

УДК 624.131.43(571.56-25)

## НАМЫВНЫЕ ГРУНТЫ В ГОРОДЕ ЯКУТСКЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ОСНОВЕ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Вахрин И.С., Кузьмин Г.П.

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова» СО РАН, Якутск,  
e-mail: kloydspir@rambler.ru, kuzmin@mpi.ysn.ru

В статье дано описание техногенных намывных грунтов в г. Якутске. Излагается метод определения плотности и пористости намывных грунтов расчетным путем по результатам компрессионных испытаний, выполняемых для получения деформационных характеристик талых и оттаивающих мёрзлых грунтов. Отмечается, что освоение территорий намывных грунтов представляет практический интерес для организации зон отдыха и расширения жилых массивов. Указывается, что устройство намывных территорий способом гидромеханизации отличается высокой производительностью разработки, транспортирования и укладки подрусловых отложений. Поэтому, несмотря на сложности и короткий сезон выполнения намывных работ, связанные с климатическими условиями, в г. Якутске в пойме р. Лены впервые на значительной площади осуществлён гидронамыв грунтов для строительства жилых домов. Отмечается, что гидронамыв на первой площадке (микрорайон 202) был проведён в конце 1970-х – начале 1980-х гг., а на второй площадке (микрорайон 203) в 1990–1992 гг. Окончательное формирование площадки под застройку микрорайона 203, откуда были отобраны образцы грунта, было завершено летом 2013 г., когда был восстановлен вывезенный слой намывного грунта на юго-западной части территории. Приводятся устройство и характеристики прибора компрессионного сжатия Г.Т. 2.0.5. Изложена методика экспериментального определения физических свойств грунтов. Обоснована возможность определения плотности и пористости грунтов по результатам компрессионных испытаний, исключающих боковое расширение образцов при нагружении их вертикальными нагрузками. Приведены результаты этих определений.

**Ключевые слова:** сжимаемость, нагрузка, деформация, плотность, пористость, талый грунт

## HYDRAULIC-FILL SOILS IN YAKUTSK AND DETERMINATION OF THEIR PHYSICAL PROPERTIES FROM CONSOLIDATION TESTS

Vakhnin I.S., Kuzmin G.P.

Melnikov Permafrost Institute SB RAS Merzlotnaya St., Yakutsk,  
e-mail: kloydspir@rambler.ru, kuzmin@mpi.ysn.ru

This article describes the soils of hydraulic fills in Yakutsk and presents the method for estimating their density and porosity based on consolidation test data for thawed and thawing frozen soils. Land reclamation is a practical method of land expansion to provide for housing and recreational needs. Hydraulic filling is considered to be the most efficient technique for dredging, transporting and placing the river deposits. Extensive hydraulic fills were therefore used in Yakutsk for residential construction in the Lena River floodplain despite the technical and seasonality constraints on filling activities imposed by climate. Hydraulic fill was first placed into the floodplain area in the late 1970s–early 1980s for a new residential development District 202. In 1990–1992, hydraulic filling was undertaken to expand land for construction of District 203. The filling of the area for District 203, where soil samples were collected for this study, was completed in the summer of 2013 by replacing the removed fill layer in its south-western part. The article contains a description of the Г.Т. 2.0.5. consolidometer used in this study. Also presented is the experimental procedure for determining the physical properties of soils. It is shown that soil density and porosity can be estimated from the results of consolidation tests when the specimens are confined laterally and loaded vertically. The estimated values of these parameters are provided.

**Keywords:** compression, load, deformation, density, porosity, thawed ground

Развитие производительных сил северных районов вызывает необходимость соответствующего объёма строительства жилищного фонда и других объектов инфраструктуры. При этом для строительства в первую очередь выбирают благоприятные участки, площадь которых существенно сокращается. Обычно населённые пункты располагают вблизи рек и озёр, к которым примыкают поймы со старичными озёрами, заболоченными понижениями, затопливаемые в паводковые периоды. Такие территории осваиваются для организации зон отдыха и расширения жилых массивов.

