

# Особенности исследований процесса инъектирования несвязных грунтов в подземном строительстве<sup>1</sup>

Насонов И.Д., д-р техн. наук, проф., лауреат Государственных Премий СССР, научн. консультант; Шилин А.А., д-р техн. наук, проф., ген. директор; Щукина А.Б., инж., ЗАО «Триада-Холдинг», Москва

## Аннотация

Выполнено физическое моделирование процесса инъектирования в несвязных грунтах с целью установления основных закономерностей процесса закрепления несвязных грунтов, а также определения величины основных параметров технологии в зависимости от естественных физических свойств грунтов и инъекционных растворов. Проведен анализ влияния основных параметров процесса инъектирования на свойства укрепляемых грунтов. Оценены объемы укрепленного грунта в зависимости от параметров нагнетания инъекционного раствора и режимов выбранной технологической схемы производства работ.

## Ключевые слова

Инъектирование, моделирование, раствор.

## Abstract

Physical modeling of injections into loose soil is described aimed at defining the basic principles and setting the values of the main parameters both of the injection environment and the grouts. Influence of the main injection parameters on soil properties after injecting is analyzed. Volumes of consolidated soil masses are evaluated depending on the selected injection technology and grout type.

## Ключевые слова

Grout; injection technology; modeling

С каждым годом объем работ по закреплению пород инъекционными растворами возрастает. В основном это связано с ростом подземного строительства в районах со сложными гидрогеологическими условиями.

В зависимости от материала, который применяется для закрепления грунтов методом инъектирования, различают следующие его виды: цементация, глинизация, силикатизация, смолизация. Выбор материала для инъектирования зависит от ряда факторов [1].

Описание движения раствора в грунтах является сложной задачей при представлении процесса в виде как ньютоновской, так и неньютоновской жидкости [2]. Если же рассматривать производственный опыт и анализировать его в отношении выбора режимов и параметров инъектирования, то и здесь нельзя выявить четкие закономерности. Это связано, как правило, с различными гидрогеологическими состояниями

закрепляемых массивов, что не позволяет зачастую обеспечить закрепление массива, придав ему заданные проектом характеристики.

Весьма ценными для решения этой задачи являются аналитический и физический методы моделирования [3]. Однако аналитическое моделирование требует в ряде случаев введения допущений, которые не всегда адекватно отражают существо процесса и тем самым снижают практическую ценность результатов. Физическое же моделирование, на наш взгляд, является наиболее надежным. Но при его применении также возникают определенные трудности.

Для разработки физической модели инъектирования грунтов необходимо рассмотреть теоретические основы подобия гидродинамических процессов движения растворов и проанализировать существующий производственный опыт.

При физическом моделировании гидродинамических процессов рассматривается подобие движения стационарного течения несжимаемой вязкой жидкости для случаев наличия и отсутствия влияния сил тяжести, а также вязкостное и инерционное течение. В дальнейшем авторами рассматривается только процесс течения при наличии влияния сил тяжести, так как остальные разновидности течения жидкости являются частными случаями [4].

Дифференциальные уравнения, описывающие этот вид течения как для модели, так и для природы, имеют аналогичный вид:

– уравнение движения:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

– уравнения сплошности:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + g + \nu \nabla^2 v_x, \quad (2)$$

<sup>1</sup> Статья печатается в сокращенном виде

где  $v_x$  – компонента скорости по оси  $x$ ;  
 $\rho$  – плотность жидкости;  
 $g$  – ускорение силы тяжести;  
 $p$  – удельное давление жидкости;  
 $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости;

$\nabla$  – оператор Лапласа.

Краевые условия в рассматриваемой задаче не могут содержать никаких других физических переменных, кроме скорости, которая может быть задана на границе в виде уравнения, выражающего скорость как функцию координаты точек границы. Это связано с тем, что скорость является определяющим параметром, влияние которого на процесс по сравнению с остальными наиболее значительно.

Если рассматривается течение жидкости внутри какого-либо изучаемого объекта (например, трубопровода), то его границами следует считать входное сечение потока (там имеют место управляемые краевые условия) и поверхности твердых стенок, ограничивающих поток, где имеют место неуправляемые граничные условия. Однако поскольку это условие автоматически соблюдается и в модели, и в натуре, задание краевых условий сводится лишь к заданию скорости на входном сечении изучаемого объекта [2, с. 107].

Поскольку в рассматриваемой задаче размерность скорости может быть представлена в виде

$$[v] = [\sqrt{gl_0}], \quad (3)$$

то граничные условия могут быть записаны в виде:

$$v_{r,x} = f_x(x_r, y_r, z_r, l_r, g), \quad (4)$$

где  $l_i$  – геометрический параметр моделируемого объекта.

Для приведения уравнений (1) и (4) к безразмерному виду выполним масштабные преобразования:

$$x = l_0 X; v_x = v_0 V_x; p = p_0 P; g = g_0 G; v_{r,x} = v_0 V_{r,x}; \nu = \nu_0 N; \rho = \rho_0 R, \quad (5)$$

где величины, отмеченные индексом «0», являются размерными масштабами.

