

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

В.Н. Кутергин, Р.Г. Кальбергенов, В.И. Аксенов

*Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС), 105058, Москва, Окружной проезд, 18, Россия*

Количественная оценка изменения свойств грунтов оснований различных сооружений при внешних воздействиях является одной из важных задач инженерной геологии и геокриологии.

Имеющиеся в настоящее время в нормативных документах справочные данные по прочности пластичномерзлых грунтов справедливы лишь для расчета предельных статических нагрузок на фундаменты. Появление дополнительной к статической нагрузке динамической составляющей может привести к увеличению скорости деформирования пластичномерзлых грунтов и, как следствие, к изменению его расчетной прочности.

Динамическая составляющая нагрузки от промышленных сооружений, движущихся транспортных средств может проявиться в результате работы несбалансированных машин и агрегатов, сейсмике и т.п.

Для исследования пластичномерзлых грунтов в динамических условиях была разработана новая методика и модифицированы конструкции испытательных установок. Динамическая составляющая представляла собой меняющиеся по синусоидальному закону напряжения, частота приложения которых составляла 10 Гц, а амплитудные значения соответствовали 15% от статической нагрузки на данной ступени. Полученные данные по развитию осевых деформаций во времени сопоставлялись с результатами испытаний того же грунта в идентичных условиях, но без динамических воздействий.

В качестве объекта исследований использован суглинок с п-ова Ямал при засоленности 0,3% и 0,6%. Температура грунта при испытании составляла -2 и -6 °С.

Выполненные эксперименты показали значительные изменения механических свойств пластичномерзлых грунтов при динамических нагрузках.

*Пластичномерзлый грунт, суглинок, прочность, динамическая нагрузка, температура*

### STUDY OF RELATIONSHIP BETWEEN DYNAMIC LOAD AND STRENGTH PROPERTIES OF SOFT FROZEN GROUND

V.N. Kutergin, R.G. Kalbergenov, V.I. Aksenov

*Production and Research Institute for Engineering Construction Survey (PNIIS), 105058, Moscow, Okrzhnoi pr., 18, Russia*

Quantitative evaluation of properties of soil foundations of various constructions under external impacts is one of the problems of prime importance in engineering geology and geocryology.

The reference information about the strength of soft frozen ground available in normative literature is valid only for the calculation of ultimate steady-state loads on footings. The appearance of any extra load component may result in the increased rate of deformation of soft frozen ground and subsequent change in its design strength.

The dynamic component of a load of industrial constructions and moving transport facilities may result from the operation of unbalanced machines and aggregates, seismic effects, etc.

To study soft frozen ground under dynamic conditions, we worked out a new technique and adapted constructions of testing units. The dynamic component was the stresses, varying according to the sine-shaped law, with the application frequency of 10 Hz and peak values of 15% of a steady-state load at the specific load increment. The obtained data on the time development of axial strains were correlated with the results of tests of the same frozen ground under identical conditions but without dynamic impacts.

We studied the loam from the Yamal Peninsula with salinity of 0.3% and 0.6%. The specimens of frozen ground were tested at a temperature of -2 and -6 °C. The experiments carried out have shown the significant variations in stress and strain properties of soft frozen ground under dynamic loads.

*Soft frozen ground, loam, strength, dynamic load, temperature*

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Количественная оценка изменения свойств грунтов оснований различных сооружений при внешних воздействиях является одной из важных задач инженерной геологии и геокриологии,

поставленной перед наукой современной строительной практикой. Изменение внешних условий при строительстве и эксплуатации сооружений приводит к нарушению квазистатического равно-

веса грунта и обуславливает проявление процессов, ведущих к изменению его физико-химических и физико-механических свойств. В привычном понимании основным внешним воздействием являются нагрузки от зданий и сооружений, которым и уделяется главное внимание при расчетах оснований и проектировании. Однако важными, а подчас и наиболее значительными являются дополнительные воздействия на грунты внешних полей, под которыми понимается некая совокупность элементов и определенных условий той или иной природы (физической, химической и т.п.), формирующихся внешними источниками, имеющими контакт с грунтовой средой.

Одними из наиболее значимых, воздействие которых на грунты неоспоримо, являются тепловые поля, представляющие собой совокупность тепловых потоков, изменяющихся в пространстве и во времени. В природе изменение температуры грунтов обусловлено физико-географическими и климатическими особенностями района залегания. Кроме того, тепловые поля зачастую имеют техногенную природу и связаны, например, с использованием различных хладагентов.

