ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտություններ, սերիա XXIV, № 2, 1971 Серия технических наук

ГИДРАВЛИКА

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

О СКОРОСТИ И ПЛОТНОСТИ АЭРОСМЕСЕЙ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ В ПЛОТНОМ СЛОЕ

Как известно, пневмотранспорт является одним из видов внутризаводского транспорта и имеет, благодаря ряду преимуществ, большое распространение. Однако еще большему распространению этого способа транспорта мешают два обстоятельства: во-первых, большой удельный расход энергии (по сравнению с другими, чисто механическими способами транспорта) и, во-вторых, отсутствие надежной методики расчета и проектирования пневмотранспортных установок.

Большой удельный расход энергии является следствием применения в пневмотранспорте больших скоростей (несколько десятков метров в секунду) и малых концентраций твердой фазы в аэросмесях. Это приводит, помимо больших расходов энергии, также к быстрому износу трубопроводов, к затруднениям при разделении и обеспыливании отработанного воздуха, к уменьшению удельной производительности транспортного трубопровода, к повреждению частиц и материала (что в ряде случаев недопустимо) и к сооружению громоздких компрессорных установок и воздушных сетей.

Разработанный в технологической лаборатории Института органической химии АН Арм. ССР новый способ, названный *пневмотранспортом в плотном слое*, исключает все эти недостатки обычного способа пневмотранспорта, что доказано соответствующими исследованиями [1, 2] и опытом эксплуатации ряда вновь сооруженных промышленных установок.

Что касается методики расчета, то ее состояние следующее. Для расчета обычного пневмотранспорта в разбавленном слое (назовем способом № 1) предложен ряд уравнений для определения трения аэросмеси в трубопроводе. Как уже было показано [2], все эти уравнения являются разновидностями уравнения Гастерштадта, которое, как мы дальше покажем, не только очень приближенное, но и в принципе неправильное. Таким образом, методика надежного, даже приближенного, расчета способа № 1 практически отсутствует.

Для пневмотранспорта в плотном слое (назовем его способом № 2) предварительно была предложена методика [3], в которой, как

показали дальнейшие исследования, имеются недостатки. Вновь накопленный экспериментальный материал дает возможность внести значительные поправки в эту методику. Кроме того, исследования обнаружили ряд новых возможностей уменьшения потерь давления на транспорте и увеличения дальности перемещения аэросмесей.

Настоящая статья посвящена этим двум задачам — уточнению методики расчета и изысканию путей увеличения дальности передачи. Отметим, что они касаются мелкодисперсных материалов, таких, как цемент, глинозем и аналогичных им порошков.

1. Сравнение потерь на трение жидкости, газа и аэросмеси. В основу методики расчета любого трубопроводного транспорта лежит нахождение $dP_т/dl$, где $P_т$ — потери на трение; l — длина трубопровода. Как известно, в случае протекания чистой жидкости

$$\frac{dP_т}{dl} = f(D, V, \mu, \gamma), \tag{1}$$

причем, вязкость μ и удельный вес γ постоянны. Если постоянен также диаметр D, то постоянна также скорость V и, следовательно,

$$\frac{dP_т}{dl} = \frac{P_т}{l}. \tag{2}$$

Иначе говоря, при протекании жидкости потери давления на трение постоянны по всей трассе.

В случае протекания чистого газа с молекулярным весом M

$$\frac{dP_т}{dl} = f(D, V, \mu, M, P) \tag{3}$$

и, как известно, в трубе постоянного диаметра, по ходу движения, то есть с уменьшением давления (или плотности), $dP_т/dl$ растет. Иначе говоря, потери на трение не постоянны и растут по ходу движения.

В случае протекания аэросмеси по трубе имеет место сложная взаимосвязь:

$$\frac{dP_т}{dl} = f(D, V, \gamma_в, P, \sigma, \gamma_ч, \Phi, \mu, M), \tag{4}$$

где $\gamma_в$ и $\gamma_ч$ — соответственно удельный вес среды и частицы; σ — диаметр частицы; Φ — коэффициент формы частиц.

