

ристического уравнения линеаризованной системы уравнений, описывающих возмущенное движение частицы в плоскости xOy , показало, что вблизи значения $\mu_R = 15.9691$ на плоскости $\mu - e$ существует область неустойчивости, которая при малых значениях параметра e ограничена прямыми (24). Все аналитические и численные вычисления выполнены с помощью системы компьютерной алгебры *Mathematica*.

Автор выражает глубокую признательность проф. Е.А.Гребеникову за полезное и интересное обсуждение рассматриваемой проблемы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В. Себехей. Теория орбит: ограниченная задача трех тел. – М.: Наука, 1982. – 656 с.
2. А.П.Маркеев. Точки либрации в небесной механике и космодинамике. – М.: Наука, 1978. – 312 с.
3. А.П.Маркеев. Устойчивость гамильтоновых систем // Нелинейная механика/ Под ред. В.М.Матросова, В.В.Румянцева, А.В.Карапетяна. – М.: Физматлит, 2001. – С.114-130.
4. L.M.Perko, E.L.Walter. Regular Polygon Solutions of the N-Body Problem. *Proc. American Math. Soc.*, 94, No 2 (1985), 301-309.
5. В.Elmbasout. Sur l'existence de certaines configurations d'equilibre relatif dans le probleme des N corps / *Celestial Mechanics*. – V. 41. – 1988. – 131-151.
6. Е.А.Гребеников. Существование точных симметричных решений в плоской ньютоновой проблеме многих тел // Математическое моделирование. – Т. 10, № 8. – 1998. – 74-80.
7. Е.А.Grebenikov. Two new dynamical models in celestial mechanics. *Romanian Astronomical Journal*, 8, No. 1 (1998), 13-19.
8. Е.А.Grebenikov, D.Kozak-Skoworodkin, M.Jakubiak. The methods of computer algebra in the many-body problem, Moscow, Ed. RUDN, 2002. – 210 С.
9. А.Н.Прокопеня, А.В.Чичурин. Использование системы *Mathematica* для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. – Мн.: Изд-во БГУ, 1999. – 265 С.
10. А.Н.Prokopenya. Studying Stability of a Hill's Equation with Computer Algebra System *Mathematica* // Proc. 8th International Conf. on Applications of Computer Algebra (June 25-28, 2002, Volos, Greece). – Volos, University of Thessaly, 2002. – P.96-98.
11. Н.П. Еругин. Линейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений с периодическими и квазипериодическими коэффициентами. – Мн.: Изд-во АН БССР, 1963. – 272 с.

УДК 621.315.592

Русаков К.И., Паращук В.В.

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НЕПОЛНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ В ДИЭЛЕКТРИКАХ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

В ряде наших предыдущих работ [1-8] теоретически обосновано взаимодействие электромагнитных волн видимого и микроволнового диапазонов в условиях стримерного разряда в гексагональных и кубических полупроводниках. Показано, что данное взаимодействие является одной из причин кристаллографической ориентации стримерных разрядов, вносит вклад в формирование их пороговых условий, обуславливает высокую скорость развития и некоторые другие свойства стримеров. Предсказана зависимость ориентации разрядов от размеров и формы кристалла в определенной области его толщин (размерный эффект), в том числе возможность образования неветвящихся одиночных разрядов в тонких стержневидных образцах, подтверждающаяся наблюдением на опыте неветвящихся разрядов в полупроводниках [1,2,9] и щелочно-галлоидных кристаллах [10] при близких условиях. В связи с этим представляет интерес анализ указанного процесса в кристаллах NaCl как типичном представителе ЩГК, а также в LiNbO₃ - модельной среде с ярко выраженным электрооптическим эффектом, определяющим механизм взаимодействия волн.

