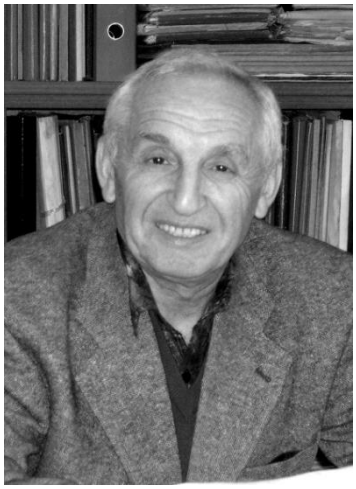
«Угловая аппроксимация» и "векторное представление" нагрузочных графиков стандартных испытаний грунтов

Доказательно предложены возможные приемы камеральной обработки графиков "осадка-нагрузка" способами ***"угловой аппроксимации"*** с параллельной "***векторной проверкой"*** стандартных испытаний грунтов сваями и штампами, совместно обеспечивающие развитие ключевых рекомендаций Еврокодов-7 в части: ***единства геотехнической терминологии*** базовых параметров графиков - пределов пропорциональности (с учетом доопытной нагрузки), несущей способности (даже незавершенного опыта) системы "свая-грунт" и проектной нагрузки объекта; ***статистической*** обработки графиков для условно-однозначного выделения фаз сопротивления грунта основания; вычисления структурной прочности и "***приведенного"*** модуля деформации грунта (и на его основе - модуля ***общей*** деформации природного грунта),- тем самым обеспечивая по вычисленным параметрам ***графоаналитический*** прогноз работы фундамента на грунте во ***всем диапазоне*** нагружения, вплоть до исчерпания несущей способности основания.



Гольдфельд Игорь Зусьевич – технический консультант МАФ / IAFC, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Тематика научно-производственной деятельности – композитные элементы фундаментов и рукавно-торовые технологии их выполнения, полевые испытания грунтов штампами, сваями и статическим зондированием. Автор более 90 публикаций и 60 изобретений.

Прошедшая в последние десятилетия интенсификация строи-тельства по видам осваиваемых грунтов, росту высотности объектов и глубины заложения подземных сооружений инициировала быстрое и широкое разнообразие конструкций и технологий нулевых циклов. Основными стали большенагруженные плитные, свайные, плитно- свайные фундаменты [1], а также технологии преобразования самих грунтовых массивов [2] - для возможности регулировать в обширном диапазоне нагрузки и осадки разнообразных объектов. Привычные нормативы (ГОСТы, СП, СНиПы, ТУ) с их базовыми принципами и расчетными методами, стандартные программы для полевых изысканий стройплощадок и проектирования нулевого цикла объектов начали отставать от внедренных практикой инноваций.

Большинство расчетных параметров грунтов имеют ***лабораторную*** основу определения [3]. Учитывая сложность (часто – невозможность) отбора ненарушенных образцов грунтов для камеральных определений, условность классических приборов и лабораторных схем испыта-ний, инновационная практика фундирования все чаще требует опробования грунтов в натурных условиях, т.е. полевыми методами – штампами, сваями, их моделями с учетом аналогичных технологий возведения.

Натурные опыты с фундаментами и их фрагментами удлиняют изыскания, бывают экологически вредны и технически дефицитны из-за потребности в сугубо строительном оборудовании, возможности экологического урона и невозвратности расходных материалов. Для облегчения прибегают к аналоговым экспресс-методам испытаний грунтов, например, вместо большеразмерных плит используют штампы [4] и статическое зондирование (СЗ) [5], вместо габаритных свай - обычные сваи или их модели той же длины и способа образования [6]. Переход от изыскательских аналогов к натурным строительным фундаментам возможен только при ***строго однозначной*** оценке испытаний грунтов как самими натурными фундаментами, так и их аналогами.