Если для функции (1) и (3) найдены точные количественные уравнения, то для функции (4) вряд ли это возможно. К ее эмпирическому решению можно прийти только после двух упрощений: первое — допускаем, что газом является воздух, тогда μ и M окажутся постоянными; второе — рассматривается данный конкретный материал, имеющий постоянные σ, $\gamma_ч$ и Φ.

При этих двух допущениях (4) может быть представлено в виде

$$\frac{dP_т}{dl} = f(D,\ V,\ \gamma_c,\ P). \tag{5}$$

Исследование функции (5) показало, что влияние давления P на трение аэросмеси практически неощутимо и без заметного ущерба для точности можно написать:

$$\frac{dP_т}{dl} = f(D,\ V,\ \gamma_c). \tag{6}$$

По-видимому давление P влияет на трение только газовой фазы так, как указывалось выше. Надо полагать, что это влияние сохраняется и в случае движения аэросмеси, но оно по сравнению с влиянием твердой фазы так мало, что нами экспериментом не обнаруживалось.

Вышеизложенное относится только к потерям на трение. Однако в случае движения аэросмеси по горизонтали перепад давления состоит из двух слагаемых—потерь на трение и переход части давления в кинетическую энергию, то есть:

$$-dP = dP_т + dP_к = f(D,\ V,\ \gamma_c) + \frac{VdV}{g}\gamma_c. \tag{7}$$

Для решения этого уравнения нужно иметь скорость и удельный вес аэросмеси для какой-либо определенной точки и определить их изменение по ходу транспорта в зависимости от давления P.

Пока отметим, что в отличие от чистой жидкости и газов потери на трение аэросмеси у м е н ь ш а ю т с я с уменьшением давления, т. е. по ходу движения при постоянстве диаметра трубопровода.

2. О начальном значении удельного веса аэросмеси. Ранее [1] было показано, что концентрация φ_1 аэросмеси, входящей в монжусную трубу (в начале транспортного трубопровода) при способе № 2 является постоянной величиной для данного материала.

Далее было показано [4], что все материалы в неподвижном слое имеют некоторую минимальную концентрацию φ_0 и была описана методика экспериментального определения минимальной концентрации. Также было установлено [4], что псевдоожижение слоя наступает практически при этой концентрации.

Последующие исследования показали, что аэросмесь, поступающая в монжусную трубу, почти имеет концентрацию начала псевдоожижения φ_0. Например, для глинозема и цемента были найдены концентрации φ_0 в неподвижном слое. Они составляли 0,27 и 0,335, что соответствуют объемным весам 937 и 970 $кг/м^3$. Затем на опытной установке были определены фактические значения удельных весов γ_1 аэросмесей на входе в монжусную трубу. В результате многочисленных экспериментов было установлено, что при начальной скорости V_1 аэросмеси более 1 $м/сек$, в зависимости от диаметра монжусной трубы,

γ_1 для глинозема меняется в пределах от 828 до 930, а для цемента от 900 до 960 $кг/м^3$. Меньшие значения γ_1 получаются при небольших D, примерно до 25 $мм$. При больших диаметрах среднее значение γ_1 для глинозема составляет 920, а для цемента 957.

Эти данные, нам кажется, дают право утверждать, что при $V_1 > 1$ $м/сек$ и $D > 25$ $мм$ начальный удельный вес γ_1 аэросмеси практически равен удельному весу неподвижного слоя при наиболее рыхлой упаковке:

$$\gamma_1 \approx \gamma_{01} \quad \gamma_1 \approx \gamma_{10}. \tag{8}$$

Из (8) вытекает определение способа № 2, а именно: говоря *пневмотранспорт в плотном слое* подразумевается, что начальная аэросмесь имеет максимально возможную концентрацию $\gamma_1 \approx \gamma_{01}$ или максимально возможный удельный вес $\gamma_1 \approx \gamma_{10}$.

