

УДК 621.926.5

А. Н. Иванов, д-р техн. наук, проф.

Харьковский государственный университет строительства и архитектуры, г. Харьков

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ВЯЗКИХ РАСТВОРОВ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ К ТРУБНЫМ МЕЛЬНИЦАМ

*Разработаны энергосберегающая схема установки для транспортирования вязких растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) к трубным цементным мельницам и пневмофорсунка для подачи ПАВ на заданные участки трубной мельницы. Предложена методика и определены значения транспортных характеристик вязких неньютоновских жидкостей.*

*Розроблені енергозберігаюча схема установки для транспортування в'язких розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР) до трубних цементних млинів і пневмофорсунка для подачі ПАР на задані ділянки трубного млина. Запропонована методика й визначені значення транспортних характеристик вязких неньютонівських рідин.*

### Введение

В настоящее время применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) при измельчении материалов в трубных мельницах общеизвестно и общепризнано, несмотря на то, что эффективность применения ПАВ зависит от многих ещё малоизученных факторов. Исследованиями автора доказано, что до недавнего времени широко распространенный способ ввода ПАВ на тарельчатый питатель малоэффективен: пока добавка равномерно распределится по поверхности всего материала, он успеваеет пройти камеру тонкого измельчения. При таком способе ввода ПАВ их функция сводится, в основном, к устранению налипания измельчаемого материала. Однако, эффективность применения ПАВ гораздо шире (снижение прочности частиц, регулирование структуры потока и т. д.) и во многом зависит от способа и места ввода их в мельницу. [1, 2] Ранее с этой точки зрения ПАВ не изучали.

### Основная часть

При вводе ПАВ в первую камеру в тонкораспыленном состоянии их действие значительно эффективнее, так как с самого начала процесса измельчения они соприкасаются со вновь обнаженными поверхностями размалываемого материала, адсорбируются на их поверхностях и действуют еще и как понизители твердости. Кроме того, ввиду небольших количеств ПАВ и зависимости прочности частиц клинкера от их крупности ПАВ надо подавать на те участки первой камеры мельницы, где, согласно диаграмме помола, находится наибольшее количество трудноразмалываемой фракции измельчаемого материала (0,5–1 мм) [1, 2].

Оптимальные условия ввода ПАВ в мельницу в распыленном виде создаются в том случае, если они растворены в воде. Водный раствор ПАВ легко распыливается с помощью специальных устройств и, кроме того, минералы многих материалов обладают высокой гидрофильностью (например цементного клинкера) и сильно адсорбируют на вновь образованных поверхностях воду.

Для ввода ПАВ внутрь мельницы имеется несколько типовых установок, разработанных различными проектными и научно-исследовательскими организациями.

На рис. 1 представлена распространённая на цемзаводах схема, включающая подогрев паром и разбавление ПАВ водой. Она состоит из расходных бачков воды 1 и ПАВ 2, наполнение бачков регулируется сигнализаторами уровня 9 и 10. Сигнализатор уровня ПАВ сблокирован с насосом-дозатором 8., привод которого соединен с тарельчатым питателем мельницы. Вода подается самотеком через электромагнитный клапан 3, расход ее контролируется счетчиком 4. В мельницу 5 водный раствор подается форсункой в

распыленном виде. Для предотвращения загустевания предусмотрен подогрев ПАВ в расходном баке (до  $60^{\circ}\text{C}$ ) и обогрев трубопроводов (паровая рубашка).

