

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРРАСТВОРОМ

Наведено теоретичне обґрунтування дослідження параметрів процесу ін'єктування та призначення режиму руху розчину по трубопроводу в струмені стиснутого повітря.

Приведено теоретическое обоснование исследования параметров процесса инъектирования и назначения режима движения раствора по трубопроводу в струе сжатого воздуха.

The theoretical justification of research of injection parameters and setting the regime of mortar motion in a pipeline by compressed air jet is presented.

Одним из важнейших параметров процесса инъектирования является назначение режима движения раствора по трубопроводу в струе сжатого воздуха. Для исключения потерь напора следует учитывать влияние касательных, инерционных и вязкостных напряжений на движение по трубопроводу растворной смеси в воздушном потоке.

В связи с этим возникла необходимость определения зависимостей, устанавливающих по-

тери напора при перемещении смеси сплошным потоком.

С момента начала движения растворной смеси по трубопроводу возникают касательные напряжения, величина которых обуславливается одновременно рядом факторов: физическими свойствами движущегося раствора, скоростью его перемещения, диаметром трубопровода и степенью шероховатости его внутренней поверхности (рис. 1).

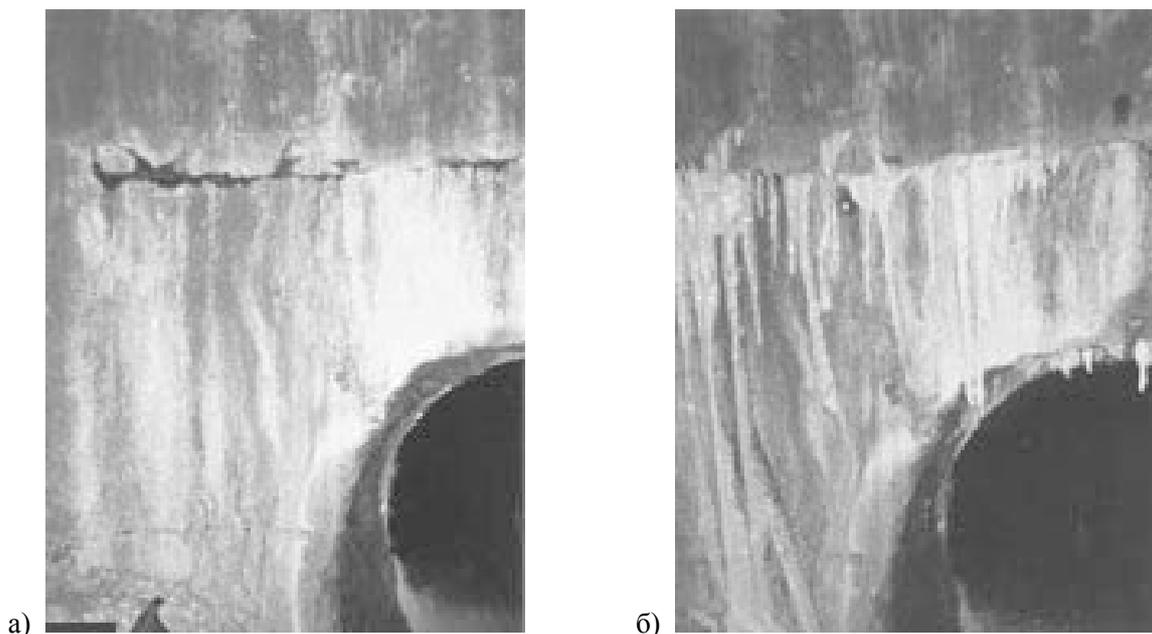


Рис. 1. Пример ошибочного выбора реологических свойств инъекционного раствора:
а) начало инъектирования;
б) окончание инъектирования

При этом касательные напряжения слагаются из вязкостных и инерционных напряжений, которые изменяются в зависимости от условий транспортирования раствора и могут характеризоваться в одно и то же время различными величинами. С повышением скорости транспортирования вязкостные напряжения снижа-

ются [1, 2], но одновременно увеличиваются инерционные, так как последние одновременно являются функцией скорости. В общем виде можно записать, что общие касательные напряжения слагаются из вязкостных и инерционных:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{и}} . \quad (1)$$

Определение величин этих напряжений позволит вывести уравнения сопротивления трубопровода при различных режимах пневмотранспорта инъекционного полимерного раствора. Поскольку перемещение аэросмеси, какой является раствор при перемещении в струе сжатого воздуха, представляет собой движение сложной среды – материальной части и воздуха, величину касательных напряжений следует рассчитывать отдельно для каждого компонента.