Ввиду дороговизны полевых опытов желательно по их итогам получать ***наибольшее число*** будущих расчетных параметров. Так, при штамповых испытаниях, наряду с модулем общей деформации грунта, уметь оценивать его структурную прочность $\sigma_{стр}$ [7], пределы пропорциональности и несущей способности, а по возможности - даже прочностные параметры грунта, такие как угол внутреннего трения, сцепление и др.

Используемые изыскателями аналоговые эквиваленты полевых испытаний фундаментов - сваи-штампы, модели свай, статическое зондирование сегодня ориентированы в основном на прогноз несущей способности без оценки возможных осадок во всем диапазоне нагружения. Зачастую величина несущей способности "привязывается" к очередной статистически условной осадке типа S=8, 16 мм и др., обусловленной конкретным объектом.

Задача терминологической однозначности оценок нагрузок на графиках испытаний ставилась многократно и ранее, особенно с расширением свайных фундаментов. На XI Международном конгрессе по механике грунтов и фундаментостроению отмечалось [8], что "сейчас ***нет единой методики*** определения несущей способности сваи... даже при наличии данных испытания ее статической нагрузкой". А.Ван Вилл (Голландия), предложив ведущим специалистам девяти стран определить этот параметр по имеющемуся у него графику испытаний реальной сваи, получил по запросу значения, расходившиеся до 2-х и более раз. В большинстве ответов подчеркивалось, что для свай большого диаметра, в частности, буронабивных***", основным в расчете*** является не несущая способность***, а осадка сваи".***

На рис. 1 дан пример разброса таких рекомендаций при анализе испытаний буронабивных DD-свай (drilled displacement) диаметром d=457мм и длиной 15м, выполняемых в несвязных переслаивающихся крупно- и тонкозернистых слоях без выемки грунта [9]. Методика устройства этих инновационных свай была представлена на Международном Конгрессе по фундаментам глубокого заложения в 2002 г.

Практика выполнения проектно-изыскательских отчетов чаще использует ***между***опытную и много реже- преимущественно в научных целях -***внутри***опытную статистику. Последняя включает подбор аппроксимирующих формул нагрузочного графика $S = f(N)$ - для сглажи-вания разброса данных; или экстраполяцию - для получения недостигнутых в опыте значений [10, 11]. По рис. 1-справа трудно придти к однозначному выбору предельных (по термину и по значению) нагрузок. Выбор нагрузки диктуется осадкой в долях диаметра сваи или значением осадки, приходящейся на единицу. нагрузки. Например, трудно однозначно выбрать окончание линейной части графика (предел пропорциональности)N_n или найти предельную по несущей способности нагрузку N_c . Визуально приемлемой для назначения N_n можно считать точку e'' (рис.1-справа) пересечения нагрузочного графика $S = f(N)$ с копией разгрузочной кривой, проведенной из начала координат /критерий ~ (4÷6)% D/. Нагрузку N_c выбирают близкой к асимптоте конечной ветви графика при буквально провальной осадке 90%D /точка 8/, хотя вся конечная ветвь графика выражена целиком одной прямой. Использование способа "угловой аппроксимации" на рис.1-слева (см. также пояснение к рис.2) облегчает решение этой задачи. В лабораторных отчетах и инженерных методах чаще используется двухфазная модель квазиоднородного грунта. Нанесем углы наклона хорд по ступеням 1÷7 из рис.1-справа в координатную систему φ-N на рис.1-слева; проведя через полученные координатные точки две прямые $o'e$ и $e8$, получим в линеаризованном виде две фазы работы