После внесения масштабных преобразований в уравнения (1) и (4) получим:

$$\left[ \frac{v_0^2}{l_0} \right] \left( V_x \frac{\partial V_x}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial Z} \right) = - \left[ \frac{p_0}{\rho_0 l_0} \right] \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial X} + [g_0] G + \left[ \frac{v_0 \nu_0}{l_0} \right] N \nabla^2 V_x; \quad (6)$$

$$\left[ \frac{v_0}{l_0} \right] \left( \frac{\partial V_x}{\partial X} + \frac{\partial V_y}{\partial Y} + \frac{\partial V_z}{\partial Z} \right) = 0; \quad (7)$$

$$[v_0] V_{r,x} = f_x(l_0 X_r, l_0 Y_r, l_0 Z_r, l_0 L_r, g_0 G). \quad (8)$$

Для приведения этих уравнений к безразмерному виду необходимо

$$\frac{v_0^2}{l_0} = \frac{p_0}{\rho_0 l_0} = g_0 = \frac{v_0 \nu_0}{l_0}. \quad (9)$$

Из условия (9) можно получить три уравнения связи, которые содержат шесть масштабов. Следовательно, любые три из них, имеющие независимые размерности, можно выбрать, например,  $l_0 = l$ ,  $\rho_0 = \rho$ ,  $g_0 = g$ , а три остальных определить из уравнения связи (9):

$$v_0 = [gl_0]^{\frac{1}{2}}; \rho = \rho gl_0; \nu = (gl_0^3)^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

Тогда выражения для безразмерных величин можно записать как

$$\begin{cases} L_i = \frac{l}{l_0}; V = \frac{v}{(gl_0)^{\frac{1}{2}}}; \\ P = \frac{p}{\rho gl_0}; N = \frac{\nu}{(gl_0^3)^{\frac{1}{2}}}; \\ G = 1; R = 1 \end{cases} \quad (11)$$

где  $l$  – радиус-вектор;

$L$  – безмерный радиус-вектор какой-либо точки в потоке;

$G$  – единичный вектор.

Уравнение движения

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial Z} = 1 - \frac{\partial R}{\partial X} + N \nabla^2 V_x. \quad (12)$$

Уравнение сплошности

$$\frac{\partial V_x}{\partial X} + \frac{\partial V_y}{\partial Y} + \frac{\partial V_z}{\partial Z} = 0. \quad (13)$$

Граничные условия

$$V_{r,x} = F_x(X_r, Y_r, Z_r, L_i). \quad (14)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (12) и (13), удовлетворяющей граничным условиям (14), можно представить в виде:

$$\begin{aligned} V_x &= F_x(X, Y, Z, V_r, V_r, V_r, N); \\ P &= F_p(X, Y, Z, V_r, V_r, V_r, N). \end{aligned} \quad (15)$$

Следовательно, для соблюдения подобия двух потоков необходимо и достаточно осуществить равенство безразмерной скорости на границе потока в модели и образце, а также равенство критерия  $N$  в сравниваемых потоках, т.е.

$$(V_r)_M = (V_r)_N; (N)_M = (N)_N. \quad (16)$$

<sup>2</sup> С целью сокращения уравнение движения Навье-Стокса написано лишь для проекции на ось  $X$ .

Следует заметить, что имеющие весьма широкое применение критерии  $Re$ ,  $Eu$ ,  $Fr$  могут быть представлены как степенные функции критериев  $V$ ,  $P$ ,  $N$ . Воспользовавшись (11), получаем:

$$\frac{V}{R} = \frac{v_{l0}}{v} = Re; \frac{P}{v^3} = \frac{p}{\rho v^2} = Eu; V^2 = \frac{v^2}{gl_0} = Fr. \quad (17)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса;

$Eu$  – критерий Эйлера;

$Fr$  – критерий Фруда.

Следовательно, чтобы получить гидродинамическое подобие процесса на модели, необходимо обеспечить соблюдение равенства критериев  $Re$ ,  $Eu$ ,  $Fr$  для модели и для натуре, чего добиться в лабораторных условиях весьма трудно, а часто и невозможно.

В связи с этим при физическом моделировании безусловно выполняют только условия наиболее существенных, определяющих критериев подобия, которые устанавливаются в зависимости от типа изучаемой задачи и целей исследования [5].

Исходя из изложенного, физическая модель должна быть разработана с учетом следующего.

1. Учение о подобии стационарных физических полей подразумевает, что подобные физические процессы протекают только в геометрически подобных системах. Поэтому геометрический масштаб моделирования можно задавать произвольно.

2. Необходимо обеспечить равенство критериев подобия  $Re$ ,  $Eu$ ,  $Fr$  и максимально упростить процесс моделирования. Целесообразно в качестве материала модели использовать естественные песчаные или обогащенные грунты с различной гранулометрией, а также растворы, наиболее часто применяемые в практике инъекционных работ.

