

3. Матуа В. П. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций с учетом их неупругих свойств и пространственного нагружения: дис. на соиск. ученой степ. докт. техн. наук: 05.23.11 – проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Ростов-на-Дону, 2002. – 484 с.
4. Зубков А. Ф. Разработка технологии устройства асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными параметрами: автореф. на соиск. ученой степ. докт. техн. наук: 05.23.11 – проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Воронеж, 2008. – 32 с.
5. Кононов В. Н. Теоретические основы повышения эксплуатационных качеств асфальтобетонных покрытий дорожных одежд городских улиц и дорог: дис. на соиск. ученой степ. докт. техн. наук: 05.23.11 – проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Ростов-на-Дону, М., 1983. – 288 с.
6. Постановление Правительства РФ от 20 декабря 2017 г. N 1596 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие транспортной системы" <http://government.ru/rugovclassifier/841/events/>.
7. Изменения в нормативно-технических документах в сфере дорожной деятельности за 2020-2021 годы: информационный вестник / под ред. Е.А. Дмитренко. М.: ФАУРОсдорНИИ, 2022. 202 с.
8. Mardani-Aghabaglou, A. Durability performance and dimensional stability of road concrete containing dry-shake surface hardener admixture / A. Mardani-Aghabaglou, K. Karakuzua, V. Kobyaа, D. Hatungimanab // Construction and Building Materials. – 2021. – V. 274. – Article 122472.
9. Sukhija, M.A Comprehensive review of warm mix asphalt mixtures-laboratory to field/ M. Sukhija, N. Saboo// Construction and Building Materials. – 2021. –V. 274. – Article 121781.
10. HooiCho, B. Enhanced surface hardening of hydrated concrete composite by strontium nitrate (Sr(NO₃)₂) aqueous solution / B. HooiChoа, B. H. Namb, S. Santrac, M. Barryd, S. Novake // Journal of Building Engineering. – 2021. – V. 40. – Article 102696.
11. Fang, Z Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction / Z. Fang, Yu Zhu, T. Ma, Y. Zhang, T. Han, J. Zhang // Automation in Construction. – 2022. –V. 142. – Article 104473.
12. Адоньева, А. А. Методика оценки агрегатного состояния после промораживания пластификаторов для полимерно-битумных вяжущих / А.А. Адоньева, И.А. Ефремов, А.С. Покатаев, Н.И. Савенкова, Д.Ю. Небрятенко // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научнотехнический журнал. – 2022. – №. 1 (39). – С. 41-47.
13. Небрятенко, Д. Ю. ABCD – метод оценки низкотемпературного поведения дорожных вяжущих / Д.Ю. Небрятенко // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. – 2022. – №. 1 (39). – С. 37-41.
14. Корочкин А.В. Теория расчета жесткой дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием. – М.: МАДИ, 2017. – 148 с.
15. Гуторов, К. В. Универсальные добавки, улучшающие характеристики асфальтобетонных смесей / К.В. Гуторов, В.А. Павлова // StudNet. – 2021. – Т. 4. – №. 4.

© Ш. В. Бузиков, М. В. Мотовилова

Ссылка для цитирования:

Бузиков Ш. В., Мотовилова М. В. Исследование эффективности применения уплотняющих машин при формировании дорожных покрытий с учетом напряженно-деформированного состояния асфальтобетонных слоев // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 3 (41). С. 22-27.

УДК 69.04
DOI 10.52684/2312-3702-2022-41-3-27-31

**ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ДЛИННОГО СТЕРЖНЯ СКВОЗЬ ПЕСЧАНЫЙ ОБРАЗЕЦ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

З. Г. Тер-Мартirosян, А. Н. Шебуняев

Тер-Мартirosян Завен Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7(495)287-49-14, доб. 1425; e-mail: Ter-MartyrosyanZG@mgsu.ru;

Шебуняев Александр Николаевич, аспирант, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7(977)946-11-93; e-mail: shebunyaev95@mail.ru