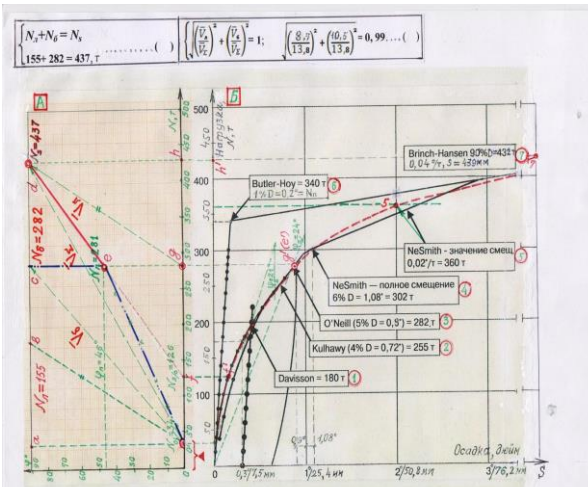


Рис.1. Итоги выбора ***предельной*** нагрузки: а) справа - по рекомендациям различных специалистов; б) слева – способом «угловой аппроксимации»

основания. Начало графика первой фазы попало на нагрузочной оси в точку $N_{o'}=34_{TC}$, пересечение графика второй фазы с осью абсцисс при $\varphi=90^o$ попало в точку N_c=437$_{TC}$, пересечение фазовых графиков между собой в точке e дало $N_n=282_{TC}$. Три названные точки определяют нагрузки фактического начала работы сваи при испытании $N_{o'}$, предела ее несущей способности N_c и предела пропорциональности N_n. Нагрузка $N_{o'}$ может отражать неучтенный собственный вес сваи, группы домкратов (для фрагментов), предварительное нагружение грунта сваей (при циклических испытаниях), уплотнение забоя при изготовлении монолитной сваи и пр. Зафиксированные по нашей методике предельные нагрузки N_n и N_c совпали с рекомендациями соответственно O Neill (5%D) и Brinch-Hansen (90%D).

Еще одним способом анализа является "***векторное представление***" общей нагрузки сваи как суммы долей нагрузок лба (острия) и боковой поверхности (ствола) /опытное доказательство способа дано к рис. 4/. Представим графики работы лба сваи в виде прямой **f-8**, ствола - в виде ломаной **o'-e-c**, общей работы сваи - в виде ломаной **o'-e-8**. Эти работы могут быть выражены в прямоугольной системе координат векторами соответственно $V_л$, $V_б$, V_Σ. На уровне предельных нагрузок проверка выражается формулами (см. рис.1-вверху):

для суммы прямых нагрузок $N_л+N_б=N_\Sigma$; $155+282=437_{тс}$ .....(1)

для суммы векторных сил $\sqrt{(V л)^2+(V б)^2}=V_\Sigma$; .....(2)

Обращаем внимание, что сумма нагрузок берется от начала координат, а векторная сумма - от доопытной нагрузки; во избежание путаницы системы единиц сохраняются по первоисточникам. Способ "угловой аппроксимации" проверен по данным испытаний столбчатых фундамен-тов на обычном и предварительно уплотненном основании, штампов - на талых и оттаивающих песчано-глинистых слоях, для свай в различных (в том числе, просадочных) грунтах. Способ также позволяет оценить структурную прочность грунта при полевых испытаниях штампами.

Рассмотрим нагрузочный график $S=f(N)$ стандартного испытания увлажненного мелкопесчаного грунта в шурфе на глубине 1,45м круглым штампом площадью $F_ш$=600см^2 (рис. 2). График имеет вид ломаной линии, так как нагрузку повышают отдельными ступенями; при методически правильном испытании ломаная линия хорошо огибается плавной кривой. На оси абсцисс откладываются ступени удельной нагрузки p [12], на оси ординат вверху (рис.2-б) – углы φ в град. между горизонталью и секущей, проведенной через начало и конец соответствующей ступени графика $S=f(p)$ (рис.1-а). Через полученные точки можно провести в большинстве случаев две прямые $\varphi=ap+b$ (в нашем случае ***o-c*** и ***d-b***), каждая из которых соответствует определенной фазе сопротивления основания. Такой подход основан на постулате, [13], что фаза сопротивления характеризуется не столько абсолютной величиной осадки или степенью линейности (нелинейности) зависимости осадки от давления, сколько ***постоянством аналитической формы зависимости в пределах данной фазы***. В качестве параметров формы принимаются угол φ наклона секущей каждой ступени и величина соответствующей ступени нагрузки p. Возможны случаи получения одной прямой – при однофазной работе основания (например, забивной сваи в озерно-болотных мелах), трех прямых–при испытании штампа на