При этом принимаем, что их сумма в любом режиме транспортирования составит общую величину касательных напряжений.

Изменение вязкостных напряжений при движении структурированных пластично-вязких систем соответствует закону Бингама. Однако он больше относится к таким вязкопластичным материалам, в которых соблюдается пропорциональная зависимость между градиентом скорости и касательным напряжением.

Наполненный раствор на основе алкилрезорциновой смолы в случае перемещения его по трубопроводу вследствие разрушения структуры не может быть отнесен к идеальным пластично-вязким телам. А. Кассон предложил описать движение таких тел следующим уравнением [3]

$$\sqrt{\tau_{\text{в}}} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta \frac{dV}{dy}} . \quad (2)$$

Возведя в квадрат уравнение (2), получим выражение для вязкостных напряжений:

$$\tau_{\text{в}} = \tau_0 + \eta \frac{dV}{dy} + 2\sqrt{\tau_0 \cdot \eta \frac{dV}{dy}} . \quad (3)$$

Инерционное напряжение, возникающее в турбулентном потоке, равно

$$\tau_{\text{и}} = \gamma \cdot l^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 , \quad (4)$$

где γ – плотность раствора, кг/м³;

l – длина пути перемещения раствора, м.

Тогда касательные напряжения, возникающие при движении материальной части аэросмеси (раствора), равны сумме (3) и (4):

$$\tau_{\text{р}} = \tau_{\text{р.в}} + \tau_{\text{р.и}} . \quad (5)$$

Касательные напряжения, возникающие от движения воздуха, также складываются из вязкостных и инерционных напряжений:

$$\tau_{\text{возд}} = \tau_{\text{возд.в}} + \tau_{\text{возд.и}} . \quad (6)$$

При производстве ремонтных работ необходимо учитывать режимы транспортирования полимерного раствора по трубопроводу, поскольку в одних случаях преобладают вязкостные напряжения, в других – инерционные, или же они могут быть равны между собой. Например, при больших значениях Re, когда турбулентный режим сопровождается интенсивным перемешиванием, вязкостные напряжения резко снижаются, и в расчетах ими можно пренебречь [4]. В этом случае можно принять, что величина инерционного напора воздуха подчиняется известной закономерности [5] и определяется из уравнения

$$\tau_{\text{возд.и}} = \gamma_{\text{возд}} \cdot l_{\text{возд}}^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 . \quad (7)$$

Зная, что

$$\tau_{\text{возд.в}} = \eta_{\text{возд}} \frac{dV}{dy} , \quad (8)$$

касательные напряжения, возникающие при движении воздушной части аэросмеси, определяются из выражения

$$\tau_{\text{возд}} = \eta_{\text{возд}} \frac{dV}{dy} + \gamma_{\text{возд}} \cdot l_{\text{возд}}^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 . \quad (9)$$

Для преодоления суммарных касательных напряжений (вязкостных и инерционных), возникающих от движения аэросмеси, необходимо затратить силу, зависящую от разности давлений в начале и конце трубопровода

$$F = S_0 \cdot \Delta p , \quad (10)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения трубопровода, м²;

$\Delta p = p_{\text{н}} - p_{\text{к}}$ – разность давлений в начале и конце трубопровода, соответственно, Па.

С учетом того, что величины напряжений от движения растворной части аэросмеси и воздуха для трубопровода диаметром d_0 на участке L равны, соответственно, $\tau_{\text{р}} \pi d_0 L$ и $\tau_{\text{возд}} \pi d_0 L$, уравнение импульсов для движения аэросмеси по трубопроводу примет вид

$$S_0 \cdot \Delta p - \tau_p \pi d_0 L - \tau_{\text{возд}} \pi d_0 L =$$

$$= \frac{G_p}{g} (V_{p.n} - V_{p.k}) + \frac{G_{\text{возд}}}{g} (V_{\text{возд.н}} - V_{\text{возд.к}}), \quad (11)$$

где G_p – масса транспортируемого раствора, кг;
 $G_{\text{возд}}$ – масса воздуха, кг;
 $V_{p.n}$ – скорость раствора в начале трубопровода, м/с;
 $V_{p.k}$ – то же, в конце трубопровода, м/с.

