

ФИЛЬТРАЦИЯ ВЛАГИ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ТРИКОТАЖНОГО ГЕОКОМПОЗИТА*

WATER FILTRATION THROUGH A LAYER OF KNITTED GEOCOMPOSITES

Г.В. БАШКОВА, А.П. БАШКОВ, С.В. СОКОЛОВА
G.V. BASHKOVA, A.P. BASHKOV, S.V. SOKOLOVA

(Ивановский государственный политехнический университет. Текстильный институт)
(Ivanovo State Polytechnic University. Textile Institute)
E-mail: milena55@yandex.ru

В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением объемов влаги, фильтрующейся через слой грунта, укрепленного льняным трикотажным полотном сетчатой структуры, приводится методика расчета соотношения массы грунта и текстильной волокнистой составляющей, что позволяет оптимизировать структуру геокompозита.

The article discusses issues related to the definition of the volume of water filtered through a layer of soil linen knitted fabric reinforced mesh structure, the technique of calculating the ratio of the soil mass and the textile fiber content to optimize the structure of the geocomposites.

Ключевые слова: геокompозит, льняные трикотажные геополотна, фильтрация влаги, дренирование слоя грунта, оптимизация структуры геокompозита.

Keywords: geocomposites, flax warp-knitted geotextiles, water filtration, drainage of the soil layer, optimize the structure of geocomposites.

В настоящее время в мировой практике все шире используются геоматериалы из натуральных волокон. Сведения о преимуществах трикотажных геосеток из льносодержащей пряжи и условиях их работы при заглублении в грунт приведены в работе [1]. Однако очень часто геоматериалы, армирующие грунт, то есть геокompозиты, работают в условиях переувлажнения. Очень важно, чтобы при переувлажнении прочность армирующей составляющей не снижалась, и влагообмен между грунтом и текстильным материалом был максимально активен. Это способствует не только сохранению механических свойств геоматериала, но и дренированию почвы.

При решении подобной задачи необходимо рассматривать капиллярные свойства обеих составляющих геокompозита, с учетом влияния внешних силовых нагрузок.

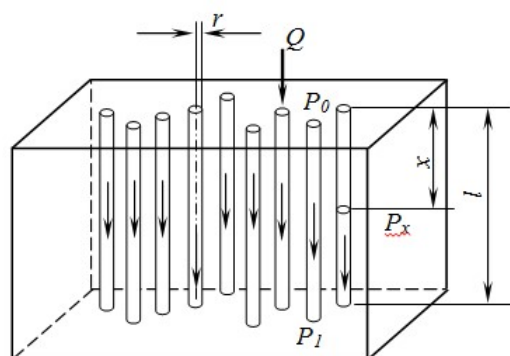


Рис. 1

* Статья подготовлена в рамках выполнения гранта ИГТА для поддержки молодых исследователей. Работа выполнена под руководством докт. техн. наук Г.В. Башковой.

Рассмотрим фильтрацию воды через двухкомпонентный пористый слой. Течение вязкой жидкости с малой скоростью через искривленный капилляр можно рассматривать как ламинарное. Известна модель для описания данного вида фильтрации (рис. 1) с использованием закономерностей течения через капилляр Гагена-Пуазейля [2], [3]:

$$Q = \pi r^4 (P_0 - P_1) / 8\mu\ell,$$

$$v_m = r^2 (P_0 - P_1) / 4\mu\ell, \quad (1)$$

$$\bar{v} = 0,5v_m = Q / \pi r^2,$$

$$\tau = 4\mu\bar{v} / r = r(P_0 - P_1) / 2\ell,$$

где r – радиус капилляра; Q – расход жидкости через капилляр; v_m и \bar{v} – соответственно наибольшая и средняя скорости жидкости; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости; P_0 и P_1 – соответственно силы давления жидкости на входе и выходе капилляра; τ – касательное напряжение сил трения на стенках капилляров. Деформируемый волокнистый слой трикотажной структуры и слой грунта можно считать состоящими из несжимаемой массы m (единичное волокно и частица грунта практически таковыми и являются), занимающей объем V , и капилляров, объем которых

$$V_1 = \pi r^2 \ell n, \quad (2)$$

где n – число капилляров.

Тогда средняя плотность деформируемой среды будет:

$$\bar{\gamma} = m / (V + V_1). \quad (3)$$

Отсюда следует, что

$$r^2 = \bar{r}^2 (\gamma_m - \bar{\gamma}), \quad (4)$$

где \bar{r} и $\bar{\gamma}$ – средний радиус капилляров и средняя плотность фильтрующего слоя соответственно при нулевом расходе жидкости; γ_m – предельная плотность пористого слоя при очень сильном сжатии.

