

ГИДРАВЛИКА

Я. А. АЛМАСЯН, А. М. ГАСПАРЯН, Р. Е. АКОПЯН

К РАСЧЕТУ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
АЭРОСМЕСЕЙ

В работе [1] нами показано, что аэросмесь по трубопроводу может перемещаться в плотном слое с концентрацией, равной концентрации этих частиц в окружающем воздухе. Получены выражения для определения скорости, удельного веса и концентрации аэросмеси по ходу транспорта. Рассмотрен вопрос критических скоростей движения аэросмеси по горизонтали. При этом расчет горизонтального перемещения сводится к раскрытию функции

$$\frac{dP_1}{dl} = f(D, V, \gamma), \quad (1)$$

где P_1 — потери давления на трение по ходу транспорта; l — длина горизонтального участка; D — диаметр трубопровода; V — скорость аэросмеси; γ — удельный вес аэросмеси.

Без знания вида функции (1) не представляется возможным применение уравнения Бернулли к аэросмеси. Известная формула Дарси — Вейсбаха в данном случае неприменима ввиду неизвестности вязкости аэросмеси.

В продолжении работы [1] в настоящей статье приводятся результаты проведенных нами экспериментальных исследований, цель которых — раскрытие функции (1) и получение расчетного уравнения для горизонтального перемещения аэросмесей.

1. Краткое описание опытов. Для экспериментального определения зависимости (1) нами проведен ряд экспериментов на различных лабораторных и полупромышленных установках. Схема одной из этих установок приведена на рис. 1.

На этой и на других, не приведенных здесь, установках были проведены опыты по пневмотранспорту глинозема и цемента по трубам диаметрами 10, 15, 17,6, 26,5, 35, 40 и 53 мм. Длина транспортного трубопровода составляла от 5,4 до 41,6 м, удельная производительность трубопровода менялась в пределах от 2000 до 10000 кг/секм², начальное избыточное давление колебалось от 600 до 3100 мм ртутного столба, скорость аэросмесей составляла от 1 до 25 м/сек, удельный вес аэросмеси менялся от 960 до 170 кг/м³.

Опыты проводились следующим образом. Из манжуса Б (полной емкостью 300 литров) материал транспортировался по трубопро-

воду с диаметром $D = 10$ мм в аналогичную емкость A , установленную на песках. При установившемся режиме транспорта замерялись: давление (ртутным манометром) на указанных на схеме 17 точках трубопровода и на двух монжусах. Одновременно через газовые часы измерялся объем отработанного воздуха после фильтров (на схеме не показаны) и приращение веса монжуса A . Таким образом, опытом определялись: ход изменения давления по трубопроводу, количество транспортированного материала, расход воздуха. В течение каждого опыта соблюдалось постоянство давления в монжусе $B - P_n$, следовательно, и постоянство производительности q . По завершении каждого опыта пневмотранспортом материал из монжуса A передавался в монжус B по короткому, отдельному трубопроводу. Для каждого значения P_n (или q) выполнялось 4–6 опытов.

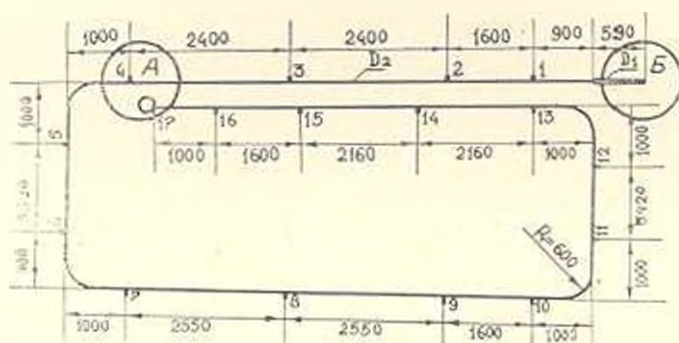


Рис. 1.