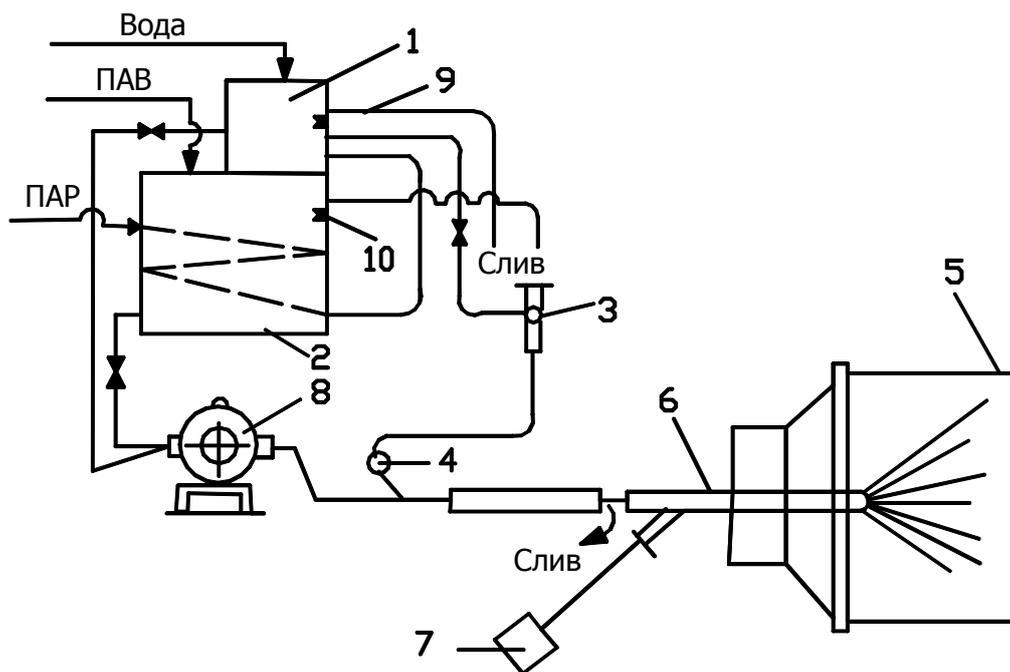


Рис.1. Старая схема установки для подачи и распыла воды и ПАВ

Воздух в форсунку поступает от вентилятора 7. Конфигурация форсунки обуславливает создание факела с углом раскрытия  $18^{\circ}$ . Для предотвращения попадания ПАВ на межкамерную перегородку форсунка наклонена вниз под углом  $15^{\circ}$ . Форсунка работает при скорости в горловине  $80\text{ м/с}$  и плотности орошения  $0,8\text{ л/м}^3$ .

В качестве ПАВ широкое распространение получили отходы целлюлозно-бумажной промышленности – лигносульфонаты технические модифицированные (ЛСТМ), имеющие высокую вязкость [3]. На цементные заводы ЛСТМ поступает в виде 50 % водного раствора в железнодорожных цистернах. После их разгрузки ЛСТМ хранится в специально оборудованных ямах, откуда насосом периодически подается в бак возле мельницы цеха «Помол», где водой растворяется до 10–15 % концентрации и затем из него насосом-дозатором подается в пневмофорсунку для распыла ЛСТМ в мельницу.

Такая схема подачи вязких ПАВ к мельницам имеет ряд недостатков:

1. Так как вязкость 50 % водного раствора ЛСТМ большая ( $230\text{ сП}$  при  $20^{\circ}\text{C}$  и  $1000\text{ сП}$  при  $0^{\circ}\text{C}$ ), то перекачка его насосом от места разгрузки до цеха «Помол» даже в летнее время требует значительного расхода электроэнергии на обогрев довольно длинной трассы.

2. Зимой вязкость резко возрастает и для транспортировки ЛСТМ необходимо обогревать транспортирующую трубу до  $60^{\circ}\text{C}$ , с целью снижения вязкости ЛСТМ и возможности его транспортировки к цеху.

3. Наличие дорогостоящих насосов-дозаторов (обычно это плунжерные насосы высокого давления, они ненадежны в работе и быстро забиваются)

4. Ввод ЛСТМ в мельницу осуществляется по трубе, соосной с корпусом мельницы. Из-за этого капли ЛСТМ ударяются в начале мельницы в контур мелющей загрузки, а не подаются, как доказано автором, на требуемые участки по длине мельницы.