Экспериментальное обнаружение микроволнового излучения в канале стримеров осуществлялось на примере кристаллов сульфида кадмия, в которых свойства указанных разрядов изучены в наибольшей степени. Для этой цели использовались стандартные полупроводниковые СВЧ - приемники сантиметрового диапазона, на входе которых располагался сменный волновод рупорного типа, калиброванный на фиксиро-

ванные длины волн ($\approx 1; 3; 10$ см и т. д.) [11]. На фоне помех (шума с широким спектром) был выделен полезный сигнал, характеризующийся следующими свойствами: спектр этого сигнала ограничен диапазоном $\sim 10^2 \div 10$ см с максимумом в области ~ 1 см; его интенсивность при возникновении разрядов в кристалле заметно возрастала. Данный результат подтверждает предположение о том, что формирование стримера происходит в условиях генерации мощного СВЧ излучения и его взаимодействия с рекомбинационным свечением электронно-дырочной плазмы в полупроводнике. Известно, что при стримерном пробое других твердых тел [12,13] также образуются интенсивные микроволны, позволяющие контролировать параметры разряда.

Рассмотрим по аналогии с [6-8] условия фазового синхронизма СВЧ волн и света в сильном электрическом поле сначала в NaCl. Кристаллы хлористого натрия являются центросимметричными средами, в которых отсутствует линейный электрооптический эффект, зато наблюдается отчетливо выраженный квадратичный электрооптический эффект [14,15], что предполагает возможность его учета при определении направлений фазового синхронизма по аналогии с описанной ранее методикой для случая сульфида кадмия. Вторая возможность заключается в том, что при наложении внешнего поля меняется (понижается) симметрия решетки, кристалл становится псевдоцентросимметричным и в этих условиях проявляется линейный эффект [14,16-20], что требует учета обоих факторов при некоторой неопределенности соответ-

Русаков Константин Иванович. К. физ.-мат. н., доцент каф. физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Паращук Валентин Владимирович. К. физ.-мат. н., ведущий научный сотрудник лаборатории оптики полупроводников ИФ НАНБ им. Б.И. Степанова.

Беларусь, 220072, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 70.

ствующих параметров.

Кубические кристаллы хлористого натрия относятся к классу симметрии $m\bar{3}m$ и для них уравнение оптической индикатрисы в присутствии электрического поля с учетом квадратичного электрооптического эффекта может быть записано в виде

$$\begin{aligned} &(\eta + R_{11}E_1^2 + R_{12}(E_2^2 + E_3^2))x_1^2 + \\ &+(\eta + R_{11}E_2^2 + R_{12}(E_1^2 + E_3^2))x_2^2 + \\ &+(\eta + R_{11}E_3^2 + R_{12}(E_1^2 + E_2^2))x_3^2 + \\ &+2R_{44}(E_1E_2x_1x_2 + E_1E_3x_1x_3 + E_2E_3x_2x_3) = 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\eta = \frac{1}{n_o^2}$, R_{ij} ($R_{12} < 0$) - коэффициенты квадратичного эффекта ($R_{ij} \sim 10^{-17} \text{ см}^2\text{В}^2$).

Преобразования соотношения (1), выполненные в соответствии с методикой для полупроводников [6,7], приводят к следующим выражениям для главных значений показателя преломления:

$$\frac{1}{n_1^2} = \eta - RE^2(\cos^4\theta - \frac{1}{2}\cos^2\theta \cdot \sin^2\theta + \sin^2\theta), \quad (2)$$

$$\frac{1}{n_2^2} = \eta - RE^2(\cos^2\theta + \frac{1}{2}\sin^2\theta). \quad (3)$$

Здесь полагается $|R_{ij}| \equiv R$ (по данным [15] различие коэффициентов невелико). В пределе сильных полей соотношение (2) описывает угловое распределение с двумя максимумами типа $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$, а (3) - с максимумом вдоль $\langle 100 \rangle$. Эти направления совпадают с путями неполного электрического пробоя в рассматриваемых кристаллах при различных полярностях возбуждающих импульсов ($T=300 \text{ К}$). Расчеты показывают, что в сильном внешнем поле, меняющем симметрию кристалла на моноклинную (например, $m\bar{3}m \rightarrow m\bar{1}X_2$), к указанным направлениям добавляется $\langle 111 \rangle$, соответствующее опыту при перенапряжении или изменении температуры [21-25].

