

РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ГРУНТЕ И ЕГО ПОЛЗУЧЕСТЬ

В.П. Иванов, докт.техн. наук, профессор, А.П. Кастрюк, канд.техн. наук, доцент (Полоцкий государственный университет)

Аннотация

Рассмотрено изменение напряжений в грунте при его сжатии в начальный период времени. Полученные зависимости между прочностными и деформационными свойствами грунтов позволяют проводить инженерные расчеты взаимодействия рабочих органов с грунтом.

Changes in soil stress at its compression on initial time period are examined. The received dependences between strength and deformation properties of soils enable the engineering analysis of operating elements cooperating with soil interaction to be carried out.

Введение

Для расчета усилия резания грунта и мощности привода почвообрабатывающей машины необходимы сведения о поведении грунта при изменяющейся скорости деформирования, обуславливающей его релаксационные свойства. Время релаксации напряжений является важной характеристикой грунтов при их деформировании. Исследованиям этого вопроса посвящено значительное количество работ, главным образом, в связи с изучением строительных свойств грунта [1-3 и др.].

Основная часть

Грунты по своим механическим свойствам соответствуют максвелловской модели, поэтому к ним применимы основные зависимости изменений напряжения и деформации во времени, установленные для модели, у которой упругие и вязкие элементы соединены последовательно [4-6]. Сжатие упруго-вязкого тела складывается из упругих, не изменяющихся с течением времени деформаций и неупругих – остаточных деформаций, возрастающих с течением времени. Состояние этого тела выражается уравнением:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt},$$

где σ – напряжения, Па; E – модуль упругости первого рода, Па; ε – относительная деформация; η – коэффициент вязкости, Па·с; t – текущее время, с.

При $\varepsilon = \text{const}$ формула Максвелла после интегрирования принимает вид:

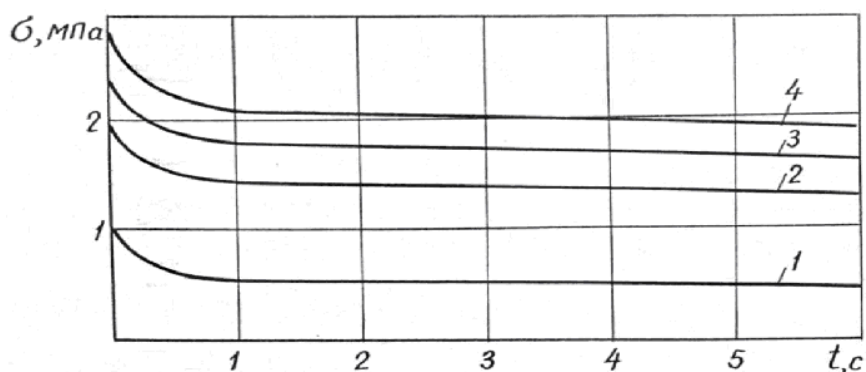
$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/T}, \quad (1)$$

где $T = \eta/E$ – период релаксации, с.

Уравнение (1) характеризует релаксацию напряжений и устанавливает уменьшение с течением времени напряжений до нуля по показательному закону. Однако, как показывают исследования, при $\varepsilon = \text{const}$ у грунтов, как и у ряда других материалов, напряжения стремятся не к нулю, а к некоторому конечному значению.

Определение релаксационных свойств минеральных и торфяных грунтов проводилось при их сжатии штампами с различными значениями перемещения плиты и скорости. После достижения заданной деформации измерялось усилие, приложенное к штампу, и его изменение во времени. При снятии релаксационной характеристики грунта рабочая полость силового гидроцилиндра в течение всего опыта была соединена с гидравлическим аккумулятором, что позволяло поддерживать постоянство деформации.

