

**Соколов И.С., Волков Н.Г.**

ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» (международная группа компаний Фугро), г. Москва, ssi@fugro.ru, ngv@fugro.ru

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С ПОМОЩЬЮ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

### *Введение*

Мерзлые грунты, содержащие в своем составе лед, воздух и незамерзшую воду являются сложной системой, в которой при изменении напряженно-деформированного состояния и температуры могут происходить существенные структурные изменения. В первую очередь они обусловлены реологическими свойствами льда, который связывает минеральные частицы, а преобладающим характером внутренних структурных связей мерзлого грунта является поверхность раздела «лед–связанная вода», при которой уменьшается расстояние между контактирующими твердыми элементами (минерал–минерал, минерал–лед). Оба эти фактора оказывают существенное влияние на снижение величины сдвигающего напряжения, при котором возникает пластическое течение мерзлого грунта, это напряжение не превышает 0,05 МПа. Нагрузка практически любой величины вызывает пластические течения льда и пленок незамерзшей воды, переориентировку кристаллов льда. При этом всегда происходит перестройка структуры, вызывающая релаксацию напряжений и деформацию ползучести, т.е. изменение прочностных и деформационных характеристик мерзлого грунта во времени. Прямым проявлением реологии мерзлого грунта будут ползучесть и релаксация напряжения, вызванная приложенной нагрузкой [5].

### *Существующие методики испытания*

В процессе статического зондирования грунтов происходит внедрение зонда, снабженного датчиками силы, температуры, порового давления и др. Выполнение статического зондирования грунтов подразумевает два подхода при выполнении испытаний, отличающихся способом задавливания зонда.

В первом подходе проводится непрерывное задавливание зонда в грунт с постоянной скоростью, равной 2 см/с и принятой в качестве стандартной как в России, так и в мировой практике. В процессе задавливания ведется запись показаний датчиков зонда и строятся диаграммы «скоростных» значений показателей зондирования в зависимости от глубины.

Во втором подходе проводится прерывистое задавливание зонда в грунт. Зонд также погружается в грунт с постоянной скоростью, однако перерывы осуществляются на заранее заданной глубине, где выполняется остановка вдавливания зонда и ведется запись параметров зондирования в режиме «релаксации». Каждая такая остановка соответствует отдельному испытанию

на заданной глубине, где осуществляется запись данных во времени. В этом случае давление масла не сбрасывается для поддержания зонда строго на постоянной глубине и его положение зафиксировано, равно как и деформация грунта непосредственно под зондом. Такая методика испытания близка к описанному С.С. Вяловым [2] лабораторному динамометрическому методу, где измеряется релаксация напряжения в мерзлом грунте при постоянной деформации.

Время релаксации льда составляет  $10^2$ – $10^3$  с [2]. При интервале времени приложения нагрузки меньшем времени релаксации льда, он ведет себя как упругое тело или разрушается хрупко под нагрузкой, превышающей его прочность. В случае более длительного приложения нагрузки лед проявляет вязкие свойства. Аналогичное поведение – хрупкое разрушение при быстром приложении нагрузки и вязкое течение при длительном воздействии нагрузки – отчетливо наблюдается у мерзлых грунтов. В связи с этим, при «скоростном испытании» статическим зондированием можно определить мгновенную прочность мерзлого грунта. При большем же времени воздействия зонда (в режиме «релаксации») грунт начинает течь подобно вязкой жидкости, что позволяет определить длительную прочность мерзлого грунта.

После того, как напряжение, передаваемое зондом, окажется ниже условной мгновенной прочности, в грунте начинает развиваться деформация ползучести и меняться отношение упругой и пластической деформации. Следствием этого является релаксация напряжения, передаваемого зондом в грунт. Измеряемое при этом напряжение уменьшается во времени от величины условной мгновенной прочности, до величины длительной прочности, соответствующей конкретному интервалу времени на момент замера, и стремится к этому пределу длительной прочности. На основе полученных данных строится график релаксации напряжения в зависимости от времени.

### *Предлагаемая методика*

Анализ получаемой кривой релаксации напряжения не позволяет получить единое аналитическое выражение, отображающее весь ход релаксационной кривой. Так, О.Н. Исаевым с соавторами было отмечено, что «вопрос определения предельного сопротивления мерзлого грунта с использованием статического зондирования является весьма сложным и до настоящего времени изучен недостаточно» [4]. Однако, при разделении кривой на два участка представляется возможным описать процесс релаксации для участков I и II кривой в отдельности (

Рис.рис., а). При этом ряд исследователей берет за основу такого деления представление о различных механизмах релаксации на I и II участках (рис., б). Гипотеза о таком разделении кривой релаксации описана в работах по металловедению и экспериментально показана для релаксации напряжения в металле [3].

