

ОБОСНОВАНИЕ ОПОРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ИНЪЕКТИРОВАНИЯ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ

И. В. Носков, С. А. Ананьев, А. В. Каныгин

Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

В статье рассматриваются опорные параметры технологии инъектирования лессовых грунтов при устройстве фундаментов жилых и общественных зданий и оснований автомобильных дорог общего пользования.

Ключевые слова: *инъектор, растворонасос, лабораторные испытания грунтов.*

Ежегодная возрастающая нагрузка грузовых и пассажирских перевозок, приводит к все более сильному износу дорог и как следствие расходу бюджетных средств.

Инъектирование грунтов характеризуется такими технологическими параметрами, как давление и время. Эти два параметра будут характеризоваться расходом и скоростью распространения раствора. Между первыми и вторыми показателями существует взаимосвязь (рисунок 1).

Режим инъектирования при постоянном давлении ($P = \text{const}$) вызывает уменьшение со временем как расхода, так и скорости распространения раствора. Это наиболее часто применяемый и простой режим. Раствор, распространяясь в поровом пространстве грунта, полностью его заполнит. За счет вязкости раствора уменьшается эффективный размер пор, и фильтрация затормаживается. В слоях грунтового массива, расположенных вблизи инъектора, создается повышенное давление.

С использованием экспериментальной установки были проведены исследования режимов нагнетания при постоянной скорости распространения. Учитывая, что скорость можно выразить через радиус распространения в единицу времени, а расход – через произведение скорости и площади, необходимо отметить, что для данного режима радиус и площадь увеличиваются пропорционально времени нагнетания. Это возможно, если инъекционный раствор не встречает на своем пути сопротивления ни со стороны воды, заполняющей поры, ни со стороны вязкого раствора. В этом случае система представляет собой бесконечно пористую структуру, в которой раствор, не встречая сопротивления, равномерно движется по поровым каналам.

В естественных природных условиях

наибольшее распространение и применение имеют схема с постоянным давлением ($P = \text{const}$), причем ей отдается предпочтение как наиболее простой в эксплуатации. Кроме того, при инъектировании верхних слоев земляного полотна, когда расход раствора является постоянным, повышение давления приводит к разрывам грунтовой толщи и выходу раствора на поверхность, что является отрицательным фактором. На основании этих доводов для инъектирования растворов на небольшие глубины может быть рекомендована схема с постоянным давлением.

При глубинном инъектировании грунтов применяются следующие величины давлений нагнетания: при глубине 2-4 м – 0,3-0,5 МПа; при глубине 4-10 м – 0,5-1,0 МПа.

Расход раствора является производной характеристикой от давления и времени нагнетания, а также зависит от фильтрационных свойств грунта и плотности раствора. В свою очередь, параметры инъектирования (радиус и глубина распространения раствора) зависят от всех вышеперечисленных факторов. Следовательно, можно записать

$$R, h = f(P, Q, t, K_f, V_w, \eta), \quad (1)$$

где V_w – влажность грунта; η – вязкость раствора.

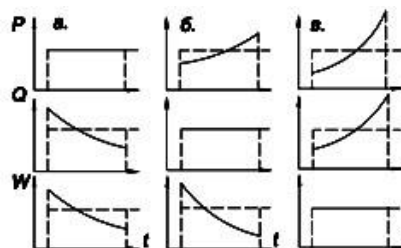


Рисунок 1 – График зависимости параметров нагнетания от времени

Учитывая большое количество переменных факторов, сгруппируем показатели для облегчения установления зависимостей:

- 1) $Q = f(P)$ при $K_{\phi} = \text{const}$ и $t = \text{const}$;
- 2) $Q = f(t)$ при $K_{\phi} = \text{const}$ и $P = \text{const}$;
- 4) $P = f(V_w)$ при $K_{\phi} = \text{const}$;
- 5) $P = f(\eta)$ при $K_{\phi} = \text{const}$;
- 6) $h = f(P)$ при $K_{\phi} = \text{const}$ и $t = \text{const}$;
- 7) $R = f(P)$ при $K_{\phi} = \text{const}$ и $t = \text{const}$.