На установке испытывался пневмотранспорт гликозема для 6 значений P_n (от 2880 до 3770 мм рт.) или 6 значений q (от 2320 до 3350 кг/м³·сек). При этом скорости аэросмеси от точки 1 до точки 17 (см. рис. 1) менялись в диапазоне от 2,74 до 17,3 м/сек, а удельный вес аэросмеси — от 780 до 200 кг/м³.

На той же установке испытывался пневмотранспорт цемента для пяти значений P_n (от 2880 до 3680 мм), соответствующих значениям q от 1800 до 3100 кг/м³·сек.

На основании опытов определялись: общие потери давления ΔP на данном участке трубопровода, потери на единицу длины пути, начальная скорость аэросмеси V_1 , расход воздуха на транспорт одного килограмма материала λ и начальная концентрация аэросмеси φ_1 (или удельный вес γ_1). По формулам работы [1] и 17 точках трубопровода определены скорости V и удельные веса γ .

2. Разложение ΔP на ΔP_s и ΔP_v . Общее падение давления на данном участке, пересчитанное на единицу длины,

$$\Delta P = \frac{P_2 - P_1}{\Delta l} = \Delta P_s + \Delta P_v \quad (2)$$

состоит из двух слагаемых: безвозвратных потерь на трение — ΔP_1 и перехода части давления в кинетическую энергию — ΔP_2 .

Возникает вопрос — каким образом ΔP разложить на свои слагаемые и определить величину ΔP_1 .

Очевидно, что ΔP_2 возникает благодаря существованию ΔP_1 , которое является непрерывной функцией потока. dP_1 и dP_2 возникают одновременно и взаимосвязаны. Однако, при известности их суммы, раздельное их определение нам неизвестно.

К разложению ΔP на ΔP_1 и ΔP_2 мы подошли следующим приближенным путем. Очевидно, что при падении давления аэросмесь, расширяясь от давления P_0 до давления P_1 на данном участке произведет определенную работу, затрачиваемую на трение и на приращение кинетической энергии. Работа, совершаемая 1 кг аэросмеси на единицу пути Δl , определяется выражением:

$$\Delta L \Delta l = \left| 2,3 P_0 n 10^{-3} \lg \frac{P_0}{P_1} - \frac{1}{2} (P_0 - P_1) \right| \text{ кг/м кг.} \quad (3)$$

Расширение воздуха принимается изотермическим (теплоемкость твердой фазы очень велика по сравнению с таковой для газа), что выражается первым членом правой части (3). Второй член уравнения представляет собой работу, совершаемую 1 кг твердой фазы, имеющей объем 1 г. Приращение кинетической энергии на единицу пути данного участка будет:

$$\Delta L_k = \frac{V_0^2 - V_1^2}{2g \Delta l} \text{ кг/м кг,} \quad (4)$$

где V_0 и V_1 — скорости в начале и в конце данного участка.

Работа на трение на единицу пути определяется выражением:

$$\Delta L_1 = \Delta L - \Delta L_k. \quad (5)$$

Значения ΔL и ΔL_k определяются по (3) и (4) на основании данных опыта.

Имея значения всех трех членов (5), принимаем допущение о пропорциональности соответствующих членов уравнений (2) и (5), т. е.

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{\Delta P_1}{\Delta L_1} = \frac{\Delta P_2}{\Delta L_k} = K. \quad (6)$$

Определив K по известным значениям ΔP и ΔL , находим значения ΔP_1 и ΔP_2 . Очевидно, что для различных участков трубопровода K имеет различные значения. С уменьшением абсолютного давления уменьшается K , однако, при небольшой длине участка его величина практически постоянна.

В уравнении (6), конечно, имеется погрешность, однако, как показали проверочные расчеты, эта погрешность, вызванная допущением равенства $\frac{\Delta P_1}{\Delta L_1}$ и $\frac{\Delta P_2}{\Delta L_2}$, незначительна и практически неощутима.