Важный источник дополнительных внешних воздействий — вибрационные поля, генерирующие переменные динамические нагрузки, передаваемые на грунты. Объектами-источниками, поддерживающими энергией вибрационные поля, являются различные промышленные установки, строительные машины и механизмы, движущиеся транспортные средства, а также силы природы, проявляющиеся в виде землетрясений, ветровых потоков, ударов штормовых и прибрежных волн. Наибольшая концентрация техногенных источников вибрации имеет место в пределах так называемых промышленных зон и городских агломераций, где особая роль в формировании полей вибрации принадлежит наземным и подземным транспортным магистралям. Динамические нагрузки обуславливают изменение напряженно-деформированного состояния грунтов. Результатом такого изменения являются дополнительные осадки фундаментов, а в отдельных случаях — потеря устойчивости сооружений.

Проблема оценки влияния внешних воздействий на свойства грунтов длительное время изучается в ПНИИСе, причем наиболее пристальное внимание уделяется температурам и динамическим нагрузкам.

К настоящему времени детально проработаны методики исследований влияния упомянутых полей в отдельности, однако проблема их совокупного влияния остается нерешенной, хотя, вполне очевидно, что отклик грунтового массива на интегральное воздействие не является простой

суммой откликов на действие его отдельных составных частей.

Сведения о динамических испытаниях мерзлых грунтов крайне скудны. Известны лишь результаты динамических исследований грунтов при отрицательных температурах в области упругих, неразрушающих деформаций [Kajlar, 1963; Nakano et al., 1973]. Получены характеристики упругости (скорости продольных и поперечных волн, модули упругости, модули упругого сдвига, коэффициент Пуассона) и поглощения (коэффициент затухания) грунтов. Проанализированы их зависимости от температуры, амплитуды деформаций, частоты нагружения и величины обжата образцов мерзлых грунтов [Stevens, 1973]. Однако исследования динамических свойств грунтов при больших, необратимых деформациях сдвига, а также виброползучести при отрицательных температурах практически отсутствуют.

Оценка характера и интенсивности процессов, возникающих при этом в грунтовых массивах, требует детальных и достаточно сложных экспериментальных исследований, невозможных при использовании стандартных приборов.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для испытаний мерзлых грунтов при дополнительном воздействии вибрационной (динамической) составляющей был использован метод одноосного сжатия ступенчатовозрастающей нагрузкой (ГОСТ 24586-90, 1990). Методика и приборы были модифицированы таким образом, чтобы учесть и оценить влияние дополнительных динамических нагрузок на свойства грунтов.

Основной принцип разработанной методики заключается в сопоставлении прочности испытываемого грунта, получаемой, как при наличии динамической составляющей, так и без нее. Закономерное расхождение этих величин свидетельствует о влиянии динамического фактора и может быть оценено количественно.

Все динамические испытания производились при частоте колебаний 10 Гц. Относительная амплитуда динамической нагрузки, представляющая собой отношение амплитуды динамических напряжений к величине статической сжимающей нагрузки, принята на основе литературных данных и составила 15%.

В качестве основы прибора использована станина и рычажно-тросовая нагрузочная система от компрессионного прибора, позволяющая задавать на подвеске рычага гири требуемую статическую нагрузку на образец.

Динамическое воздействие на образец создавалось при помощи электромотора постоянного тока с регулируемым дебалансом.

Закрепленный на секторном рычаге прибора мотор под действием центробежной силы  $F_c$  вращаемого дебаланса создавал инерционные нагрузки. При этом, при прохождении дебалансом нижней точки траектории вращения к статической нагрузке рычага гири добавлялась, а при прохождении верхней точки вращения — отнималась динамическая составляющая, в соответствии с уравнением:

$$N = mG \pm nF_c \sin(2\pi\omega t + \psi_0 + \beta),$$

где  $m$  и  $n$  — рычажные отношения для гирь и дебаланса;  $G$  — гиревая навеска;  $F_c$  — центробежная сила дебаланса;  $\omega$  — частота вращения;  $t$  — время;  $\psi_0$  — начальный угол при  $t = 0$ ;  $\beta$  — угол отклонения от горизонтали линии, соединяющей центры вращения рычага и дебаланса.

Величина амплитуды динамической нагрузки регулировалась изменением массы дебаланса.

Образец грунта, установленный в прибор, перекрывался сверху штампом со встроенным внутри датчиком давления (мессдозой). Мессдоза кабелем соединялась с тензоусилителем „Топаз-4“, выход которого был подключен к гальванометрам светолучевого осциллографа Н-117/1.

Частота воздействий определялась скоростью вращения мотора. Она контролировалась тахометром и составляла в опытах 10 об./с (600 об./мин).