Так как для любого порошкообразного материала γ_{01} и γ_{10} легко могут быть определены, то γ_1 и γ_1 для любого материала, транспортируемого способом № 2, заранее заданы, что является важнейшим фактором для разработки методики расчета.

3. О минимальной скорости аэросмеси. Как показали опыты, если транспорт ведется только по вертикали (горизонтальный участок трубопровода отсутствует), то минимальная скорость (на входе в можжусную трубу), при которой обеспечивается нормальный процесс, зависит от диаметра трубы. Так, при диаметре вертикальной трубы $D = 8$ $мм$, эта минимальная скорость оказалась 4,1 $см/сек$, при

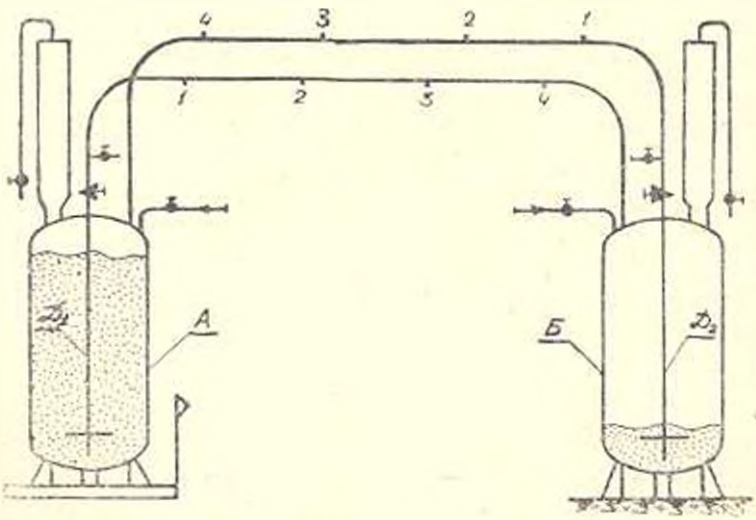

Рис. 1.

$D = 22$ $мм$ — 16,3 $см/сек$, а при $D = 53$ $мм$ — 70 $см/сек$. Опыты проводились с глиноземом. Однако, при наличии горизонтального участка при этих скоростях транспортировка не имеет места; требуются большие скорости.

Когда по горизонтальной трубе течет двухфазная система, состоящая из жидкости и твердых частиц, то, как известно, имеется критическая скорость $V_{кр}$. Если $V < V_{кр}$ (V — скорость потока), то на дне трубопровода образуется осадок твердой фазы. Только при скоростях $V > V_{кр}$ вся твердая фаза находится в движении. Применительно к гидротранспорту этот вопрос в литературе достаточно освещен и определение $V_{кр}$ с приемлемой точностью известно.

Наши опыты по пневмотранспорту не обнаружили аналогию с вышесказанным.

На установке, схематически изображенной на рис. 1, участки трубопровода *1 — 2* и *3 — 4* были изготовлены из органического стекла. Использовались трубы с диаметрами 12, 17, 27 и 35 *мм*. Опыты по определению $V_{кр}$ для глинозема производились следующим образом. Начинали транспорт при скоростях, несколько больших критической, а затем, путем уменьшения давления в монжусе, постепенно уменьшили скорость до нарушения или прекращения транспорта. Зарегистрированная скорость, при которой нормальный ход транспорта нарушался (начинаются пульсации, транспорт идет с толчками), считалась $V_{кр}$. Скорости V рассчитывались исходя из производительности установки. Во всех нужных точках давления измерялись ртутным манометром. Все измерения производились с интервалом в 1 *мин*, по возможности синхронно. Опыты с трубой данного диаметра повторялись многократно. Каждая точка, приведенная на рис. 2 представляет собой среднюю величину из 10 — 12 опытов. Прямая, аппроксимирующая связь между D и $V_{кр}$, может быть выражена уравнением:

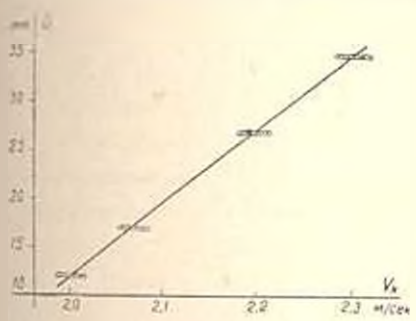

Рис. 2.

$$V_{кр} = 1{,}84 + 13\,D. \qquad (9)$$

Эта скорость $V_{кр}$ подсчитана для начала горизонтального участка в точке *1* (рис. 1).