Рассмотрим зависимость каждого из перечисленных параметров от характеристик грунта, раствора и других соответствующих факторов.

Исследования проводились на инъекторах двух типов отнесенных, в зависимости от отношения длины перфорированной части инъектора к его диаметру, к радиальному и сферическому источникам.

Расход. Количество рабочего раствора Q , необходимого для закрепления способом инъецирования, зависит от пористости грунта

$$Q = V n \alpha, \quad (2)$$

где $V = \pi r^2 l$ – объем закрепленного грунта, условно принятый за объем цилиндра м^3 ; n – пористость грунта, доли единицы; α – коэффициент заполнения пор грунта раствором, принимаемый равным 0,7-0,9 в зависимости от степени влажности грунта.

Этот же показатель может быть представлен на основе удельного расхода раствора на 1 пог. м участка дороги

$$Q = \alpha K i s [(H + 0,2) - H_{\text{од}}] \cdot (1,45 V_w - V_{\text{wf}}), \quad (3)$$

где K – коэффициент, учитывающий расход раствора в основании дорожной одежды: для гравийно-песчаных оснований $K = 1,8-2,2$; l – длина участка, равная 1 пог. м; H – глубина погружения инъектора, м; s – ширина закрепленного участка, м; $H_{\text{од}}$ – толщина дорожной одежды, м; V_w – оптимальная влажность грунта, в долях единицы; V_{wf} – фактическая влажность грунта, в долях единицы.

Рассматривая расход жидкости через скорость фильтрации на площадь поперечного сечения, можно утверждать, что расход жидкости зависит от параметров грунта и воды, содержащейся в порах, а также от создаваемого давления.

Для обоснования оптимального значения времени нагнетания при поверхностном инъецировании проанализированы результаты экспериментальных исследований расхода раствора в зависимости от продолжи-

тельности нагнетания и построен график (рисунок 2).

Вместе с тем проведены расчеты по определению степени заполнения пор грунта раствором на основании экспериментальных данных.

Расчеты проводились по схеме:

- 1) определение области распространения раствора;
- 2) определение веса грунта;
- 3) определение объема вяжущего вещества;
- 4) определение объема пор грунта;
- 5) определение степени заполнения пор грунта раствором.

Анализ графиков позволил установить следующие зависимости.

1. При времени нагнетания равном 5 с экспериментальный расход вещества всегда больше расчетного. Это объясняется тем, что раствор, выходя из отверстия инъектора, встречает на своем пути пористую среду. Для установления ламинарного режима течения необходимо создать определенное давление, на что расходуется дополнительное количество вяжущего вещества. Это подтверждает возникновение разности давлений внутри инъектора и на внешней его стороне, что вызывает возникновение потерь, которые в расчетах учитываются через коэффициент гидравлических потерь.

2. При времени нагнетания 10-15 с результаты опытных и экспериментальных данных идентичны.

