

РАСЧЕТ КОНСОЛИДАЦИИ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ ВСЕХ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ДАННЫЙ ПРОЦЕСС

В. Д. Гейдт, Л. В. Гейдт, А. В. Гейдт
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

CALCULATION OF SOIL CONSOLIDATION TAKING INTO ACCOUNT ALL MAJOR PARAMETERS AFFECTING THIS PROCESS

Vladimir D. Geidt, Larisa V. Geidt, Andrey V. Geidt
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Поиск способов ускорения подготовки оснований на водонасыщенных заторфованных территориях является актуальной задачей и требует дальнейшего научного изучения. Проведенные исследования позволили установить, что вибровоздействие может быть эффективным средством ускорения консолидации водонасыщенных грунтов оснований. По результатам теоретических и экспериментальных исследований был разработан метод численного решения задачи.

Ключевые слова: водонасыщенный грунт, консолидация, поровое давление, глубинное вибровоздействие, напряжения

Введение

Инженерная подготовка территории – важнейшая задача при обустройстве нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири. При этом вопрос сокращения сроков и скорости консолидации (уплотнения) слабых водонасыщен-

Abstract. The search for ways of accelerating the preparation of bases on water-saturated boggy areas is an up-to-date problem and requires further scientific study. The conducted researches made it possible to establish that vibration can be an effective means of accelerating the consolidation of water-saturated soils of the bases. Using theoretical and experimental research, a method for numerical solution of the problem was developed.

Key words: water-saturated soil, consolidation, pore pressure, deep vibration, stresses

ных грунтов является основным. Значительно усложняют его решение климатические условия региона, где инженерную подготовку территории под строительство приходится осуществлять за время короткого сибирского лета. Между тем, спрос на углеводородное сырье по-прежнему

высок, и промедление в вопросах добычи чревато негативными экономическими эффектами. В связи с этим поиск способов ускорения подготовки оснований на водонасыщенных заторфованных территориях, а в Тюменской области торфяные грунты занимают около 70 % площади, до сих пор является актуальным.

В современной строительной практике в целях ускорения консолидации грунтов хорошо себя зарекомендовало вертикальное дренирование [1–3]. Однако в условиях Тюменской области (особенно ее северных территорий) просто дренирования оснований, сложенных водонасыщенными торфами и заторфованными грунтами, оказывается недостаточно. Необходимо использовать комплексное воздействие на грунты основания, а именно – совмещать дренирование и глубинное вибровоздействие в междренном пространстве, что в свою очередь создает избыточное поровое давление с последующим увеличением оттока воды в дренаж [4, 5]. Сочетание этих двух способов может значительно ускорить процесс консолидации.

Объект и методы исследования

Сущность уплотнения грунтов глубинной вибрацией заключается в следующем. Специальный механизм приводит в движение вибратор, который находится на поверхности (в таком случае имеет место быть поверхностная вибрация) или внутри уплотняемого слоя (тогда осуществляется глубинная вибрация) и является источником колебательных движений отдельных частиц и агрегатов грунта. За счет кинетической энергии вибратора расположенные в зоне его действия частицы грунта начинают колебаться и смещаться относительно друг друга и, переориентируясь, уплотняются. Эффект увеличения плотности грунтов зависит от ряда факторов, к главным из них следует отнести степень однородности размеров частиц – структурные связи между ними.

Если группа частиц расположена в зоне действия вибратора и находится в состоянии колебательных движений, то в них будут развиваться инерционные силы, величина которых прямопропорциональна массам частиц. Так как массы ча-

стиц неодинаковы, то за счет разности в силах инерции на их границах возникают напряжения. Чем больше разница в местах отдельных частиц грунта, тем скорее происходит относительное перемещение частиц и тем слабее силы связи между ними. Таким образом посредством вибрации осуществляется эффективное уплотнение несвязного грунта, включающего в себя частицы различной крупности со слабыми связями.