С целью устранения указанных недостатков автор предлагает следующее:

1. Разбавлять ЛСТМ с 50 % до 10–15 % водной концентрации не в цехе «Помол», а сразу возле места разгрузки цистерн. Для этого использовать струйный эжектор (рис. 2). В качестве рабочего агента по трубе 1 подают воду. В этом случае одновременно решаются две задачи: разбавление ЛСТМ до нужной концентрации и транспортировка его из ямы. С

целью стабилизации работы эжектора 2 на трубе 1, подающей воду, устанавливается редуктор, а сам эжектор размещают на поплавке 3, чтобы избежать влияния уменьшающегося уровня ЛСТМ на стабильность работы эжектора. Под действием разряжения по всасывающему патрубку 4 водный 50 % раствор ЛСТМ из емкости 5 засасывается в эжектор и подается в магистраль транспортировки уже разбавленного до 12,5 % водного раствора ЛСТМ. Контроль концентрации ЛСТМ ведут по плотности эмульсии.

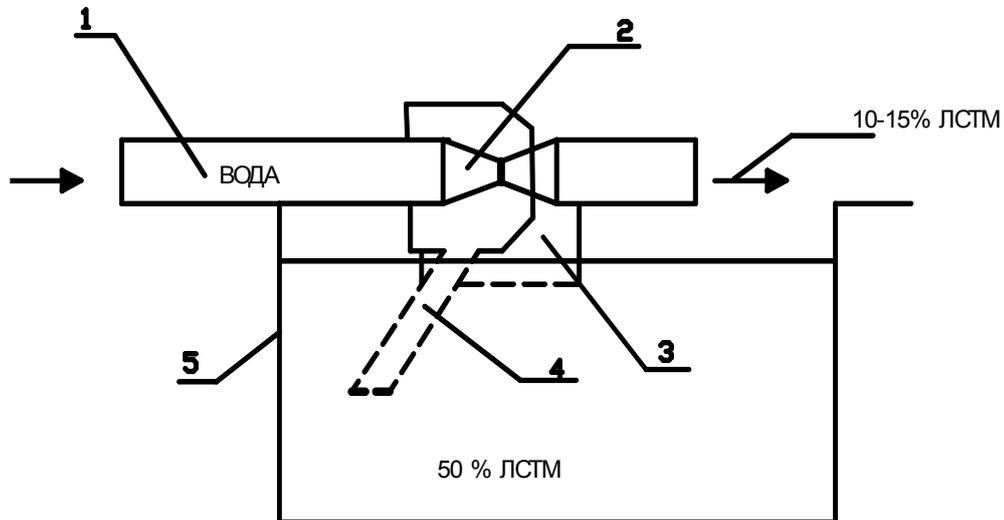


Рис. 2. Схема установки эжектора

Благодаря этому снизятся расходы на транспортировку ЛСТМ, так как согласно проведенным автором исследованиям вязкость и коэффициент гидравлического сопротивления 50 % раствора в 100 раз превышают эти показатели для 10–15 % раствора, подаваемого в мельницу.

2. Вместо насосов – дозаторов использовать напорные баки с подачей самотеком ПАВ к пневмофорсунке. Так как расход ЛСТМ небольшой (2,5 л/мин. для мельниц 3,2x15 м и 4 л/мин. для мельниц 4x13,5 м), то напорные баки над мельницами можно наполнять периодически. С целью исключения влияния уменьшающегося уровня раствора на его расход можно использовать трубку Мариотта.

3. Трубу, подающую ПАВ к пневмофорсунке, располагать не коаксиально с корпусом мельницы, а сместить в сторону так, чтобы распыл капель ПАВ осуществлялся в свободное от контура мелющей загрузки пространство.