Из соотношения (2) и условия согласования скоростей в приближении анизотропии одной волны $c/n(E, \theta) = c/\sqrt{\epsilon_s}$

следует, что для $E \sim 10^6 \div 10^7 \text{ В/см}$, $\lambda \sim 10 \text{ мм}$ и параметров NaCl [15] эффективное уменьшение количества возможных направлений фазового синхронизма имеет место при толщине стержневидного кристалла $d_{кр} \approx 6 - 10 \text{ мм}$ - в соответствии с известным опытом по ветвлению в ЩГК [10]. В данном случае критический размер образца $d_{кр}$ примерно на порядок больше, чем при прочих равных условиях в полупроводниках [1,2,9], что обусловлено различием диэлектрических (волноводных) свойств в СВЧ-диапазоне для сравниваемых сред.

Следует отметить, что в твердых диэлектриках [22-24], электрооптических (акустических) кристаллах [26,27] и непрямозонных полупроводниках [28] интенсивность краевого свечения разрядов и соответственно скорость их распространения значительно ниже, чем в полупроводниках, и этот факт находит объяснение в рамках рассматриваемого процесса взаимодействия. Однако в отмеченных процессах не исключается участие достаточно интенсивного рентгеновского излучения, всегда присутствующего в условиях высоковольтного разряда практически во всех средах [29,30]. Для указанной спектральной области отсутствуют необходимые сведения о параметрах кристалла и, в частности об электрооптическом эффекте, поэтому оценка вклада соответствующего фактора затруднительна.

Кристаллы LiNbO₃ относятся к классу $3m$ и имеют 8 ненулевых компонент тензора линейного электрооптического эффекта (из них 4 независимых). Соответствующие коэффициенты характеризуются значением $r_{ij} \sim 10^{-9} \div 10^{-8} \text{ см/В}$, однако данные различных авторов существенно различаются [15], поэтому в конечных соотношениях для определения направлений фазового синхронизма целесообразно учесть порядок этой величины. Уравнение оптической индикатрисы в электрическом поле для ниобата лития может быть представлено следующим образом [14]:

$$\begin{aligned} &(a_{10} - r_{22}E_2 + r_{13}E_3)x_1^2 + (a_{10} + r_{22}E_2 + r_{13}E_3)x_2^2 + \\ &+(a_{30} + r_{33}E_3)x_3^2 + 2r_{42}(E_1x_1 + E_2x_2)x_3 + 2r_{61}E_1x_1x_2 + 1, \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом условий $a_{10} = a_{20} \approx a_{30} = a$, выполняющихся в области края поглощения, и $r_{61} = -r_{22}/|r_{ij}| \sim r$ соотношение для главных значений показателя преломления имеет вид

$$\frac{1}{n_{1,2}^2} = a + rE(\cos^3\theta - \cos\theta \cdot \sin^2\theta + \frac{11}{5\sqrt{5}}\sin\theta \cos^2\theta), \quad (5)$$