Авторами было проведено исследование, посвященное изучению процесса консолидации при влиянии глубинного вибрирования на водонасыщенный пригруженный грунт с вертикальными дренами и без дрен [6–8]. Осуществлена серия лабораторных и численных экспериментов. Данные, полученные в ходе экспериментов, были использованы для разработки математической модели этих процессов. Их сравнение с результатами измерений, которые были получены в лабораторных условиях, позволило сделать вывод, что уровень данной модели является адекватным. Указанная математическая модель реализована в комплекте программ, написанных в среде визуального объектно-ориентированного программирования для расчетов на ЭВМ процессов консолидации заторфованных оснований при наличии дрен и вибрации.

Полученная математическая модель консолидации заторфованного грунта в условиях полного водонасыщения и отсутствия газовой фазы позволяет прогнозировать зависимость осадки, порового давления и напряжения в грунте от времени и координат, а также комплексно учитывать целый ряд факторов. Среди них – переменность и нелинейность сжимаемости от внешней нагрузки, режимы вибрации, различие водопроницаемости грунта в горизонтальном и вертикальном направлениях, геометрические размеры дрен и расстояния между ними, а также ряд других.

Экспериментальная часть

В лабораторных условиях определялись:

- зависимости от времени избыточного давления в поровой воде P в отдельных точках образца после включения и после выключения вибратора в условиях отсутствия оттока воды;

- значения количеств воды, отфильтрованной в горизонтальных и вертикальных направлениях при различных режимах вибрации.

В полевых условиях измерены временные зависимости избыточного давления в поровой воде P в отдельных точках, а также осадки исследуемого основания на различном удалении от оси вибрирования.

Анализ данных экспериментальных исследований позволил прийти к следующим выводам. Вибровоздействие приводит к значительному увеличению избыточного порового давления P , которое, между тем, не превышает величины внешней нагрузки. Увеличение порового давления сопровождается уменьшением напряжения в скелете на соответствующую величину.

Относительно величины максимального избыточного порового давления P_{max} выявлены следующие закономерности:

- до некоторого критического радиуса $R_{крит}$ величина максимального увеличения избыточного порового давления P_{max} равна внешней нагрузке;
- на расстояниях от оси вибрации, превышающих этот критический радиус, величина P_{max} уменьшается с увеличением расстояния от оси вибрирования;
- критическое расстояние увеличивается с увеличением интенсивности вибрирования и уменьшается с уменьшением коэффициента пористости e ;
- на расстояниях от оси вибрирования $R < R_{крит}$ давление в поровой воде P_{max} не зависит от R . При $R > R_{крит}$ величина максимального увеличения избыточного порового давления P_{max} уменьшается с увеличением R .

Ярко выраженный «релаксационный» характер носит увеличение избыточного порового давления P во времени после включения вибрации, а также уменьшение избыточного порового давления P после завершения вибрации.

Вибровоздействие не приводит к нарушению известного соотношения $P = q$, где q – величина внешней статической нагрузки.

Количество отфильтрованной воды при наличии вертикальной дрены увеличивается по срав-

нению с одномерной консолидацией приблизительно в 1,2 раза. Обнаружено, что количество воды, отфильтрованной при наличии вертикальной дрены, сложным образом связано с длительностью предварительной одномерной консолидации. Однако этот эффект не превышает 10 %.

Исследования показали, что в начальный момент времени при включении вибратора скорость консолидации возрастает (по сравнению с безвибрационной на 30 %). Однако через несколько секунд скорость оттока воды – как в вертикальном, так и в радиальном направлениях – практически не зависит от вибровоздействия.

Предложенная модель процесса консолидации при глубинном вибровоздействии удовлетворительно согласуется с результатами измерений в лабораторных условиях. Впервые в практику лабораторных исследований процесса консолидации введены замеры количества отфильтрованной воды в качестве удобной, надежной и достаточно информативной (относительно изучаемого процесса консолидации) измеряемой величины.