Достоинством их является возможность осуществления компактных планировочных решений, обеспечения выхода населённых пунктов к водоёмам, организации комфортабельных зон отдыха и комплексного выполнения реконструкции зданий и сооружений. Инженерная подготовка пойменных территорий, направленная на недопущение подтопления, ликвидацию заболоченности, увеличение несущей способности грунтов, как оснований зданий и сооружений, может быть выполнена способом гидронамыва грунтов, характеризующимся высокой производительностью разработки, транспорти-

рования и укладки подрусловых отложений, сложенных песчаными грунтами с высокой несущей способностью. В условиях распространения многолетнемерзлых грунтов применение гидромеханизации для устройства строительных площадок приводит к растеплению многолетнемерзлых грунтов основания. Необходимым условием эффективного применения гидронамыва в этих условиях является разработка надёжных методов многолетнего прогноза температурно-влажностного режима и несущей способности грунтового массива, а также выбор технологии намыва и метода строительства. Несмотря на сложности решению этих задач, в г. Якутске в пойме р. Лены впервые на значительной площади осуществлён гидронамыв грунтов для строительства жилых домов. Работы по намыву грунтов на первой площадке (микрорайон 202) были проведены в конце 1970-х – начале 1980-х гг., а на второй площадке (микрорайон 203) в 1990–1992 гг. Окончательное формирование площадки под застройку микрорайона 203, откуда были отобраны образцы грунта для исследования, было завершено летом 2013 г., когда был восстановлен слой вывезенного намывного грунта на юго-западной части территории. Для устройства намывной территории была выбрана городская протока р. Лены, представляющая собой совокупность участков береговой отмели, низкой и высокой поймы с абсолютными отметками поверхности от 84,0–87,0 до 90–93,5 м. Разность отметок поверхности пойменного комплекса обычно не превышает 8,0 м, поверхность надпойменной террасы возвышается над поймой в среднем также на 6,0–8,0 м. Территория характеризуется наличием большого количества старичных озёр различной конфигурации, разной площади и протяжённости. Пойменный комплекс находился в стадии активного заиливания, торфообразования и зарастания луговой травой и ивняком. Пойма р. Лены практически ежегодно подвергается затоплению весенними паводковыми водами, а в отдельные годы и летними паводками. Территория намывных грунтов микрорайона 203 является самостоятельной природно-технической системой, для которой характерна своеобразная природная обстановка. Исследуемый район расположен в зоне сочленения склона Алданской и южного борта Вилюйской синеклизы. На этой территории выделяются два структурных яруса: архейский кристаллический фундамент и покрывающий его осадочный чехол,

включающий породы протерозоя, кембрия, юры, мела, неогена и четвертичных отложений. В строении осадочного чехла участвуют морские карбонатные, терригенно-карбонатные, а также терригенно-континентальные отложения палеозойского и четвертичного возраста [1]. Коренные породы повсеместно перекрыты современными пойменными и верхнечетвертичными аллювиальными отложениями. В понижениях рельефа грунты представлены оторфованными и заиленными супесями и суглинками мощностью 3,5–4,3 м. Аллювий представлен в основном песками различной крупности, в котором нередко встречаются супеси и суглинки мощностью до 1,5–2,0 м. Общая мощность аллювиального комплекса в пределах поймы составляет 18,0–22,5 м. Мощность намывных грунтов в зависимости от морфологии естественного основания оставляет 8,5–10,0 м на гривах и прирусловых валах поймы, 12,0–14,0 м на участках погребённых старичных озёр. На территории намывных грунтов развиты надмерзлотные воды, преимущественно приуроченные к нижней половине талой зоны мощностью в среднем 17,5 м при максимальных размерах талика 26,0 м. По химическому составу эти воды относятся к пресным гидрокарбонатно-кальциевым. Максимальным и постоянным водонасыщением обладают талые грунты на границе с мёрзлыми, ежегодно пополняемые паводковыми водами по погребённым (реликтовым) таликам, сообщающимся с подрусловыми водами реки Лены, а также водами надмерзлотного талика. Основное питание подземных вод территории намыва осуществляется за счёт фильтрации речной воды через песчаную толщу по погребённым таликам. Составляющая водного баланса за счёт атмосферных осадков незначительна – около 230–250 мм в год. Рассматриваемая территория расположена в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород мощностью до 240–310 м. Глубокие надмерзлотные, и возможно, сквозные гидрогенные талики приурочены к углублённым участкам русла городской протоки р. Лены. Талики мощностью до 15,0–20,0 м характерны и для двух стариц, частично погребённых при намыве 202 и 203 микрорайонов. На остальной части площади до намыва были развиты талики мощностью до 6,0–8,0 м. По результатам исследований [1] перед намывом надмерзлотные талики мощностью 0,2–2,1 м в основном имели распространение на плоских межстаричных пространствах и прирусловых гри-