Пример определения ΔP_1 и ΔP_2 приводится в табл. 1.

Таблица 1

Участки трубопровода по рис. 1	P_1	P_2	ΔP	ΔL	ΔL_1	ΔL_2	K	ΔP_1	ΔP_2
1—2	3390	3259	81,9	1,45	0,037	1,413	56,5	79,8	2,1
3—4	3079	2905	72,5	1,47	0,044	1,426	49,3	70,2	2,3
8—9	2164	2014	58,8	1,54	0,098	1,442	38,2	55,0	3,8
11—12	1625	1430	57,0	1,92	0,234	1,686	29,7	50,0	7,9
14—16	925	732	51,4	3,03	1,26	1,770	17,0	30,0	21,4

В графах 2 и 3 приведены измеренные значения абсолютных давлений в начале и в конце данного участка в мм рт. столба. В графе 4 показаны перепады давления на единицу пути $\Delta P = (P_1 - P_2) \Delta L$, ΔL — длина участка в м. В графе 5 приведены значения работы расширения 1 кг аэросмеси на 1 м пути данного участка, рассчитанные по (3). В графе 6 показано приращение кинетической энергии 1 кг аэросмеси на 1 м пути данного участка. ΔL_1 рассчитана по (4), где V_1 и V_2 подсчитаны по [1]. Затраты работы на трение (гр. 7) определены как разность между ΔL и ΔL_1 . В графе 8 приведено отношение $\Delta P_1 \Delta L_1$.

Приведенные в табл. 1 данные относятся к транспорту глинозема по трубопроводу с диаметром 10 мм при удельной производительности 3350 кг/м²·сек, давлении P_1 3780 мм рт. столба (абсолютное), значении объемного расхода воздуха $\mu = 0,89$ литр/кг. Начальная скорость аэросмеси составляла 3,94 м/сек, а конечная — 17,3 м/сек.

Как видно из таблицы, по ходу транспорта уменьшается общий удельный перепад давления ΔP , а расход давления при приращении кинетической энергии (гр. 10) закономерно и быстро растет. Работа на преодоление сопротивления движению (ΔL_1) также растет, но так медленно, что приводит к довольно быстрому уменьшению потерь давления ΔP_1 . Это очень важное обстоятельство, говорящее о большом влиянии концентрации твердой фазы на ΔP .

3. **Определение потерь давления на трение.** По данным опытов, приведенных над глиноземом при 6 значениях производительности q , для всех 12 прямолинейных горизонтальных участков трубопровода определены средние величины V_1 , τ_s и ΔP .

Допуская, что при постоянном D функция (1) может быть представлена в виде

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta L} = \Delta P_1 = KV^{x+y}, \quad (7)$$

то при $D = 10$ мм способом наименьших квадратов найдены: $K = 0,09772$; $x = 0,5$; $y = 1,28$.

Считая, что x и y не зависят от диаметра трубопровода, влияющие D на коэффициент K представляем в виде зависимости

$$K = K' D^z. \quad (8)$$

Для определения значений показателя z данные опытов, полученные при диаметрах $D = 15,5; 26,5; 35; 40; 53$ мм, также обработаны методами наименьших квадратов и по (7) определены значения коэффициента K для каждого горизонтального участка в отдельности. Отклонение значений K от среднего не превышало $\pm 10\%$. Найденные значения K нанесены на рис. 2 и проведена усредняющая прямая, уравнение которой