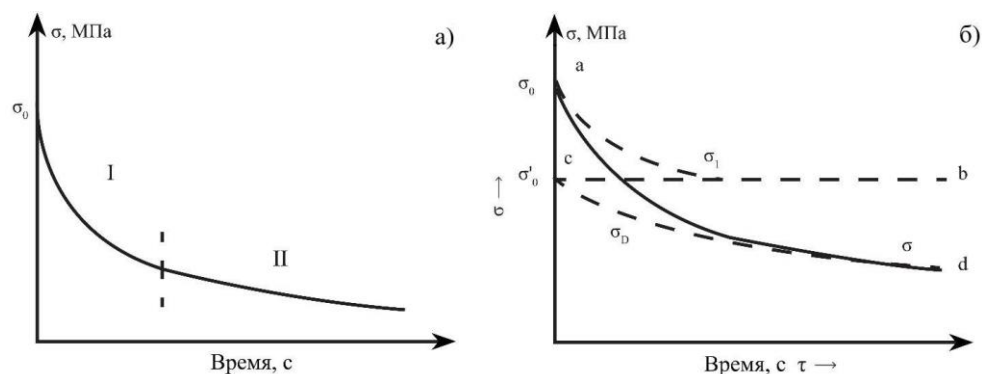


Рис. Схема кривой релаксации напряжений (а) и ее интерпретация (б) [3]

Предположительно I участок кривой определяется действием процессов, протекающих на границах зерен поликристаллического металла и представляющих собой диффузионные явления. II участок кривой релаксации определяется действием процессов, протекающих в теле зерна и представляющих собой сдвиговые явления. Более правильным является рассмотрение релаксации напряжений как результат наложения обоих процессов. С.В. Грачев с соавтором [3] отмечают, что пока неизвестно, имеют ли оба периода релаксации разный физический смысл или одинаковый.

Авторами было решено использовать данный подход для определения длительной прочности мерзлого грунта на сжатие и длительной прочности мерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания с помощью метода статического зондирования.

При испытаниях грунтов статическим зондированием в процессе движения зонда на грунт передается нагрузка, превышающая величину мгновенной прочности и обеспечивающая внедрение зонда. При остановке движения зонд фиксируется неподвижно и ведется запись релаксации напряжений. Запись значений производится до момента, когда наступит стабилизация величины считываемых параметров. После этого производится обработка данных отдельно по датчикам лобового сопротивления и трения грунта по боковой поверхности с применением уравнений длительной прочности.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\beta} \cdot \ln(t_p + 1) - \frac{1}{\beta} \cdot \ln T, \quad (1)$$

где  $\tau$  – измеряемое напряжение, (лобовое сопротивление или боковое трение в МПа);  $t_p$  – время замера, с;  $\beta$ ,  $T$  – коэффициенты, зависящие от характера релаксации напряжения.

Вычисляются индивидуальные значения длительной прочности грунта. Для данных, полученных с помощью датчика лобового сопротивления – это длительная прочность грунта на сжатие, а для данных, полученных с помощью датчика трения грунта по боковой поверхности – это величина длительной прочности на сдвиг.

Обработка полученных в полевых условиях кривых релаксации напряжений с помощью описанного уравнения (1) позволяет рассчитать значения длительной прочности грунта на заданной глубине. Обоснованность применения такого подхода подтверждается работами С.С. Вялова [2] при испытании грунтов динамометрическим методом.

### *Заключение*

Приведенный в публикации метод обработки кривой релаксации, разделением на два участка, автоматизирован [1] и позволяет в ходе полевых испытаний на релаксацию напряжения определять необходимый и достаточный интервал времени испытания. Это позволяет быстро получить первичную информацию о прочностных характеристиках исследуемых грунтов, скорректировать количество и длительность испытаний. Дальнейшая камеральная обработка данных позволяет получить значения параметров, необходимых для лабораторных испытаний образцов грунта, производить расчет несущей способности свай на заданный период эксплуатации сооружения.

В дополнение к пределу длительной прочности в этом режиме испытаний мерзлого грунта измеряется температура мерзлого грунта, что само по себе является важнейшей характеристикой мерзлого грунта, а также может быть использовано для правильной постановки испытаний грунтов в лаборатории и повышения точности определения физико-механических характеристик. Корректность получаемых данных подтверждается сравнением с натурными испытаниями свай статической вдавливающей нагрузкой и значениями удельного давления под нижним концом свай для незасоленных мерзлых грунтов [6].

### **Список литературы**

1. Волков Н.Г., Соколов И.С. Расчет несущей способности свай на основе определения длительной прочности методом статического зондирования в массиве мерзлых грунтов // Геотехника. 2019. Т. 11. № 1. С. 68–78.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: учебное пособие для строительных вузов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
3. Грачев С.В., Мальцева Л.А. Релаксация напряжений пружинной ленты при изгибе. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. 18 с.
4. Исаев О.Н., Волков Ф.Е., Минкин М.А. Определение несущей способности свай в пластично-мерзлых грунтах статическим зондированием // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1987. № 5. С. 17–19.
5. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: Наука/Интерпериодика, 2002. 425 с.
6. СП 25.13330.2012 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».