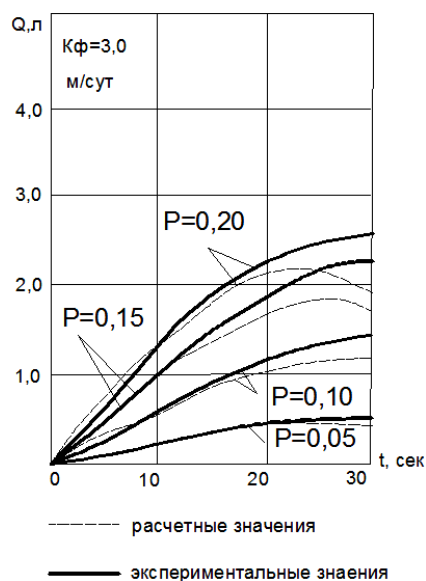


Рисунок 2 – График зависимости расхода раствора от времени нагнетания

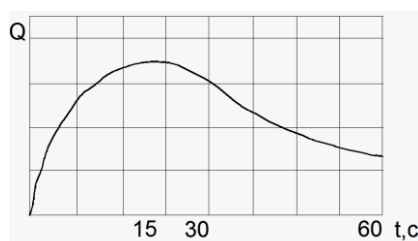


Рисунок 3 – График зависимости расхода раствора от времени нагнетания

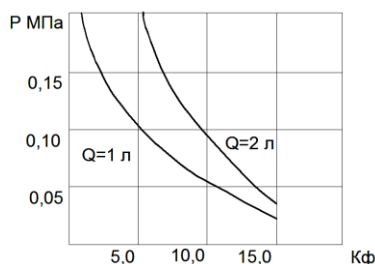


Рисунок 4 – Зависимость давления нагнетания от фильтрационных свойств грунта при времени нагнетания $t = 10$ с

3. При времени нагнетания 20-30 с результаты опытных данных всегда меньше расчетных. Для объяснения этого факта необходимо обратиться к графику зависимости параметров нагнетания от времени (рисунок 3). Каждая из приведенных зависимостей представляет основной фрагмент, характеризующий длительное нагнетание раствора. По этим зависимостям видно, что кривые исходят не из начала координат, хотя при нулевом времени параметры тоже равны нулю. Рассматривая первую, наиболее распространенную схему нагнетания при постоянном давлении, можно утверждать, что расход и скорость распространения раствора должны понижаться при длительном времени нагнетания. Соединив общепринятые параметры с полученными результатами, получаем график, изображенный на рисунке 3.

При глубинном инъецировании невозможно установить зависимость между исходными условиями и установившимся режимом. А при поверхностном инъецировании удалось установить, что при времени нагнетания равном 20 с намечается снижение расхода раствора за счет того, что поры грунта, расположенного вблизи инъектора, перенасыщаются раствором, нарушается ламинарный режим течения и расход раствора уменьшается.

При времени нагнетания равном 30 с расход снижается по отношению к расходу при 20 с, что свидетельствует о наличии пе-

региба кривой в интервале равном 20-30 с.

На основании приведенных данных выбираем время нагнетания при поверхностном инъецировании равное 10-15 с. Кроме технических выводов необходимо руководствоваться условиями производительности процесса инъецирования, которые требуют наименьшего расхода времени.

Исходя из этих соображений можно остановиться на 10 с нагнетания раствора.

Давление. Д. В. Волоцкой [1] рекомендует принимать давление нагнетания раствора в грунт таким образом, чтобы на поверхности покрытия не возникло неровностей и трещин. Для этого допустимое давление устанавливается из условия равновесия системы «масса дорожной одежды – давление в порах грунта» по выражению

$$P_n \leq P_p, \quad (4)$$

где P_n – давление нагнетаемого раствора, МПа; P_p – противодействие от массы вышележащих слоев дорожной одежды, МПа,

$$P_p = \sum \rho_i z_i + A, \quad (5)$$

где ρ_i – плотность конструктивных слоев дорожной одежды, г/см³; z_i – толщина тех же слоев, см; A – коэффициент, учитывающий монолитность слоев дорожной одежды, принимаемый равным 0,2-0,4.

Зависимость давления нагнетания от вида грунта $P = f(K_{\phi})$. Основная характеристика грунта, отражающая эффективность инъецирования, это его фильтрационные свойства.

При глубинном инъецировании растворов в хорошо проницаемые грунты давление составляет 0,3-1,0 МПа, а в непроницаемые (недренирующие) породы – свыше 1,0-1,5 МПа, причем при высоком давлении происходит разрыв сплошности грунта [1]. Давление для поверхностного инъецирования в 5-8 раз ниже, чем для глубинного. График зависимости давления нагнетания от коэффициента фильтрации при поверхностном инъецировании показывает (рисунок 4), что с увеличением фильтрационных свойств грунта давление снижается. Увеличение объема раствора для нагнетания в один и тот же грунт требует большего давления, что сказывается на степени заполнения пор грунта раствором.