В области сильных полей ($E > 10^7 \text{ В/см}$) из (5) и указанного выше условия согласования волн следуют направления фазового синхронизма в плоскости типа $\{120\}$ ниобата лития под углами $\theta \approx 0; 58; 90; 148^\circ$ относительно оси C_3 при положительном знаке поля и $\theta \approx 90; 212^\circ$ - при отрицательном знаке. Сравнение показывает, что значения $\theta \approx 0$ и 58° близки к направлениям положительных стримеров (0 и 60°) [26,27], а $\theta \sim 212^\circ$ - к направлению отрицательного разряда (220°). На опыте в этих и некоторых других кристаллах обнаружена чувствительность стримеров к длительности и крутизне фронтов возбуждающих импульсов, проявляющаяся в том, что на начальной стадии разряды распространяются примерно под углом 90° к оси третьего порядка, а затем принимают указанные стационарные направления [26,27]. В этих же средах наблюдалось одновременное возникновение положительных и отрицательных разрядов (от одного возбуждающего импульса поля). Соответствующие обоим случаям значения θ присутствуют и среди рассчитанных направлений. Таким образом, основные закономерности стримеров в модельных с точки зрения пробойных и акустических явлений средах - твердых диэлектриках и электрооптических кристаллах - могут быть описаны в рамках развиваемого применительно к полупроводникам подхода, учитывающего излучательные процессы.

В соответствии с моделью стримерного разряда для полупроводника, предложенной в работе [31], заряд равномерно распределен по всей поверхности тела стримера, включая его фронт и боковую часть, а внутри канала отсутствует. Анализ показывает, что в рамках данных представлений стример аналогичен проводнику, находящемуся в быстропеременном электромагнитном поле в условиях скин-эффекта, что может служить одной из причин генерации СВЧ излучения. В этом случае, как известно, происходит вытеснение тока из объема однородного проводника на поверхность, причем эффективное уменьшение электрического поля происходит на расстоянии от поверхности

$$\delta' = c(2\pi \mu \sigma \omega)^{-1/2}, \quad (6)$$

равном глубине проникновения переменного тока. Поскольку в последнее выражение входит проводимость σ , то частота ω текущего в проводнике переменного СВЧ тока определяется начальной концентрацией неравновесных носителей. В частности при $\delta' = \delta \sim 10^{-4} \text{ см}$, $n_o \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ имеем $\sigma \sim 10^7 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$, $\omega \sim 10^9 \text{ с}^{-1}$. С уменьшением n_o частота поля возрастает.

Приближенно вклад скин-эффекта можно оценить по соотношению между эффективным сопротивлением проводника переменному току R_{ω} и сопротивлением постоянному току R_0 [32]:

$$\frac{R_{\omega}}{R_0} = \begin{cases} 1 + \frac{k^4}{3}, & k < 1, \\ 0.997k + 0.277, & 1.5 < k < 10, \\ k + \frac{1}{4} + \frac{3}{64k}, & k > 10, \end{cases} \quad (7)$$

где $k = r' / 2\delta', r'$ - радиус цилиндрического проводника. Из (7) следует, что чем толще проводник (канал стримера), тем заметнее скин-эффект и тем при меньших значениях ω и σ его нужно учитывать.

Наряду с рассмотренным существует множество других процессов, приводящих к возникновению СВЧ излучения в полупроводниках и диэлектриках [1,5,8,12,33-36], в том числе лежащих в основе принципа действия современных транзисторов и иных приборов. Среди них наибольший интерес представляет явление инжекции электронного пучка в плазму, находящуюся в волноводе, которое сопровождается генерированием мощного радиоизлучения [37]. Это явление нашло важное практическое применение и впоследствии признано открытием. Подобная ситуация, по-видимому, реализуется и при стримерном разряде [1], так как его возбуждение осуществляется, как известно (в том числе), электронным пучком, и на выходе стримера обнаружена эмиссия электронов [38]. В качестве нелинейно-оптического механизма следует отметить возможность генерации лазерного излучения разностной частоты миллиметрового диапазона, образующегося и поддерживаемого в прямоугольном волноводе и обусловленного биениями спектральных компонент пикосекундных импульсов [39].