Если через F обозначить сжимающее усилие, то зависимость $\gamma(F)$ можно аппроксимировать выражением:

$$\gamma = \gamma_m \{1 + \beta [1 - \exp(-\alpha F)]\} / (1 + \beta), \quad (5)$$

где $\alpha > 0$ и $\beta > 0$ – константы, определяющие механические свойства фильтрующего материала, которые находятся путем испытаний. Характер зависимости плотности пористого слоя от сжимающего усилия (5) показан на рис. 2.

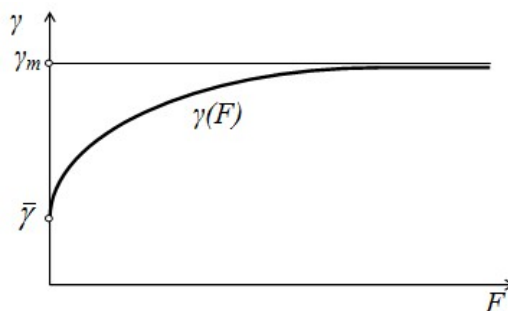


Рис. 2

Из выражения (5) следует, что при $F=0$ $\gamma = \bar{\gamma}$, а при $F \rightarrow \infty$ $\gamma \rightarrow \gamma_m$. Перепишем выражение Гагена-Пуазейля в дифференциальном виде:

$$dP = -8\mu Q \pi^{-1} r^{-4}(x) dx \quad (6)$$

и учитывая выражения (4) и (5), а также, что $F = -\Delta P = -(P_0 - P_1)$, получим текущее давление $P(x)$ в точке с координатой x :

$$P(x) = P_0 - P_1. \quad (7)$$

После интегрирования

$$\exp(2\alpha P) dP = -8\mu Q \pi^{-1} r^{-4}(x) dx \quad (8)$$

получим:

$$P = 0,5\alpha^{-1} \ln\left(1 - \frac{x}{x_m}\right), \quad (9)$$

где x_m – характерная толщина фильтрующего слоя, при которой он не способен пропустить заданный расход жидкости Q при любом напоре:

$$x_m = \frac{\pi\bar{\Gamma}^4 n}{16\mu\alpha Q}. \quad (10)$$

Соответственно можно записать, что плотность фильтрующего слоя и радиус капилляров на глубине x будет:

$$\gamma = \gamma_m \frac{1 + \beta(1 - \sqrt{1 - x/x_m})}{1 + \beta}, \quad (11)$$

$$r^2 = \bar{r}^2 \sqrt{1 - x/x_m}. \quad (12)$$

Толщину составляющих фильтрующего слоя с учетом сжатия от гидравлического давления можно определить из выражения:

$$\int_0^1 \gamma(x) dx = \bar{\gamma} \ell_0, \quad (13)$$

а толщину слоя можно вычислить из соотношения:

$$\frac{\ell_0}{\ell} = 1 + \beta - \frac{2}{3}\beta \frac{1 - \exp(-3\alpha\Delta P)}{1 - \exp(-2\alpha\Delta P)}. \quad (18)$$

Слой грунта, армированный трикотажным полотном, достаточно тонок, и его деформация в абсолютных величинах незначительна, поэтому параметры α и β можно считать очень близкими по значе-

где ℓ_0 – толщина слоя при отсутствии давления жидкости.

С учетом выражения (11) толщина слоя может быть найдена как

$$\ell = Zx_m, \quad (14)$$

где Z удовлетворяет трансцендентному уравнению, решаемому численными методами:

$$Z_0 = (1 + \beta)Z + \frac{2}{3}\beta \left[(1 - Z)^{\frac{3}{2}} - 1 \right], \quad (15)$$

в котором $Z_0 = \ell_0/x_m$.

В процессе деформации соблюдается закон сохранения массы:

$$\bar{\gamma} dx_0 = \gamma dx, \quad (16)$$

где dx_0 и dx – элементарные длины фрагментов пористой массы в направлении сжатия в исходном и деформированном состояниях.

При этом расход жидкости через деформируемую массу слоя может определяться из выражения:

$$Q = \frac{\pi\bar{\Gamma}^4 n}{16\mu\alpha\ell_0} \left\{ (1 + \beta) [1 - \exp(-2\alpha\Delta P)] - \frac{2}{3}\beta [1 - \exp(-3\alpha\Delta P)] \right\}, \quad (17)$$

нию к 1. Если не учитывать деформацию слоя, то расход жидкости через него можно выразить

$$Q_0 = \frac{\pi\bar{\Gamma}^4 n}{16\mu\alpha\ell_0} \Delta P, \quad (19)$$

таким образом,

$$Q = Q_0 f(P), \quad (20)$$

$$f(P) = \frac{(1 + \beta) [1 - \exp(-2\alpha\Delta P)] - \frac{2}{3}\beta [1 - \exp(-3\alpha\Delta P)]}{2\alpha\Delta P}. \quad (21)$$

Из приведенных выражений видно, что

силы давления P и реакции F слоя, а также

плотность самого слоя γ увеличиваются с возрастанием координаты x , то есть с приближением к плотному водоупорному основанию.