Кривые релаксации (рис. 1) имеют два участка, первый характеризуется резким падением напряжений в условиях затухающей скорости релаксации, второй – их замедленным снижением, асимптотическим прибли-



жением к предельному значению σ_n ($t = \infty$). Первый участок для связных минеральных и торфяных грунтов соответствует времени до 0,5–0,7, а для песчаных грунтов – 0,15–0,20 с. Этот участок описывает взаимодействие рабочих органов и ходовых систем машин с грунтом. Второй участок определяется очень медленным изменением напряжений, на графике он изображен прямой линией. Относительное снижение напряжений ξ_σ выражается формулой:

$$\xi_\sigma = \frac{\sigma(0) - \sigma(t)}{\sigma(0)},$$

где $\sigma(0)$ – напряжения при $t = 0$; $\sigma(t)$ – напряжения по истечении времени t . Для исследуемых грунтов $\xi_\sigma = 0,19–0,28$.

Более быстрое протекание релаксации напряжений указывает на ускоренный переход обратимой деформации в пластические сдвиги и более быстрое снижение способности грунта сопротивляться внешним нагрузкам. Характер снижения напряжений определяет влияние скорости деформирования на сопротивление грунта сжатию. Скорость изменений напряжений в грунте обуславливается передачей внешней нагрузки на его каркас и гидростатическую смесь. После передачи нагрузки на каркас постепенное убывание во времени скорости снижения напряжений происходит вследствие влияния водно-коллоидных пленок, обладающих вязкостью.

Релаксацию напряжений необходимо рассматривать как нарастание пластической деформации при одновременном и равном падении упругой деформации, а не как переход упругой деформации в пластическую. Напряжения $\sigma(t)$ при релаксации определяются долей упругой деформации, остающейся к моменту времени t , т. е. зависят от величины пластической деформации

$$\sigma(t) = E[\varepsilon_o - \varepsilon_{nl}(t)],$$

где ε_o – начальная упругая относительная деформация; ε_{nl} – пластическая относительная деформация.

Зависимость изменения напряжений во времени, полученная экспериментальными исследованиями различных видов грунтов, аппроксимируется уравнением:

$$\sigma(t) = \sigma_n + (\sigma_o - \sigma_n)e^{-t/T}, \quad (2)$$

где σ_o – напряжения в начальный момент, Па.

Уравнение (2) по своей структуре сходно с уравнением релаксации среды, реологическое состояние которой определяется выражением:

$$T \frac{d\sigma}{dt} + (\sigma_o - \sigma_n) = ET \frac{d\varepsilon}{dt}.$$

Через 20–30 секунд изменение напряжений происходит весьма медленно, и зависимость может быть выражена уравнением Гаусса, принятым для металлов:

$$\sigma(t) = \sigma_i - a \lg \frac{t+T}{T},$$

где a – коэффициент, имеющий размерность напряжения.

Период релаксации T соответствует времени, за которое разность $\sigma_o - \sigma_n$ уменьшается в e раз

$$\sigma_{t-T} - \sigma_n = \frac{\sigma_o - \sigma_n}{e}.$$

Скорость изменения напряжений

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\left(\frac{\sigma_o - \sigma_n}{T}\right)e^{-\frac{t}{T}}.$$

Период релаксации T и напряжения σ_n определяются на основе экспериментальных данных. Для этого принимали напряжения σ_{t1} и σ_{t2} при двух значениях t_1 и t_2 , причем $t_2 = 2t_1$.

При $t = t_1$ имеем:

$$\sigma_{t_1} = \sigma_n + (\sigma_o - \sigma_n)e^{-\frac{t_1}{T}}.$$

Отсюда

$$e^{-\frac{t_1}{T}} = \frac{\sigma_{t_1} - \sigma_n}{\sigma_o - \sigma_n}. \quad (3)$$

Следовательно

$$T = \frac{t_1}{\ln \frac{\sigma_o - \sigma_n}{\sigma_{t_1} - \sigma_n}}. \quad (4)$$

Значения σ_o и σ_{t1} определяются из опытов. Напряжение σ_n вычисляется следующим образом. При $t_2 = 2t_1$

$$e^{-\frac{2t_1}{T}} = \frac{\sigma_{t_2} - \sigma_n}{\sigma_o - \sigma_n}. \quad (5)$$

Решив совместно уравнения (3) и (5), находим:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{t_1}^2 - \sigma_{t_2} \sigma_o}{2\sigma_{t_1} - \sigma_{t_2} - \sigma_o}.$$