Приводится решение задачи о перемещении длинного стержня сквозь песчаный образец с боковым обжимающим давлением, один конец которого находится под действием динамической нагрузки, а второй свободен от нагрузок и сил сопротивления, с нарушением условия предельного равновесия с использованием аналитических зависимостей и численного интегрирования в программе Mathcad. Полученные результаты наглядно показывают влияние параметров рассматриваемой системы (статическая сила, амплитуда динамической составляющей нагрузки, угол внутреннего трения, частота колебаний) на интенсивность перемещения стержня и могут быть использованы при решении прикладных геотехнических задач, например, о динамическом погружении свай в песчаный грунт. Анализируя результаты решения данной задачи, прослеживается вязкая природа перемещения стержня, так как скорость перемещения пропорциональна продольной силе.

Ключевые слова: динамическая нагрузка, перемещение стержня, условие предельного равновесия, обжимающее давление.

MOVEMENT A LONG ROD THROUGH A SANDY SPECIMEN UNDER THE ACTION OF A DYNAMIC LOAD

Z. G. Ter-Martirosyan, A. N. Shebunyaev

Ter-Martirosyan Zaven Grigoryevich, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: +7 (495) 287-49-14, ext.1425; e-mail: Ter-MartyrosyanZG@mgsu.ru;

Shebunyaev Aleksandr Nikolayevich, Postgraduate Student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: +7(977)946-11-93; e-mail: shebunyaev95@mail.ru

The article provides a solution to the problem of moving a long rod through a sand sample with lateral compressive pressure, one end of which is under the action of a dynamic load, and the second is free from loads and resistance forces, with violation of the condition of ultimate equilibrium using analytical dependencies and numerical integration in the Mathcad program. The obtained results clearly show the influence of the parameters of the system under consideration (static force, amplitude of the dynamic component of the load, angle of internal friction, frequency of vibrations) on the intensity of the rod movement and can be used in solving applied geotechnical problems, for example, on the dynamic immersion of a pile in sandy soil. Analyzing the results of solving this problem, the viscous nature of the rod movement is traced, since the speed of movement is proportional to the longitudinal force.

Keywords: dynamic load, moving the rod, limit equilibrium condition, compressive pressure.

В статье рассматривается задача о перемещении (протаскивании) стержня массой m радиусом $r = a$ под действием динамической нагрузки $N(t) = N + \Delta N \cdot \sin \omega t$ (для сокращения записи данная нагрузка уже учитывает вес стержня) сквозь песчаный образец грунта высотой h при боковом обжимающем давлении $\sigma_{r,b} = const$. Иллюстрация задачи приведена ниже на рисунке 1. Модель является аналогичной конструкции грунтового вискозиметра, предложенной З. Г. Тер-Мартirosяном и др. [11, 17], только помимо статической нагрузки к стержню прикладывается динамическая составляющая нагрузки. Решение аналогичной статической задачи о погружении стержня в вязкую среду, но без нарушения условия предельного равновесия и без решения краевой задачи относительно радиальных напряжений получено А. Надаи [10].

Для нахождения радиальных контактных напряжений $\sigma_{r,a}$, обжимающих непосредственно стержень и препятствующих его продвижению, требуется решить осесимметричную задачу о боковом наружном обжатии напряжением $\sigma_{r,b}$ полого грунтового цилиндра наружным радиусом $r = b$ и внутренним радиусом $r = a$ с жестким сердечником в виде стержня. Данную краевую задачу можно решить в полиномах первого порядка с использованием функции напряжений К. В. Соляника-Красса [14]. Вид базовых функций напряжений $\psi(r)$ и $\theta(r)$ и граничные условия приведены ниже (1).

$$\left. \begin{aligned} \psi(r) &= Ar^2 + B \\ \theta(r) &= Cr^2 + D \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} \sigma_r|_{r=b} &= \sigma_{r,b} \\ u|_{r=a} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Константы A и B равны нулю, т.к. задача является плоской вдоль оси z ($\sigma_z = const$), и функция напряжений при $r = b$ равна нулю $\Phi|_{r=b} = 0$ [12]. Используя граничные условия (1) и функции для напряжений σ_r и радиальных перемещений u , получаем значения постоянных C и D , а также искомой значение радиальных напряжений $\sigma_{r,a}$ на поверхности стержня (2).