разнозернистом песке и даже четырех прямых, когда основание фундамента сложено рыхлыми грунтами и т.д. Количество участков (фаз) выбирается предварительно по характеру кривой S=f(p); более точно границы участков усматриваются из графического построения в координатах $\boldsymbol{p-\varphi}$.

В случае затруднений границы можно уточнить аналитически методом попыток, исходя из требования получения наибольшего средневзвешенного коэффициента корреляции по всем участкам [14]. Для инженерной практики на базе 2-х фазной модели грунтов границу между фазами – предел пропорциональности $\boldsymbol{p_n}$ можно определить по наибольшему средневзвешен-ному коэффициенту корреляции:

$$\boldsymbol{r} = \frac{\boldsymbol{r_1 \cdot n_1 + r_2 \cdot n_2}}{\boldsymbol{n_1 + n_2}}, \qquad (3)$$

где: $\boldsymbol{r_1}$, $\boldsymbol{r_2}$ – коэффициенты линейной корреляции прямых, $\boldsymbol{n_1}$ и $\boldsymbol{n_2}$ – число угловых отсчетов соответственно в первой и второй фазах линеаризованного графика.

Следует отметить, что в «чистом» виде ни одно фаза не существует: в каждый момент нагружения фундамента в основании существуют как упругие, так и пластические зоны. Различия между фазами определяются степенью развития этих зон. Однако некоторая идеализация работы основания приводит к возможности более четкого теоретического решения без ущерба для действительной работы

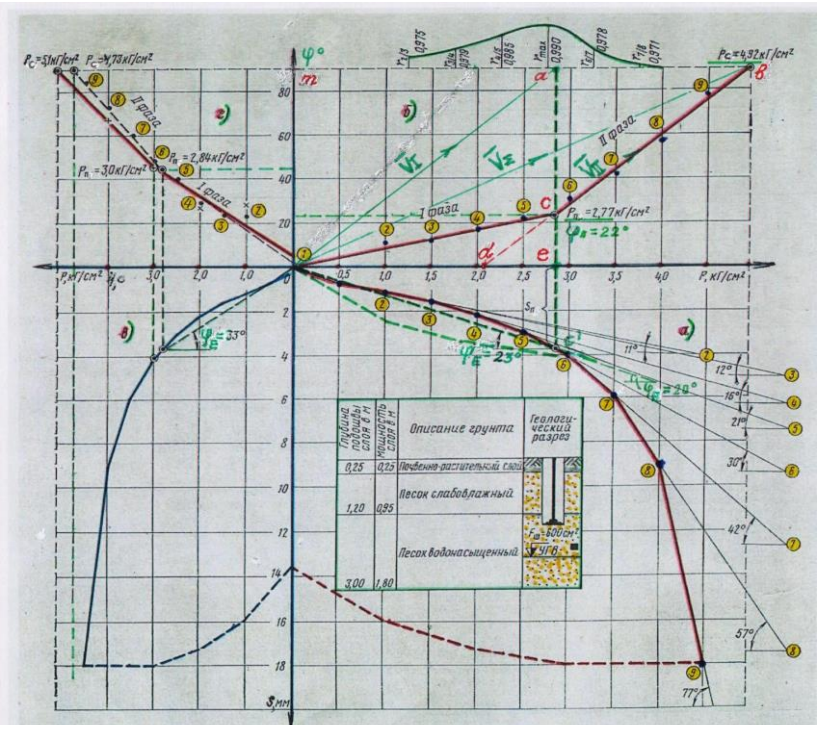


Рис.2. Аппроксимация и векторное представление штампового испытания песчаного грунта