Подставив в уравнение (4) значение σ_n и преобразовав его, получаем:

$$T = \frac{t_1}{\ln \frac{\sigma_o - \sigma_{t_1}}{\sigma_{t_1} - \sigma_{t_2}}}. \quad (6)$$

Формула (6) позволяет определить период релаксации по данным испытаний. Для суглинистого грунта с прочностью, характеризуемой величиной $C = 8$

$$\sigma(t) = \sigma_n + (\sigma_o - \sigma_n)e^{-\frac{t}{0,38}}.$$

Анализ кривых релаксации, полученных при разной величине деформации (рис. 1) показывает, что они являются геометрически подобными и могут быть получены из одной кривой умножением ее ординат на некоторую величину, являющуюся функцией величины напряжений. Это означает, что

$$\frac{\sigma_0}{\sigma'_0} = \frac{\sigma_{t_1}}{\sigma'_{t_1}} = \frac{\sigma_{t_2}}{\sigma'_{t_2}} = \text{и т. д.},$$

где $\sigma_0, \sigma_{t_1}, \sigma_{t_2}$ – соответственно начальное напряжение и его значения при $t = 0, t_1, t_2$; $\sigma'_0, \sigma'_{t_1}, \sigma'_{t_2}$ – то же для другой кривой релаксации.

Приняв коэффициент релаксации $k_p = \sigma_n / \sigma_0$ и подставив его в уравнение (2), получаем

$$\sigma(t) = \sigma_n + \sigma_0(1 - k_p)e^{-t/T}. \quad (7)$$

Вследствие подобия кривых релаксации коэффициент k_p не зависит от начального напряжения σ_0 и является величиной постоянной для данного типа грунта и его физического состояния. С изменением начального напряжения σ_0 в таком же отношении меняется напряжение σ_n . В механике грунтов значение σ_n принято за предел длительной прочности.

Уравнение (7) позволяет определить напряжение грунта под штампом на разной глубине в любой момент времени после прекращения деформирования.

В зависимости от типа грунта, степени его водонасыщения изменяются релаксационные свойства. Для водонасыщенных грунтов главную роль в изменении их состояния играет скорость фильтрации, трехфазных – ползучесть каркаса. Чем больше вязкость, тем медленнее рассеяние напряжений и большее время необходимо для перехода к равновесному состоянию. Чем слабее сцепление частиц между собой, тем быстрее протекают релаксационные процессы. С уменьшением плотности грунта относительное снижение напряжений в нем возрастает. Так, для суглинка с изменением объемной массы от 2050 до 1700 кг/м³ оно увеличивается от 0,31 до 0,38.

Различное влияние фактора времени на деформационно-прочностные свойства связных и песчаных грунтов вызвано, главным образом, их неодинаковой фильтрационной способностью и обусловленной этим разной скоростью рассеяния значений порового давления.

В теории ползучести рассматриваются два качественно разных вида развития деформации во времени [7]:

- при напряжениях, меньше предельных, когда деформации во времени затухают, а процесс приобретает характер затухающей ползучести;
- при напряжениях, равных или выше предельных, когда деформации растут во времени.

На кривой (рис. 2), кроме мгновенной деформации $0a$, различают три стадии: *I* (отрезок ab) – неустано-

вившейся ползучести, *II* (отрезок bc) – установившейся ползучести или пластического течения с постоянной скоростью деформирования и *III* (отрезок cd) – прогрессирующего течения со все возрастающей скоростью деформирования.