$$C = \frac{\sigma_{r,b}}{2 \left[(1+\nu) + (1-\nu) \cdot \frac{a^2}{b^2} \right]}, \quad D = -\frac{\sigma_{r,b} \cdot a^2}{2 \left[(1+\nu) + (1-\nu) \cdot \frac{a^2}{b^2} \right]} \quad \left. \right\} \quad \sigma_r|_{r=a} = \frac{2\sigma_{r,b}}{\left[(1+\nu) + (1-\nu) \cdot \frac{a^2}{b^2} \right]} \quad (2)$$

На контакте «стержень – среда» возникает переменное касательное напряжение $\tau_a(t)$, складывающееся из статической составляющей $\tau_{a,ст}$, обусловленной статической составляющей нагрузки N , и динамической составляющей $\Delta\tau_a$, вызываемой динамической составляющей нагрузки $\Delta N \cdot \sin \omega t$. Смещению стержня по вектору действия внешней нагрузки препятствуют силы трения по закону Кулона [12, 15, 16], при этом пренебрегается разницей между статическим и динамическим коэффициентом трения. Кроме того, примем, что коэффициент трения между стержнем и образцом равен коэффициенту трения в самом грунте.

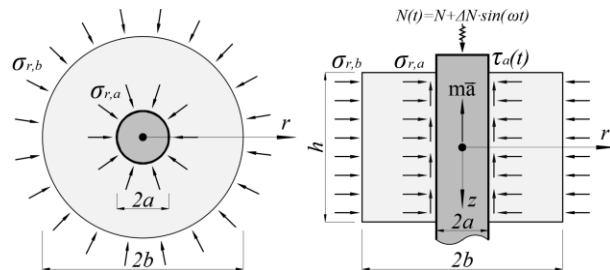


Рис. 1. Иллюстрация задачи о перемещении стержня сквозь среду с обжимающим давлением под действием динамической нагрузки

В любой момент времени t стержень не продвигается по оси z (ускорение $a = 0$ и скорость $v = 0$), если касательное напряжение на контакте стержня с грунтом $\tau_a(t)$, вызванное внешней нагрузкой $N(t)$, не превышает предельного касательного напряжения τ_{ult} , определяемого по закону Кулона, т. е. выполняется условие (3) (см. рис. 2 участки выше толстой линии τ_{ult}) [4, 5, 7, 9].

$$\tau_a(t) = \tau_{a,ст} + \Delta\tau_a \cdot \sin \omega t \leq \tau_{ult} = \sigma_{r,a} \cdot tg\varphi \quad (3)$$

где ω – круговая частота колебаний; φ – угол внутреннего трения.

Когда вышеуказанное условие (3) не выполняется, то стержень начинает продвижение и получает ускорение \vec{a} , возникает сила инерции $m \cdot \vec{a}$, действующая в противоположном направлении (ускорение $a > 0$ и скорость $v > 0$; серые участки выше толстой линии на рисунке 2) (2) [4, 12, 13].

$$\tau_{a,ст} \cdot 2\pi ah + \Delta\tau_a \cdot 2\pi ah \cdot \sin \omega t - (\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi) \cdot 2\pi ah - m \cdot \vec{a}(t) = 0$$

$$\vec{a}(t) = \frac{2\pi ah \cdot (\tau_{a,ст} + \Delta\tau_a \cdot \sin \omega t - \sigma_{r,a} \cdot tg\varphi)}{m} \quad (4)$$

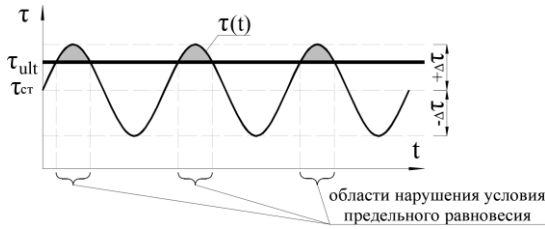


Рис. 2. К механизму перемещения стержня за счет нарушения условий предельного равновесия

