

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНА В ОКРЕСТНОСТИ ПУСТОТЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ ЕЕ ЗАМОРАЖИВАНИИ

**Вербицкая О. Л., к.т.н., доцент**

Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

Рассмотрена задача определения напряженного состояния пористого бетона при его замораживании. Рассмотрен пример и определены эквивалентные напряжения в окрестности замершей воды в ячейке.

**Ключевые слова:** напряженное состояние, пора, заполненная льдом

Рассматривается задача определения напряженного состояния пористого бетона при его замораживании. Используется модель, состоящая из вложенных друг в друга двух цилиндров (рис. 1). Внутренний цилиндр моделирует ячейку, заполненную водой, а внешний – материал, окружающий эту ячейку.

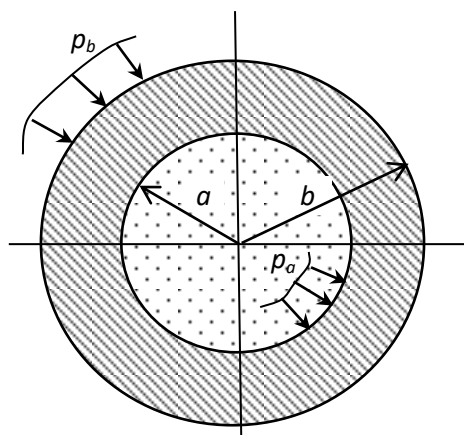


Рис. 1 Моделирование ячейки, заполненной льдом

Механические характеристики льда, образовавшегося в пустоте, зависят от температуры и солёности. Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона льда  $E_z = 3,0 - 11,0$  ГПа,  $\nu_z = 0,31 - 0,36$  [1], [2].

Для решения задачи о напряженном состоянии полого цилиндра, нагруженного на внутренней и на внешней поверхностях равномерно распределенными нагрузками  $p_a$ ,  $p_b$ , получены выражения для радиального и тангенциального напряжений [3] (1).

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} + \frac{(p_a - p_b) a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r^2}; \quad \sigma_r = \frac{p_a a^2 - p_b b^2}{b^2 - a^2} - \frac{(p_a - p_b) a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r^2} \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – радиусы внутренней и внешней поверхности цилиндра.

В свободном состоянии превращение воды в лед приводит к увеличению объема за счет расширения льда примерно на 11%, обозначим его  $k_0$

$$k_0 = \frac{V_0}{V_p} = 1,1, \quad (2)$$

где  $V_0$  – объем ячейки после замерзания воды  $V_0 = \pi(a + u_0)^2 l$ ;

$V_p$  – объем ячейки до замерзания воды  $V_p = \pi a^2 l$ ;

$l, u_0$  – длина и линейное расширение ячейки, то есть увеличение ее радиуса.

Определим радиальное перемещение точек поверхности ячейки за счет такого расширения. Подставим выражения для объемов  $V_0$  и  $V_p$  в уравнение (2)

$$(a + u_0)^2 = a^2 \cdot k_0. \quad (3)$$

В результате решения уравнения получим значение перемещения

$$u_0^2 + 2au_0 + (1 - k_0)a^2 = 0. \quad u_0 = (\sqrt{k_0} - 1) \cdot a. \quad (4)$$

Рассмотрим цилиндрическое тело, радиуса  $a$  и не содержащее внутреннюю полость. Цилиндрическое тело загружено только по своей поверхности нагрузкой  $p_a$ , которая направлена внутрь. Радиальное перемещение и коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются с учетом отсутствия внутренней полости:

$$u = Ar + \frac{B}{r} \quad A = \frac{-p_a \cdot a^2}{a^2} \frac{1 - \nu_z}{E_z} = -\frac{1 - \nu_z}{E_z} p_a; \quad B = 0, \quad (5)$$

Если  $r = a$ , то перемещение поверхности ячейки за счет расширения от замерзания воды в ней и от давления на ее поверхность выражается функцией

$$u_z(p_a) = u_0 + A \cdot a = u_0 - \frac{1 - \nu}{E_z} p_a a, \quad (6)$$

Радиальное и тангенциальное напряжения во всех точках поры, заполненной льдом, одинаковые и равные давлению на поверхность поры. То есть, лед в поре испытывает всестороннее сжатие. Учитывая, что на внешней поверхности нагрузка  $p_b$  отсутствует, коэффициенты  $A$  и  $B$  выражаются по формулам

$$A = \frac{p_a \cdot a^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1 - \nu_b}{E_b}; \quad B = \frac{p_a \cdot a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1 + \nu_b}{E_b}, \quad (7)$$

Получим функцию перемещений точек бетона на его внутренней поверхности от давления между льдом поры и бетоном. Для этого принимаем  $r = a$ .

$$u_b(p_a) = p_a \left[ \frac{a^3(1 - \nu_b)}{(b^2 - a^2)E_b} + \frac{ab^2(1 + \nu_b)}{(b^2 - a^2)E_b} \right]. \quad (8)$$

