

Таблица 3. Количество печатного расплода (не вышедших пчел) на конец эксперимента

Контрольный инкубатор				Опытный инкубатор			
Контрольная рамка № 1		Контрольная рамка № 2		Опытная рамка № 1		Опытная рамка № 2	
Сторона 1	Сторона 2	Сторона 1	Сторона 2	Сторона 1	Сторона 2	Сторона 1	Сторона 2
61	89	17	31	149	111	89	114
Итого: 150		Итого: 48		Итого: 260		Итого: 203	
Общее количество печатного расплода (не вышедших пчел) на конец эксперимента в контроле 198				Общее количество печатного расплода (не вышедших пчел) на конец эксперимента печатного расплода в опыте 463			

Морфологический анализ молодых пчел опытной группы характеризуется более темной окраской тельца, что обусловлено практически полным отсутствием волосяного покрова, а также более агрессивным, по сравнению с контролем, поведением.

Анализ особей, оставшихся в нераспечатанных ячейках, показал динамику угнетения на разных стадиях онтогенеза (от 11-го до 20-го дня развития предкуколки).

M. S. Emelyanova, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
G. V. Lomayev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

To the question of ontogenesis of bees in the weak magnetic field of the Earth

The experimental fact is established on oppression of developing Apis Mellifera L. prepupa nymph (brood)-stage bees larvae in chronic weakening of Earth's magnetic field. The methodology of the experiment is described.

Keywords: weakening of the magnetic field of the Earth, magnetobiology, ontogenesis of bees, larvae of bees.

Получено: 15.08.14

УДК 625.745.2

A. A. Кисляков, кандидат технических наук, профессор
В. П. Грахов, доктор экономических наук, профессор
Ю. Г. Кислякова, кандидат педагогических наук, доцент
А. В. Дрогомирецкий, студент

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ИЗУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДРЕН ПРИ УПЛОТНЕНИИ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ

В статье рассматривается история изучения вертикальных дрен применительно к различным видам грунтов. Приводятся методики расчета для определения эффективности дрен и шага их установки, учитывающие водопроницаемость, зоны смятия, эффекты заиливания и гидравлического сопротивления дрены. Рассматривается развитие теории фильтрационной консолидации.

Ключевые слова: вертикальные дрены, уплотнение водонасыщенных грунтов, эффективность, теория фильтрационной консолидации.

С течением времени количество свободных площадей для возведения зданий и сооружений неумолимо сокращается, что особенно актуально в крупных городах с преобладанием плотной застройки. Следовательно, зачастую возникает необходимость строительства на слабых и в том числе водонасыщенных грунтах. Это становится возможным благодаря применению вертикальных песчаных и бумажных дрен, которые позволяют

сократить сроки консолидации водонасыщенных грунтов основания.

Впервые вертикальные песчаные дрены были использованы в 1925 г. Daniel E. Moran в целях глубокой стабилизации грунтов. Это привело к проведению исследовательских лабораторных и полевых экспериментов California Division of Highways в 1933–1934 гг., давших положительные результаты. В СССР песчаные дрены были применены впервые

Заключение

По итогам полученных результатов можно предположить, что гипогеомагнитное поле увеличивает возможность появления нарушений на стадии онтогенеза от предкуколки до имаго. Уровень магнитного поля Земли является значимым экологическим фактором жизнедеятельности пчелы.

Библиографические ссылки

1. Ломаев Г. В., Бондарева Н. В. Динамика железа в онтогенезе пчел *Apis mellifera mellifera* L. в условиях изменения величины геомагнитного поля и вариации концентрации элемента в корме // Магнитные явления : сб. статей под ред. проф. Г. В. Ломаева, 2012. – Вып. 4. – С. 5–108.
2. Ломаев Г. В., Бондарева Н. В. Магнитные параметры пчел *Apis mellifera mellifera* (L.), полученные СКВИД-магнитометрией // Биофизика. – 2002. – Т. 49. – Вып. 6. – С. 1118–1119.
3. Ломаев Г. В., Емельянова М. С., Корепанова Е. В. Установка для проведения магнитобиологических опытов в инкубаторе // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «КоМУ-2013» : сб. тезисов докладов. – Ижевск : ФТИ УрО РАН ; ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – С. 31–32.