Визуальное наблюдение за прозрачными участками трубопровода обнаружило следующее. При нормальном ходе твердая фаза двигалась по всему сечению, на дне неподвижных слоек не удалось обнаружить. Остановка транспорта в области критической скорости наступала почти сразу, с заполнением участка *1 — 2* полностью глиноземом. Следует отметить следующее. Когда после забивки и остановки транспорта трубопровод продувался воздухом, то после удаления основной массы глинозема из трубопровода на дне всегда оставался небольшой слой материала, а воздух проходил над ним в запыленном виде. По-видимому при сильно разбавленных аэросмесях осадкообразование на дне трубопровода возможно, что в наших опытах, в которых минимальная кон-

центрация была выше 150 *кг* на 1 $м^3$ воздуха, не обнаруживалось. Для данного материала и при данном диаметре трубопровода $V_{кр}$, по-видимому, зависит также от концентрации аэросмеси (что, кстати, явно выражается для систем жидкость—твердая фаза), что не учтено в приближенном уравнении (9). Отметим, что на рис. 2 приведены точки несколько завышенных значений $V_{кр}$ и поэтому (9) дает завышенные $V_{кр}$, то есть в (9) имеется определенный резерв. Так, согласно (9) $V_{кр}$ для $D = 53$ *мм* составляет 2,53 *м/сек*. Экспериментально было показано, что в трубе $D = 53$ *мм* нормальный транспорт глинозема (при концентрации 200 $кг/м^3$) нарушается только при скоростях меньше 2 *м/сек*.

Любая установка, работающая по способу № 2, неизбежно должна иметь вертикальный участок в самом начале (монжусная труба). Очевидно, что скорость V_1 аэросмеси в начале монжусной трубы может быть выбрана меньше $V_{кр}$. Разница между $V_{кр}$ и V_1 зависит от разности давлений между точкой 1 (рис. 1) и началом монжусной трубы.

4. Изменение скорости и удельного веса по ходу транспорта. Если начальная скорость V_1 известна, то в любой другой точке трассы, где давление составляет P, скорость V может быть определена из выражения [3]:

$$V = V_1 \left| \varphi_1 + (1 - \varphi_1) \frac{P_1}{P} \right|, \tag{10}$$

где φ_1 и P_1 — концентрация и давление в начале монжусной трубы.

Удельный вес и концентрация аэросмеси могут быть определены по выражениям [3]:

$$\gamma = \gamma_1 : \left| \varphi_1 + (1 - \varphi_1) \frac{P_1}{P} \right|; \tag{11}$$

$$\varphi = \varphi_1 : \left| \varphi_1 + (1 - \varphi_1) \frac{P_1}{P} \right|. \tag{12}$$

Выражения (10), (11) и (12) получены при допущении отсутствия накопления твердой фазы в трубопроводе, иначе говоря, допускается, что весовой состав аэросмеси на выходе из трубы (или на входе в трубу) такой же, как и весовой состав аэросмеси в любом другом сечении трубопровода. Однако опыты показали, что это допущение не вполне соответствует действительности.

Опыты производились следующим образом: на концах участка 3—4 были установлены пробковые краны с приспособлением для одновременного открытия и закрытия обоих кранов. По достижении нормального транспорта краны закрывались, транспорт прекращался, содержимое участка извлекалось и взвешивалось. Зная давление на концах участка, а также все прочие нужные параметры транспорта (φ_1, P_1, V_1), по (12) рассчитывали среднюю концентрацию в этом участке

ка. По весу материала, извлеченного из участка, определялась фактическая концентрация.

