \frac{18}{6} \end{bmatrix} = 0, 14 \cdot 10^{-3} m$$
(4)

ergibt. Dieser sogenannte Feinkornanteil macht etwa 5...20 % aus (s. Bild 2).

Aus diesen Betrachtungen kann man schließen, daß die Kalisuspension weder ausgesprochen heterogenes noch eindeutig quasi-homogenes Transportverhalten aufweist und demnach dazwischen in einem sogenannten Übergangsbereich (feindisperse Mischung) einzuordnen ist.

2. Rheologisches Verhalten

Zur Einschätzung des Schubspannungsverhaltens der Kalisuspensionen wurden Untersuchungen mit Hilfe des Rotationsviskosimeters durchgeführt, wobei die Feststoffkonzentration im Bereich von $c_R = 0...0,46$ variiert wurde. Diese Untersuchungen sind an zwei verschiedenen Kornbändern vorgenommen worden:

- Gesamtkornband (wie durch Bild 2 charakterisiert)

- Feinkornanteil ($d_k < 160 \mu m$)

In Bild 3a) sind die Ergebnisse dargestellt. Es wird deutlich, daß der aus der Literatur /2/ bekannte Einfluß des Korndurchmessers auf das Schubspannungsverhalten durch die Untersuchungen bestätigt wurde: Mit wachsender Partikelgröße werden die Wandschubspannungen bei konstantem Schergefälle zu kleineren Werten verschoben (bei $c_R =$ konst.).

Ebenso ergeben sich auch Unterschiede hinsichtlich des Überganges vom Newton'schen in nicht-Newton'sches Schubspannungsverhalten. Während bei dem Gesamtkornband dieser Effekt erst bei Raumkonzentrationen von $c_R > 0.3$ zu beobachten ist, erfolgt für den Feinstkornanteil ein Umschlagen bereits bei $c_R = 0.2$. In /2/ wird diese Erscheinung durch die wachsende Partikelanzahl mit kleiner werdendem Korndurchmesser bei konstanter Feststoffkonzentration begründet, woraus eine Zunahme der Wechselwirkungen der Partikel resultiert, die wiederum eine höhere (in /2/ sogenannte) "innere Festigkeit" der Suspension und somit höhere Schubspannungswerte verursacht.

Diese Aspekte werden deutlich durch die Steifigkeit K charakterisiert, dargestellt in Bild 3b). Es ist erkennbar, daß die K-Werte des Gesamtkornbandes erheblich unter den Werten des Feinkornanteiles liegen. Fließgrenzen konnten für die Suspensionen nicht festgestellt

101

S. Pudel, H.J. Kecke, H. Richter

werden. Somit kann also der Schubspannungsansatz

$$T = \mathbf{K} \left(\frac{\mathrm{d}\mathbf{w}}{\mathrm{d}\mathbf{r}}\right)^{\mathbf{n}}$$
(5)

nach OSTWALD - DE WEALE herangezogen werden.

In Kenntnis dieser Verhältnisse lassen sich Schlußfolgerungen hinsichtlich des Auftretens laminarer Strömungsverhältnisse ziehen. Bekanntlich, läßt sich für das Umschlagen der laminaren Strömung in die turbulente die sogenannte kritische Reynoldszahl angeben. Für Rohre gilt

 $\operatorname{Re}_{\operatorname{kreit}} = 2300$ (6)

Mit dem entscheidenden Einfluß der Trägheits- und Zähigkeitskräfte auf den Strömungszustand muß dabei von den spezifischen Fließgesetzmäßigkeiten ausgegangen werden.

Mit der universellen Definition

$$Re = 16 \frac{\sqrt{2}}{\tau_w}^2$$
 (7)

die für alle Flüssigkeiten gilt, erhält man für OSTWALD - DE WEALE -Flüssigkeiten

$$Re = \frac{8 \cdot {w_n}^2 - n d_R n \cdot 9}{K \cdot (8 \cdot \frac{1 + 3n}{4n})^n}, \qquad (8)$$

wenn man entsprechend den geltenden Gesetzmäßigkeiten für die Wandschubspannung _____n

$$\tilde{\tau}_{w} = K \left(8 \frac{m}{d_{R}} + \frac{1+3n}{4n} \right)$$
(9)

einsetzt.