Вышеприведенное выражение (2) имеет ограничение: ускорение $\vec{a}(t)$ равно нулю, если стержень покоится или движется с постоянной скоростью, сила трения направлена противоположно движению стержня, препятствует его перемещению и не является движущей, а движение стержня происходит не только в пределах зоны, где график функции действующего касательного напряжения $\tau_a(t)$ поднимается выше линии предельного касательного напряжения τ_{ult} (выделены серым цветом на рисунке 2), а также продолжается в некотором промежутке времени после окончания данной зоны [4, 6], т. к. в пределах серой зоны стержень набирается скорость за счет положительного ускорения, а его остановка происходит не моментально, а за счет сил трения, и возникает отрицательное ускорение (ускорение $a < 0$, скорость $v > 0$).

Выражение для скорости перемещения стержня $\vec{v}(t)$ (5) получено путем интегрирования по времени t выражения для ускорения $\vec{a}(t)$ (4). Постоянные интегрирования C_1 и C_2 найдены из условия равенства нулю скорости $\vec{v}(t)$ в момент времени t_0 потери равновесия стержня и начала его движения. Значение времени t_0 находится из условия равновесия действующих касательных напряжений $\tau(t)$ и трения $\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi$ (5). Следует отметить, что выражения для ускорения, скорости и перемещения в рамках данной задачи являются кусочно-заданными, т. к. перемещение стержня осуществляется не непрерывно, а дискретно, поэтому полученные выражения находятся для первого колебания, а последующие колебаний количественно идентичны первому.

$$\tau_{a,ст} \cdot 2\pi ah + \Delta\tau_a \cdot 2\pi ah \cdot \sin \omega t_0 - (\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi) \cdot 2\pi ah = 0 \quad (5)$$

$$t_0 = \frac{\arcsin\left(\frac{\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi - \tau_{a,ст}}{\Delta\tau_a}\right)}{\omega}$$

$$\vec{v}(t) = \int \vec{a}(t) dt = \int \frac{2\pi ah}{m} \cdot [\tau_{a,ст} - \sigma_{r,a} \cdot tg\varphi + \Delta\tau_a \cdot \sin \omega t] dt = \frac{(\tau_{a,ст} - \sigma_{r,a} \cdot tg\varphi) \cdot 2\pi ah}{m} \cdot \left[t - \frac{\arcsin\left(\frac{\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi - \tau_{a,ст}}{\Delta\tau_a}\right)}{\omega} \right] - \frac{\Delta\tau_a \cdot 2\pi ah}{m \cdot \omega} \cdot \left\{ \cos \omega t - \cos \left[\arcsin\left(\frac{\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi - \tau_{a,ст}}{\Delta\tau_a}\right) \right] \right\}$$

Выражение для перемещения $\vec{S}(t)$ аналогично найдено путем интегрирования по времени t выражения для скорости $\vec{v}(t)$ (5) с получением постоянных интегрирования из условия равенства нулю перемещения в момент времени t_0 (6).

$$\vec{S}(t) = \int \vec{v}(t) dt = \frac{(\tau_{a,ст} - \sigma_{r,a} \cdot tg\varphi) \cdot 2\pi ah}{m} \cdot \left[\frac{t^2}{2} - \frac{\arcsin\left(\frac{\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi - \tau_{a,ст}}{\Delta\tau_a}\right)}{\omega} \cdot t + \frac{\left(\arcsin\left(\frac{\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi - \tau_{a,ст}}{\Delta\tau_a}\right) \right)^2}{\sqrt{2} \cdot \omega} \right] + \frac{\Delta\tau_a \cdot 2\pi ah}{m \cdot \omega^2} \cdot \left[\frac{\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi - \tau_{a,ст}}{\Delta\tau_a} - \sin \omega t + \cos \left\{ \arcsin \left[\frac{\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi - \tau_{a,ст}}{\Delta\tau_a} \right] \right\} \cdot \left\{ \omega \cdot t - \arcsin \left[\frac{\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi - \tau_{a,ст}}{\Delta\tau_a} \right] \right\} \right] \quad (6)$$