На основе вышеприведенного, учитывая малые расходы ПАВ, автор предлагает без использования насос–дозаторов следующую схему при периодической работе насоса (рис. 3). Над каждой мельницей устанавливают свой расходный бак с ПАВ и пневмофорсунку продувают сжатым воздухом до и после подачи ПАВ, с целью ликвидации «зарастания» ее измельчаемым материалом (особенно в цементных мельницах). Схема работает следующим образом. Из емкости 1 эмульсия 10–15 % ЛСТМ центробежным насосом 2 подается в герметичные расходные баки с трубкой Мариотта 3 и через нижние краны 4 самотеком поступает в пневмофорсунки для распыла на требуемые участки внутри мельницы. Для контроля верхнего и нижнего уровней эмульсии в баках установлены сигнализаторы уровня СУ, исключающего влияние опускающегося уровня периодически наполняемой емкости 1 на стабильную работу центробежного насоса 2. В расходных баках над мельницами это условие обеспечивает трубка Мариотта 3 [4] и поэтому расход эмульсии самотеком из бака зависит от величины зазора между торцом трубки 3 и дном бака, которая постоянна. В этой связи сигнализаторы нижнего уровня СУЗ должны быть расположены выше этого зазора. При остановке какой-либо из мельниц, перекрывается соответствующий верхний кран 4. С целью предохранения от загрязнений на всасывающей трубе центробежного

насоса 2 установлен фильтр 5.

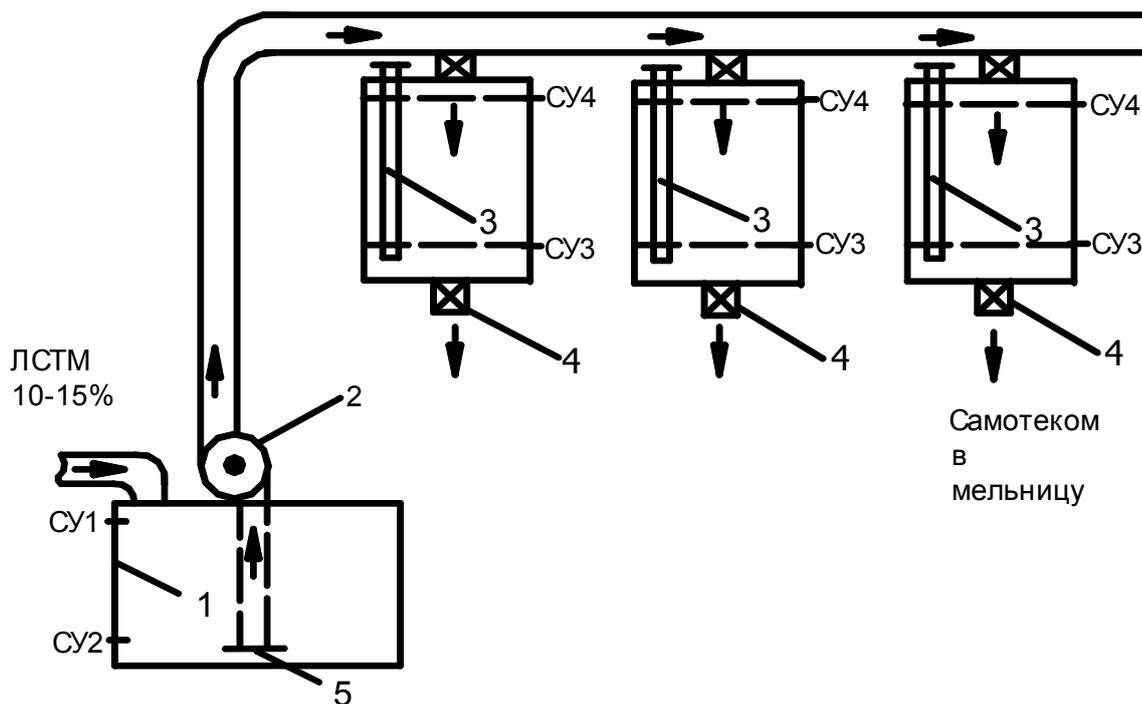


Рис. 3. Новая схема подачи ПАВ при периодической работе насоса

В зависимости от крупности поступающего в мельницу материала возникает необходимость регулировки подачи ПАВ на разные участки по длине корпуса мельницы. На рис. 4 представлено устройство (продольный разрез) для регулирования дальности и дисперсности распыла интенсификаторов помола в трубные мельницы,

