

ГИДРАВЛИКА

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

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ  
 АЭРОСМЕСЕЙ

В работах [1, 2, 3] нами были выявлены некоторые закономерности движения аэросмесей и раскрыт характер зависимости потерь давления на трение по длине трубопровода при горизонтальном перемещении. В настоящей статье рассматриваются транспортные трубопроводы, включающие также вертикальные и наклонные участки, с разработкой методики их расчета.

**1. О негоризонтальных участках трубопроводов.** В любой трассе транспорта наличие негоризонтальных участков неизбежно. Рассмотрим вертикальный участок. Исследования показали, что потери на трение на вертикальном участке несколько меньше потерь на горизонтальном. Поэтому применение расчетных уравнений [1, 2] для негоризонтальных участков, которые обычно составляют небольшую часть трассы, вполне приемлемо. Это дает возможность высоты вертикальных участков сложить к длине горизонтальных и при расчете всю трассу рассмотреть как горизонтальную. Но это касается только сопротивления трения. Кроме трения, на вертикальных участках возникает действие веса транспортируемого материала, для учета которого в уравнение (8) [3] нужно внести новый член, что крайне осложняет решение задачи. Было найдено целесообразным к учету действия веса на вертикальных участках подойти несколько упрощенно, следующим образом.

Если вертикальный участок имеет высоту  $H$ , а средний удельный вес аэросмеси на этом участке  $\gamma'$ , то, очевидно, перепад давления (без учета потерь на трение) составит  $\Delta P' = H\gamma'$ . Из этого следует, что  $\Delta P'$  зависит от местонахождения вертикального участка на трассе. Если участок находится в начале трассы, то  $\Delta P'$  может оказаться в несколько раз больше того перепада давления, который имел бы место при нахождении этого же участка в конце трассы, где удельный вес аэросмеси меньше. Эта зависимость  $\Delta P'$  от местонахождения вводит дополнительные затруднения в расчете трассы. Если же вертикальные участки учитывать не по перепаду давления, а по затрате энергии, то задача упрощается.

Затрата энергии на подъем аэросмеси может быть выражена как

$$L = HG + hG, \quad (1)$$

где  $H$  — высота вертикального участка, а  $h$  — расстояние по вертикали, на которое отстают частицы от потока при подъеме на  $H$  в результате стесненного падения.

Продолжительность подъема частиц на высоту  $H$  будет:

$$\tau = H / (V - C), \quad (2)$$

где  $V$ —средняя скорость движения потока на участке, а  $C$ —средняя скорость стесненного падения частиц в потоке.

Очевидно, что  $h = \tau C$ , следовательно,

$$h = \frac{C}{V - C} H. \quad (3)$$

Когда средняя крупность частиц не превышает 50–60 микронов, скорость  $C$  составляет порядка 0,05 м/сек, а  $V$ —несколько м/сек. Поэтому величиной  $h$ , по сравнению с  $H$ , можно пренебречь, тогда (1) запишется так:

$$L = H G \text{ кгм/час.} \quad (4)$$

Это означает, что затрата работы на подъем материала не зависит от местонахождения вертикального участка и практически равна произведению высоты подъема  $H$  на вес материала.

При наличии на трассе нескольких участков подъема, спуска или уклона их не нужно учитывать в отдельности, а следует взять их алгебраическую сумму. Иначе говоря, за вертикальный подъем (или спуск)  $H$  следует брать разницу между отметками начала монжусной трубы и конца транспортного трубопровода, а затрату (или приобретение) работы определить по (4).

**2. Сопротивление колен (поворотов).** Явления, происходящие на повороте аэросмеси и приводящие к возникновению местного сопротивления, весьма сложны и разнообразны. Сопротивление поворота аэросмеси зависит не только от свойств фаз, концентраций, скорости, диаметра трубопровода, радиуса кривизны, плавности, угла поворота и прочего, но и от непосредственного расположения самого поворота. На сопротивление вертикального поворота значительное влияние оказывает направление потока: если поток из вертикального положения переходит в горизонтальное, то возникают одни сопротивления, если же поток из горизонтального положения переходит в вертикальное, то — другие.