Для метрологического обоснования результатов испытаний грунтов предварительно проводилась общая тарировка установки в сборе. В качестве измерителя усилий, воспринимаемых образцом, использована тензометрическая дисковая мессдоза, предварительно протарированная статическими (гиревыми) нагрузками.

В ходе тарировки подбирались также дебалансы различных масс, необходимых для получения 15%-й (от статики) динамической составляющей.

Испытываемые образцы мерзлого грунта имели высоту 100 мм и диаметр 45 мм (площадь поперечного сечения 16 см<sup>2</sup>).

Эксперименты проводились в термокамере при температуре  $-2^\circ\text{C}$  и  $-6^\circ\text{C}$ .

Подготовленный образец грунта устанавливался в кассету между нижним и верхним штампом. Боковая поверхность образца была покрыта эластичной оболочкой, края которой сопрягались с боковой поверхностью штампов. Затем образец подвергался начальному обжатию, составляющему 50% от нагрузки первой ступени.

Перед испытанием рассчитывалась плановая таблица эксперимента, в которой регламентировалось количество ступеней, статическое напряжение на каждой ступени, динамическое напряжение, составлявшее 15% от величины статической нагрузки.

Таким образом, при переходе на каждую последующую ступень нагружения предусматривалось не только увеличение гиревой нагрузки на подвеске рычага, но и увеличение момента инерции дебаланса за счет возрастания его массы. В итоге, в течение всего опыта отношение динамических и статических напряжений поддерживалось постоянным и равным 15%.

Интервал между ступенями составлял 0,25 кгс/см<sup>2</sup> для грунтов с  $t = -2^\circ\text{C}$  и 0,5 кгс/см<sup>2</sup> для грунтов с  $t = -6^\circ\text{C}$ .

Каждая ступень нагружения выдерживалась 3 суток. Параллельно с опытами на исследование динамического воздействия аналогичные образцы испытывались на статическое одноосное сжатие по ГОСТу 24586-90 (ГОСТ 24586-90, 1990).

### ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

Объектом исследований являлись типичные для п-ова Ямал мерзлые засоленные суглинки.

По гранулометрическому составу суглинки содержат 3,8—4,8% песчаных частиц, 36,7—43,1% пылеватых и характеризуются высоким содержанием глинистой фракции (52,1—59,5%). Сравнительно небольшое число пластичности ( $I_p = 16$ ) при высоком содержании глинистой фракции связано с низкой физико-химической активностью минеральной части, образовавшейся в результате морозного выветривания исходных инертных минералов.

Ионно-солевой комплекс исследуемых грунтов представлен хлоридами, сульфатами, гидрокарбонатами натрия, калия, кальция, магния. Водная вытяжка по реакции на рН практически нейтральная (рН=7,1—7,5).

Образцы засоленных мерзлых грунтов с хлоридно-натриевым типом засоления ( $D_{sal} = 0,3\%$  и  $0,6\%$ ) изготавливались путем предварительного охлаждения грунтовой массы и последующего ее уплотнения в обоймах под нагрузкой при температуре испытания образцов ( $-2^\circ\text{C}$  и  $-6^\circ\text{C}$ ).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментов было выполнено 8 длительных испытаний на одноосное сжатие засоленного суглинка при температуре  $-2^\circ\text{C}$  и  $-6^\circ\text{C}$  и воздействии статических и динамических нагрузок.

Каждое испытание продолжалось до тех пор, пока процесс деформирования образца не переходил в стадию незатухающей ползучести или продольная деформация образца не достигала 20% его первоначальной высоты.

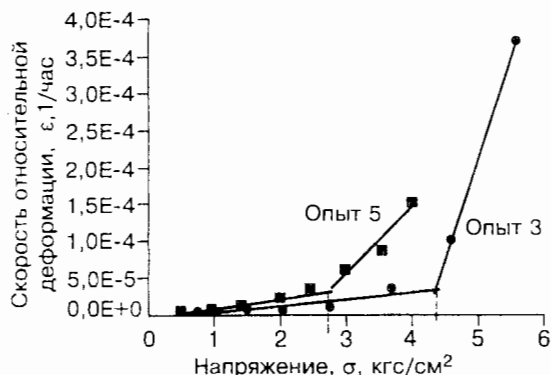


Рис. 1. Характерные реологические кривые.

$T = -6^{\circ}\text{C}$ ;  $W = 0,45$ ,  $D_{sal} = 0,6\%$ . Опыт 5 — динамика:  $\sigma_{on} = 2,9$  кгс/см<sup>2</sup>; Опыт 3 — статика:  $\sigma_{on} = 4,35$  кгс/см<sup>2</sup>.

По результатам испытаний на каждой ступени нагружения строились графики относительная деформация — время.