Зависимость давления нагнетания от влажности и плотности грунта $P = f(V_w, \rho_d)$. Влажность грунта является важной характе-

ристикой физического состояния породы. От нее зависит возможность придания грунту максимальной плотности. Кроме того, наличие воды в порах грунта сужает фильтрационные каналы и в определенной степени разбавляет раствор, уменьшает его концентрацию. Для характеристики физического состояния породы была определена степень влажности

$$S_r = \frac{V_w}{V_{wmax}}. \quad (6)$$

Выбранные грунты имели $S_r = 0,40-0,43$, что относит их к категории маловлажных. Зависимость давления нагнетания от влажности грунта представлена на рисунке 5, где V_w – влажность грунта; V_{wmax} – полное водонасыщение.

Рассмотрим процесс инъектирования в зависимости от содержания воды в грунте. Вес грунта G можно выразить через объем V_g и его плотность ρ , т. е.

$$G = V_g \rho. \quad (7)$$

Согласно оптимальным значениям влажности, приведенным выше, для получения максимальной плотности грунта необходимое количество воды составит

$$G_{w \text{ опт}} = 0,09 G. \quad (8)$$

Следует учесть, что это количество воды заполняет только 40-43% от объема пор, т.е. примерно такое же пространство в порах остается свободным для заполнения раствором.

Дальнейшие рассуждения приведем на примере стандартного цементного или зольного раствора, представляющей собой продукт, содержащий сухих веществ около 50%. Для закрепления грунта рекомендуется применять 5% вяжущего от веса грунта по сухому остатку, т.е.

$$G_{c.o.} = 0,05 G. \quad (9)$$

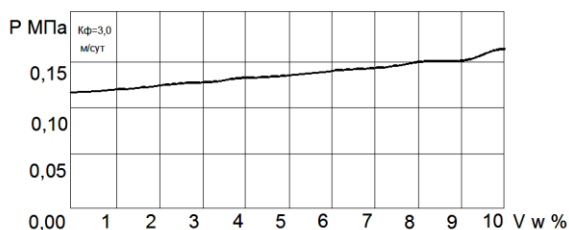


Рисунок 5 – График зависимости изменения давления от влажности грунта

Поскольку сухой остаток разбавляется водой в соотношении 1:1, то в вяжущем содержится такое же количество жидкой фазы

$$G_w = G_{c.o.} = 0,05 G. \quad (10)$$

Общий вес вяжущего

$$G_c = G_w + G_{c.o.} = 0,1 G. \quad (11)$$

Для закрепления грунтов рекомендуется применять растворы различной концентрации и максимального разбавления (1:1)

$$0,1 G + 0,1 G = 0,2 G. \quad (12)$$

В этом весе раствора содержится сухого остатка в количестве, определяемом из выражения 10, а жидкой фазы

$$G_w = 1,5 G. \quad (13)$$

Следует учитывать, что для дополнительного отверждения раствора применяется активатор-отвердитель в количестве 5% от массы вяжущего нормальной концентрации, т.е.

$$G_{от} = 0,05(0,1 G). \quad (14)$$

Тогда общее количество воды в грунте с учетом оптимальной влажности составит

$$V_w = 0,09 G + 0,05 G + 0,005 G = 0,145 G. \quad (15)$$

Следовательно, чтобы получить концентрацию раствора при разбавлении вяжущего водой в соотношении 1:1, необходимо добавить воды в количестве, равном весу отвердителя

$$V_w = 0,15 G - 0,145 G = 0,005 G. \quad (16)$$

Общее количество воды равное 0,15G будет соответствовать степени влажности $S_r=0,71$, и грунт будет относиться к влажным ($0,5 < S_r < 0,8$; согласно ГОСТ 25100-2011 [2]).

Как было сказано выше, оптимальная влажность грунта является обязательным фактором для получения максимальной плотности. Поскольку фильтрационные характеристики определялись у грунта, имеющего максимальную плотность, то экспериментальные исследования по изменению технологических параметров нагнетания показали, что для получения одних и тех же областей пропитки для грунтов с плотностью ниже максимальной, а следовательно. с

большим коэффициентом фильтрации, необходимо создавать меньшее давление, поскольку прежнее приведет к выбросу раствора.