В настоящем исследовании мы не занимались поисками обобщающих количественных выводов и ограничивались только опытным нахождением величин сопротивлений плавных поворотов под углом  $90^\circ$  (при некоторых диаметрах труб). В результате было установлено, что сопротивление колена быстро растет с ростом скорости аэросмеси. Если колено находится в начале трассы, то его сопротивление эквивалентно сопротивлению 0,3–0,5 м соседнего прямого горизонтального участка, а на конечных участках трассы достигает 5–7 м сопротивления прямого участка. Не опасаясь заметных погрешностей в расчете всей трассы, можно принимать, что в среднем сопротивление плавного колена с радиусом поворота более 1,5 м равно среднему сопротивлению 5 м прямого горизонтального участка.

3. **Трубопровод постоянного диаметра.** Начальный диаметр трубопровода (диаметр монжусной трубы) определяют исходя из принятой производительности, начальной концентрации  $\varphi_1$  и критической скорости  $V_{кр} = V_1$ . Если этот диаметр постоянен по длине трассы, то остается определить начальное давление в монжусе  $P_1$ .

Определение  $P_1$  можно произвести так: а) определяется фактическая длина всей трассы  $l_1$  от начала монжусной трубы до конца трубопровода; б) задаваясь значениями  $P_1$ , определяются соответствующие длины  $l$  горизонтального трубопровода и строится кривая  $P_1 = f(l)$  для трубопровода данного диаметра  $D$  (на рис. 1 приведен пример для четырех диаметров, для глинозема); в) по уравнению (9) [3] определяется несколько значений работоспособности одной тонны аэросмеси ( $L$ ) при различных значениях  $P_1$ , принимая конечное давление равное 1 ата, и строится кривая  $L = f(P_1)$  (на рис. 2 приведены такие кривые для глинозема\* и цемента); г) принимая, что вся трасса  $l_1$  горизонтальна, из рис. 1 определяется давление  $P_1$ , соответствующее  $l_1$ , а по  $P_1$  из рис. 2 определяется  $L'$ ; д) выявляется разница между отметками начала монжусной трубы и конца трубопровода  $H$  (1000  $H$  это — работа на подъем одной тонны материала,  $L_{под}$ ), затем определяется число поворотов (колен) по всей трассе  $N$ , а из выражения  $L_{кол} = 5NL'/l$  — дополнительные затраты работы на этих поворотах; е) по сумме

$$L = L' + L_{под} + L_{кол} \quad (5)$$

из рис. 2 определяется необходимое давление  $P_1$ .

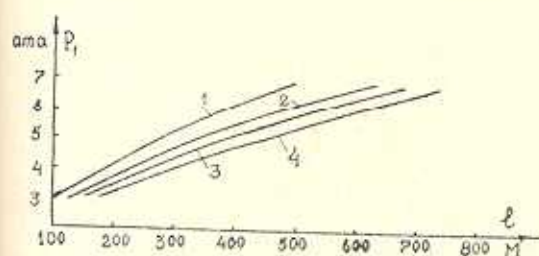


Рис. 1. Зависимость длины перемещения от давления (при постоянном диаметре труб):

- 1 — при  $D=51$  мм и  $G=16,9$  т/час;
- 2 — при  $D=76$  мм и  $G=42,5$  т/час;
- 3 — при  $D=100$  мм и  $G=81,6$  т/час;
- 4 — при  $D=125$  мм и  $G=140,8$  т/час;

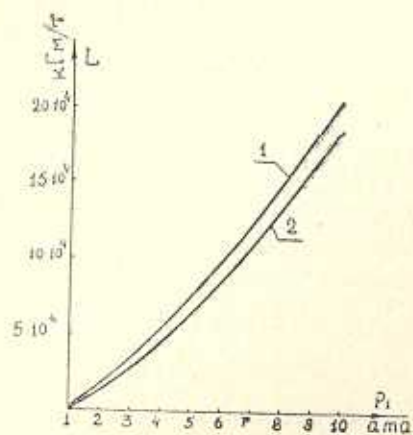


Рис. 2. Зависимость удельной работоспособности воздуха ( $L$ ) от давления: 1 — для глинозема; 2 — для цемента.

Решение ряда примеров и анализ результатов показал, что такой способ расчета дает несколько заниженное значение  $P_1$ .

\* Отметим, что (9) [3] написано для глинозема, для другого материала следует подставить соответствующие значения  $n$  и  $\gamma$ .