Для обеспечения совместности деформаций поры, заполненной льдом и материалом, окружающим пору, составим уравнение и найдем взаимное давление льда поры и окружающего ее бетона

$$u_z(p_a) + u_b(p_a) = 0, \quad (9)$$

Решение уравнения (9) представим в следующем виде

$$p_a = \frac{u_0}{k_1 + k_2 + k_3}, \quad (10)$$

$$k_1 = \frac{a(1-\nu_z)}{E_z}; \quad k_2 = \frac{a^3(1-\nu_b)}{(b^2 - a^2)E_b}; \quad k_3 = \frac{ab^2(1+\nu_b)}{(b^2 - a^2)E_b}.$$

Учитывая выражение для  $u_0$ , получим

$$p_a = \frac{(\sqrt{k_0} - 1)a}{k_1 + k_2 + k_3}. \quad (11)$$

Учитывая, что  $p_b = 0$ , получим напряжения в окрестности поры

$$\sigma_r = \frac{p_a a^2}{b^2 - a^2} - \frac{p_a a^2 b^2}{(b^2 - a^2)r^2}; \quad \sigma_\theta = \frac{p_a \cdot a^2}{b^2 - a^2} + \frac{p_a \cdot a^2 b^2}{(b^2 - a^2)r^2}. \quad (12)$$

Исследования показали, что в окрестности поры за счет ее расширения в результате замерзания воды появляются сжимающие радиальные и растягивающие тангенциальные напряжения.

Учитывая (12) вычислим радиальные и тангенциальные напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  во всех слоях стенки ячейки. Касательные напряжения в связи с радиальной симметрией равны нулю. В качестве критерия наступления предельного состояния принимаем удельную потенциальную энергию изменения формы.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_r^2]}. \quad (13)$$

Вычислим эквивалентные напряжения в окрестности замершей воды в ячейке. Примем следующие исходные данные: модуль упругости и коэффициент Пуассона льда  $E_z = 3$  ГПа,  $\nu_z = 0,31$ ; модуль упругости и коэффициент Пуассона материала  $E_b = 29$  ГПа,  $\nu_b = 0,18$ .

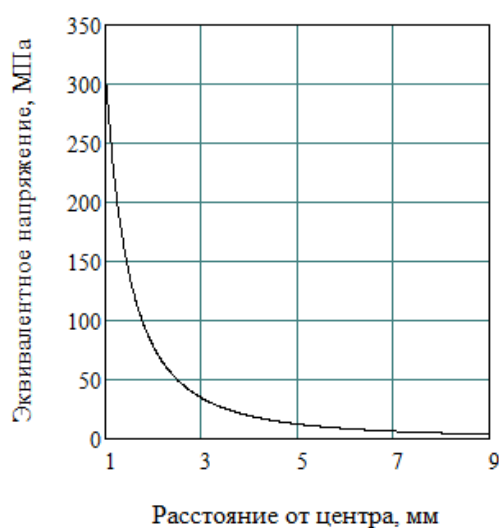


Рис.2. График эквивалентного напряжения в окрестности замершей цилиндрической полости

### Библиографический список

1. Войтковский, К.Ф. Механические свойства льда / К.Ф. Войтковский. – М.: Изд-во Акад. наук СССР. –1960. – 98 с.
2. Гольдштейн, Р.В. Механика разрушения и проблемы освоения Арктики / Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко. – ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. – №4 2015. – С14-27.
3. Вербицкая, О.Л. Напряженное состояние бетона в окрестности цилиндрической пустоты, подвергнутой внутреннему давлению / О.Л. Вербицкая // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф., 26-27 окт. 2023 г. / редкол.: Е.М. Жуковский (гл. ред.) [и др.]. Минск: БНТУ, 2024. – С. 178-182.

УДК 699.82

## ИННОВАЦИОННЫЙ ГЕОТЕКСТИЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Галузо О. Г. – кандидат технических наук, доцент,  
Вершеня Е. Г. – старший преподаватель,  
Белорусский национальный технический университет,  
Республика Беларусь, г. Минск

*Аннотация.* В статье приведены результаты исследования инновационных геотекстильных материалов, применяемых в строительстве. Определены физико-технические и гидротехнические характеристики дренажных материалов различной поверхностной плотности, толщины полотна и их область применения.

*Ключевые слова:* геотекстильный материал, прочность при растяжении, относительное удлинение, поверхностная плотность, коэффициент фильтрации.

Современные геотекстильные материалы предназначены для защиты дренажных систем от засорения, эффективно отводят влагу, предотвращают перемешивание слоев грунта и усиливают дренажные конструкции. Применяются в дренажных системах, инверсионных кровлях, дорожном строительстве, при строительстве парковок, садовых дорожек, в ландшафтном дизайне.

Геотекстильные материалы производятся в соответствии со стандартами экологической безопасности. Для изготовления полотен используются малотоксичные компоненты с пониженной горючестью. Устойчивость к коррозии и гниению делает материал безопасным для окружающей среды. Срок службы геотекстиля при правильном соблюдении транспортировки, хранения и укладки, сопоставим со сроком службы конструкций с включением полотен.

Геотекстиль главным образом служит в качестве фильтрующего холста и предотвращает попадание мелких частиц грунта в дренажный элемент [1].

В научно-исследовательской и испытательной лаборатории бетонов и