Правая часть уравнения (11) представляет сумму количества движения. При установившемся движении в коротком трубопроводе скорости аэромеси в начале и конце трубопровода условно можно принять равными, тогда

$$\frac{G_p}{g} (V_{p.n} - V_{p.k}) = 0, \quad (12a)$$

$$\frac{G_{\text{возд}}}{g} (V_{\text{возд.н}} - V_{\text{возд.к}}) = 0. \quad (12b)$$

С учетом уравнений (4), (7), (9) и (11), после деления на S_0 обеих частей уравнения (11) и преобразования общего выражения получим полное уравнение сопротивления движению раствора по трубопроводу

$$\Delta p = \left[\tau_{0p} + 2 \sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \left(\frac{dV}{dy} \right)} + \eta_p \frac{dV}{dy} + \gamma_p \cdot l_p^2 \left(\frac{dV_p}{dy} \right)^2 \right] \frac{4L}{d} +$$

$$+ \left[\gamma_{\text{возд}} \cdot l_{\text{возд}}^2 \left(\frac{dV_{\text{возд}}}{dy} \right)^2 + \eta_{\text{возд}} \left(\frac{dV_{\text{возд}}}{dy} \right) \right] \frac{4L}{d}. \quad (13)$$

Преобразуя уравнение (13) путем деления всех членов уравнения на $\tau_{\text{возд}}$, а последнего члена умножением на $\tau_{\text{возд}}$, получим

$$\Delta p = \left[\frac{\tau_{0p}}{\tau_{\text{возд}}} + \frac{2 \sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \left(\frac{dV_p}{dy} \right)}}{\tau_{\text{возд}}} + \frac{4L \tau_{\text{возд}}}{d} + \right.$$

$$\left. + \left[\frac{\eta_p \left(\frac{dV_p}{dy} \right)}{\tau_{\text{возд}}} + \frac{\tau_{p.и}}{\tau_{\text{возд}}} + 1 \right] \frac{4L \tau_{\text{возд}}}{d} \right]. \quad (14)$$

Сомножитель уравнения (14), вынесенный за скобку, характеризует потерю напора, вызванную касательными напряжениями от дви-

жения сжатого воздуха ($p_{n.\text{возд}} - p_{k.\text{возд}}$) в трубопроводе, приведенную к единице площади поперечного сечения и обозначенную H_0 :

$$H_0 = \frac{4L \tau_{\text{возд}}}{d}. \quad (15)$$

Зная значение весовой концентрации $\mu = \frac{G_p}{G_{\text{возд}}}$, получим

$$\gamma_p = \gamma_v \frac{V_{\text{возд}}}{V_p} \mu. \quad (16)$$

С учетом (16) можно записать

$$\frac{\tau_{p.и}}{\tau_{\text{возд}}} = \mu \frac{\gamma_{\text{возд}} \cdot V_{\text{возд}} \cdot l_p^2 \left(\frac{dV_p}{dy} \right)^2}{\gamma_{\text{возд}} \cdot l_{\text{возд}}^2 \cdot V_p \left(\frac{dV_{\text{возд}}}{dy} \right)^2 + \eta_{\text{возд}} \frac{dV_{\text{возд}}}{dy}}. \quad (17)$$

Обозначим

$$\frac{V_{\text{возд}} \cdot l_p^2 \left(\frac{dV_p}{dy} \right)^2}{l_{\text{возд}}^2 \cdot V_p \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 + \eta_{\text{возд}} \frac{dV_{\text{возд}}}{dy}} = k, \quad (18)$$

тогда выражение четвертого члена уравнения (14) примет вид $k\mu$. Значение коэффициента k не может быть определено теоретически и определяется опытным путем.

Преобразуем первый член уравнения (1), умножив и разделив его на величину $\frac{4L}{d}$:

$$\frac{\tau_{0p} \frac{4L}{d}}{\tau_{\text{возд}} \frac{4L}{d}}. \quad (19)$$

Знаменатель представляет собой выражение (15), тогда первый член уравнения (14) примет вид

$$\frac{\tau_{0p} \frac{4L}{d}}{H_0} = \frac{\tau_{0p} \cdot 4L}{H_0 \cdot d}.$$

При больших скоростях воздуха происходит взвешивание твердой составляющей раствора и в трубопроводе движется поток аэроsmеси, при этом структура материалов нарушается. В процессе перемещения основное значение имеют силы инерции и силы тяжести [6]

$$\frac{\mu}{Fr^4} = \text{const} . \quad (20)$$

В этом случае вязкостные напряжения от растворной части аэроsmеси резко снижаются, тогда второй и третий члены уравнения (14) можно принять равными нулю.