по предложению Н. Н. Маслова и Г. О. Графтио при строительстве ГЭС Свирь-3 в Ленинградской области в 1933 г.

В 1958 г. Moran сделал обзорный доклад по применению песчаных дрен, включающий методики проектирования и многочисленные случаи использования дрен.

Сегодня известны новые методики устройства песчаных дрен, таких как заглубление при помощи бурения спиральным или сплошным буром, использованием открытой трубы, намывом и др. Помимо этого, вертикальные дрены различают по виду конструкции. Различают песчаные дрены круглого сечения, песчаные щели, песчаные дрены предварительного изготовления типа *Sandwicks*, а также группа плоских дрен с фильтрами из различных материалов (пластмассовые, картонные, нетканые и другие) и различной формы сердечниками при наличии соответствующих технологий монтажа. На настоящий момент плоские дрены наиболее распространены, поскольку они продемонстрировали такие преимущества, как низкая стоимость, простота и высокая технологичность установки. Так, по ряду публикаций 2–2,5 бумажные дрены по своему действию эквивалентны одной песчаной дрене диаметром 400 мм, хотя стоимость устройства одной бумажной дрены составляет 25 % от стоимости устройства песчаной дрены.

Впрочем, несмотря на многочисленные случаи успешного применения вертикальных дрен для ускорения процесса консолидации слабых водонасыщенных грунтов при строительстве дорожных насыпей, дамб, аэродромов и в случаях уплотнения намывных территорий, нет полной картины механизма работы дрен. До сих пор остается много неопределенностей в вопросах преимуществ различных типов дрен и способов их установки, а оценка скорости консолидации грунта является трудной задачей, которая часто оканчивается неудачей. Известны случаи, когда успех применения вертикальных дрен был гораздо ниже того, который предполагался по расчету. Так, были проведены экспериментальные исследования эффективности применения вертикальных песчаных дрен при строительстве насыпи железнодорожной линии Апатиты – Сорокская в 1964 г. В толще ильдиевых глин устанавливались песчаные дрены диаметром 425 мм на глубину 11 м в шахматном порядке с расстоянием между центрами 2,5 м. Сверху была возведена насыпь высотой 4 м. Осадка основания насыпи с вертикальными дренами составила 51 см, в то время как без дрен осадка достигла 43 см, а скорость ее протекания во времени несущественно отличалась от скорости осадки основания с вертикальными дренами. Неэффективность дрен в данном случае объясняется М. Ю. Абелевым [1] высокими структурной прочностью и начальным градиентом напора ильдиевых глин. Применение дрен в таких грунтах не целесообразно [2].

В иностранной литературе также есть упоминания о большом количестве случаев неудовлетворительной работы вертикальных дрен.

George F. Sowers пишет, что вертикальные дрены при шаге размещения 244 см и их диаметре 35,56 см оказались не эффективны из-за редкого размещения в грунте. За три месяца уплотнения степень консолидации достигла всего 15 %, а за 7-месячный период лишь 30 %. В данном случае такой шаг размещения дрен оказался неприемлемым.

Классификация и оценка эффективности дрен с применением различных методов установки и разным шагом размещения при проведении натурных экспериментов представляется сложной задачей из-за большой разницы в условиях дренирования основания.