Вышеприведенный способ расчета дает вполне удовлетворительные результаты, если (5) написать в виде

$$L=L'+L_{\text{под}}+L_{\text{кол}}+L_{\text{к}}, \quad (6)$$

где  $L_{\text{к}}$  — кинетическая энергия одной тонны аэросмеси в конце трубопровода, определяемая из выражения:

$$L_{\text{к}} = 1000 \frac{V_{\text{к}}^2}{2g}. \quad (7)$$

Такой метод расчета можно применять для любой трассы с  $D = \text{const}$ , даже для случая, когда вся трасса состоит из вертикального трубопровода любой высоты.

**Пример 1.** Для пневмотранспорта глинозема трубопровод должен обеспечить производительность 40 *т/час*. Сумма фактических длин всех участков трассы  $l_1=160$  м. Общая высота подъема аэросмеси  $H=20$  м, число плавных поворотов под углом  $90^\circ$  на трассе  $N=4$ . Конечное давление  $P_k=1$  *ата*. Известно, что для глинозема  $\varphi_1=0,265$  ( $n=0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ ), а  $\gamma_r=3470$  *кг/м*<sup>3</sup>. Определить диаметр трубопровода  $D$  и величину начального давления аэросмеси  $P_1$ .

**Решение.** Начальный удельный вес аэросмеси составит:  $\gamma_1=0,265 \times 3470=920$  *кг/м*<sup>3</sup>. Начальный объем —  $W_1=40000 : 920=43,5 \text{ м}^3/\text{час}$ . Начальную скорость  $V_1$  принимаем равной  $V_{\text{кр}}=1,84 + 13D$ . Следовательно;  $W_1=43,5=V_{\text{кр}} \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot 3600$ . Из этих выражений путем подбора определяем  $D=76$  мм и  $V_1=V_{\text{кр}}=2,83$  *м/сек*.

По кривой 2 рис. 1 находим  $P_1=4$  *ата*, соответствующее горизонтальному прямому трубопроводу длиной  $l_1=160$  м. Из рис. 2 по кривой 1 находим работоспособность аэросмеси  $L'=5,3 \cdot 10^4$  *кГм/т*, соответствующую  $P_1'$ . Определяем работу подъема  $L_{\text{под}}=20 \cdot 1000=2 \cdot 10^4$  *кГм/т*. Находим затраты работы на преодоление сопротивлений колен  $L_{\text{кол}}=5 \cdot 4 \cdot 5,3 \cdot 10^4 : 160=0,66 \cdot 10^4$  *кГм/т*.

По (5) находим общую затрату энергии  $L=7,96 \cdot 10^4$  *кГм/т* и по этой величине из рис. 2 находим  $P_1=5,2$  *ата*.

Далее, согласно вышеизложенному, вводим поправку на кинетическую энергию. Находим конечную скорость  $V_{\text{к}}$  для  $P_1=5,2$  *ата*, а именно:

$$V_{\text{кр}}=2,83 (0,265+0,735 \cdot 5,2)=11,6 \text{ м/сек}. \text{ Следовательно,}$$

$$L_{\text{к}}=1000 \cdot 11,6^2 : 19,62=6700 \text{ кГм/т}.$$

Уточненный расход работы согласно (6) составит  $8,63 \cdot 10^4$  *кГм/т*, уточненное значение  $P_1$  согласно рис. 2 составит  $5,45$  *ата*.

Сама трасса может иметь любую конфигурацию с общим подъемом в 20 м и числом колен 4.

**4. Ступенчатый трубопровод.** Начальный диаметр  $D_1$  определяется аналогично п. 3. Затем, зная  $D_1$ , строится кривая  $P_1=f(l)$  для ступенчатого трубопровода. Принимая  $P_1=3$  *ата* (для более низких  $P_1$  рекомендуется применять трубопровод постоянного диаметра), опре-

деляются длины участков ступеней. При этом перепад давления в первой ступени рекомендуется принимать  $\Delta P_1=1 \text{ ата}$  (от 3 до 2 ата), а во второй и третьей ступенях—по 0,5 ата. Сумма длин трех ступеней даст  $l_3$ .