Устройство содержит корпус 1, внутри которого расположены форсунка 2 для подачи ПАВ и канал 3 для подачи распылителя (сжатого воздуха), раздваивающийся на конце на наклонный 4 и коленообразный 5 участки. Наклонный участок 4 выполнен с регулирующими углами наклона к оси канала, равным  $15-35^{\circ}$ , и соединён посредством эластичной муфты 6 с соплом 7, шарнирно-соединённым с торцом форсунки 2 и подвешенным к последней пружиной 8. Сопло 7 связано тягой 9, например гибким шнуром, с системой регулирования угла наклона сопла, например, состоящей из втулки 10, кольца 11, регулировочного колеса 12. Коленообразный участок 5 снабжен поршнем 13, на котором установлена рамка 14 с заслонкой 15. Устройство для регулирования дисперсности и дальности распыла интенсификатора (ИП) устанавливают в свободном от измельчаемого материала пространстве загрузочного шнека, т.е. с учетом направления вращения мельницы.

Устройство для регулирования дальности и дисперсности распыла интенсификаторов помола в трубные мельницы работает следующим образом.

Воздух под давлением 1,8–2,8 атм по каналу 3 подается в корпус 1 и далее по наклонному участку 4 поступает в сопло 7, на выходе из которого подхватывает вытекающую из форсунки 2 струю ИП, распыляя его в виде капель на участок внутренней поверхности трубной мельницы, где преобладают трудно размалываемые фракции. Регулирование дальности распыла достигается изменением угла наклона сопла 7 в результате перемещения тяги 9 в направляющих втулки 10 и кольца II путем вращения регулировочного колеса 12, выведенного из мельницы. Возможность перемещения обеспечивается эластичной муфтой 6 и пружиной 8.

Помимо регулировки дальности распыла изменением угла при подборе соответствующего давления воздуха возможно управлять процессом формирования размеров капель ИП. При прекращении подачи ИП и сжатого воздуха давление в коленообразном

участке 5 падает, заслонка 15 поршнем 13 по рамке 14 опускается и закрывает форсунку 2 и сопло 7 от запыленной среды.