Среди многочисленных публикаций описание эксперимента на площадке Ска Эдеби, Швеция, считается наиболее известным. Наблюдения, проводимые за геодренами и песчаными дренами с разным шагом, продолжались более 15 лет и наглядно показывали трудности в проектировании вертикальных дренажных систем. Результаты наблюдений показали, что скорость осадки сооружения зависит от расстояния между дренами и что нарушение природной структуры грунта при установке дрен оказывает пагубное влияние на эту скорость при слишком частом шаге дренирования. Для этих условий геодрены, расположенные на расстоянии 0,9 м друг от друга, оказались эквивалентны песчаным дренам диаметром 18 см, находящимся на расстоянии 1,5 м друг от друга.

Влияние зоны нарушенного грунта вокруг дрены (рис. 1) впервые рассмотрел Barron, принимая ее радиусом в 1/6 от радиуса дрены.

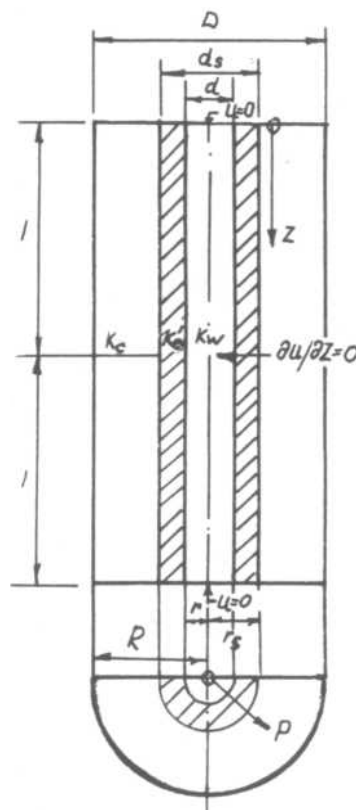


Рис. 1. Расчетная схема для одиночной вертикальной дрены

При этом отношение степени водопроницаемости ненарушенного и нарушенного грунтов равно 10. Время консолидации возросло на 20 %. Если зона нарушенного грунта превышает в два раза радиус дрены, то время консолидации удваивается.

Casagrande с *Poulos* заметили, что водопроницаемость зоны уплотнения может быть меньше в 10 и даже 1000 раз по сравнению с грунтами ненарушенной структуры, а также установили, что зона нарушенного грунта при использовании набивных песчаных дрен диаметром 457 мм составляет около 90 мм.

Стало известно, что кроме происходящего во время установки дрены нарушения структуры грунта может происходить заиливание дрены мельчайшими частицами грунта, проходившими вместе с водой сквозь материал фильтра, вследствие чего вокруг дрены образуется оболочка из более крупных частиц грунта толщиной до нескольких миллиметров. Следовательно, скорость уплотнения в значительной степени зависит от выбора фильтрующего материала дрены.

Ими было установлено, что оптимальный размер ячейки материала фильтра, когда не происходит заиливание дрены и сохраняется фильтрующая способность дрены, составляет от 10 до 20 мм. На скорости консолидации грунтов отражается также эффект гидравлического сопротивления дрены, который рассматривался целым рядом авторов *Barron*, *Bhide*., *Richart*. Этот эффект является ничтожным и им можно пренебречь, если расстояние между дренами эквивалентно половине толщины дренируемого слоя грунта. В большинстве же случаев расстояние между дренами значительно меньше. Однако применение дрены длиной до 50 м для консолидации грунтов большой толщи заставляет принимать во внимание фактор гидравлического сопротивления дрены. Подробно вопросами смятия грунта при установке дрены и гидравлического сопротивления занимался *S. Hansbo*. Он утверждает, что относительное влияние гидравлического сопротивления дрены зависит от диаметра дрены, от расстояния между ними и от отношения водопроницаемости грунта k_c к разгрузочной способности дрены q_w . Для типичной плоской дрены длиной 20 м, закрытой с нижнего конца, сопротивлением дрены нельзя пренебрегать, когда $q_w/k_c < 3000 \text{ м}^2$.