Для определения длительной прочности использовались графики зависимости напряжения и скорости относительной деформации „ $\sigma-\dot{\epsilon}$ “. Характерные реологические кривые двух идентичных образцов, испытанных при статическом и динамическом воздействии, при одинаковой отрицательной температуре и засоленности, представлены на рис. 1. Также приведены соответствующие точкам перелома кривых опытные значения длительной прочности ( $\sigma_{on}$ ).

На графиках отчетливо прослеживается тенденция к увеличению скорости деформаций образцов при дополнительных динамических воздействиях. Переход в стадию незатухающей ползучести происходит при меньших значениях сжимающих напряжений, нежели в статических условиях.

Это наглядно иллюстрируется рис. 2, на котором сопоставлены графики зависимостей длительной прочности от засоленности грунта при разных режимах нагружения. Для полноты

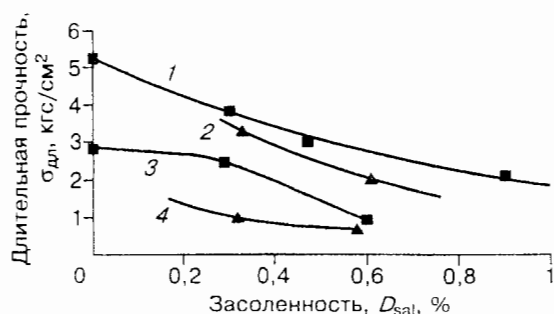


Рис. 2. Зависимость длительной прочности от засоленности для пластичномерзлого суглинка при различных видах воздействия на образец.

1 — статические испытания при  $T = -6^{\circ}\text{C}$ ; 2 — динамические испытания при  $T = -6^{\circ}\text{C}$ ; 3 — статические испытания при  $T = -2^{\circ}\text{C}$ ; 4 — динамические испытания при  $T = -2^{\circ}\text{C}$ .

картины при анализе использованы также данные предыдущих статических испытаний тех же грунтов в более широком диапазоне изменения засоленностей (от 0 до 0,9%).

В целом, для более низких температур ( $-6^{\circ}\text{C}$ ), можно отметить увеличение влияния вибрации на длительную прочность грунтов при росте их засоленности.

В таблице приведены все основные характеристики и результаты выполненных статических и динамических опытов. Кроме того, даны сопротивления нормальному давлению  $R$ , вычисленные по формуле 5 СНиП 2.02.04.-88 (СНиП 2.02.04.-88, 1989) для торца сваи, заглубленной на 4 м.

Сопоставление экспериментальных и нормативных статических значений  $R$  показывает их отличие не более, чем на 10%, что обосновывает достоверность полученных нами опытных данных.

Анализ цифр, приведенных в таблице, позволяет отметить, что в зависимости от темпера-

Сводная таблица прочностных свойств пластичномерзлых суглинков при статическом и динамическом воздействии

№ опыта, характер воздействия	$T, ^{\circ}\text{C}$	Засоленность, $D_{sal}, \%$	Влажность, $W_{tot}, \text{д.е.}$	Прочность, $\sigma_{дл}, \text{кг/см}^2$	Сопротивление нормальному давлению $R, \text{кг/см}^2$	
					опытное	СНиП
2 (статика)	-2	0,6	0,42	0,92	3,3	3,5
1 (динамика)	-2	0,58	0,41	0,7	2,6	—
7 (статика)	-2	0,29	0,42	2,45	7,6	6,5
8 (динамика)	-2	0,32	0,41	1,02	3,6	—
3 (статика)	-6	0,48	0,45	3,05	9,4	—
5 (динамика)	-6	0,61	0,43	2,03	6,5	—
4 (статика)	-6	0,3	0,44	3,82	11,7	—
6 (динамика)	-6	0,33	0,43	3,29	10,1	—

туры и засоленности динамическое воздействие может снизить прочность пластичномерзлого суглинка на 15—50%. Наиболее существенным оказалось влияние вибрации при температуре  $-2^{\circ}\text{C}$  и засоленности 0,3%.

Исследования пластичномерзлых грунтов при динамическом воздействии проводились нами по схеме планируемого эксперимента, в котором были выделены следующие доминирующие факторы:

$X1$  — амплитуда динамического воздействия  $\Delta\delta$ , кгс/см<sup>2</sup>;

$X2$  — температура грунта  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$X3$  — засоленность  $D_{sal}$ , %.

В каждой серии экспериментов факторы имели определенные численные значения — уровни варьирования, которые являются ключевыми точками в факторном пространстве.

Для построения полиномиальных уравнений связи использовались значения прочности грунта (см. таблицу).