Аналогичный расчет производится и при  $P_1=4 \text{ ата}$ , с разбивкой трассы на четыре участка (на первых двух перепад давления по 1 ата, а на последних двух—по 0,5 ата). Сумма длин ступеней даст  $l_4$ . Таким образом, определяют  $l_5$ ,  $l_6$  и  $l_7$  соответственно для  $P_1=5$ ; 6 и 7 ата. На рис. 3 приведены кривые  $P_1=f(l)$  для четырех начальных диаметров (для глинозема), построенные указанным способом. Допуская, что вся трасса горизонтальная, из кривой  $P_1=f(l)$  определяется необходимое начальное давление  $P'_1$ , и по нему из рис. 2 находят  $L'$ . Имея общий подъем  $H$  и число колен, по (5) определяется общая начальная работоспособность аэросмеси  $L$ , а по ней—давление  $P_1$ .

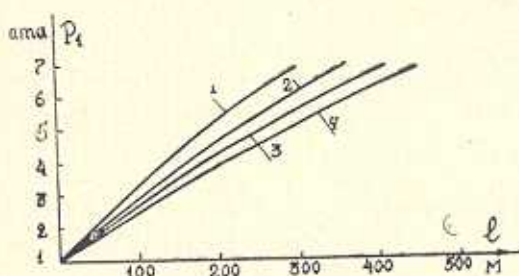


Рис. 3. Зависимость длины перемещения от давления при ступенчатом трубопроводе. (Номера кривых, начальные диаметры и производительности соответствуют приведенным на рис. 1).

**Пример 2.** Для пневмотранспорта глинозема ступенчатый трубопровод должен обеспечить производительность 40  $m/час$ . Фактическая длина  $l_1=320 \text{ м}$ ;  $H=20 \text{ м}$ ;  $N=4$ ;  $P_k=1 \text{ ата}$ . Определить начальное давление  $P_1$  и рассчитать трубопровод.

**Решение.** Аналогично предыдущему примеру находим начальный диаметр  $D_1=76 \text{ мм}$ . Из рис. 3 (кривая 2) при  $l_1=320 \text{ м}$  находим  $P'_1=4,9 \text{ ата}$ , которому соответствует  $L'=7,3 \cdot 10^4 \text{ кгм/т}$ . Далее,  $L_{пол} = 2 \cdot 10^4$ , а  $L_{пол} = 5,4 \cdot 7,3 \cdot 10^4 : 320 = 0,46 \cdot 10^4$ . Общая начальная работоспособность аэросмеси по (5) получится:  $L=9,76 \cdot 10^4 \text{ кгм/т}$ . Из рис. 2 находим  $P_1=5,8 \text{ ата}$ .

Структура трубопровода (число и длины ступеней и их диаметры) определяется, допуская, что он горизонтальный и прямолинейный, а начальное давление  $P_1=4,9 \text{ ата}$ . Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Участок	$D, \text{ мм}$	$\Delta l, \text{ м}$	Перепад давления, $\text{атм}$
I	76	40	от 4,9 до 4,0
II	82	50	от 4 до 3,0
III	88	80	от 3 до 2,0
IV	100	60	от 2 до 1,5
V	110	90	от 1,5 до 1,0

Институт органической химии АН АрмССР

Поступило 28.X.1970.

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

## ԱՆՐՈՒՆԱՆՈՒՐԳՆԵՐԻ ՏԵՂԱՓՈԽՄԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱԳԾԵՐԻ ՀԱՇՎՈՒՄԸ

## Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Մշակված է խիտ շերտով պնևմոտրանսպորտի հաշվման մեթոդիկա խողովակաղծերի ցանկացած ձևի համար՝ երբ խողովակաղծում առկա են վերախիլի բարձրացող ու իջնող հատվածներ, հորիզոնական հատվածներ, անկյուններ և թերություններ:

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гаспарян А. М., Алмасян Я. А., Акопян Р. Е. «Известия АН АрмССР, серия технических наук», т. XXIV, № 2, 1971.
2. Алмасян Я. А., Гаспарян А. М., Акопян Р. Е. «Известия АН АрмССР, серия технических наук», т. XXIV, № 3, 1971.
3. Гаспарян А. М., Акопян Р. Е., Алмасян Я. А. «Известия АН АрмССР, серия технических наук», т. XXVI, № 5, 1973.