Предложенная математическая модель позволяет комплексно учитывать:

- результаты компрессионных испытаний;
- нелинейную зависимость водопроницаемости от коэффициента пористости;
- различие водопроницаемости грунта в горизонтальном и вертикальном направлениях;
- скорости распространения, диссипации и затухания механических волн в среде;
- режимы вибрации;
- геометрические размеры дрен и расстояния между ними;
- механизм взаимодействия продольных волн с водонасыщенным торфом;
- водопроницаемость грунта, подстилающего торфяную толщу.

В программе *Vibro-Drena* весь процесс расчета разбит на три этапа. Это – довибрационная (одномерная) консолидация; консолидация в условиях непосредственного вибровоздействия; послевибрационная консолидация.

Используемые входные данные в программах можно представить в виде таблиц на рис. 1, 2.

Исходные данные

Количество			Параметры, определяющие выбор граничных условий (водоупор или водоотвод)			Основная нагрузка			Зона влияния $D_e, м$	Коэффициент вибрации O_v
слоев грунта L_o	столбов L_h	этапов нагружения I_q	отметка измерения $Z_{B'}, м$	степень консолидации в вертикальном направлении U_v	степень консолидации в радиальном направлении U_r	ширина $B_{f'}, м$	длина $A_{f'}, м$	отметка $Z_{f'}, м$		

Траектория нагружения

Нагрузка $F_q, кПа$	Поровое давление на отм. Z_b $P_{B'}, кПа$	Время $T_q, мин$

Слои грунта

Толщина слоя $H, м$	Плотность частиц $\rho, г/см^3$	Коэффициент пористости $e, д. ед.$

Параметры консолидирующихся слоев

Номер слоя K_i	Цементная прочность $dF_c, кПа$	Давление насыпной, $P, кПа$	Характерная		Упругая доля $O_u, кПа$	Сжатие пластическое $A_s, кПа$	Проницаемость		Боковое давление	
			сжимаемость $E, кПа$	проницаемость $K_x, мм^2$			изменение $C_k, мм^2$	анизотропия $O_{k'}, мм^2$	начальное $C_o, кПа$	первичное $C_{nc}, кПа$

Сводка общих и контрольных данных

Точка в расчетной координатной сетке ТЧК КРС	Глубина $A_m, м$	Средние эффективные напряжения				$dF/F_o, кПа$
		бытовые $F_o, кПа$	дополнительные $dF, кПа$	текучести $F_p, кПа$	цементная прочность $F_c, кПа$	

Рис. 1. Представление исходных данных и результатов расчета.
Таблицы ввода исходных данных

Условно-мгновенное конечное состояние

Точка в расчетной координатной сетке ТЧК КРС	Эффективное напряжение $F, \text{кПа}$	Избыточное поровое давление $dP, \text{кПа}$	Коэффициент пористости $e, \text{д. ед.}$	Вертикальное перемещение $S, \text{мм}$	$S, \text{мм} / e, \text{д. ед.}$

Ход консолидации

Точка в расчетной координатной сетке ТЧК КРС	Эффективное напряжение $F, \text{кПа}$	Избыточное поровое давление $dP, \text{кПа}$	Коэффициент пористости $e, \text{д. ед.}$	Вертикальное перемещение $S, \text{мм}$	$S, \text{мм} / dP, \text{кПа}$

Рис. 2. Представление исходных данных и результатов расчета.
Таблицы вывода результатов расчета и ординаты эпюр для их графической интерпретации

Выходные величины представляются в виде графиков в соответствующий момент времени, заданный входным расписанием, в соответствии с которым на экране отображаются графики, а также результаты пространственно-временных

выходных величин. На рис. 3–8 для наглядности приведены некоторые графики зависимости исследуемых величин, полученные по результатам программирования на ЭВМ процессов вибрационной консолидации.