$$\lg K = \lg K' - z \lg D \text{ или } K = 0,003846 D^{-0,71}. \quad (9)$$

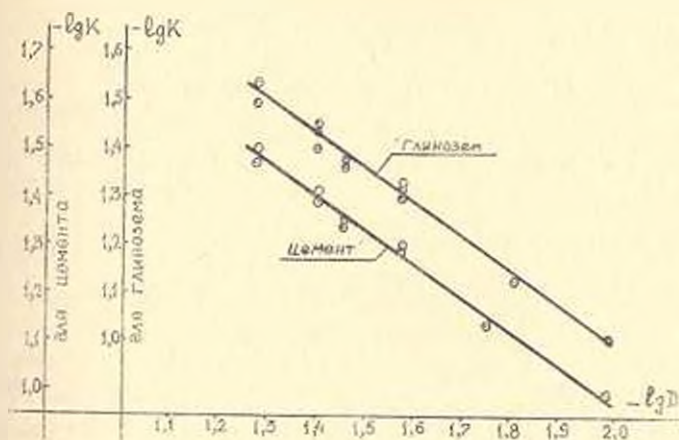


Рис. 2.

Из уравнений (7) и (9) получается:

$$\Delta P_1 = 0,003846 D^{-0,71} V^{0,5} \gamma_1^{1,25} [\text{кг/м}^3]. \quad (10)$$

Аналогичным путем для пневмотранспорта цемента была установлена применимость (10), если в нем коэффициент 0,003846 заменить цифрой 0,004074.

4. Расчетное уравнение для горизонтального пневмотранспорта. С учетом (10) уравнение Бернулли можно записать в виде

$$-dP = 0,003846 D^{-0,71} V^{0,5} \gamma_1^{1,25} dl = \frac{V dV}{g} \gamma_c. \quad (11)$$

Выражая V и γ_c через известные начальные значения скорости V_1 и удельного веса γ_1 [1], выражение (11) примет вид

$$\left| \bar{\tau}_1 + (1 - \bar{\tau}_1) \frac{P_1}{P} \right|^{0,78} dP - \frac{V_1^2 \bar{\tau}_1 P_1 (1 - \bar{\tau}_1)}{g} \left| \bar{\tau}_1 + (1 - \bar{\tau}_1) \frac{P_1}{P} \right|^{0,78} \frac{dP}{P^2} +$$

$$+ 0,003846 D^{-4,71} V_1^{0,71} \frac{1}{\bar{\tau}_1^{0,71}} dl = 0. \quad (12)$$

Интегрирование (12) приводит к весьма громоздким результатам. Если показатель первого члена (12) округлить до 0,8, то интегрирование (12) приводит к выражению (13).

$$KV_1^{0,71} \frac{1}{\bar{\tau}_1^{0,71}} l - (1 - \bar{\tau}_1) P_1 \left(\frac{t_n^0}{t_n^0 - \bar{\tau}_1} - \frac{t_v^0}{t_v^0 - \bar{\tau}_1} \right) +$$

$$+ \frac{(1 - \bar{\tau}_1) P_1}{\bar{\tau}_1^{0,2}} \left(1,84 \lg \frac{t_n - \bar{\tau}_1^{0,2}}{t_n - \bar{\tau}_1^{0,2}} + \right.$$

$$+ 0,5686 \lg \frac{t_n^0 - 0,618 \bar{\tau}_1^{0,2} t_n + \bar{\tau}_1^{0,2}}{t_n^0 - 0,618 \bar{\tau}_1^{0,2} t_n + \bar{\tau}_1^{0,2}} - 1,489 \lg \frac{t_v^0 - 1,618 \bar{\tau}_1^{0,2} t_n + \bar{\tau}_1^{0,2}}{t_v^0 - 1,618 \bar{\tau}_1^{0,2} t_n + \bar{\tau}_1^{0,2}} \Big) +$$

$$+ \frac{1,52 (1 - \bar{\tau}_1) P_1}{\bar{\tau}_1^{0,2}} \left(\arctg \frac{t_n - 0,309 \bar{\tau}_1^{0,2}}{0,951 \bar{\tau}_1^{0,2}} - \arctg \frac{t_n - 0,309 \bar{\tau}_1^{0,2}}{0,951 \bar{\tau}_1^{0,2}} \right) -$$