Если известен коэффициент пористости ε и $\ell = \ell_0$, как в нашем случае, то с учетом выражений (2) и (3) можно записать:

$$n = \frac{V_0 \varepsilon}{\pi \bar{\Gamma}^2 \ell} = \frac{S_0 \varepsilon}{\pi \bar{\Gamma}^2}, \quad (22)$$

где V_0 и S_0 – общий объем и площадь соответственно анализируемого участка грунта, армированного геополотном.

Тогда с учетом (22) запишем выражение (19) в виде:

$$Q_0 = \frac{\bar{\Gamma}^2 S_0 \varepsilon}{16 \mu \ell} \Delta P. \quad (23)$$

При увлажнении более активно насыщается влагой грунт, поскольку его поры шире, а сами частицы грунта не гигроскопичны. Несущую способность грунта оценивают по сопротивлению сдвигу, то есть по значениям угла внутреннего трения. При полном насыщении влагой песка этот угол уменьшается на $2...3^\circ$, а при содержании мелкодисперсных частиц более 50% – на 7° [4]. Несущая способность такого грунта снижается на 40%. Это ослабляет его верхний слой, и на склонах он начинает сдвигаться, то есть начинаются процессы водной эрозии. Затем грунт передает свою влагу волокнистой составляющей. Чем больше ее гигроскопичность, тем быстрее осушается грунт и маловероятней его перемещение. Определение минимально необходимого дренажа влаги позволит найти оптимальное соотношение массы грунта и волокнистой составляющей в верхнем слое.

Коэффициент пористости ε пылеватого песка 0,39, средний размер частицы, а соответственно и поры 0,25 мм, плотность частицы $2,66 \text{ т/м}^3$, плотность грунта $1,62 \text{ т/м}^3$. При толщине слоя 25 мм разность давления ΔP в капиллярах составит 0,25 Па, коэффициент динамической вязкости

воды при 10°C будет равен $1,308 \times 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Подставляя эти значения в формулу (23), получим расход жидкости при фильтрации через 1 м^2 . Он составит $1,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Для успешного дренирования такой же расход необходимо поддерживать в текстильной составляющей, в первую очередь, за счет высокой влагоемкости лубяных волокон. При этом решается обратная задача: по заданному расходу определяется необходимая масса волокнистой составляющей геокомпозита.

Площадь контакта текстильного полотна с частицами грунта за счет его структурных свойств значительно больше, чем площадь участка, а соответственно больше и число капилляров. Исследуемый образец полотна [1] был получен из льняной пряжи $T=63,4$ текс, диаметром 0,48 мм, поверхностной плотностью 351 г/м^2 , толщиной 5,8 мм. При этих параметрах площадь внешней поверхности нитей составит $4,17 \text{ м}^2$. Средний размер капилляров примерно соответствует средней толщине волокна (без учета капиллярности самого волокна) и составляет 15 мкм. Плотность химически чистой монолитной целлюлозы 1500 кг/м^3 . Фильтрация происходит через тело пряжи, поэтому необходимо учитывать ее пористость. Объемный вес пряжи, из которой сформировано полотно, 350 кг/м^3 , коэффициент пористости пряжи 0,77. При этих значениях расход жидкости при фильтрации составит $1,49 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Как видим, даже в первом приближении, расчет фильтрации показал, что полученное полотно способно защитить склон от размывания и переувлажнения. В данном расчете не учитывались силы сцепления частиц грунта с нитями полотна, что вносит дополнительный укрепляющий эффект.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета фильтрации влаги через слой геокомпозита на основе льносодержащего трикотажного полотна, что позволяет прогнозировать достаточную для дренирования волокноемкость изделия.

2. Проведенный расчет показал пригодность экспериментального образца трикотажа к использованию в качестве основы геокompозита для укрепления склонов и для предотвращения поверхностной эрозии грунтов сложных рельефов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Башкова Г.В., Башков А.П., Алешина Д.А., Соколова С.В. Проектирование основных свойств трикотажных геополотен // Изв. вузов. Технол. текстильной промышленности. – 2013, № 3. С.159...162.

2. Зарубин В.М., Балаев Э.Ф., Ясинский Ф.Н. К вопросу о фильтрации через деформируемую пористую среду // Изв. вузов. Технол. текст. пром-сти. – 1991, № 4. С.42...44.

3. Федоткин И.М., Воробьев Е.И., Вьюн В.И. Гидродинамическая теория фильтрования суспензий. – Киев: Вища школа, 1986.

4. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов.– М.: Стройиздат, 1979.

Рекомендована кафедрой механической технологии текстильных материалов. Поступила 09.10.13.