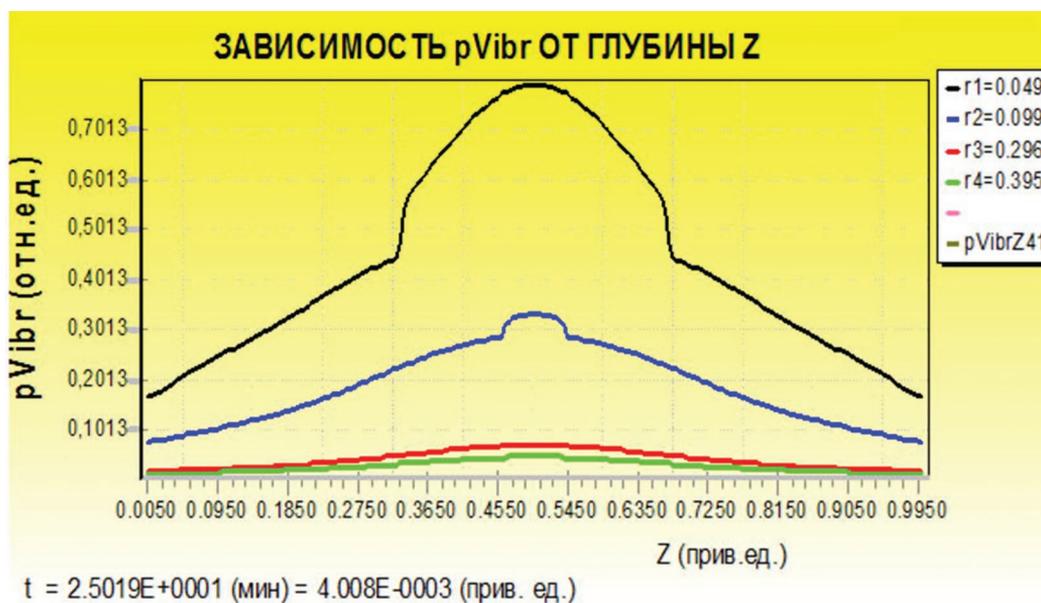


Рис. 3. Результаты расчетов вибрационного давления от глубины

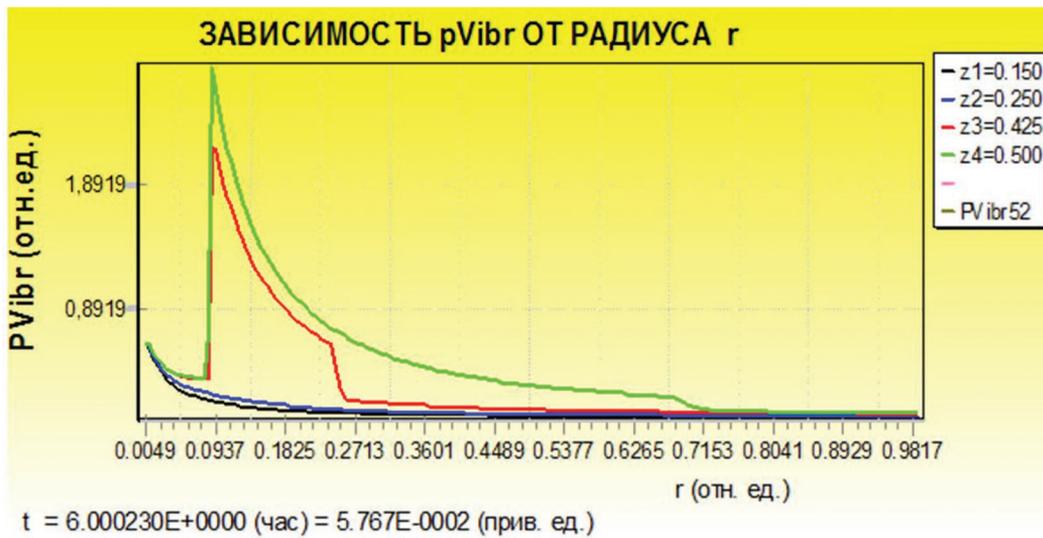


Рис. 4. Результаты расчетов вибрационного давления от радиуса

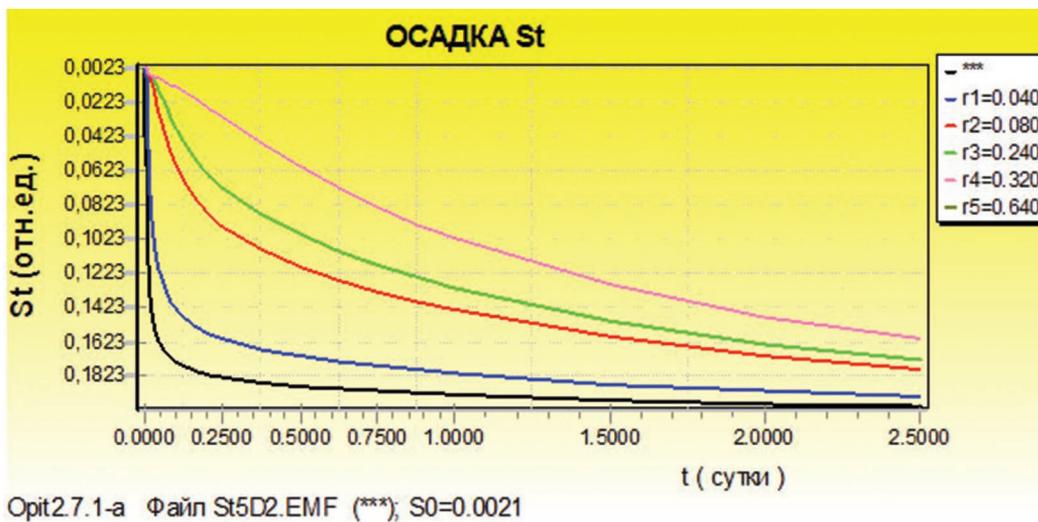


Рис. 5. Результаты расчетов осадки