Для этого начало и конец каждой ступени стандартного вида графика $\boldsymbol{S=f(p)}$ соединяют хордами (рис.2), графически замеряют на чертеже угол $\boldsymbol{\varphi}$ наклона каждой хорды к горизонтали и откладывают полученные углы в координатах «нагрузка-угол» $\boldsymbol{p-\varphi}$ выше нагрузочной оси графика (рис.1-б). Полученные точки в зависимости от расчетной схемы разделяют на группы (фазы), число которых диктуется близостью точек в группе к прямой линии (линеаризуемостью группы). Ступени нагрузки $\boldsymbol{p}$ и углы наклона хорд к горизонтали $\boldsymbol{\varphi}$ пронумерованы по ступеням № 1÷9.

Нанесенные вверху в координатах $\boldsymbol{p-\varphi}$ точки дали при линеаризации наибольший приведенный коэффициент корреляции между точками 5÷6 ($\boldsymbol{r}$=0,99). Полученный таким геометрическим путем линеаризованный график представлен ломаной линией ***O-c-b*** с пределом пропорциональности $\boldsymbol{p_n}$ *=2,77кг/см²*, углом на пределе пропорциональности $\boldsymbol{\varphi=22^o}$**;** и пределом несущей способности $\boldsymbol{p_c}$*=2,77кг/см²* с углом $\boldsymbol{\varphi=90^o}$**,** который теоретически соответствует полному выпору грунта из-под штампа.

Важно отметить, что значение p_n совпадает с точкой c^1 пересечения нагрузочного графика $S=f(p)$ копией кривой разгрузки, проведенной из начала координат. Это подтверждает физическую основу предела пропорциональности – возможность расчетов грунтов основания в первой фазе по упругим законам. Еще одним доводом физической значимости p_n как границы I-ой фазы (уплотнения) является пересечение ***прямой*** линией, проведенной из начала координат к исходному криволинейному графику $S=f(p)$ под углом к горизонтали $\varphi_E \sim \varphi_n$ и пересекающей его при той же нагрузке p_n **.**Указанные признаки помогают с помощью штампа более однозначно определить природный модуль деформации грунта без ориентации на размер и число ступеней стандарта [9].

Продлив линию II-фазы линеаризованного графика до оси нагрузок, мы получим в точке d начало развития II-фазы. Если по техническим или технологическим причинам предел несущей способности штампа не был достигнут, но известны хотя бы 2÷3 ступени нагрузки после предела пропорциональности p_n, можно прогнозно завершить работу штампа продлением графика II-фазы до горизонтали с ординатой $\varphi=90^o$**.** Начало построения линеаризованного графика I-фазы должно предусматривать отложение на оси нагрузок структурной прочности $p_{стр}$ (если она имеется), собственного веса p_o испытуемой конструкции – штампа (сваи) с надстройками или прилежащего им трансформированного грунтового массива. Природный модуль деформации грунта под штампом вычисляется по формуле

$$E=\omega\, d\,(1-\nu^2)\, p/s = 0{,}79\ 27{,}6\cdot(1-0{,}25^2)\ 1{,}5/0{,}2 = 154 кг/см^2 \qquad (4)$$

где: ω**-** корректирующий коэффициент для круглого жесткого штампа, равный 0,79; d - диаметр штампа площадью 600см^2, равный 27,6см; ν**-**коэффициент бокового расширения грунта (Пуассона), равный для водонасыщенных разнозернистых песков 0,25; p**,** s **-** ступень нагрузки ≤ p_n и соответствующая ступени осадка на проведенной под углом φ_E к горизонтали прямой линии к графику $S=f(p)$**.**

Выводы анализа и процедур подтверждаются векторной проверкой:

$$\sqrt{(V_I)^2+(V_{II})^2}=V_\Sigma \qquad (5)$$

Малое влияние масштаба на итоги анализа видно из рис. 1-b и 1-г, где изображен тот же график и его "угловая аппроксимация" при вдвое меньшем масштабе по оси нагрузок и линеаризации фазовых прямых ступенями по 0,5 (пунктир) и по 1,0 (сплошная линия) кг/см^2.