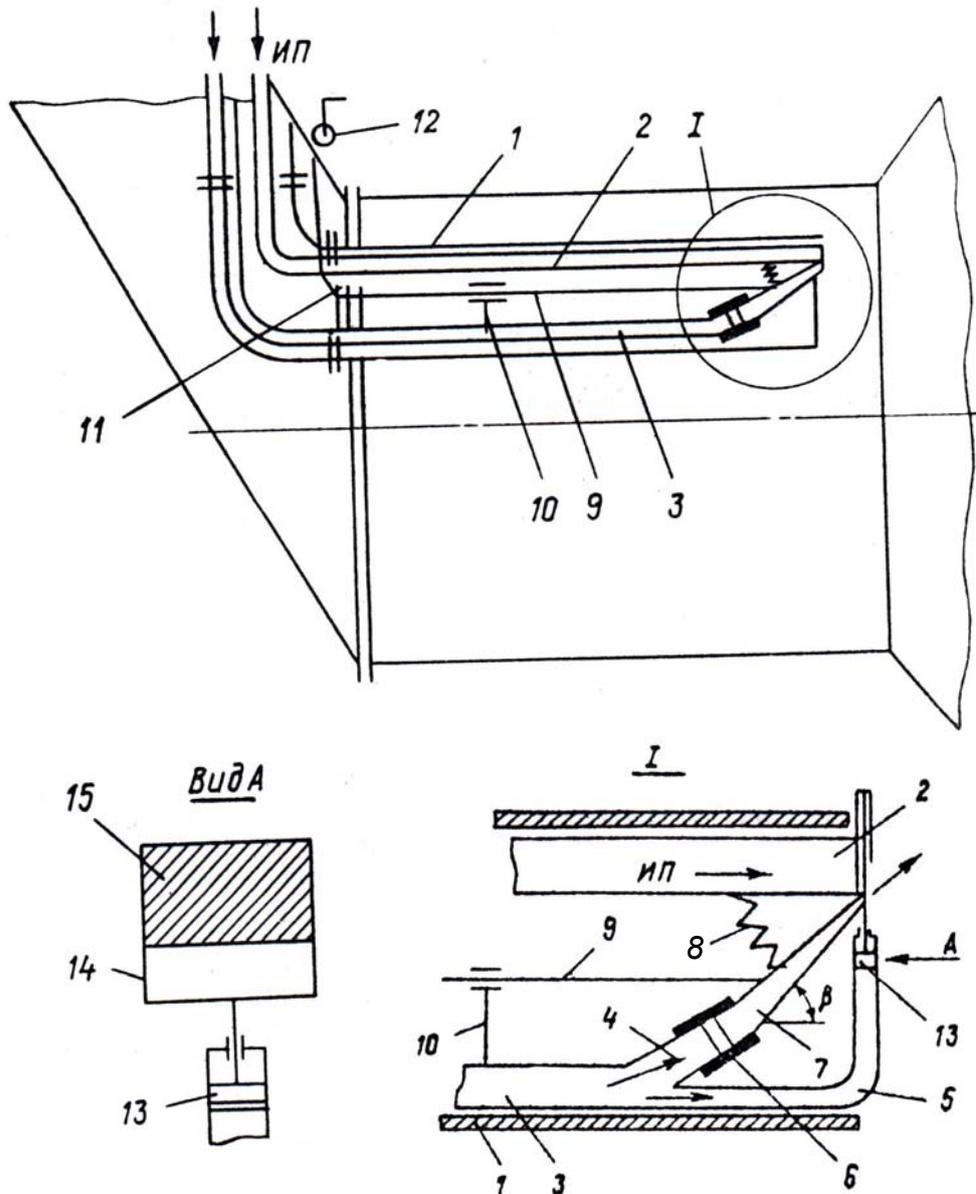


Рис. 4. Схема распылительного устройства

Как известно, для расчета трубопровода надо знать расход жидкости  $V$ , диаметр трубопровода  $d$  и напор  $H$ . Расчет этих величин требует подстановки значений коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$ , зависящего от критерия  $Re$ , который в свою очередь зависит от заранее неизвестной скорости потока  $W$ . Поэтому расчет носит поисковый вариант: задаваясь ожидаемым режимом течения жидкости (ламинарный, турбулентный) выбирают соответствующую формулу  $\lambda = f(Re)$  и после ее подстановки в расчетное уравнение ( $V$ ,  $d$ ,  $H$ ) находят одну из искомых величин при неизвестных двух остальных. Затем принятый режим проверяют (по области значений  $Re$ ) и в случае его несоответствия, полученный расчет проверяется.

Для неньютоновских жидкостей, какими являются вязкие ПАВ, вопрос еще осложняется необходимостью определения коэффициента  $A$ , характеризующего степень отклонения неньютоновской жидкости от ньютоновской, и под вязкостью понимают кажущуюся вязкость.

С целью устранения этого недостатка, автор разработал методику для расчета транспортировки вязких ПАВ, применяемых в качестве интенсификаторов помола.

Так как расходы интенсификатора помола из технологических ограничений невелики, то движение его в трубах будет ламинарным. Известно, что в этом случае расход  $V$  неньютоновской жидкости равен [4]:

$$V = \frac{\pi a}{3a+1} \left( \frac{P_1 - P_2}{2\mu \cdot l} \right)^{\frac{1}{a}} R^{\frac{3a+1}{a}}, \quad (1)$$

где  $P_1 - P_2$  – перепад давления жидкости при движении в горизонтальной трубе длиной  $l$  и радиусом  $R$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость жидкости.