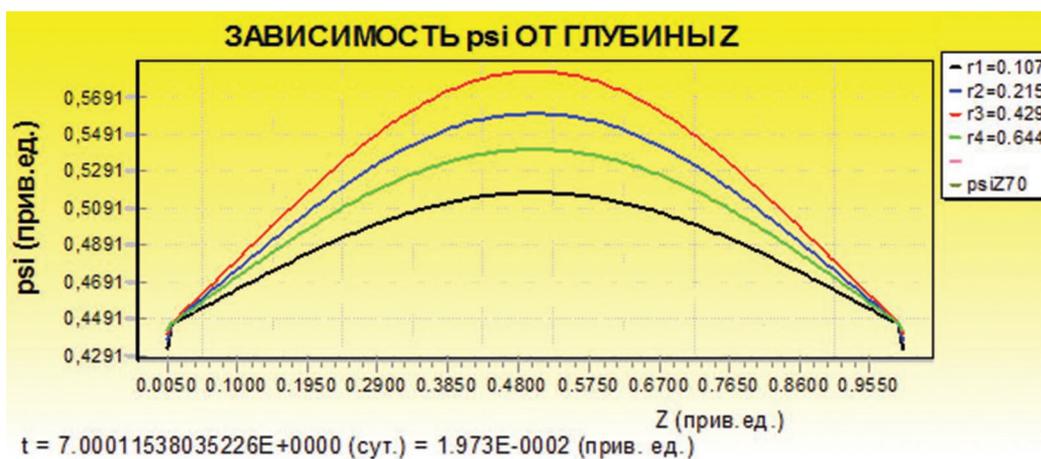


Рис. 6. График зависимости приведенного коэффициента пористости от глубины для разных удалений от дрены



Рис. 7. График зависимости удаленной воды в горизонтальном (Q_{z2}) и вертикальном (Q_{r2}) направлениях в сравнении с суммарным количеством удаленной воды