Зависимость давления нагнетания от плотности раствора $P = f(\rho)$. Нагнетание растворов различной плотности приводит к изменению давления нагнетания. Плотность в экспериментальных работах колебалась от 1,1 до 1,2 г/см³. Зависимость изменения давления от рабочей концентрации раствора представлено на графике, изображенном на рисунке 6. Анализ графика показывает, что для нагнетания раствора большей плотности в грунты необходимо применять большее давление.

Учитывая результаты предыдущих исследований, касающихся ламинарного режима течения жидкости, рекомендуем применять для закрепления грунтов следующие концентрации:

- для сухих грунтов — растворы плотностью 1,1-1,2 г/см³;
- для грунтов, имеющих влажность 5-6% — растворы плотностью 1,13-1,23 г/см³;
- для имеющих оптимальную влажность (8-9%) — растворы плотностью 1,2-1,16 г/см³;
- для имеющих повышенную влажность (до 15%) — раствор плотностью 1,2 г/см³ и в количестве на 1-3% больше, чем для закрепления грунтов с оптимальной влажностью.

Зависимость давления от времени нагнетания раствора $P = f(t)$. При инъектировании одним из главных параметров является время нагнетания, поскольку от него зависит качество инъектирования и производительность технологического процесса. Естественно, чем больше время нагнетания, тем больше область пропитки. Однако наряду с увеличением радиуса распространения раствора увеличивается и глубина пропитки, возникает объем перенасыщенный вяжущим материалом, что затруднит уплотнение и повысит расход материала. На основании экспериментальных данных построен график зависимости создаваемого давления от времени пропитки (рисунок 7). На основании графика можно сделать вывод, что большее давление необходимо применять при малом времени нагнетания.

Зависимость давления от глубины нагнетания $P = f(h)$. В результате экспериментальных исследований определены минимальные значения грунтовой толщи (толщины земляного полотна), при которых давление раствора, выходящего из инъектора, было выше, чем давление массы грунта, с уче-

том сил сопротивления сдвигу. Расчетные и экспериментальные данные ($K_f = 3,0$ м/сут.) позволили построить график зависимости давления от глубины нагнетания (рисунок 8).

Заштрихованная часть графика включает нестабильные результаты, при которых возможен выброс раствора. Данная зависимость легла в основу разработки конструкции инъектора. В предварительных опытах по нагнетанию раствора в поверхностные слои земляного полотна длина инъектора колебалась в пределах 0,21-0,15 м. После получения данных, характеризующих режимы нагнетания, длина была принята равной 150 мм.