На международном конгрессе в 1977 г. *S. Hansbo* представил результаты натурного эксперимента в Оребро (Швеция), подтверждая, что на практике сопротивление дрены имеет очень малое значение. Так, осадка в конце года наблюдений показывает, что геодрены и алидрены по своей эффективности равноценны, хотя фильтр алидрены обладает более высокой водопроницаемостью.

Akagi T., *Hansbo S.* в материалах Стокгольмского конгресса привели сопоставленный анализ наиболее часто применяющихся методов устройства вертикальных дрены. *T. Akagi* считает, что по имеющимся на настоящий момент результатам нельзя однозначно выбрать оптимальный метод установки верти-

кальных дрены. *Hansbo S.* приводит анализ шести вариантов применения дрены различного типа на опытных полигонах. Автор отмечает несовершенство методов оценки эффективности работы ленточных дрены и необходимость дальнейшего развития расчетных методик.

При анализе существующей литературы по применению вертикальных дрены для ускорения консолидации оснований сооружений была отмечена некоторая осторожность авторов в оценке эффективности используемых вертикальных дрены и настоятельные требования проводить натурные испытания на каждой большой стройке с целью определения реального расстояния между дренами. При этом отмечается, что анализ осадки дренированного основания не может полностью охарактеризовать действительную эффективность вертикальных дрены и что необходимо, по возможности, проводить сравнительные испытания по схеме «различные типы дрены – разный шаг размещения дрены в основании – контрольная зона без дрены».

Трудность применения ленточных дрены для ускорения консолидации грунтов, слагающих дно Финского залива и часто встречающихся в Ленинградской области, это недостаток опыта использования таких дрены в нашей стране. Они, в основном, применялись при уплотнении илистых и торфяных грунтов.

Основоположником теории фильтрационной консолидации считается К. Терцаги [3], которым было получено решение одномерной задачи уплотнения при движении воды вертикально вверх из водонасыщенного слоя грунта. Основное уравнение К. Терцаги выражается следующим образом:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где U – избыточное давление поровой воды; c_v – коэффициент консолидации, который равен при фильтрации воды в вертикальном направлении:

$$c_v = \frac{k_{fv}}{\gamma_w m_{fv}},$$

m_{fv} – приведенный коэффициент сжимаемости грунта в вертикальном направлении; e_0 – начальный коэффициент пористости.

Rendulic L. рассмотрел осесимметричную задачу пространственной теории консолидации, учитывая только радиальную фильтрацию воды к одиночной дрены в центре грунтового цилиндра. Уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = c_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right), \quad (2)$$

где r – переменный радиус; c_r – коэффициент консолидации при фильтрации воды в горизонтальном направлении, который вычисляется по формуле:

$$c_r = \frac{k_{fr}}{\gamma_w m_{vr}},$$

где k_{fr} – коэффициент фильтрации грунта в горизонтальном направлении; m_{Vr} – приведенный коэффициент сжимаемости грунта в горизонтальном направлении.

При решении этого уравнения принимались следующие граничные условия:

1. Внешняя боковая поверхность грунтового цилиндра водонепроницаема, т. е. при $r = R$ $\frac{\partial U}{\partial r} = 0$.

2. Вертикальная дрена абсолютно проницаема, т. е. при $r \leq r_0$, $U = 0$.

Решение этой задачи проводилось с использованием функций Бесселя и Неймана. Общее решение уравнения (2) имеет вид:

$$U = \sum_{i=1}^{\infty} B_i e^{-c n_i^2 t} V_0(n_i r), \quad (3)$$

где B – коэффициент ряда Фурье; n_i – корни уравнения:

$$J_1(nR)Y_0(nr_0) - J_0(nr_0)Y_1(nr) = 0, \quad (4)$$

функции Бесселя и Неймана нулевого и первого порядков.