вах, где формировались многолетнемерзлые породы не сливающегося типа. В разные годы в зависимости от условий увлажнения грунтов в предзимний период, времени затопления территории летними паводками, изменения толщины снежного покрова и других факторов значения мощности и площади надмерзлотных таликов могли как увеличиваться, так и уменьшаться, вплоть до полного их промерзания. Современные природные условия способствовали новообразованию многолетнемерзлых пород в таликах береговой части старичных озёр и увлажнённых понижениях. Температура грунтов поймы в целом колебалась от 0 °С до – 2 °С. На гривах и плоских межстаричных участках она минимальная, а на участках с не сливающейся мерзлотой и в старичных понижениях изменялась от 0 до 0,5 °С [1]. Процесс промерзания намывных грунтов чаще всего происходит без видимого льдообразования в связи с интенсивной фильтрацией летних атмосферных осадков в предзимний период. Верхняя граница многолетнемерзлых грунтов на намывной территории микрорайона 203 вследствие деградации погребённой криолитозоны существенно понизилась. В процессе намыва грунтов способом гидромеханизации вместе с пульпой происходил приток значительного количества тепла к кровле многолетней мерзлоты. Как отмечали [1], в процессе намыва площадки микрорайона 202 верхняя граница многолетнемерзлых пород уже на начальном этапе производства работ в конце 1970-х – начале 1980-х гг. в среднем понизилась на 1,0–5,0 м. На процесс деградации многолетнемерзлых пород влияет ежегодное поступление в намывную толщу и подстилающие грунты паводковых вод через высокопроницаемые песчаные намывные грунты с коэффициентом фильтрации до 10–15 м/сутки. Подземные воды надмерзлотных таликов в намывных и подстилающих грунтах оказывают определяющее значение в формировании температурного режима многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых грунтов. Как показывают результа-

ты наблюдений за температурой грунтов на незастроенной территории с мощной толщей намывного массива, верхняя граница многолетнемерзлых пород может находиться на различных стадиях стабилизации. Криолитозона в контактной зоне с водоносным таликом может быть деградационной, аградационной или стабилизированной. Низкоградиентные и безградиентные температуры грунтов ниже подошвы слоя годовых теплооборотов в подстилающих намывную толщу грунтах на территории микрорайона 203 могут свидетельствовать как о стабилизации нарушенного в ходе и после намыва их теплового поля, так и продолжении деградационного процесса в верхнем горизонте погребённой криолитозоны. Техногенные намывные грунты и верхняя часть грунтов естественного основания находятся в талом состоянии. Глубина сезонного промерзания на намывной территории составляет около 4,5 м. Мерзлотные условия сложные и изменчивые, так как находятся под воздействием многих факторов, взаимодействующих в различных сочетаниях. Основные из них – состав отложений, режим дренирования слоя сезонного промерзания, испарение с поверхности в летний период, мощность снежного покрова, инфильтрация атмосферных осадков. Физические свойства этих грунтов изучены очень слабо. Целью исследования является определение плотности скелета и пористости песчаного намывного грунта по данным стандартных компрессионных испытаний, необходимых для принятия оптимальных конструктивных решений фундаментов и технологий их возведения.