3. При зажимном способе (раствор подается при постоянном расходе и увеличивающемся давлении нагнетания) нагнетания движение инъекционного раствора осуществляется только в горизонтальном направлении. Движение раствора в вертикальном направлении отсутствует, так как нет перепада давления. Следовательно, совершенно объективно исследование объемной (трехмерной) задачи сводится к исследованию плоской (двухмерной) задачи.

4. В связи с изложенным в пунктах 1–3 при моделировании процесса инъектирования значение параметра сил тяжести не имеет существенного

значения, и процесс нагнетания может рассматриваться как течение жидкости без влияния сил тяжести и даже, более того, – как вязкостное течение, при котором подобие процесса инъектирования грунтов может быть осуществлено независимо от размеров модели.

В соответствии с требованиями условий подобия для производства экспериментальных работ может быть сооружена модель в виде ванны-лотка.

Рассмотрим краевые условия подобия для модели.

Каждый раз в начале опыта задаются параметры водонасыщенности грунта. При каждом опыте также задается величина давления раствора на входном сечении трубопровода. Граничные условия движения раствора также выполняются просто: на всей внутренней поверхности модели имеет место наличие неуправляемых граничных условий ( $V = 0$ ), которые соблюдаются автоматически; граничные условия на входном сечении ванны-лотка задаются как изменение величины давления раствора на входном сечении подающего трубопровода.

Определение границы продвижения раствора в ванне-лотке во времени может быть реализовано различными способами: подкрашиванием раствора, электроизмерением, георадаром и т.д.

Для установления основных закономерностей процесса инъектирования, а также для определения основных параметров была сооружена экспериментальная модель на базе завода по производству сухих строительных смесей «СПС» в индустриальном парке «Ворсино» Калужской обл. Созданный полигон (модель), выполненный в натуральную величину, удовлетворяет всем критериям и условиям подобия.

Экспериментальный полигон включал камеру (рис.1) из монолитного железобетона сечением  $3 \times 4$  м и траншеей длиной 20 м. Засыпка траншеи осуществлялась различными песками – как обогащенным, так и карьерным. Грунт засыпки уплотнялся и напитывался водой до полного водонасыщения.

Для производства инъекционных работ в экспериментах использовались различные составы на основе минеральных и органических вяжущих (раствор жидкого стекла, цементные растворы, карбамидная смола, гидроактивный пенополиуретан и др.).



Рис. 1. Монолитная железобетонная камера



Рис. 2. Проведение георадиолокационных исследований распространения инъекционных растворов в песках

Для определения параметров закрепления и характеристик укрепленного грунтового массива на испытательном полигоне производилось вскрытие траншеи. Контроль распределения составов в грунтах производился различными методами (рис. 2).

На основании проведенных исследований и выполненных экспериментов сформулированы следующие выводы:

- физическое моделирование процессов инъектирования несвязных грунтов может быть решено с помощью специального экспериментального полигона с соблюдением геометрических и граничных условий подобия;

- созданный полигон позволяет определить не только геометрические параметры распространения раствора в различных по плотности, влажности и составу грунтах, но и отработать технологию производства работ, используя в каждом

конкретном случае грунты объекта, где планируется выполнение инъекций;

- успешно применена технология укрепления грунтов различной гранулометрии при коэффициентах фильтрации более 1,6 м/сут. с использованием как ньютоновских, так и неньютоновских растворов;

- разработанная методика отбора составов для укрепления песчаных грунтов позволяет предварительно оценить основные параметры на лабораторных моделях, учитывающих соблюдение основных критериев, определяющих успешное протекание процесса. Выбранные растворы продолжают исследоваться на полигоне при нагнетании в пески различного гранулометрического состава, влажности и плотности;

- проведенные научные и экспериментальные исследования позволяют эффективно использовать технологию фильтрационного укрепления песчаных грунтов, корректируя как состав и вязкость растворов, так и технологические параметры производства работ.

Следует отметить, что физическое моделирование процесса инъектирования несвязных грунтов является весьма сложной, но решаемой задачей, требующей детальной проработки как в теоретическом, так и в экспериментальном аспекте.

Физическое моделирование процесса инъектирования позволяет определить области возможного применения инъекционного упрочнения дисперсных грунтов в каждом конкретном случае, подобрать необходимый состав раствора и технологию производства работ, что позволит предупредить возможные осложнения как в процессе производства работ, так и при последующем использовании грунтового массива.

#### Литература

1. Эйгенсон Л.С. Моделирование. – М.: Советская наука, 1952.
2. Насонов И.Д. Моделирование горных процессов. – М.: Недра, 1978.
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957.
4. Кирпичев М.В., Михеев М.А. Введение в теорию подобия – М.: Энергоиздат, 1963.
5. Насонов И.Д., Ресин В.И. Моделирование физических процессов в горном деле – М.: Изд-во Академии горных наук, 1999.

Для связи с авторами:

Щукина Анастасия Борисовна: 8-964-572-7143;

schukina@triadaholding.ru