Уточненные расчеты большеплощадных плит и крупногабаритных свай предполагают учет структурной прочности грунта, приведенного модуля деформации, доопытной нагрузки химически и механически преобразованного массива.

Обычно в песчаных и крупнообломочных грунтах структурные связи отсутствуют или малы, а в пылевато-глинистых грунтах должны учитываться [ ]. Физически они выражаются через структурную прочность $p_{стр}$, качественно подразделяются на водно-коллоидные (вязко-пластические) и кристаллизационные (жестко-хрупкие, водостойкие и неводостойкие). Последние после нарушения не восстанавливаются. Связи могут быть раздельными и суммарными, придавая грунтам структурную прочность. Считается, что уплотнение грунта (остаточные осадки) развиваются только при превышении структурной прочности $p>p_{стр}$.

Принято определять $p_{стр}$ лабораторными опытами на компрессию, изображая графиками (рис.3-в, г) в простой или полулогарифмической системах координат. Однако искажение структуры грунта при отборе монолитов и зарядке прибора искажают качество образца; более точные результаты дают штамповые опыты.

Рассмотрим для получения $p_{стр}$ классическую схему испытания грунта штампом (рис.3-Б) [ ]. Структурная прочность $p_{стр}$ ожидаема и проявляется в начале опыта, хотя значение ее неизвестно. На рис.3-А показана угловая аппроксимация стандартного графика $s=f(p)$, включающего две фазы работы основания. I-я фаза выражена параллельной оси нагрузок горизонтальной прямой с ординатой $\varphi=17^o$; II-я фаза выражена наклонной прямой d-b. Пересечение прямых между собой в точке c фиксирует предел пропорциональности p_n; пересечение наклонной прямой оси нагрузок в точке d фиксирует начало II-ой фазы, а пересечение ею горизонтали с ординатой $\varphi=90^o$ фиксирует в точке b окончание II-ой фазы - предел несущей способности p_c.

Для нахождения $p_{стр}$ преобразуем аппроксимированный график к каноническому виду. Из начала координат o проведем через середину g горизонтали I-ой фазы прямую до пересечения с наклонной прямой II-ой фазы в точке e. Вертикаль через точку e «перемещает» сюда предел пропорциональности ввиду наличия $p_{стр}$. Теперь путем векторного представления находим значение $p_{стр}$. На рис.3-А показаны фазовые векторы – V_I и V_{II}. Их результирующий вектор сложения V_Σ по ф-ле (5) как радиус с центром в точке p_c «засекает» на оси нагрузок в начале координат значение $p_{стр}$. Как видно, оно сходится с указанным значением на исходном штамповом опыте.