#### Материалы и методы исследования

По гранулометрическому составу испытанный грунт классифицируется как песок средней крупности [2], который в основном слагает массив намывной территории микрорайона 203 (табл. 1).

Основные физические свойства испытанного песчаного грунта представлены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты гранулометрического анализа исследуемого грунта

Гранулометрический состав%, размер частиц в мм							Грунты. Классификация ГОСТ 25100-2011
10,0–5,0	5,0–2,0	2,0–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	
0,5	1,5	7,0	8,0	50,0	31,0	2,0	Песок средней крупности

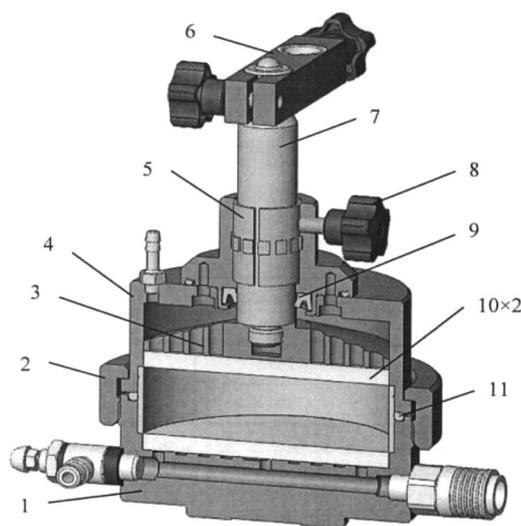
Таблица 2

Физические свойства исследованного песка

Наименование	Влажность, $w$ , д.ед.	Плотность грунта, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность скелета грунта, $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность частиц грунта, $\rho_p$ , г/см <sup>3</sup>	Пористость, $n$ , %	Коэффициент пористости, $e$ , д.ед.	Коэффициент водонасыщения $S_w$ , д.ед.
Песок средней крупности	0,04	1,66	1,60	2,66	39,85	0,66	0,16



а)



б)

Прибор компрессионных испытаний образцов грунта: а) общий вид, б) одометр, 1 – основание; 2 – гайка; 3 – штамп; 4 – образец грунта; 5 – втулка; 6 – держатель; 7 – шток; 8 – винт; 9 – манжета; 10 – фильтр; 11 – уплотнительное кольцо

В Российской Федерации в настоящее время действует нормативный документ [3], в котором рекомендуется определять методом компрессионного сжатия следующие характеристики: коэффициент сжимаемости, модуль деформации, структурную прочность на сжатие, коэффициенты фильтрационной и вторичной консолидации, и для песков мелких и пылеватых, глинистых грунтов с показателем текучести  $I_L > 0,25$ , органо-минеральных и органических грунтов, относительное суффозионное сжатие для засоленных песков (кроме гравелистых), супесей и суглинков, начальное давление суффозионного сжатия. Данная установка (рисунок)

для испытания грунта включает в себя [4]: а) станина с нагрузочным устройством и б) компрессионный прибор (одометр).

Данные компрессионных испытаний позволяют определять также плотность и пористость грунтов на всех ступенях давления [5, 6]. Для этого из исследуемого грунта изготавливают два идентичных образца, один из которых используют для определения начальных значений плотности и пористости грунта. Для этого определяют начальный объем образца, высушивают его при температуре 105 °С до установления постоянной массы, определяют массу высушенного образца и вычисляют начальную плотность и пори-

стость грунта. Второй образец помещают в металлический цилиндр компрессионного прибора, испытывают его под ступенчато-возрастающим давлением с выдержкой на каждой ступени до условной стабилизации деформации и определяют абсолютную деформацию образца. При испытании образца в условиях невозможности бокового расширения объем его изменяется только за счёт продольной деформации.