Полученное уравнение связи имеет следующий вид:

$$\delta_{dl} = -0,4X1 - 0,89X2 - 0,49X3 + 0,21X1X2X3 + 2,16. \quad (1)$$

Анализ уравнения показывает, что температура ( $X2$ ) в наибольшей степени влияет на длительную прочность грунта. Засоленность ( $X3$ ) и амплитуда динамического воздействия ( $X1$ ) оказывают примерно одинаковое влияние, но в два раза меньше влияния температуры.

Использовать данное уравнение для получения численных значений  $\delta_{dl}$  можно при условии нормализации факторов, избавляясь от размерности.

Проверка на адекватность полученного уравнения производилась путем сравнения экспериментальных и вычисленных значений  $\delta_{dl}$ , отличия которых друг от друга оказались весьма незначительными. Полученный коэффициент корреляции 0,97 свидетельствует о большой тесноте связи двух выборок.

Таким образом, можно видеть, что влияние динамической нагрузки на изменение показателя длительной прочности достаточно велико. Используя уравнение, можно оценить предел длительной прочности пластичномерзлых грунтов основания реальных сооружений, испытывающих динамическое воздействие.

До настоящего времени в практике проектирования исследований работ и расчетов оснований на мерзлых грунтах методики учета динамических воздействий не существует.

Для талых грунтов проектирование сооружений, работающих в условиях действия динамических нагрузок, регламентировано рядом справочных и нормативных документов (Руко-

водство по проектированию..., 1982, СНиП 11-19-79, 1980).

При проверке среднего статического давления под подошвой фундамента на естественном талом основании влияние динамических нагрузок учитывается коэффициентами условий работы.

При повышенных требованиях к расчетам оснований сооружений прогноз ожидаемых изменений свойств грунтов рекомендуется производить на основе экспериментальных исследований.

Для расчета сопротивления нормальному давлению ( $R$ ) пластичномерзлых грунтов при заданной амплитуде динамического воздействия можно воспользоваться полученным нами многофакторным уравнением (1). Допущением в данном случае является линейный характер изменения  $\delta_{dl}$  при увеличении относительной амплитуды динамической нагрузки до 15%.

Таким образом, проведенные исследования позволяют практически подойти к решению задачи учета динамической нагрузки, а методику и полученные результаты использовать в нормативных документах (в частности, в регламенте по строительству объектов для газовой промышленности).

Для более широких обобщений, при наличии других грунтовых условий и расширенного диапазона изменения параметров воздействий необходимо проведение дальнейших исследований.

## ВЫВОДЫ

1. В настоящей работе впервые сформулирована задача исследования совместного влияния внешних полей на свойства грунтов, намечены пути ее решения, разработана методика и приборы для динамических испытаний пластичномерзлых грунтов.

2. Выполненные эксперименты (8 опытов, продолжительностью по 15—20 сут. каждый) обнаружили увеличение скорости деформирования пластичномерзлых глинистых грунтов при дополнительных динамических нагрузках. Этот экспериментальный факт требует учета при проектировании либо снижение расчетного сопротивления грунта на сжатие статической нагрузкой, либо введение повышающего коэффициента к действующей статической нагрузке.

3. Продолжение исследований предполагает расширение круга исследуемых грунтов (пески, супеси, глины), а также границ изменения параметров динамической составляющей нагрузки. Это позволит выявить природу процессов, возникающих при совместном влиянии теплового и вибрационного полей, и дать обобщенные практические рекомендации по оценке и прогнозу

прочности и деформируемости пластичномерзлых грунтов с учетом вибрационного воздействия.

### Литература

ГОСТ 24586-90. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов, 1990.

Руководство по проектированию фундаментов машин с динамическими нагрузками. М., Стройиздат, 1982.

СНиП 11-19-79. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. М., Стройиздат, 1980.

СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. М., Стройиздат., 1989.

Kaplar C.W. Laboratory determination of the dynamic moduli of frozen soils and of ice // Proceed. 1st Int. Conf. Permafrost, Lafayette, Ind., NAS-NRG Publ. 1963, 1287, p. 293-301.

Nakano Y. and Froula N.H. Sound and shock transmission in frozen soils // North Am. Contrib. 2d Int. Conf. Permafrost, Yakutsk, USSR, National Acad. Sci., Washington, 1973, p. 359—369

Stevens H.W. Viscoelastic Properties of frozen Soil under vibratory loads // North Am. Contrib. 2d Int. Conf. Permafrost, Yakutsk, USSR, National Acad. Sci., Washington, 1973, p. 400—409.

*Поступила в редакцию  
19 июня 1997 г.*