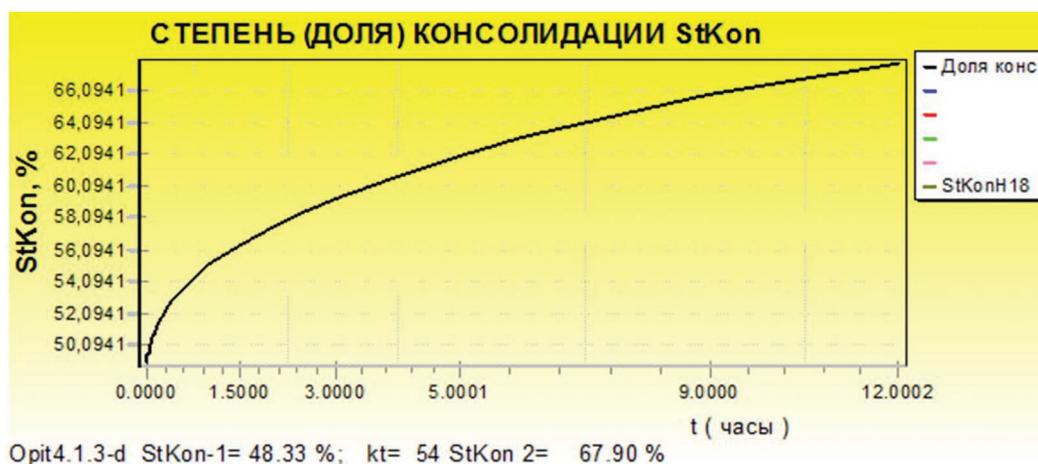


Рис. 8. Степень консолидации

Большое значение для успешной эксплуатации программы имеет оптимальная подготовка исходных данных, при выборе которых насколько возможно сокращено их число, т. к. при большом количестве вводимых данных неизбежно совершение случайных ошибок пользователя программы. Уменьшает число ошибок при использовании дисплея и удобная форма ввода данных в виде представленных выше таблиц, в оглавлении колонок которых указывается наименование данного, его размерность и формат (рис. 1). Уменьшает число ошибок пользователей и ввод данных только в форме с фиксированной запятой. Она используется даже для целых данных, а их обращение к целой форме производится внутри программы.

Сократить количество вводимых исходных данных по сравнению с обычными программами такого типа удалось за счет выполнения операций определения числа расчетных точек, а также толщины подслоя и шага по времени внутри самой программы. Например, толщина подслоя определяется по данным о толщинах разнородных слоев. Вначале вычисляется наибольшее общее кратное этих толщин. Если оно оказывается меньше максимально допустимого, то это кратное принимается в качестве шага. Если нет, то наибольшее кратное последовательно уменьшаем в два раза, пока кратное не окажется меньшим максимально допустимого шага. Первое кратное, удовлетворяющее этому условию, принимается в качестве шага.

Результаты

Результаты расчетов выводятся в виде таблиц (рис. 2). В каждой из них содержатся относящиеся к определенной степени осадки основания и соответствующего ей момента времени, значения порового давления, коэффициента пористости и осадки каждой точки разностной сетки, т. е. их эпюры. Оси эпюр располагаются на свободном месте справа от таблиц. Кроме того, отдельными строками выводится величина времени условной стабилизации скорости осадки основания и ее максимальное за период консолидации значение.

Надежность современных программ очень высока, т. к. отказы и сбои в процессе счета контролируются. Однако сомнения в достоверности результатов расчетов оправданны, поскольку даже после отладки программы остаются не обнаруженные ошибки и могут быть машинные сбои. Поэтому необходимо контролировать результаты расчетов, получая их, по крайней мере, за две прогонки программы с одним и тем же вариантом исходных данных, чтобы убедиться, что результаты не искажены влиянием случайных сбоев или не обнаруженных отказов машины. Двойной счет лучше выполнять на различных ЭВМ или на одной и той же машине, но с некоторым интервалом (не менее 1-2 суток). Совпадение результатов двух расчетов является критерием отсутствия ошибок, связанных с работой ЭВМ.

Обсуждение

Независимыми от ЭВМ являются погрешности расчета, связанные с заменой производной конечной разностью. Эти погрешности можно контролировать и регулировать посредством изменения шага конечно-разностной сетки. При достаточно малом фиксированном шаге по глубине основания (толщине подслоя) уменьшение шага по времени вызывает уменьшение погрешности численного метода вплоть до заданной точности. В программе *Vibro-Drena* такая процедура предусмотрена алгоритмом самой программы, и она осуществляется автоматически при любом расчете. Предварительные расчеты показали, что оптимальная толщина подслоя соответствует

примерно двадцатой доле максимального расстояния до поверхности дренирования. Поэтому в программе заложена разбивка на соответствующее количество точек по глубине.