Таким образом, возможны три экстремальных случая транспортирования инъекционного полимерного раствора: 1) V_{\min} при $\tau_b = \text{max}$, $\tau_n = \text{min}$; 2) $V_{\text{ср}}$ при $\tau_b = \tau_n$; 3) V_{max} при $\tau_b = \text{min}$, $\tau_n = \text{max}$. Во всех трех случаях сумма τ_b и τ_n равна $\tau_{\text{общ}}$.

Для каждого случая с учетом проведенных выше преобразований необходимо определить величины сопротивления горизонтального и вертикального транспортного трубопровода.

Первый случай. Смесь движется сплошным потоком V_{\min} при максимальных вязкостных и минимальных инерционных напряжениях. Тогда уравнение (14) с учетом (15) примет вид

$$\Delta p = \left(\frac{\tau_{0p}}{\tau_{\text{возд}}} + \frac{2\sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \frac{dV_p}{dy}}}{\tau_{\text{возд}}} + \frac{\eta_p \cdot \frac{dV}{dy}}{\tau_{\text{возд}}} + 1 \right) H_0 . \quad (21)$$

Преобразуем его, проведя упрощения:

$$\frac{\tau_0 \cdot H_0 \cdot \frac{4L}{d}}{H_0} + \frac{2\sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \frac{dV}{dy}} \cdot \frac{4L}{d} \cdot H_0}{H_0} + \frac{\eta_p \cdot \frac{dV}{dy} \cdot \frac{4L}{d} \cdot H_0}{H_0} + H_0 , \quad (22)$$

$$\Delta p = \left(\tau_{0p} + 2\sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \frac{dV}{dy}} + \eta_p \cdot \frac{dV}{dy} \right) \frac{4L}{d} + H_0 , \quad (23)$$

$$\Delta p = \left(\sqrt{\tau_{0p}} + \sqrt{\eta_p \cdot \frac{dV_p}{dy}} \right)^2 \cdot \frac{4L}{d} + H_0 \quad (24)$$

Во всех выражениях величина $\frac{dV}{dy}$ пред-

ставляет собой изменение скорости в направлении, нормальном к направлению самой скорости, т.е. является скоростью скольжения или градиентом скорости, который может быть вы-

ражен $\frac{dV}{dy} \approx \frac{V}{d} = \frac{2V}{d}$, где V – максимальная

скорость; $d/2$ – расстояние от стенки трубопровода до слоя раствора, движущегося с максимальной скоростью. Подставив это значение в уравнение (1.24), получим окончательную расчетную формулу для определения сопротивления движению полимерного раствора сплошным потоком

$$\Delta p = \frac{4L}{d} \left(\sqrt{\tau_{0p}} + \sqrt{\eta_p \cdot \frac{2V_p}{d}} \right)^2 + H_0 . \quad (25)$$

Второй случай. Смесь движется с частично взвешенными компонентами со средней скоростью $V_{\text{ср}}$. При этом вязкостные и инерционные напряжения равны между собой. Требуемое условие приобретает вид:

$$\frac{\tau_{0p} + 2\sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \frac{dV_p}{dy}} + \eta_p \cdot \frac{dV_p}{dy}}{\tau_{\text{возд}}} = k\mu .$$

Следовательно, уравнение (14) имеет вид расчетной формулы для рассматриваемого случая

$$\Delta p = H_0 (1 + 2k\mu) . \quad (26)$$

Третий случай. Смесь движется полностью во взвешенном состоянии со скоростью V_{max} . Взвешенное состояние аэроsmеси при движении с такой скоростью сопровождается полным разрушением структуры, режим транспортирования турбулентный, характеризуемый минимальными вязкостными и максимальными инерционными напряжениями. Вторым и третьим членами уравнения (14) можно пренебречь, тогда с учетом (15)

$$\Delta p = \frac{\tau_{0p} \cdot 4L}{H_0 \cdot d} + (k\mu + 1)H_0 . \quad (27)$$