Mit Hilfe der Gleichungen (6) und (8) ist somit der Umschlagpunkt laminare-turbulente Rohrströmung bestimmbar. In Bild 4 wurden in Abhängigkeit vom Rohrinnendurchmesser für die Kalisuspensionen die maximalen Gemischgeschwindigkeiten dargestellt, bis zu welcher laminares Verhalten zu erwarten ist. Hier wird nochmals der Einfluß der Korngröße deutlich. Das Bild veranschaulicht, daß sich laminare Verhältnisse für die Größenordnung technischer Förderanlagen (Nennweite > 150 mm; Gemischgeschwindigkeiten >1 m/s) erst bei sehr hohen Konzentrationen (c_R = 0,46) einstellen.

102



Bild 1: Dichte und kinematische Viskosität der Trägerflüssigkeit



Bild 2: Siebdurchgangskennlinie des Kalissises





Bild 4: Maximale Gemischgeschwindigkeit im Rohr, bis zu welcher laminare Strömungsverhältnisse zu erwarten sind - in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser (gültig für OST#ALD-DE WEALE-Flüssigkeiten)

Formelverzeichnis

Symbol	Einheit	
Ar	Ģ	Archimediszabl
c _R	-	Raumkonzentration
D	%	Siebdurchgang
Dr	s ⁻¹	Schergefälle
ďk	m	Korndurchmesser
dkf	-	oberer Korndurchmesser des feindis- persen Anteiles
^d _R	m	Rohrinnendurchmesser
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
К	-	Steifigkeit
n	-	Strukturziffer
Re	-	Reynoldszahl
wa	m/s	mittlere Gemischgeschwindigkeit
*s	⊠⁄s	Sinkgeschwindigkeit
V	m²/s	kinematische Zähigkeit
8	kg/m ³	Dichte
v	°C	Temperatur
T	Pa	Schubspannung

Indizes

K	Korn
М	Material
F	Fluid
W	Wand

Literatur:

- /1/ Kecke H. J.; Richter H. Fließverhalten von fest-flüssig-Systemen und dessen Beschreibung Hydromechanisation 4, Karl-Marx-Stadt, 1985
- /2/ Windbab, E.

Untersuchungen zum rheologischen Verhalten konzentrierter Suspensionen

VDI-Fortschrittsberichte, Reihe Verfahrenstechnik, Nr. 118, VDI-Verlag Düsseldorf, 1986

Recenzent: Prof. dr heb. inż. Maciej ZARZYCKI

Wpłynęło do Redakcji 1987.04.7

TRANSPORT HYDRAULICZNY SOLI POTASOWYCH

Stresczenie

Zastosowanie transportu hydraulicznego w przemyśle potasowym w celu łączenia poszczególnych faz produkcyjnych przy metodach mokrych, znalazło wiele zalet. Transportowanie w postaci roztworów nasyconych, jak i parametry wyjściowe (właściwości nosiwa) można jednak odnieść do innych procesów, które można opisać za pomocę dotychczas znanych modeli obliczeniowych dla czystego heterogenicznego transportu. W oparciu o właściwości materiałowe ciała stałego oraz cieczy transportującej badane są reologiczne własności roztworów soli przy różnym stężeniu ciała stałego i na podstawie tego wyciągane są wnioski końcowe co do procesu przepływu w rurze.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ КАЛИЕВЫХ СОЛЕЙ

Резюме

Применение гидротранспорта в калиевой промытленности для соединения отдельных производственных фаз при применении мокрых методов имеет много достоинств. Транспортировка в виде насыщенных растворов, как и исходные параметры (свойства гидроносителя), можно отнестя к другим процессам, которые можно описать с помощью известных расчетных моделей, применяемых при гетерогеническом транспорте. Основываясь на свойствах твердого теда и транспортной жидкости, исследуются реалогические свойства растворов соли при разной концентрации твердого теда и на этой основе делаются выводы о прохождении процесса течения в трубе.

.