Итак, зная величину  $a$ , можно определить среднюю скорость жидкости  $W$ , число  $Re$  и коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$ , т. е. практически все необходимые данные для расчета трубопровода транспортировки – его диаметра и требуемого напора (нужного для выбора насоса).

Для определения  $a$  необходимо знать все остальные величины, входящие в это уравнение. С этой целью был разработан и создан специальный стенд и методика исследований.

Для исследования вязкости ЛСТМ и её основных показателей как неньютоновской жидкости был создан специальный стенд. Стенд состоит из герметичной емкости с трубкой Мариотта, позволяющей поддерживать любой заданный режим вытекания жидкости при периодическом заполнении емкости исследуемой жидкостью, т.е. при опускании ее уровня в емкости. Внизу емкости имеется выходное отверстие, к которому подключается имитируемый участок трубопровода, радиусом  $R$ . На нем на расстоянии  $1m$  имеются отводные штуцера, к которым подводятся пьезометрические трубки или трубки дифференциального манометра с целью измерения перепада давлений  $P_1 - P_2$  (т. е. потерь напора) на участке  $l$ , равном  $1m$ . Объемный расход исследуемой жидкости  $V$  определяется по скорости изменения уровня между метками, нанесенными на стеклянной емкости  $1$ . Величину  $V$ , а следовательно и характер движения жидкости в трубопроводе (т.е. число  $Re$ ), перепад давлений  $P_1 - P_2$  можно изменять за счет уровня трубки Мариотта, а также за счет высоты  $H$  расположения самой емкости.

Для определения показателя  $a$ , характеризующего транспортирующую способность исследуемой жидкости, надо знать также вязкости ее  $\mu$ . Величина  $\mu$  определяется по стандартной методике пропорционально времени опускания жидкости между метками капилляра, а затем аналитически рассчитывается через относительные водные показатели.

Исследована вязкость ЛСТМ –1 и влияние на неё различных факторов. Вязкость при  $20^\circ C$  ЛСТМ 50 % водной концентрации, поступающего на цементные заводы в ж/д цистернах, составляет более 230 сП, а вязкость с 12,5 % водного раствора ЛСТМ, подаваемого в трубные мельницы, равна 2 сП.

Определив из уравнения (1), при полученных из опыта  $V$  и  $P_1 - P_2$ , величину  $a$ , находим среднюю скорость  $W$  потока как [4]

$$W = \frac{a}{3a+1} \left( \frac{P_1 - P_2}{2\mu \cdot l} \right)^{\frac{1}{a}} R^{\frac{3a+1}{a}} \quad (2)$$

и коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  [4]

(3)

$$\lambda = \frac{8\mu}{\left[\frac{a}{2(3a+1)}\right]^a W^{2-a} (2R)^a \rho}$$

где  $\rho$  – плотность жидкости.

При ламинарном течении ньютоновской жидкости в прямой трубе  $\lambda=64/\text{Re}$  [4], поэтому с целью придания аналогичной формы для ламинарного режима неньютоновской жидкости введем модифицированный критерий  $\text{Re}_M$ . Тогда для ламинарного потока  $\lambda=64/\text{Re}_M$ , откуда с учетом (3) находим

(4)

$$\text{Re}_M = \frac{W^{2-a} \cdot \rho \cdot (2R)^a}{\left[\frac{1}{8} \left(2 \cdot \frac{3a+1}{a}\right)^a \cdot \mu_n\right]}$$

Требуемый напор  $H$  для обеспечения заданного расхода определяем из уравнения

$$V = \pi R^2 \sqrt{\frac{2gH}{\lambda \frac{l}{2R} + \sum n \xi}}, \quad (5)$$

откуда

$$H = \frac{V^2}{2\pi^2 R^4} \cdot \left( \lambda \frac{l}{2R} + \sum n \xi \right), \quad (6)$$

где  $V$  и  $\lambda$  подставляем из уравнений (5) и (3), т.е. с учетом коэффициента  $a$ ;

$n$  – число местных сопротивлений трубопровода;

$\xi$  – коэффициент местных сопротивлений.