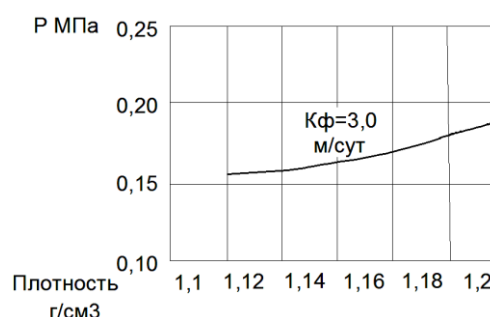


Рисунок 6 – График зависимости давления нагнетания от плотности раствора

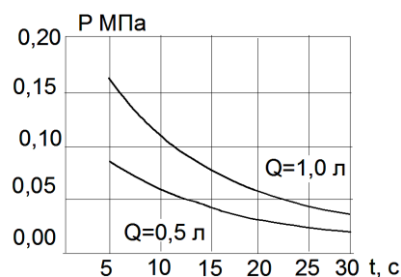


Рисунок 7 – График зависимости давления от времени нагнетания

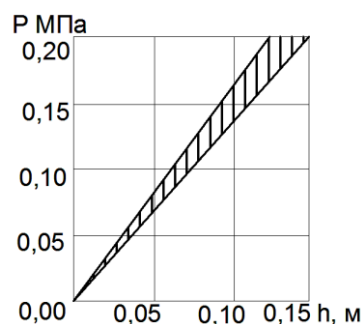


Рисунок 8 – График зависимости от глубины нагнетания

Таблица 1 – Ориентировочные значения радиуса распространения раствора

Коэффициент фильтрации грунта, м/сут	Радиус закрепления грунта, м	Коэффициент фильтрации грунта, м/сут	Радиус за- крепления грунта, м
0,1-0,3	0,2-0,3	5-10	0,65-0,85
0,3-1	0,3-0,5	10-20	0,8-0,95
1-5	0,5-0,65	20-50	0,9-1,0

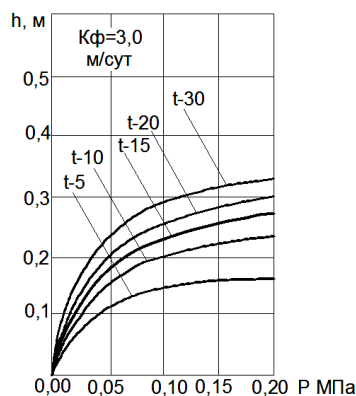


Рисунок 9 – График зависимости глубины распространения раствора от давления

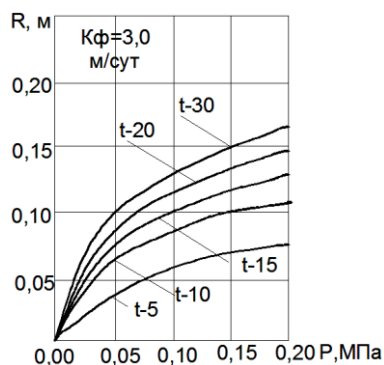


Рисунок 10 – График зависимости радиуса распространения от давления

Радиус пропитки. На основании опытных данных построены графики зависимости глубины распространения раствора от создаваемого давления (рисунок 8). Анализ графиков показывает, что с увеличением давления и времени нагнетания увеличивается глубина проникания раствора, причем для сферического инъектора эта глубина имеет большее значение, чем для радиального.

Основным параметром, определяющим эффективность инъектирования, является радиус распространения раствора, величина которого зависит не только от технологических параметров, но и от характеристики

грунта и вязкости раствора. В зависимости от проницаемости раствора ориентировочное значение радиуса распространения раствора [1] при глубинном инъектировании можно определить по таблице 1.

При нагнетании вязких растворов в верхние слои земляного полотна получены экспериментальные данные, на основании которых построены графики зависимости радиуса распространения раствора от создаваемого давления (рисунок 10).

На основании экспериментальных данных и расчета средних значений из числа опытов, выполненных в соответствии с требованиями статистической обработки, устанавливалась корреляционная связь между технологическими параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волоцкой, Д. В. Основы глубинного закрепления грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Д. В. Волоцкой. – М. : Транспорт, 1978. – 119 с.
2. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС), 2013. – 13 с.
3. СТО НОСТРОЙ 2.3.18-2011. Укрепление грунтов инъекционными методами в строительстве. – М. – 35 с.
4. СТО НОСТРОЙ 109-2013. Устройство грунтовых анкеров, нагелей и микросвай. Правила и контроль выполнения, требования к результатам работ. – М. – 45 с.
5. Инъекционное укрепление грунтов при строительстве подземных сооружений. – Режим доступа: <http://гидроизоляция-жидкийрубероид.рф/inject>.
6. Закрепление грунтов методом инъекции растворов. – Режим доступа: http://www.msogeostroy.ru/page/zakreplenie_gruntov_metodom_inekcii_rastvorov.

Носков И.В. – к.т.н., заведующий кафедрой «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: noskov.56@mail.ru.

Ананьев С.А. – заведующий лабораторией кафедры «Технология и механизация строительства» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: ananda_hasita@mail.ru.

Каныгин А.В. – магистрант группы 8С-71 ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И. И. Ползунова, E-mail: andrej.kanygin.2017@mail.ru.