

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ ЦЕМЕНТНОГО РАСТВОРА В ЗАКРЕПЛЯЕМЫЕ ОСНОВАНИЯ СООРУЖЕНИЙ С КРУПНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

И.В. Носков, С.А. Ананьев

В статье приводятся теоретические основы, теоретические и эмпирические зависимости инъектирования цементного раствора в закрепляемые основания сооружений с крупным заполнителем.

Ключевые слова: инъекционный метод, закрепление грунтов, инъектирование грунта, крупный заполнитель.

Эффективное закрепление оснований сооружений с крупным заполнителем инъектированием (нагнетанием) цементного раствора во многом зависит от режимов инъектирования (давления инъектирования, диаметров инъекторов и трубопроводов, пластичных свойств раствора, пористости заполнителя, конструкции инъектора и т.п.) и расстояния между инъекторами, что в свою очередь определяется радиусом инъектирования.

Теоретические основы, теоретические и эмпирические зависимости, объединяющие все вышеперечисленные факторы, и влияющие на процесс инъектирования, отсутствуют. Имеются лишь некоторые отдельные положения, которые полностью не раскрывают всего физического процесса и механики инъектирования (нагнетания) цементного раствора в основания с крупным заполнителем.

Так, в работе Курта Бастона [1] определено, что допустимое давление нагнетаемого раствора не должно намного превышать давление вертикального столба жидкости. При этом в работе даются четыре обязательные формы изменения рабочего давления в процессе инъектирования:

1. Давление медленно возрастает и достигает уровня, соответствующего максимальной производительности насосов; пустоты заполнены, инъекция завершена.

2. После незначительного повышения давления, в начале процесса, имеет место снижение давления. Это означает, что процесс инъекции нарушился в результате изменения структуры породы. При дальнейшем падении давления инъекцию следует прекратить, так как при создавшемся положении возможен уход раствора в создавшиеся каналы (разрывы грунта).

3. После первоначального резкого повышения давления имеет место резкое снижение, затем снова повышение, следовательно, с полной уверенностью можно судить об успешном завершении инъекции.

4. После кратковременного повышения давления - резкий спад и затем дальнейшее постепенное снижение. Это означает, что в результате повышения давления раствора в породе образовывается горизонтальная щель, в связи с чем происходит поднятие ее поверхности. В этом случае инъекция не удалась. Наличие небольшого давления в нагнетательной системе указывает на большую фильтрационную способность заполняемой среды. При повышении давления поглощающая способность снижается и при достижении максимального давления (давления насыщения) становится равной нулю.

В исследованиях Курта Бастона также отмечается весьма интересный фактор, указывающий на необходимость предварительной активации вяжущего. Им установлена зависимость между плотностью цементного раствора, давлением и прочностью породы в результате инъектирования.

При этом в случае, если гидратация происходит только на поверхности зерен, то расход воды составляет 20-27 % от веса цемента, а если процесс гидратации проникает внутрь частиц цемента, то объем воды достигает 40 %, что увеличивает подвижность раствора, повышает качество и производительность инъектирования без снижения прочности закрепляемого массива.

Не менее важным фактором, влияющим на процесс инъектирования, является проницаемость крупного заполнителя оснований сооружений, характеризующаяся его

гранулометрическим составом и пористостью.

Для определения коэффициента проницаемости E . Маагом предложена формула [2], согласно которой

$$K' = \frac{Kv}{v'} \quad (1)$$

где K' -коэффициент проницаемости породы по отношению к заполнителю;
 K -то же по отношению к породе;
 v, v' -кинематическая вязкость заполнителя и воды соответственно.

Согласно классической механики грунтов коэффициент пористости идентичен показателю фильтрации, определяющегося уравнением Дарси Вейсбаха

$$K' = \frac{Q \ln \frac{R}{r}}{2\pi h} \quad (2)$$

где Q -измеряемый объем расхода раствора, см³;
 r -радиус инъекционных скважин, см;
 R -радиус действия инъекции, см;
 h -высота пробы, см;
 H -давление столба, см.

С помощью этих уравнений установлены количественные зависимости между значениями коэффициента проницаемости $K_{пр}$ и радиуса действия инъекции R , основные из которых приводятся в таблице 1.

Таблица 1.- Зависимость радиуса инъекции от коэффициента проницаемости.

Коэффициент проницаемости, $K_{пр}$. см/сек	Вид заполняемой породы	Радиус действия инъекции, R , см
10^0	Галька	373
10^{-1}	Гравий с песком	173
10^{-2}	Песок	80
10^{-3}	Мелкозернистый песок	37
10^{-4}	Ил с песком	17
10^{-5}	Тонкий ил	8

Из таблицы закономерно следует, что с понижением $K_{пр}$ уменьшается радиус инъекции.

Для определения радиуса инъекции в гальке, щебне, каменной наброске рекомендуются определенные зависимости. Однако эти зависимости определены для условий нагнетания раствора в проницае-

мый слой, находящийся между плоскими стенками, либо непроницаемыми породами.

Принимается, что нагнетаемые жидкости являются идеальными «Ньютоновскими жидкостями».