Пористость грунта на  $i$ -й ступени давления можно выразить зависимостью

$$n_i = 1 - \frac{\rho_{d,i}}{\rho_s}, \quad (1)$$

где  $\rho_{d,i}$  – плотность скелета грунта на  $i$ -й ступени нагрузки;  $\rho_s$  – плотность твёрдых частиц.

Плотность скелета грунта на  $i$ -й ступени давления можно представить в виде

$$\rho_{d,i} = \frac{m_d}{V_i}, \quad (2)$$

где  $m_d$  – масса высушенного образца;  $V_i$  – объем образца на  $i$ -й ступени давления.

Входящие в (2) составляющие определяются по формулам

$$m_d = \rho_{d,o} * S * h_o, \quad (3)$$

$$V_i = S * (h_o - \Delta h_i), \quad (4)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения образца;  $h_o$  – начальная высота образца;  $\Delta h_i$  – приращение высоты образца на  $i$ -й ступени давления.

Подставив (3) и (4) в (2), находим выражение плотности грунта на  $i$ -й ступени давления

$$\rho_{d,i} = \frac{\rho_{d,o} * h_o}{(h_o - \Delta h_i)}. \quad (5)$$

После подстановки (5) в (1), выражение пористости грунта принимает вид

$$n_i = 1 - \frac{\rho_{d,o} h_o}{\rho_s (h_o - \Delta h_i)}. \quad (6)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 3 представлены для каждой ступени нагружения расчётные значения плотности скелета и пористости грунта, полученные по данным компрессионных испытаний.

**Таблица 3**  
Расчетные значения плотности и пористости грунта на ступенях давления

$\sigma$ , МПа	$\Delta h_p$ , мм	$\rho_{d,i} = \frac{\rho_{d,o} * h_o}{h_o - \Delta h_i}$	$n = 1 - \frac{\rho_{d,o} h_o}{\rho_s (h_o - \Delta h_i)}$
0,000	0,00	1,596	0,400
0,107	0,17	1,607	0,396
0,131	0,18	1,608	0,396
0,182	0,21	1,609	0,395
0,281	0,26	1,613	0,394
0,382	0,30	1,615	0,393
0,481	0,33	1,617	0,392

Как видно из табл. 3, с увеличением давления, как и следовало ожидать, плотность грунта повышается, а пористость его уменьшается.

### Заключение

Экспериментальные исследования позволили:

1. По данным компрессионных испытаний намывных грунтов на каждой ступени давления можно определить стабилизированные значения плотности и пористости.

2. На методы определения плотности и пористости грунтов по данным компрессионных испытаний грунтов получены патенты Российской Федерации на изобретения.

### Список литературы / References

1. Роман Л.Т., Цернант А.А., Поleshchuk В.Л., Цеева А.Н., Леонова Н.И. Строительство на намывных грунтах в криолитозоне. М., 2008. 322 с.  
Roman L.T., Tsernant A.A., Poleshchuk V.L., Tseeva A.N., Leonova N.I. Construction on Hydraulic Fill in Permafrost Regions. M., 2008. 322 p. (in Russian).
2. ГОСТ 25100 – 2011. Грунты. Классификация. М.: Межгосударственный стандарт, 2013. 78 с.
3. ГОСТ 12248 – 2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2011. 156 с.
4. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010: монография. 2-е изд., доп. и испр. М.: ООО «Прондо», 2014. 812 с.  
Boldyrev G.G. Methods for Determining the Mechanical Properties of Soils with Comments to GOST 12248-2010. 2nd ed., updated. M.: ООО «Prondo», 2014. 812 p. (in Russian).
5. Способ определения плотности грунта при компрессионных испытаниях // Патент на изобретения Российской Федерации № 2569915. G01N 9/00. Заявитель и патентообладатель Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. № 2014139936/28. заявка.02.10.2014. опубли. 10.12.2015. Бюл. № 34.
6. Кузьмин Г.П., Вахрин И.С. Способ определения характеристик пористости грунта при компрессионных испытаниях // Патент на изобретения № 2619821. Заявитель и патентообладатель Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. № 2015156005. заявка.26.12.2015. опубли. 18.05.2017.