$$- \frac{0,94 (1 - \bar{\tau}_1) P_1}{\bar{\tau}_1^{0,2}} \left(\arctg \frac{t_n + 0,809 \bar{\tau}_1^{0,2}}{0,588 \bar{\tau}_1^{0,2}} - \arctg \frac{t_n + 0,809 \bar{\tau}_1^{0,2}}{0,588 \bar{\tau}_1^{0,2}} \right) -$$

$$- \frac{V_1^2 \bar{\tau}_1}{1,78g} (t_n^{0,2} - t_v^{0,2}), \quad (13)$$

где

$$t_n = \left| \bar{\tau}_1 + (1 - \bar{\tau}_1) \frac{P_1}{P_n} \right|^{0,2}; \quad t_v = \left| \bar{\tau}_1 + (1 - \bar{\tau}_1) \frac{P_1}{P_v} \right|^{0,2}.$$

В (13) $\bar{\tau}_1$ и $\bar{\tau}_1$ соответственно имеют следующие значения: для глинозема — 0,265 и 920; для цемента — 0,33 и 957.

Сравнение (10) с опытными данными приведено в табл. 2. Например, для трубопровода $D = 26,5$ мм из 87 замеров в 37 случаях расхождения получались в пределах $\pm (0-5)\%$, и в 26 случаях $\pm (5,1-10)\%$, и в 24 случаях $\pm (10,1-20)\%$. Алгебраическая сумма всех 87 расхождений составила минус $5,5\%$. Это означает, что суммарная величина всех опытных перепадов давлений на $5,5\%$ меньше суммы расчетных величин тех же перепадов.

Таблица 2

D мм	Общее число участков	n отклонений			Среднее алгебраич. отклонение n	Испытанный материал
		$\pm (0-5)$	$\pm (5,1-10)$	$\pm (10,1-20)$		
10,0	72	27	25	20	-3,1	гайкозем
26,5	87	37	26	24	-5,5	"
35,0	31	18	6	7	-4,6	"
40,0	24	11	9	4	-0,5	"
53,0	13	6	5	2	-0,4	"
10,0	60	25	18	17	-4,7	цемент
26,5	75	36	23	16	-5,5	"
35,0	25	15	9	1	-0,9	"
40,0	10	5	2	3	-0,2	"
53,0	10	7	1	2	-1,6	"
Всего	227	99	71	57	1,0	гайкозем
	180	88	53	39	1,6	цемент

5. Влияние начальной скорости на длину транспортного трубопровода. При известных значениях начальной концентрации φ_1 (или γ_1), диаметра трубопровода D_1 , начального и конечного давлений P_1 и P_2 уравнение (13) принимает вид

$$AV_1^{0,5}l = B - CV_1, \quad (14)$$

где A , B и C — коэффициенты, зависящие от φ_1 , D_1 , P_1 и P_2 .

Допустим, что имеется случай, когда вертикальный участок в трассе транспортирования незначителен и им можно пренебречь. Вся трасса от начала конусной трубы до точки разгрузки представляет собой прямолинейный горизонтальный трубопровод. В этом случае $P_1 = P_2$.

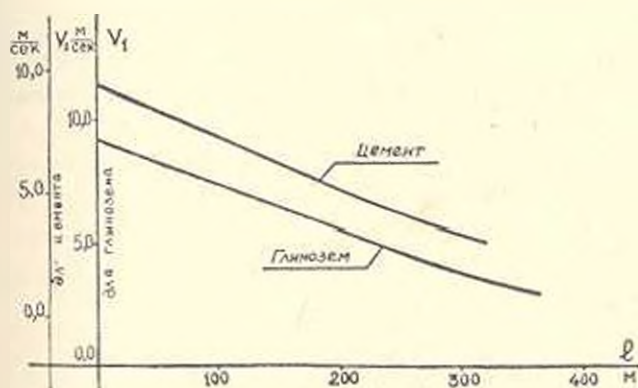


Рис. 3.