Проверка полученного решения и построение графиков полученных функций выполнены в программе Mathcad. Для выполнения вычислений приняты следующие исходные данные: $N = 85$ кН, $\Delta N = 20$ кН, $\omega = 20$ рад/с, $\varphi = 30^\circ$, $v = 0,33$, $m = 1$ т, $h = 1,0$ м, $a = 0,2$ м, $b = 0,6$ м, $\sigma_{r,b} = 100$ кПа. Для вышеприведенных значений расчетной схемы по формуле (2) радиальное напряжение на поверхности стержня $\sigma_{r,a}$ составляет (7):

$$\sigma_{r,a} = \frac{2 \cdot 100 \text{ кПа}}{\left[(1 + 0,33) + (1 - 0,33) \cdot \left(\frac{0,2 \text{ м}}{0,6 \text{ м}} \right)^2 \right]} = 142,4 \text{ кПа} \quad (7)$$

Выражения для вычисления ускорения $a(t)$ приняты в прямом виде по выражению (4), но с учетом вышеприведенного ограничения. Значения скорости $v(t)$ и пройденного пути $S(t)$ получены путем численного интегрирования методом прямоугольников. Для получения удовлетворительной точности численного интегрирования шаг разбиения принят $\Delta t = 0,01$ с. Сравнивая значения ускорения a и скорости перемещения стержня v , полученные аналитическим и численным методами, установлена тождественность полученных решений.

Ниже на рисунке 3 приведен график зависимости перемещения стержня S от времени t при шаге $n =$

0,01 сек. (развертка по времени $6 \cdot 10^3 n$ соответствует 60 сек.) для различных значений амплитуды

динамической составляющей нагрузки: $\Delta N_1 = 20,0$ кН, $\Delta N_2 = 22,0$ кН и $\Delta N_3 = 24,0$ кН.

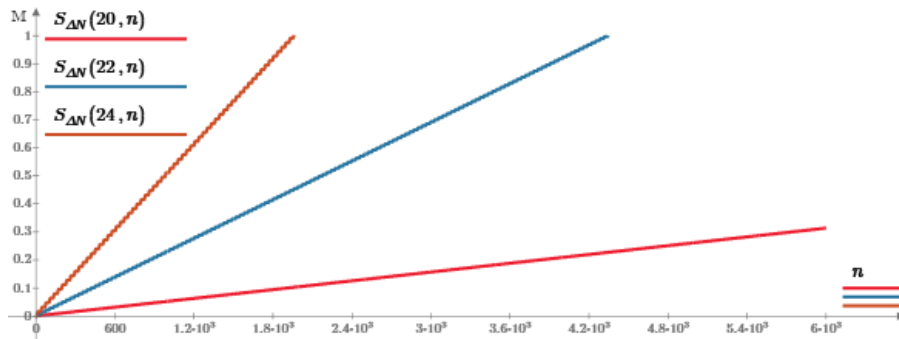


Рис. 3. График перемещения стержня S от времени t для различных значений амплитуды динамической составляющей нагрузки

Ниже на рисунке 4 приведен график зависимости перемещения стержня S от времени t при шаге $n = 0,01$ сек. (развертка по времени $6 \cdot 10^3 n$

соответствует 60 сек.) для различных значений сдвигающей силы: $N_1 = 85,0$ кН, $N_2 = 87,0$ кН и $N_3 = 90,0$ кН.