Такое допущение не совсем верное, т.к. цементные и цементно-песчаные растворы являются структурированными аномальными жидкостями и описываются законом Шведова-Бигама, в котором количественно выражается качественное определение пластичного тела по Максвеллу, а именно

$$\frac{F}{S} - \Theta = \mu \frac{dv}{dr} \quad (3)$$

где Θ -предел текучести;
 F -тангенциальная сила;
 S - площадь поверхностного трения;
 μ - динамический коэффициент вязкости;
 $\frac{dv}{dr}$ -градиент скорости в расслаиваемом сечении.

Анализ приведенного уравнения показывает, что характер движения раствора зависит от его вязкости μ и величины предельного напряжения сдвигу Θ .

В связи с этим вполне обоснованно можно высказать сомнения в отношении возможности правильного определения коэффициента фильтрации по предлагаемым формулам 1 и 2. Вполне очевидно, что для структурированных аномальных жидкостей эта величина будет зависеть не только от R, r, h и H , но и от μ, Θ и других величин.

Для нахождения коэффициента проницаемости можно предложить следующую методику.

Уравнение 3 преобразуется к виду

$$\frac{F}{S} = \mu \frac{dv}{dr} + \Theta \quad (4)$$

где $\frac{F}{S}$ =-касательное напряжение сдвига г/см² разделив (4) на $\frac{dv}{dr}$ и представив его в виде

$$\frac{\tau}{\frac{dv}{dr}} = \mu + \frac{\Theta}{\frac{dv}{dr}} \quad (5)$$

получим, что для структурированных аномальных систем величина эффективной вязкости (мгновенная вязкость), соответ-

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ ЦЕМЕНТНОГО РАСТВОРА В ЗАКРЕПЛЯЕМЫЕ ОСНОВАНИЯ СООРУЖЕНИЙ С КРУПНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

свующая градиенту скорости $\frac{dv}{dr}$ равная μ определяется как

$$\mu' = \mu + \frac{\Theta}{\frac{dv}{dr}} \quad (6)$$

Приняв в первом приближении, что для действующей жидкости в фильтрационной среде усредненный градиент скорости до нейтральной оси потока $\frac{dv}{dr_{cp}}$ равен $\frac{v}{r_0}$ либо $\frac{2v}{\alpha_0}$ и подставив его значение в уравнении (6) получим, что

$$\mu' = \mu + \frac{\Theta r_0}{v} \quad (7)$$

При ламинарном движении воды коэффициент фильтрации K_ϕ определяется общеизвестной формулой

$$K_\phi = K_{пр} \cdot \frac{\gamma_B}{\mu'} \quad (8)$$

Подставив для нашего случая значение μ в уравнение (8) получим, что коэффициент фильтрации для структурированных аномальных жидкостей в пористой среде можно определить по формуле

$$K_\phi = K_{пр} \frac{\gamma_p}{\mu + \frac{\Theta r_0}{v}} = K_{пр} \frac{\gamma_p v}{\mu v + \Theta r_0} \quad (9)$$

где $K_{пр}$ -коэффициент проницаемости среды, $см^2$;

γ_p -удельный вес инъецируемого раствора, $г/см^3$;

r_0 -усредненный радиус фильтрационных пор;

v -скорость движения жидкости в порах инъецируемой среды, $см/сек$;

Θ -предел текучести раствора, $г/см^2$;

μ -динамический коэффициент вязкости раствора, $г/см^2$

Радиус инъецирования растворов в среде может быть определен как расход жидкости через боковую стенку цилиндра (при этом следует различать радиус инъециции при горизонтальном и вертикальном расположении инъектора). В нашем случае принята вертикальная схема инъецирования, приведенная на рисунке 1.

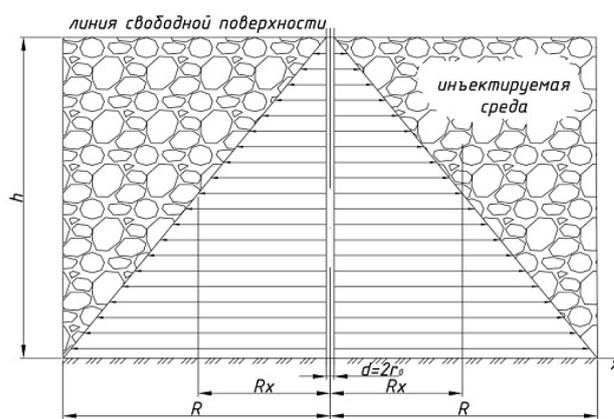


Рисунок 1 - Схема расчета радиуса инъецирования раствора через вертикально установленный инъектор.

Согласно расчетной схеме расход жидкости через боковую поверхность цилиндра определяется как

$$Q = 2\pi x h v \quad (10)$$

где V -скорость движения(истечения) раствора, $см/сек$.

x -направление распространения раствора, $см$

Q -суммарный расход раствора, $см^3/сек$;

h - высота инъектора.

Скорость истечения раствора V через боковую плоскость равна произведению пористости среды m и действительной средней скоростью потока в порах U , т.е. $V=mU$.