Итак, все необходимые данные для расчета трубопровода транспортировки ПАВ имеются.

Величину  $\lambda$  можно определить и другими путями, минуя вычисления коэффициента  $a$ . Например, через фактический расход  $V$ , замеряемый экспериментально, или фактическую скорость  $W$

$$W = \frac{V}{F} = \frac{4V}{\pi \cdot d^2}, \quad (7)$$

где  $d$  – диаметр трубопровода

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g}. \quad (8)$$

Так как  $h = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{W^2}{2g}$  [4], то из (8) получаем

$$\lambda = \frac{2g(P_1 - P_2) \cdot d}{\rho \cdot l \cdot W^2}, \quad (9)$$

или через фактический  $Re$

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (10)$$

где

$$Re = \frac{W \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{4 \cdot V \cdot d \cdot \rho}{\pi \cdot d^2 \cdot \mu} = \frac{4 \cdot V \cdot \rho}{\pi \cdot d \cdot \mu}. \quad (11)$$

Определены значения транспортных характеристик вязких неньютоновских жидкостей (коэффициент  $\alpha$  и коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$ ). Во всех случаях коэффициент  $\alpha$  больше 1 и в среднем равен 1,18. Изменение вязкости с 12,5 % до 25 % концентрации ЛСТМ-1 мало изменяет величину  $\lambda$ . Так  $\lambda$  для 12,5% мало отличается от  $\lambda$  для воды. Зато для 50 % водного раствора ЛСТМ-1 значения  $\lambda$  более чем в 200 раз выше по сравнению с 12,5 % водным раствором ЛСТМ-1 ( 8,72 против 4,1  $10^{-2}$ ). Значения  $\lambda$  практически одинаковы для 25 % и 12,5 % ЛСТМ-1. С уменьшением расхода раствора пропорционально увеличивается коэффициент гидравлического сопротивления.

### Выводы

Разработаны энергосберегающая схема установки для транспортирования вязких растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) к трубным цементным мельницам и пневмофорсунка для подачи ПАВ на заданные участки трубной мельницы. Предложена методика и определены значения транспортных характеристик вязких неньютоновских жидкостей. Рекомендуются вязкие концентрированные растворы ПАВ сразу после доставки их к местонахождению цемзавода автомобильным или железнодорожным транспортом разбавлять водой до нужной концентрации и одновременно на принципе эжекции подавать далее к трубным мельницам.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на поиск новых высокоэффективных дешёвых ПАВ малой вязкости и желательно из отходов различных производств.

### Список литературы

1. Иванов А. Н. Энергосберегающая технология и техника помола цемента Сборник докладов на Международном конгрессе, посвящённом 150-летию академика В. Г. Шухова. - Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова. 16-18.09.2003.- С.310-312.
2. Иванов А.Н., Чудный А.Ю. Использование отходов производств в качестве интенсификаторов помола I Международная н/т конференция. «Экология: образование, наука, промышленность и здоровье». – Белгород: – БГТУ, 14-16.04.2004.- Вестник БГТУ. 2004.– № 8, Часть VI. – С.153–159.
3. Иванов А.Н. Шляхи інтенсифікації процесу подрібнення. // Вісник НТУ «ХП». Хімія, хімічна технологія та екологія.- Харків: НТУ «ХП». 2006.- Вип. 44. – С.151-157.
4. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1981. – Книга первая. - 384 с.

## ENERGESAIVING IN TRANSIT VISCOUS SOLUTIONS SURFACE - ACTIVE SUBSTANCES TO THE TUBE MILLS

A. N. IVANOV, Dr. Scie. Tech., Pf.

*Developed the power saving up scheme for the transportation of an viscous solutions of surface-active substances to the tube cement mills, pnevmoinjector for feeding of surface-active substances on the specified sections of tube mill. The method is proposed and the values of the transport characteristics of viscous non-newtonian fluids are defined.*

*Поступила в редакцию 24.01 2011 г.*