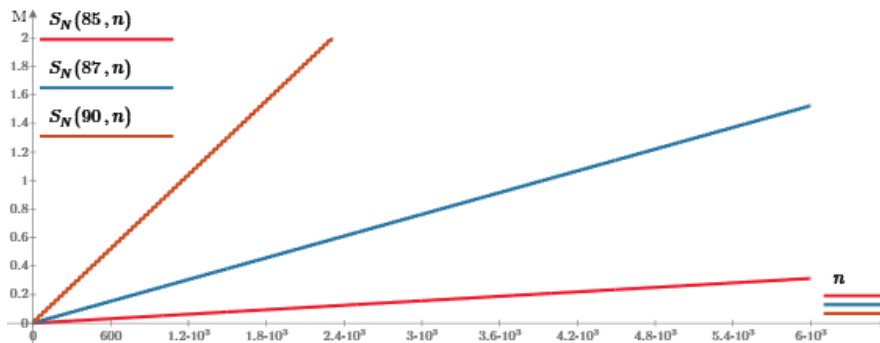


Рис. 4. График перемещения стержня S от времени t для различных значений сдвигающей силы

Ниже на рисунке 5 приведен график перемещения стержня S от времени t при шаге $n = 0,01$ сек. (развертка по времени $6 \cdot 10^3 n$ соответствует

60 сек.) для различных значений круговой частоты: $\omega_1 = 10$ рад/с, $\omega_2 = 20$ рад/с и $\omega_3 = 30$ рад/с.

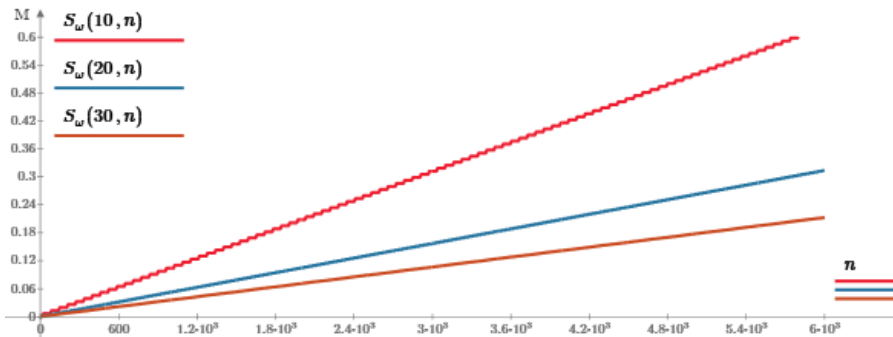


Рис. 5. График зависимости перемещения стержня S от времени t для различных значений частоты

Интересным результатом при решении данной задачи будет получение значения средней скорости протаскивания стержня S' (усредненной за весь цикл, а не только за время движения). Данное значение можно получить делением расстояния, которое проходит стержень за один цикл ΔS на период одного цикла $2\pi/\omega$. Поиск значения ΔS связан с решением уравнения $\vec{v}(t) = 0$, в котором одновре-

менно фигурируют линейные функции и тригонометрические функции относительно переменной t . Аналитическое решение такого трансцендентного уравнения можно выполнить путем представления линейной функции рядом Фурье с отбрасыванием членов ряда более высокого порядка с последующим решением уравнения относительно тригонометрических функций, однако такое решение будет приближительным со значительной погрешностью.

Наиболее эффективно выполнить решение данного уравнения в программе Mathcad через функцию «root». Ниже на рисунке 6 приведен график зависимости скорости перемещения стержня S' от угла внутреннего трения φ .

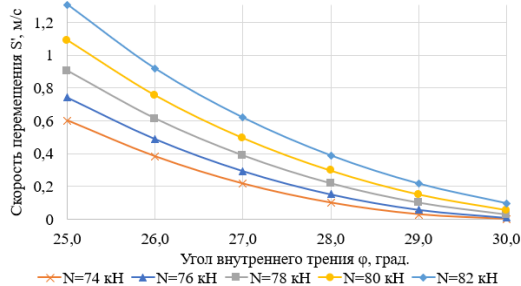


Рис. 6. График зависимости скорости перемещения стержня S' от угла внутреннего трения φ

Выводы

Из вышеприведенных графиков наглядно следует, что продвижение стержня является более интенсивным с ростом значения амплитуды динамической составляющей нагрузки ΔN , с ростом значения силы N и со снижением угла внутреннего