Еще одной возможностью контроля точности численного решения является сравнение результатов известных точных аналитических решений с результатами решения тех же задач численным методом. Нами было произведено такое сравнение для расчета изменения степени консолидации во времени нормально уплотненной глины ($e_o = e_{po}$). Легко показать, что решения, которые получаются путем допущений относительно линейных зависимостей и при $C_c = C_{K'}$, можно считать идентичными решениями классической теории, если при использовании последней коэффициент консолидации определять по формуле:

$$C_v = \frac{K_p(1 + e_{1-2})}{\gamma_w C_c} \sigma'_{ocp} \ln 10.$$

Кроме того, для проверки правильности учета программой слоистости основания можно рассчитать однородное основание по слоистой схеме, принимая во всех слоях одинаковые параметры. При этом результаты по однородной и слоистой схеме должны совпасть.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что разработанный метод расчета консолидации дренированных заторфованных оснований и методика его численной реализации методом конечных разностей на ЭВМ (программа *Vibro-Drena*) дает достаточно точные результаты, вполне отвечающие требованиям инженерной практики.

Данный расчет консолидации дренированных оснований позволяет учесть его слоистость, скорость загрузки, фильтрационную анизотропию [9]. Сравнение осадок, полученных численным методом и замеренных в натуральных условиях, дали хорошую сходимость.

Библиографический список

1. Коновалов, П. А. Особенности консолидации торфяных толщ Западной Сибири при инженерной подготовке территории намывом / П. А. Коновалов, И. Н. Кулебякин, С. Я. Кушнир // Сборник статей. – Гомель, 1981. – С. 33–34. – Текст : непосредственный.
2. Абелев, М. Ю. Строительство гражданских и промышленных сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / М. Ю. Абелев. – Москва : Стройиздат, 1983. – 248 с. – Текст : непосредственный.
3. Коновалов, П. А. Строительство сооружений на заторфованных территориях / П. А. Коновалов. – Москва : Стройиздат, 1995. – 343 с. – Текст : непосредственный.
4. Hansbo, S. Consolidation of clay with special reference to influence of vertical sand drains / S. Hansbo. – Direct text // A Study Made in Connection with Full-Scale Investigations at Skå-Edeby. Swedish Geotechnical Institute Proceedings. No. 18. – Stockholm : Ivar Häggströms Boktryckeri AB, 1960. – 166 p.
5. Hansbo, S. Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains / S. Hansbo. – Direct text // Ground Engineering. – 1979. – Vol. 12, Issue 5. – P. 16–25.
6. Гейдт, В. Д. Механизм влияния глубинной вибрации на изменение физического состояния грунта / В. Д. Гейдт, Л. В. Гейдт, А. В. Гейдт. – DOI: 10.25628/UNIIP.2019.40.1.014. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2019. – № 1 (40). – С. 79–82.
7. Патент на изобретение SU 1792466 Союз Советских Социалистических Республик, МПК E02B 11/00. Способ строительства дренажа : № 4881246 : заявл. 29.08.1990; опубл. 30.01.1993 / Коновалов П. А., Бреднев А. В., Гейдт В. Д., Остюков Б. С., Кушнир С. Я., Никифорова Н. С. : патентообладатель Гейдт Владимир Давыдович. – 2 с. – Текст : непосредственный.
8. Гейдт, В. Д. Лабораторные исследования скорости консолидации грунта при устройстве песчаных дрен : на примере Западной Сибири / В. Д. Гейдт, Л. В. Гейдт. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2018. – № 1 (36). – С. 67–71.
9. Fondjo, A. A. Swelling Stress and Suction Correlation of Compacted, Heaving Soils / A. A. Fondjo, T. C. Dzogbewu. – DOI:10.13189/cea.2020.080434. – Direct text // Civil Engineering and Architecture. – 2020. – Vol. 8. – No. 4. – P. 721–733.