Характер ползучести зависит от результирующего процесса упрочнения и разупрочнения внутренних связей частиц грунта. При преобладании упрочнения деформация ползучести стабилизируется. Если доминирует разупрочнение, то возникает незатухающая ползучесть и происходит разрушение. Чем больше

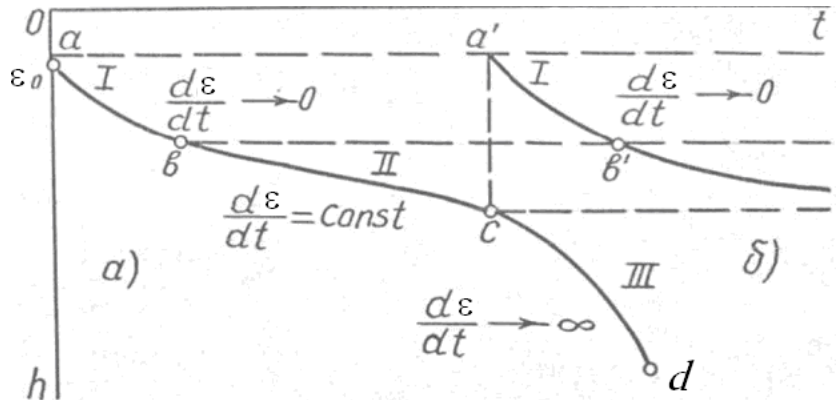


Рисунок 2. Кривые ползучести: а) незатухающей; б) затухающей

время действия нагрузки, тем при меньшем ее значении достигается прогрессирующая ползучесть.

Связь между релаксацией и ползучестью грунта вытекает из рассмотрения графиков в координатах $\sigma - \epsilon_n$ (ϵ_n – относительная деформация ползучести) при разной скорости деформирования (рис. 3). Линия *I-I*, пересекая кривые $\sigma(\epsilon_n)$, при постоянной деформации ϵ_n является линией релаксации напряжений. Если при некоторой скорости деформирования v довести деформацию до значения ϵ_{n1} и сохранить ее постоянной, то напряжения постепенно релаксируют до значения σ_2 , соответствующего той же деформации ϵ_{n1} при скорости v_2 и т. д. и может продолжать уменьшаться до значения σ_n , соответствующего кривой бесконечно

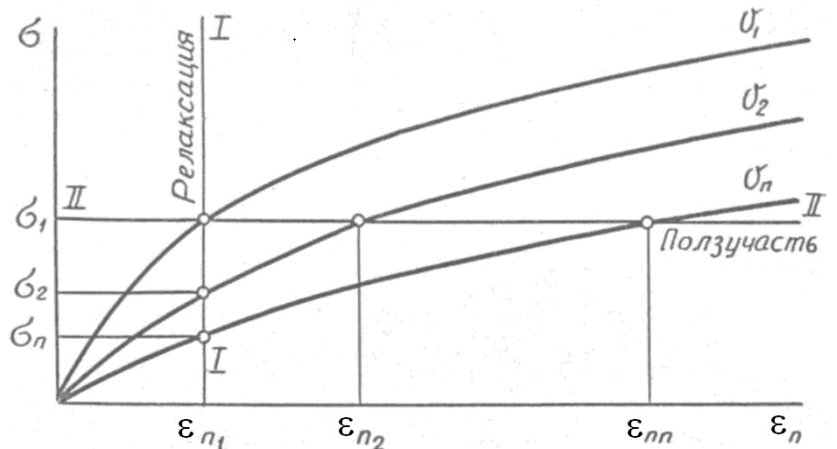


Рисунок 3. Зависимость $\sigma(\epsilon)$ при различных значениях v ($v_1 > v_2, v \rightarrow 0$)

медленного нагружения.

Линия II-II, пересекая кривые при постоянном значении σ , связана с ползучестью грунта. С уменьшением скорости деформации с v_1 до v_2 , т. е. с увеличением времени действия постоянного напряжения деформация возрастает от ε_{n1} до ε_{n2} и далее до тех пор, пока деформация возрастает до ε_{np} , при которой скорость деформации $v \rightarrow 0$.

Выражение деформации ползучести через параметры кривой релаксации напряжений наиболее удобно, так как последняя может быть легко определена при вдавлении штампа в грунт.