Дальнейшее развитие теория фильтрационной консолидации получила в работах Н. М. Герсеванова [4] и М. Biot. Герсевановым Н. М. были введены уравнения движения скелета грунта, уравнение сплошности, уравнение влажности, уравнение установившегося фильтрационного потока, принцип гидростатического равновесия. У М. Biot скелет грунта принимается линейно-упругим пористым телом, подчиняющимся закону Гука. Сжимаемыми были частицы грунта и поровая вода, имеющая постоянный коэффициент сжатия.

При вертикальном дренировании обычно отсыпается песчаная подушка для сбора воды из дрен и отвода ее в горизонтальном направлении за пределы сооружения. При этом существует фильтрация воды как в горизонтальном направлении (в дренах), так и в вертикальном направлении, в песчаную подушку. Карилло Н. доказана теорема, что функция

$$U = U_1 \cdot U_2, \quad (5)$$

является решением для случая трехмерного течения, симметричного относительно оси z , где функция $U_1 = f_1(r, t)$ есть решение уравнения для симметричного радиального потока:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = c_r \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right). \quad (6)$$

А функция $U_2 = f_2(r, t)$ является решением линейного вертикального потока:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = c_V \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}. \quad (7)$$

Вторая теорема, доказанная Н. Карилло, имеет вид:

$$\frac{U}{U_n} = \frac{U_1}{U_n} \cdot \frac{U_2}{U_n}, \quad (8)$$

где U – поровое давление в момент времени t ; U_n – начальное давление в поровой воде.

Теоремы Н. Карилло позволили отдельно решать одномерную задачу консолидации и осесимметричную задачу. При этом степень консолидации при фильтрации воды в горизонтальном и вертикальном направлениях вычисляется по формуле:

$$1 - U = (1 - U_V)(1 - U_r), \quad (9)$$

где U_V , U_r – степень консолидации при фильтрации воды соответственно в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Позднее, на основе теорем Н. Карилло, К. Терцаги решил задачу для вертикальных дрен с песчаной подушкой.

На основе теории К. Терцаги были получены частные решения с учетом влияния различных факторов В. А. Флориным [5], Д. Е. Польпиным, М. Biot и другими.

Процедура проектирования, основанная на теории консолидации К. Терцаги и Л. Рендулика, была разработана Barron для вертикального и горизонтального течения воды. Баррон решил задачи консолидации грунтов при устройстве вертикальных дрен с учетом влияния зон перематости грунта, которые возникают при установке дрен, влияния гидравлического сопротивления дренирующего материала. Им получены также решения для одиночной вертикальной дрены в случае свободных деформаций и для случая равных деформаций. В последнем случае формула записывается в виде:

$$U_{rz} = \bar{U}_z \left\{ \frac{f(z)}{v} \left[\frac{\ln r}{r^2} - \frac{r^2 - r_s^2}{2r} + \frac{k_r}{k_s} \ln S \right] + 1 - f(z) \right\}, \quad (10)$$

где $U_z = U_0 \exp(\zeta f(z))$ – среднее избыточное поровое давление между r и r_s на глубине z :

$$f(z) = \frac{e^{\beta(z-2H)} + e^{\beta z}}{1 + e^{-2\beta H}}, \quad (11)$$

здесь k_r – коэффициент фильтрации ненарушенного грунта; k_s – коэффициент фильтрации грунта нарушенной структуры; $k_{др}$ – коэффициент фильтрации дрены.

На основе общей теории уплотнения земляной среды В. А. Флорина А. М. Рустейка получает решение уравнения консолидации для пространственной задачи. Уплотнение основания с использованием вертикальных песчаных дрен рассмотрено им как частный случай решения пространственной задачи. Используя метод конечных разностей и применяя граничные условия по Л. Рендулику и К. Терцаги, А. М. Рустейка учитывает неоднородность основания и постепенное возведение нагрузки во времени.

При этом рассматривается случай свободных деформаций. Для упрощения расчетов им составлено 58 таблиц.