Таким образом, экспериментальные данные и теоретический анализ указывают на существование в условиях стримерного разряда интенсивного электромагнитного излучения микроволнового диапазона, механизм которого обусловлен вкладом различных нелинейных процессов, формирующих широкий спектр СВЧ волн. В рамках представления о взаимодействии электромагнитных волн из различных спектральных диапазонов представляется возможным объяснить основные свойства разрядов как в полупроводниках, так и других твердых телах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грибковский В.П., Паращук В.В., Русаков К.И. О кристаллографической ориентации стримерных разрядов // ЖТФ. 1994. Т. 64, В. 11.- С. 169 - 171.
2. Грибковский В. П., Паращук В. В., Русаков К. И. Стримерный лазер с селективным возбуждением // Межвуз. сб. "Лазерная и оптико-электронная техника".- Мн.: Белгосуниверситет.- 1992, В.2. -С. 9 - 11.
3. Грибковский В.П., Паращук В.В., Русаков К.И. Физика стримерных лазеров: Итоги и перспективы// В кн.: Материалы 4-й Конференции по лазерной физике и спектроскопии. Гродно, 4-8 октября 1999 г. ч.1, С.38-40.
4. Грибковский В.П., Паращук В.В., Русаков К.И. Достижения и проблемы физики стримерных лазеров// Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: Тез. докл. 3-го Белорусско-Российского семинара - Минск, 1999. - С. 44, 45.
5. Паращук В. В., Грибковский В. П., Русаков К. И., Прокопеня А.Н. Взаимодействие СВЧ волн со светом и нелинейные оптические процессы в полупроводниках в силь-

ном электрическом поле. - Препринт № 709/ Ин-т физики им. Б.И. Степанова АН Беларуси. -Минск, 1997.- 26 с.

6. Грибковский В.П., Прокопеня А.Н., Русаков К.И., Паращук В.В. Взаимодействие электрического поля со светом и направленность стримерных разрядов// Журн. прикл. спектр.- 1994.- Т. 60, № 3-4.- С. 362 - 368.
7. Грибковский В.П., Паращук В.В., Прокопеня А.Н., Русаков К.И. Стримерный лазер с селективным возбуждением// Изв. Российской АН. Сер. физ.-1995.-Т.59, № 6.-С.30-33.
8. Паращук В.В., Грибковский В.П., Русаков К.И., Прокопеня А.Н. Излучательные процессы при разряде в полупроводниках//Докл. АН Беларуси.-1997.-Т.41, № 3.-С. 43-47.
9. А. с. 1755336 А1 СССР, МКИ Н 01 L 21/66. Способ возбуждения заданного типа стримерного разряда в гексагональных полупроводниках/ В.П. Грибковский, В. В. Паращук, К. И. Русаков (СССР). - № 4878458/25; Заявлено 30.10.90; опубл. 15.08.92, Бюл. № 30. - С. 213.
10. Формирование длинных неветвящихся каналов пробоя в щелочно-галогидных кристаллах / А.Л. Миронов, А.И. Зубарев, В.Г. Шпак, В.В. Быков // ЖТФ.- 1990.- Т. 60.- В. 11.- С. 203-206.
11. Русаков К.И. Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниками в сильном электрическом поле и оптимизация характеристик стримерного лазера. Дисс. ... к. ф.-м. н., Мн., 1998, 150 с.
12. Лисицын В.М., Олешко В.И., Штанько В.Ф. Образование периодической структуры разрушений в NaCl под действием мощного электронного пучка наносекундной длительности // Письма в ЖТФ. - 1985. Т.11, В.24.- С. 1478-1480.
13. Рудаков В.В. Возбуждение СВЧ-колебаний при частичном разряде в изоляционных высоковольтных конструкциях // Физика импульсных воздействий на конденсированные среды: Тез. докл. VIII н.-т. школы.- Николаев, 1997.- С.37-38.
14. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. - М.: Наука, 1970.- 296 с.
15. Акустические кристаллы/ Под ред. М.П. Шаскольской.- М.: Наука,1982.-632 с.
16. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики, М.: Наука, 1979, 639 с.
17. Kaminow I.P., Turner E.H. Electrooptic Light Modulators// Appl. Optics.- 1966.- V. 5. № 10.- P. 1612-1628.
18. Модуляция и отклонение оптического излучения / Г.П. Катусь, Н.В. Кравцов, Л.Е. Чирков, С.М. Коновалов.- М.: Наука,1967.- 176 с.
19. Rigrod W.W., Kaminow I.P. Wide-band microwave light modulation// Proc. IEEE.- 1963.- V. 51, № 1.- P. 137-141.
20. Kaminov I.P., Liu J. Propagation Characteristics of Partially Loaded Two Conductor Transition Line for Broadband Light Modulator// Proc. of the IEEE.- 1963.- V. 51.- P. 147-151.
21. Дэвиссон Д. Направленные эффекты пробоя в кристаллах// Сб. "Прогресс в области диэлектриков", под ред. Дж. Б. Беркса, Дж. Г. Шульмана/ Пер. с англ. под ред. Д.М. Казарновского, Т.1. М.-Л.: ГЭИ.-1962.- С. 105.
22. Гурский А.Л., Луценко Е.В., Яблонский Г.П. Кристаллографическая ориентация путей электрического пробоя в диэлектриках и полупроводниках. Препринт/ Институт физики НАН Беларуси, № 607. Мн. 1990, 47 с.
23. Зубрицкий В.В. "Фокусировка фононов" и ориентация неполного электрического пробоя в щелочно-галогидных кристаллах // ЖТФ. 1991. Т.61, В.10. С. 82 - 85.
24. Зубрицкий В.В. О концентрировании фононов и анизотропии неполного электрического пробоя в кристаллах NaCl// ЖТФ. 1993. Т.63, В.5. С. 61 - 69.

25. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Выс. шк. 1966, 224 с.
26. Crystallographic Orientation of Electric Discharges in TeO₂ and LiNbO₃ Monocrystals/ V.P. Gribkovskii, A.L. Gurskii, G.A. Pashkevich, G.P. Yablonskii // Phys. Stat. Sol. (a)-1987.- Vol. 103.- P. 153-156.
27. Гладышук А.А., Гурский А.Л., Парашук В.В., Пашкевич Г.А., Яблонский Г.П. Электрические разряды в монокристаллах CdS, LiNbO₃ и TeO₂// Препринт 443 / Ин-т физики АНБ, Мн., 1986, 45 с.
28. Gurskii A.L., Lutsenko E.V., Pashkevich G.A., Trukhan V.M., Yakimovich V.N., Yablonskii G.P. Crystallographic Orientation of Incomplete Breakdown Channels in ZnP₂ and CdP₂ Monocrystals// Phys. Stat. Sol.(a)- 1991.- V. 123.- P. K75-K78.
29. Сканава Г.И. Физика диэлектриков. -М.: ГИФМЛ, 1958. - 908 С.
30. Адищев Ю.Н. и др. Экспериментальное обнаружение параметрического рентгеновского излучения// Письма в ЖЭТФ. 1985. Т.41, №7. С. 295-297.
31. Дьяконов М.И., Качоровский В.Ю. К теории стримерного разряда в полупроводниках// ЖЭТФ. 1988. Т. 94, В.5. С.321 - 332.
32. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1977, С. 460.
33. Gribkovskii V.P., Gladyschuk A.A., Zubritskii V.V., Parashchuk V.V., Yablonskii G.P. Streamer Discharges in Semiconductors// Phys. Stat. Sol.(a) 1983, V.77, No 2, P.765-774.
34. Владимиров В.В., Горшков В.Н., Константинов О.В., Кукова Н.И. Возбуждение высокочастотных автоколебаний в стримерных полупроводниковых лазерах // ДАН СССР.- 1989. -Т.305, №3. - С.586-588.
35. Дьяконов М.И., Качоровский В.Ю. Скорость стримера, распространяющегося с острия, при линейном росте напряжения// V Всес. школа "Физика имп. разрядов в конденс. средах": Тез. докл. -Николаев.- 1991.- С. 91.
36. Прокопья А.Н., Русаков К.И. Осцилляции электрического поля при возбуждении стримерных разрядов в полупроводниковых кристаллах// н-т. конф., посв. 30-летию Брестского политех. ин-та: Тез. докл. конф.- Брест, 1996.- ч.2. - С. 31.
37. Ткач Ю.В., Файнберг Я.Б., Магда И.И. и др.// Физика плазмы. 1975. Т.1, №1, С. 81 - 87; 1976. Т. 2, № 3, С.473 - 485.
38. Олешко В.И., Штанько В.Ф. Об эмиссии электронов из канала разряда// ЖТФ. 1990. В.2. С. 185.
39. Аветисян Ю.О., Мартиросян Р.М., Мирзабекян Э.Г., Погосян П.С. Генерация лазерного излучения разностной частоты в прямоугольном волноводе миллиметрового диапазона// Квантовая электроника. 1978, Т.5, № 3. С.659-661.