Из уравнения описываемого поведения грунта при релаксации имеем:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma_o - \sigma_n}{T} = E \frac{d\varepsilon}{dt}$$

или

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma_o - \sigma_n}{\eta}$$

Отсюда

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{1}{\eta_0} \int (\sigma_o - \sigma_n) dt.$$

Графическим или числовым интегрированием решается задача перехода от релаксации напряжений к ползучести и обратно. Скорость ползучести зависит от отношения давления к пределу несущей способности грунта и времени приложения нагрузки. Чем больше отношение, тем выше скорость осадки. С увеличением времени действия нагрузки, скорость осадки уменьшается. Для ряда почвообрабатывающих машин, когда нагрузка на грунт во времени переменна, осадка может быть определена на основе принципа наложения, применяемого в механике грунтов. Для описания ползучести при переменной нагрузке непрерывный рост напряжений заменяется их ступенчатым нарастанием (рис. 4).

Приняв $\sigma(t) = \sigma(0) + \Delta 1\sigma(t_1) + \Delta 2\sigma(t_2) + \dots + \Delta i\sigma(t_i)$, где $\Delta i\sigma(t_i)$ – изменение напряжений за отрезок времени $t_i - t_{i-1}$, величина ползучести описывается уравнением:

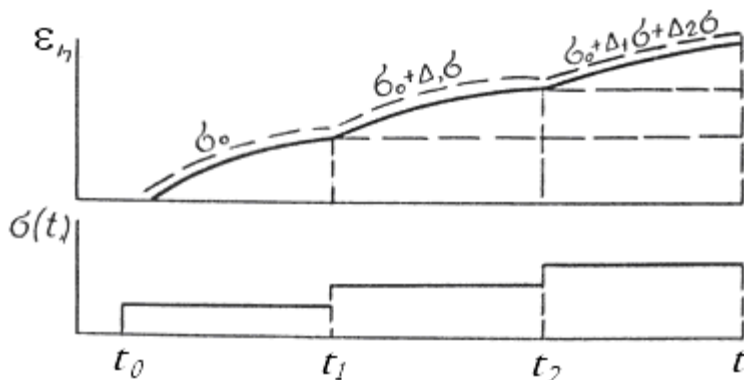


Рисунок 4. Деформация ползучести ε_n при ступенчато-возрастающих циклах напряжений в течение времени t

$$\varepsilon_n(t) = \varepsilon(t_0) + \varepsilon(t_1 - t_0) + \dots + \varepsilon(t_i - t_{i-1}). \quad (8)$$

Уравнение (8) исходит из принципа наложения, под которым понимается возможность определения деформации ползучести от действия переменной во времени нагрузки путем суммирования этих деформаций, вызванных действием элементарных приращений напряжений. При этом принимается также то, что деформация ползучести зависит от длительности его приложения, но не зависит от длительности действия остальных приращений.

Заключение

Исследование грунтов путем вдавливания штампа с определением его реологических характеристик позволяет получить информацию о прочностно-деформационных свойствах, необходимых для инженерных расчетов взаимодействия рабочих органов с грунтом в начальный период времени.

Различное влияние времени на свойства связных и песчаных грунтов вызвано их неодинаковой фильтрационной способностью и разными значениями скорости рассеяния порового давления.

Характер ползучести зависит от результирующего процесса упрочнения и разупрочнения внутренних связей частиц грунта. Скорость ползучести зависит от отношения давления к пределу несущей способности грунта и времени действия нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волошенко, Е.Н. О реологических свойствах реальных тел. / Е.Н. Волошенко// Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1966. – № 11. – С. 41-46.
2. Вялов, С.С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов/ С.С. Вялов. – М.: изд-во АН СССР, 1959. – 235 с.
3. Маслов, Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов: учебник / Н.Н. Маслов. – М.: Высшая школа, 1982. – 511 с.
4. Лысенко, М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов / М.П. Лысенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 272 с.
5. Баловнев, В.И. Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве / В.И. Баловнев, Л.А. Хмара. – М.: Транспорт, 1999. – 383 с.
6. Баловнев, В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М.: Машиностроение, 1994. – 432 с.
7. Турецкий, Р.Л. Резание мелиорируемых грунтов и интенсификация рабочих процессов машин для осушения и освоения земель Нечерноземной зоны: автореф. ... дис. докт. техн. наук: 05.20.01; 06.01.02 / Р.Л. Турецкий; ЦНИИМЭСХ. – Минск, 1981. – 38 с.