Если, например, $D = 80$ мм, $P_1 = 7$ ата, $P_2 = 1$ ата, то для глинозема ($\varphi_1 = 0,265$, $\gamma_1 = 920$) и цемента ($\varphi_1 = 0,33$, $\gamma_1 = 957$) получают-ся выражения:

$$144 V_1^{0.5} l = 99800 - 1010 V_1^2 \quad \text{— глинозем,} \quad (15)$$

$$160 V_1^{0.5} l = 96800 - 914 V_1^2 \quad \text{— цемент.} \quad (16)$$

Эти выражения представлены на рис. 3 в виде кривых, и, как видно, с ростом V_1 длина трубопровода l уменьшается и при $V_1 = 9,2$ м/сек для глинозема $l = 0$. Для цемента $l = 0$ при $V_1 = 9,5$ м/сек. Кратко остановимся на разъяснении влияния V_1 на l .

При принятых выше условиях конечная скорость аэросмеси глинозема, согласно [1], будет:

$$V_k = V_1 (0,265 + 0,735,7) = 5,41.$$

Если $V_1 = 3$ м/сек, то $V_k = 16,3$ м/сек и кинетическая энергия потока при этом будет:

$$L_k = \frac{16,3^2}{2 \cdot 9,81} = 13,5 \text{ кГ/м.кг.}$$

Потенциальная работоспособность 1 кг аэросмеси, находящейся в начале конической трубы, согласно (3), составит:

$$L = 2,3 \cdot 7 \cdot 10^4 \cdot 0,8 \cdot 10^{-4} \lg 7 = \frac{1}{3470} \cdot (7 - 1) \cdot 10^4 = 126 \text{ кГ/м.кг.}$$

Из этого количества энергии 13,5 кГ/м.кг превращается в кинетическую энергию, а 112,5 кГ/м.кг будет израсходовано на трение.

Если $V_1 = 6$ м/сек, то $V_k = 32,5$ м/сек и в кинетическую энергию переходит $L_k = 54$ кГ/м.кг, а для преодоления сопротивления остается $L_1 = 126 - 54 = 72$ кГ/м.кг. В этом случае величина l уменьшается по двум причинам: а) в результате возрастания сил трения по причине увеличения скорости потока, б) ввиду уменьшения работы на преодоление трения. Очевидно, что при $V_k = \sqrt{19,6 \cdot 126} = 49,7$ м/сек, или при $V_1 = 49,7 : 5,41 = 9,2$ м/сек, вся работа (126 кГ/м.кг) преобразится в кинетическую, а L станет нулем, то есть длина трубопровода $l = 0$.

Выводы. Результаты приведенных экспериментальных исследований и их анализ показывают, что при заданных значениях начальной и конечной давлений в транспортном трубопроводе и его диаметра дальность транспортирования зависит от начальной скорости аэросмеси. Величина начальной скорости зависит от рода материала.

Институт органической химии
АН АрмССР

Поступило 17.IX.1970.

ՅՈՒ. Ա. ԱԼՄԱՅԱՆ, Ա. Մ. ՓԻՆՓԻՐՅԱՆ, Յ. Ե. ՇԱՊԻՐՅԱՆ

ՄԱՐԴԱԿԱՆԱՐԿՆԵՐԻ ՀԱՐԻՉՈՆԱՐԱՆՔԻ ՏԵԿՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՀԱՐԻՉՐԵՐԸ

Ա. Ա. Փ. Փ. Փ. Փ.

Փորձարարական եղանակով ուսումնասիրված է մերթսահանությունը հարկանական տեղափոխման հարցերը մասնավորապես և քանակական հո-

Գրություններ և հնչման ընդհանուր տեղումները հաշվարկման համար:
Հաստատված է, որ տեղափոխման երկարությունը կախված է անբխա-
նությունից՝ սկզբնական արագությունից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гаспарян А. М., Алмасян Я. А., Акопян Р. Е. - Известия АН АрмССР (серия Т. Н.), т. XXIV, № 2, 1971.