УДК 624.131

Пошта П.С., Тарасевич А.Н.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОГНОЗА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Уплотнение грунтов с целью повышения их несущей способности и снижения деформативности производится двумя основными методами: поверхностными, когда уплотняющее воздействие прикладывается с поверхности грунта; глубинными – когда передача уплотняющего воздействия происходит по всей или определенной глубине массива грунта.

Следует отметить, что использование методов уплотнения грунтов в значительной степени зависит от области строительства. Так, в дорожном строительстве уплотнение, в основном, производят катками и только 15-20% слабых и искусственных оснований уплотняют с помощью трамбовок и виброплит [1]. В промышленном и гражданском строительстве использование уплотнения грунта трамбовками значительно выше, а в ряде случаев является единственным способом улучшения свойств грунтов оснований. Уплотнение грунтов тяжелыми трамбовками (массой 7,0 т и выше) – это наиболее простой, эффективный и доступный практически в любой строительной организации метод подготовки оснований. Уплотнение производится свободным сбрасыванием груза (трамбовки) с высоты 5...40 м. Тяжелыми трамбовками уплотняются все виды грунтов, находящиеся как в их природном залегании, так и во вновь отсыпанных основаниях.

Ю.М. Абелев, Б.И. Крутов, В.Б. Швец и др. [2, 3] указывают на необходимость проведения опытных работ по уплотнению грунтов перед производством основных работ с целью уточнения ряда технологических параметров: максимальной плотности; оптимальной влажности; глубины уплотненного

грунта при заданном режиме уплотнения; необходимого числа ударов; массы трамбовки; высоты сбрасывания и др.

Отсутствие надежных и простых способов оценки достигаемого результата сдерживает внедрение метода глубинного уплотнения в широкое производство.

В настоящее время имеются два направления развития теоретических методов расчета остаточных и максимальных деформаций грунта, образующихся под действием нагрузок типа импульса.

Первое направление использует замену реальной пространственной системы «нагрузка - деформируемое полупространство» идеализированной механической системой с одной степенью свободы, движение которой подчиняется стандартным геометрическим и кинематическим связям, выражающим в некотором приближении механические свойства грунта. При этом изучается поведение материальной точки, координаты которой соответствуют положению основания в месте нагружения. При таком подходе вычисляются максимальная и остаточная осадка грунтового основания, что характеризует уплотняемость. Однако, по полученным результатам трудно судить о величине изменения плотности грунта и глубине уплотнения.

Второе направление предусматривает применение расчетной схемы в виде одномерной системы с распределенными параметрами, соответствующими деформационным свойствам грунтов. Целью расчета является установление величины и закона распределения остаточных деформаций уплотне-

Пошта Петр Степанович. К.т.н., профессор, зав. каф. оснований, фундаментов, инженерной геологии и геодезии, ректор Брестского государственного технического университета.

Тарасевич Алексей Николаевич. К.т.н., доцент каф. оснований, фундаментов, инженерной геологии и геодезии Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Физика, математика, химия