В свою очередь скорость потока может быть определена

$$U = m \frac{dx}{dt} \quad (11)$$

Подставив полученное выражение скорости в уравнение 10, получим, что

$$Q = 2\pi x h_u m \frac{dx}{dt} \quad (12)$$

На основании этого закон движения жидкости в инъецируемой среде по принятой схеме вертикального источника с линейным излучением жидкости по высоте столба инъектора определяются уравнением

$$Q dt = 2\pi m h_u x dx \quad (13)$$

По уравнению Дарси-Вейсбаха фильтрационный расход идеальной жидкости определяется формулой

$$Q = -K_\phi F \frac{dy}{dx} \quad (14)$$

где F-площадь фильтрации в сечении у.
В рассматриваемом случае

$$F=2\pi x y \quad (15)$$

Подставив (15) и (14) имеем

$$Q = -K_{\phi} 2\pi x y \frac{dy}{dx};$$

$$Q \frac{dx}{x} = -K_{\phi} 2\pi y dy \quad (16)$$

Проинтегрировав левую часть в пределах от $X=r_u$ до $x=R$ и правую от $Y=0$ до $Y=H$ получим, что

$$Q \ln \frac{R}{r_u} = \pi K_{\phi} H^2, \text{ или } Q = K_{\phi} \frac{H^2}{\ln \frac{R}{r_u}} \quad (17)$$

Подставив (17) в (13)

$$2\pi m x \frac{dx}{dt} = \pi K_{\phi} \frac{H^2}{\ln \frac{R}{r_u}}$$

И, преобразовав, получим

$$x dx = \frac{K_{\phi} H^2 dt}{2m h_u \ln \frac{R}{r_u}} \quad (18)$$

Интегрируем выражение 18 от $t_1=0$ до $t_2=t_u$ и по dx от $x_1=r_u$ до $x_2=R$ т.е.

$$\int_{r_u}^R x dx = \frac{K_{\phi} H^2}{2m h_u \ln \frac{R}{r_u}} \int_0^{t_u} dt \quad (19)$$

После интегрирования получим

$$R^2 = \frac{K_{\phi} H^2 t_u}{m h_u \ln \frac{R}{r_u}} + r_u^2 \quad (20)$$

В связи с тем, что $r_u^2 \ll R^2$, то с небольшой погрешностью в уравнении (20) величиной r_u^2 можно пренебречь. Тогда радиус инъекции выражается как

$$R=H \sqrt{\frac{K_{\phi} t_u}{m h_u \ln \frac{R}{r_u}}} \quad (21)$$

Если в уравнение 21 ввести K_{ϕ} , подставив его аналитическое выражение, описываемое формулой (9), то радиус распространения раствора в инжектируемой среде определяется зависимостью

$$R = H \sqrt{\frac{K_{np} \gamma_p V t_u}{(\mu V + \theta r_u) m h_u \ln \frac{R}{r_u}}}, \text{ см,} \quad (22)$$

где t_u -время инжектирования сек;

h_u -высота инжектора, см;

m - коэффициент пористости закладки;

μ - динамический коэффициент вязкости раствора, г.сек;

r_u -радиус инжектора, см;

V -скорость фильтрации раствора в среде см/сек

θ -предел текучести раствора г/см²;

γ_p -объемный вес раствора г/см³;

K_{np} -коэффициент проницаемости среды, см²

В случае горизонтального расположения инжектора радиус инжектирования может быть определен по формуле Ю.Л. Маанава, согласно которой

$$R = \frac{Q \mu_p}{2l K_{np} \gamma_p} \cdot \frac{1 + \frac{4t_0}{\gamma_p d_0}}{1 - \frac{4t_0}{\gamma_p d_0}} \text{ см,} \quad (23)$$

где Q -расход раствора, г/см³;

l - длина инжектора, см;

t_0 -предельное напряжение сдвига, г/см²;

d_0 -средний диаметр пор, см.

Приведенные уравнения могут быть использованы для практических целей только после их экспериментальной проверки и определения конкретных величин, входящих в приведенные выше зависимости.

В связи с этим следующим этапом исследований является проведение лабораторных экспериментов, позволяющих определить скорость фильтрации раствора, коэффициенты проницаемости, коэффициенты фильтрации, а также реологические характеристики раствора для конкретных условий того или иного закрепляемого основания сооружения с крупным заполнителем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Burston. Strengthening soil 2nd ed.. – N.Y.: Oxford University Press, 2009. – 310 p
2. E. Maag. Building materials 1nd ed.- N.Y.: Oxford University Press, 2012. – 103 p

Носков Игорь Владиславович – к.т.н., заведующий кафедрой «Основания, фундаменты, инженерная геология и гео-

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ ЦЕМЕНТНОГО РАСТВОРА В ЗАКРЕПЛЯЕМЫЕ
ОСНОВАНИЯ СООРУЖЕНИЙ С КРУПНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

дезия» АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail:
noskov.56@mail.ru,

Ананьев Сергей Александрович –
аспирант, E-mail: ananda_hasita@mail.ru,
АлтГТУ им. И.И. Ползунова