Соответствующие данные для труб с диаметром 11 и 17 *мм* приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номера опытов	$D=11$ *мм*				D 17 *мм*			
	$V_{расч}$	$\gamma_{расч}$	$\gamma_{оп}$	расхождение в %	$V_{расч}$	$\gamma_{расч}$	$\gamma_{оп}$	расхождение в %
1	2,43	0,188	0,206	9,2	3,80	0,167	0,176	5,1
2	3,02	0,184	0,196	6,1	5,66	0,162	0,170	4,7
3	3,50	0,180	0,190	5,3	5,80	0,160	0,167	4,2
4	4,00	0,177	0,183	3,3	6,51	0,158	0,160	1,3
5	4,30	0,176	0,180	2,2	8,20	0,150	0,153	2,0
6	4,66	0,174	0,177	1,7	9,20	0,147	0,149	1,3

Данные, приведенные в табл. 1, позволяют сделать следующие выводы:

1. В трубах приведенных диаметров расхождение между расчетными и опытными концентрациями не превышает точность инженерных расчетов.

2. С ростом V это расхождение уменьшается.

3. Намечается некоторый рост расхождений в трубе диаметром 17 *мм* по сравнению с трубой диаметром 11 *мм*. Следует ожидать, что с ростом диаметра трубопровода это расхождение при той же скорости будет расти. Это обстоятельство напоминает рост критической скорости с ростом диаметра в случае потока жидкость-твердая фаза.

4. Влияние расхождений расчетной и опытной концентраций на скорость аэросмеси, определяемой уравнением (10), очевидно незначительно.

На основании изложенного было решено в дальнейших исследованиях пользоваться уравнениями (10), (11) и (12).

Таким образом, при способе № 2 имеется одна определенная точка - начало монжусной трубы, для которой начальная концентрация известна ($\gamma_1 = \gamma_0$), известен, следовательно, и удельный вес ($\gamma_1 = \gamma_1 \gamma$), а начальная скорость V_1 может быть выбрана. Ход изменений γ, γ и V аэросмеси дается уравнениями (10) — (12).

Институт органической химии
АН Арм. ССР

Поступило 28.V.1970.

Ա. Մ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, ՅՈՒ. Ա. ԱՎՄԱՍՅԱՆ, Ռ. Ե. ՀԱԿՈԲՅԱՆ

ԱԷՐՈԽԱՌՆՈՒՐԴԻ ԱՐԱԳՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՏԵՍԱԿԱՐԱՐ ԿՇԻՌԸ ԽԻՏ ՇԵՐՏՈՎ ՊՆԵՎՄՈՏՐԱՆՍՊՈՐՏՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Ցույց է տրված, որ խողովակներում աէրոխառնուրդի շարժման ժամանակ առաջացող շփման կորուստները տեղափոխման ուղղությամբ նվազում

են, մինչդեռ հեղուկների մոտ նրանք հաստատուն են, իսկ պակրի մոտ մեծանում են։ Հաստատված է, որ կոնցենտրացիան անուցման խառնուրդում (խողովակի մուտքի մոտ) հավասար է այդ մասնիկների ամենափոքրան լցվածքի կոնցենտրացիային։ Փորձերով ցույց է տրված, որ կոնցենտրացիայի, արագության և տեսակարար կշռի փոփոխություններ տեղափոխման ուղղությամբ բնութագրվում է (12), (10), (11) հավասարումներով։ Դիտված է ափրոխառնուրդի կրիտիկական արագություններ հորիզոնական տեղափոխման ժամանակ և ստացված է (9) հաշվարկային հավասարումը։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаспарян А. М., Акопян Р. Е.*, „Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)", т. XIII, № 5, 1960.
2. *Акопян Р. Е.* Кандидатская диссертация, Ереван, 1965.
3. *Гаспарян А. М., Акопян Р. Е.* „Химическая промышленность", № 7, 1965.
4. *Гаспарян А. М., Мирзаханян Р. М.* „Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)", т. XIX, № 6, 1966.