После его преобразования получим

$$\Delta p = \frac{4L\tau_{0p}}{d} + H_0(1 + k\mu). \quad (28)$$

Выражение $\frac{4L\tau_{0p}}{d}$ соответствует потере напора на преодоление начального напряжения сдвига, обозначим его H_1 . Тогда

$$\Delta p = H_1 + H_0(1 + k\mu). \quad (29)$$

Особенность транспортирования смесей во взвешенном состоянии состоит в том, что смесь попадает в струю уже движущегося с большой скоростью воздуха. В этом случае сдвигающие усилия чрезвычайно малы, и ими можно пренебречь, тогда сопротивление движению аэромеси во взвешенном состоянии описывается уравнением

$$\Delta p = H_0(1 + k\mu). \quad (30)$$

Потеря напора от движения воздуха определяется по формуле, приведенной в работе [5]:

$$H_0 = \frac{L \cdot V_{\text{возд}}^2 \cdot \gamma_{\text{возд}}}{2dg}. \quad (31)$$

Таким образом, для определения H_0 по формулам (25), (26) и (30) при расчете сопротивления движению полимерного раствора при различных скоростях используется приведенная формула (31).

Для вертикального участка трубопровода наряду с общими сопротивлениями, возникшими от касательных напряжений движущегося раствора, учитывается также сила тяжести раствора и воздуха. В связи с этим

$$S_0 \cdot \Delta p - (\tau_p - \tau_{\text{возд}})L\pi d_0 - \frac{LG_p}{V_p} - \frac{LG_{\text{возд}}}{V_{\text{возд}}} = \frac{G_p \cdot \Delta V_p}{g} + \frac{G_{\text{возд}} \cdot \Delta V_{\text{возд}}}{g} \quad (32)$$

или с учетом (14)

$$\Delta p = \frac{(\tau_p + \tau_{\text{возд}})\pi dL}{S_0} + \frac{LG_p}{V_p \cdot S_0} + \frac{LG_{\text{возд}}}{V_{\text{возд}} \cdot S_0}.$$

Рассмотрим второй и третий члены уравнения (33), представляющие собой силы тяжести воздуха и растворной части аэромеси, приходящиеся на единицу площади сечения трубо-

провода. С учетом того, что $G_p = S_0 \cdot \gamma_p \cdot V_p$ и $G_{\text{возд}} = S_0 \cdot \gamma_{\text{возд}} \cdot V_{\text{возд}}$, и приняв $L = 1$ м, второй и третий члены уравнения (33) будут иметь следующий вид

$$\frac{LS_0 \cdot \gamma_p \cdot V_p}{V_p \cdot S_0} + \frac{LS_0 \cdot V_{\text{возд}} \cdot \gamma_{\text{возд}}}{V_{\text{возд}} \cdot S_0} = \gamma_p + \gamma_{\text{возд}}, \quad (34)$$

а с учетом (16) выражение (34) может быть представлено в виде

$$\mu\gamma_{\text{возд}} \frac{V_p}{V_{\text{возд}}} + \gamma_{\text{возд}} = \gamma_{\text{возд}} \left(\mu \frac{V_p}{V_{\text{возд}}} + 1 \right) \quad (35)$$

и является дополнительным членом уравнений (25), (26) и (30), который учитывается при расчете сопротивления на вертикальном участке трубопровода:

а) для первого случая

$$\Delta p = \frac{4L}{d} \left(\sqrt{\tau_{0p}} + \sqrt{\eta_p \frac{2V_p}{d}} \right)^2 + H_0 + (\mu + 1)\gamma_{\text{возд}}; \quad (36)$$

б) для второго случая

$$\Delta p = H_0(1 + 2k\mu) + (\mu + 1)\gamma_{\text{возд}}; \quad (37)$$

в) для третьего случая

$$\Delta p = H_0(1 + k\mu) + (\mu + 1)\gamma_{\text{возд}}. \quad (38)$$

Вывод. Исследованы закономерности движения полимерного наполненного раствора на основе алкилрезорцина по трубопроводу и определены зависимости, устанавливающие потери напора при перемещении смеси сплошным потоком.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вулис Л. А. Теория струй вязкой жидкости / Л. А. Вулис, В. П. Кашкаров. – М.: Наука, 1965. – 276 с.
2. Федяевский К. К. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости / К. К. Федяевский, А. С. Гиневский, А. В. Колесников. – Л.: Судостроение, 1973. – 256 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
4. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1970. – 215 с.
5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
6. Семенов И. Н. Энергия и химический процесс / И. Н. Семенов, Р. В. Богданов. – Л.: Химия, 1973. – 112 с.

Поступила в редколлегию 30.01.2008.