Целый ряд работ посвятил вертикальным дренам *S. Hansbo* [6–8]. При исследовании эффекта начального градиента напора *S. Hansbo* установил, что при малых значениях градиента напора, близких по значению к начальному, скорость фильтрации воды принимает нелинейный характер в зависимости от градиента напора, и продемонстрировал применимость теории консолидации оснований.

Параллельно с *S. Hansbo* проблемой консолидации грунтов с вертикальными дренами занимаются *M. S. Atkinson*, *P. J. L. Eldred*, которые большое внимание уделяют вопросам смятия грунта во время установки дрен и гидравлическому сопротивлению дрены, и численному решению этой задачи. Ими разработана программа для расчета на ЭВМ в трехмерной постановке для случая единичной дрены. Программа основана на решении дифференциально-го уравнения:

$$k_{fx} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + k_{fy} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + k_{fz} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{k_{fz}}{c_v} \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (12)$$

Программа вычисляет среднее значение избыточного давления в поровой воде в любой момент времени и сравнивает с начальными условиями, чтобы определить степень консолидации.

Анализ приведенных работ выявил, что каждая из существующих теорий консолидации разработана на основе наблюдений определенного вида грунтов, обладающих характерными свойствами. Поэтому в каждом методе расчета вводятся параметры, на взгляд исследователя наиболее полно отражающие фильтрационные качества и деформацию изучаемого грунта под нагрузкой, что не позволяет автоматически использовать данные методики расчета консолидации грунтов другого типа. Но, несмотря на огромную важность теоретических разработок, их практическое применение сдерживается сложностью и гро-

моздкостью требуемых вычислений, возможностями задания граничных и начальных условий, трудностями определения достоверных физико-механических характеристик грунтов основания сооружения [9].

Исследование существующей литературы показало недостаточную изученность механизма работы вертикальных дрен, особенно ленточных, в разных геологических условиях при разных методах их установки и необходимости дальнейших исследований в натурных экспериментах. Теоретические исследования, особенно с использованием численных методов, позволяют решать многие практические задачи, но их широкое применение сдерживается несовершенством методик для определения достоверных физико-механических характеристик грунтов основания.

Библиографические ссылки

1. *Абелев М. Ю.* Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. – М.: Стройиздат, 1973. – 228 с.
2. Применение вертикальных дрен при уплотнении слабых водонасыщенных грунтов / А. А. Кисляков // Интеллектуальные системы в производстве. 2014 год, № 1.
3. *Терцаги К.* Теория механики грунтов. – Госстройиздат, 1961. – 507 с.
4. *Герсеванов Н. М.* Основы динамики грунтовой массы. – М.: Госстройиздат, 1933. – 193 с.
5. *Флорин В. А.* Основы механики грунтов. – Ленинград: Стройиздат, 1959. – 356 с.
6. *Hansbo S.* Consolidation of clay with special reference to influence of vertical sand drains // Swedish Geot. Institute. Proc. No. 18. – P. 1–160.
7. *Hansbo S.* Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains//Ground Engineering. – 1979. – Vol. 12. – № 5. – P. 16–25.
8. *Hansbo S.* Geodrains in Theory and Practice: Geotechnical Report from Terrafigo. –Stockholm, 1979. – № 5.
9. *Грахов В. П., Кислякова Ю. Г., Якушев Н. М.* Возведение зданий с моментным каркасом: монография. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 148 с.

A. A. Kislyakov, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. P. Grakhov, Doctor of Economics, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Yu. G. Kislyakova, PhD in Education, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

A. V. Drogomiretsky, Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Studying and application of vertical drains at consolidation of water-saturated soil

The history of studying the vertical drains in relation to different types of soil is considered in the article. Calculation procedures are given to determine the efficiency of drains and the step of their installations taking into account water penetration, consolidation zones, silting effects and hydraulic resistance of a drain. Development of the theory of filtration consolidation is considered.

Keywords: vertical drains, consolidation of water-saturated soil, efficiency, theory of filtration consolidation.

Получено: 15.08.14