трения φ , что объясняется превышением сдвигающей силы над силой трения и, как следствие, увеличением движущей разности сил $N(t) - (\sigma_{r,a} \cdot tg\varphi) \cdot 2\pi ah$. Также наблюдается более интенсивное продвижение стержня со снижением частоты колебаний ω , что обусловлено повышенным временем пребывания стержня в состоянии набора скорости на каждом цикле колебаний. Можно заключить, что динамическое протаскивание стержня через сыпучую несвязную среду носит вязкий характер, т. к. скорость продвижения стержня прямо пропорциональна продольной силе. Важно отметить, что данные выводы справедливы только для схемы, где на контакте «стержень – среда» нарушается условие уравнивания сдвигающей силы силой трения, и не распространяются на работу системы «стержень-среда» в допредельном состоянии. Результаты решения данной задачи могут быть полезны при решении более прикладных задач геотехники, например, о динамическом погружении свай [1, 2, 3, 8].

Список литературы

1. Бахолдин Б.В. Методика расчета несущей способности свай по результатам динамических испытаний. // Основание фундаменты и подземные сооружения. Труды НИИоснований, вып.60. – М.: Стройиздат, 1975. – С.40-48.
2. Васильевский Ю.И. Динамика погружения железобетонных свай. // Динамические расчеты, воднотранспортных сооружений. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 66. – Л.: Энергия, 1971. – С. 47-51.
3. Герсванов Н.М. Теория продольного удара с применением к определению сопротивления свай. Собрание сочинений, т. I. – М.: Стройвоениздат, 1948.
4. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов: Учеб. для гидротехн. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 447 с.; ил.
5. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях / пер. с англ. под ред. А.Б. Фадеева, М.Б. Лисюка. СПб.: Изд-во НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. – 384 с.
6. Красников Н.Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. Л.: Стройиздат, 1970 – с.240.
7. Кудря В.И. О сопротивлении сдвигу грунтов при динамических воздействиях. – Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л., Энергия, 1973, вып.87, с.32-35.
8. Курдюк А.Ю., Дисяев Д.П. Определение несущей способности свайных фундаментов под авторынок // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2014. №4 (10). – С.11-15.
9. Курдюк А.Ю., Устюгов С.В., Дисяев Д.П. Анализ различных методик по определению несущей способности свайных фундаментов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2017. №4 (22). – С.19-23.
10. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т.2 / А. Надаи; Пер. с англ. В. И. Розенблюм и др.; под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Мир, 1969. – 863 с.
11. Патент № RU 2 578 514 C1 Российская Федерация, МПК G01N 11/10 (2006.01). Грунтовый вискозиметр: №2014151525/28; заявл. 19.12.2014; опубл. 27.03.2016/ Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Соболев Е.С.; заявитель ФГБОУ ВПО «МГСУ». – 7 с.; ил. – Текст: непосредственный.
12. Пятацкий В.М. Современные фундаменты машин и их автоматизированное проектирование / В.М. Пятацкий, Б.К. Александров, О.А. Савинов. – М.: Стройиздат, 1993. – 415 с.; ил.
13. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1979. – 200 с., ил.
14. Соляник-Красса К.В. Осесимметричная задача теории упругости. – М.: Стройиздат, 1987. – 336 с.; ил.
15. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения: издание второе, дополненное и переработанное / Под общей ред. Ильичева В.А. и Мангушева Р.А. – М.: Изд-во АСВ, – 2016, – 1040 с.
16. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. Механика грунтов в высотном строительстве с развитой подземной частью: Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2020. – 946 с.
17. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Соболев Е.С. Грунтовый вискозиметр // Журнал «ГеоТехника», 5/2016, – С.4-9.

© З. Г. Тер-Мартirosян, А. Н. Шебунаев

Ссылка для цитирования:

Тер-Мартirosян З. Г., Шебунаев А. Н. Перемещение длинного стержня сквозь песчаный образец под действием динамической нагрузки // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 3 (41). С. 27–31.