References

1. Konovalov, P. A., Kulebyakin, I. N., & Kushnir, S. Ya. (1981). Osobennosti konsolidatsii torfyanykh tolshch Zapadnoy Sibiri pri inzhenernoy podgotovke territorii namyvom. Sbornik statey. Gomel, pp. 33-34. (In Russian).
2. Abelev, M. Yu. (1983). Stroitel'stvo grazhdanskikh i promyshlennykh sooruzheniy na slabykh vodonasyshchennykh gruntakh. Moscow, Sroyizdat Publ., 248 p. (In Russian).
3. Konovalov, P. A. (1995). Stroitel'stvo sooruzheniy na zatorfovannykh territoriyakh. Moscow, Sroyizdat Publ., 343 p. (In Russian).
4. Hansbo, S. (1960). Consolidation of clay with special reference to influence of vertical sand drains. A Study Made in Connection with Full-Scale Investigations at Skå-Edeby. Swedish Geotechnical Institute Proceedings No. 18. Stockholm, Publ. Ivar Häggströms Boktryckeri AB, 166 p. (In English).
5. Hansbo, S. (1979). Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains. Ground Engineering, 12(5), pp. 16-25. (In English).
6. Geidt, V. D., Geidt, L. V., & Geidt, A. V. (2019). The mechanism of influence of deep vibrations to change the physical condition of the soil. Akademicheskij vestnik Uralniiproekt RAASN, 1(40), pp. 79-82. (In Russian). DOI 10.25628/UNIIP.2019.40.1.014
7. Konovalov, P. A., Brednev, A. V., Gejdt, V. D., Ostyukov, B. S., Kushnir, S. Ya., & Nikiforova, N. S. Method for installation of drainage. Patent na izobretenie 1792466 SU, MPK E02B 11/00. No 4881246. Applied: 29.08.1990. Published: 30.01.1993. (In Russian).

-
8. Heidt, V. D., & Heidt, L. V. (2018). Laboratory investigations of the speed of ground consolidation under the sand drene device: on the example of Western Siberia. *Akademicheskij vestnik Uralniiproekt RAASN*, 1(36), pp. 67-71. (In Russian).
 9. Fondjo, A. A., & Dzogbewu, T. C. (2020). Swelling Stress and Suction Correlation of Com-pacted, Heaving Soils. *Civil Engineering and Architecture*, 8(4), pp. 721-733. (In English). DOI:10.13189/cea.2020.080434

Сведения об авторах

Гейдт Владимир Давидович, к. т. н., доцент кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, e-mail: gejdtdv@tyuiu.ru

Гейдт Лариса Викторовна, старший преподаватель кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, e-mail: gejdtlv@tyuiu.ru

Гейдт Андрей Владимирович, аспирант кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, e-mail: gejdtav@tyuiu.ru

Information about the authors

Vladimir D. Geidt, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Construction Engineering, Industrial University of Tyumen, e-mail: gejdtdv@tyuiu.ru

Larisa V. Geidt, Senior Lecturer at the Department of Construction Engineering, Industrial University of Tyumen, e-mail: gejdtlv@tyuiu.ru

Andrey V. Geidt, Postgraduate Student at the Department of Construction Engineering, Industrial University of Tyumen, e-mail: gejdtav@tyuiu.ru

Для цитирования: Гейдт, В. Д. Расчет консолидации грунтов с учетом всех основных параметров, влияющих на данный процесс / В. Д. Гейдт, Л. В. Гейдт, А. В. Гейдт. – DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-34-43. – Текст : непосредственный // *Архитектура, строительство, транспорт*. – 2021. – № 4. – С. 34–43.

For citation: Geidt, V. D., Geidt, L. V., & Geidt, A. V. (2021). Calculation of soil consolidation taking into account all major parameters affecting this process. *Architecture, construction, transport*, (4), pp. 34-43. (In Russian). DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-34-43.