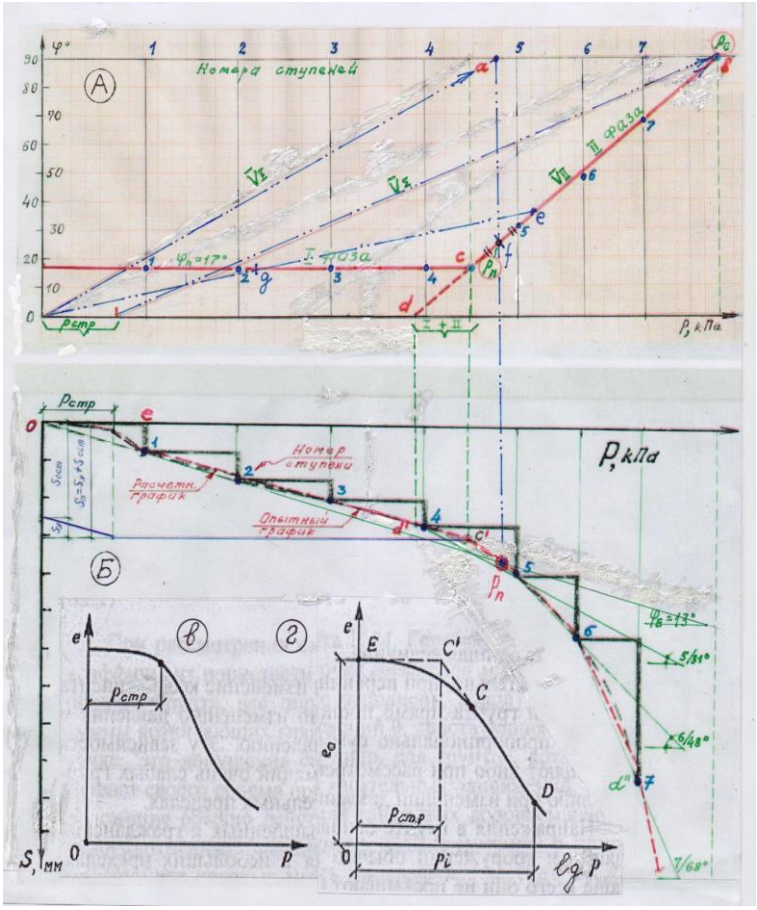


Рис.3. Структурая прочность по штампу и в лаборатории: а, б) угловая аппроксимация, векторное представление; в, г) компрессионные опыты

Возросшее использование свай разных технологий изготовления и конструкций расширило возможности строительства по грунтам и нагрузкам. Несмотря на наличие удобных и надежных методов проектирования и расчетных ПК-программ, остается по-прежнему базовым принцип проектирования работы сваи в грунте как суммы работ ее острия и боковой поверхности. Параметры этих расчетов уточняются аналитическими исследованиями, нормы постоянно актуализируются [ ], а окончательные итоги обязательно подтверждаются опытно – производственными работами на моделях, сваях-штампах, аналогах, используя тензометрию и особые методики. ***Угловая***

аппроксимация и ***векторное представление*** графиков испытаний при камеральной обработке могут облегчить установление долей работ острия и боковой поверхности стандартно испытанных натурных свай или их моделей.

Покажем обработку данных испытания тензометрической модели сваи на опытной площадке [14], представленной по глубине слабыми водонасыщеннымиценим мягкопластичными (с поверхности на глубину погружения моделей - тугопластичными) суглинками с физико-механическими свойствами по лабораторным данным (Табл.1)

Табл.1

1. Объемная масса грунта $\rho = 1{,}98$ т/м^3	7.Коэффициент водонас. S_r =0,94
2.Пористость n=41%	8.Коэффициент консистенции B=0,67
3.Коэффициент пористости e_0=0,69	9.Угол внутреннего трения $\varphi=28^0$
4. Показатель/число пластичнщс. I_p=0,12	10.Удельное сцепление c_n=0,01 МПа
5.Показатель текучести I_L=0,28	11.Компресс. модуль деформации $E_к$=5 МПа
6.Влажность W=24%	12.Коэф. Пуассона μ = 0,35

Модель сваи включала ствол из металлической трубы диаметром d=0,05м, плоский оголовок сверху и заостренный под 60^0 конический наконечник (конус) внизу ствола с основанием того же диаметра d; внутри ствола располагался подвижный стержень для продольного выдвижения конуса. Ствол, конус и оголовок модели сваи были снабжены тензодатчиками, обеспечивавшими при нагружении раздельный замер сопротивлений грунта по стволу, под конусом и модели целиком (разработчик МИСИ-Москва: авторы Дорошкевич Н.М. и Сальников Б.А.).

После предварительной раздельной тарировки всех частей собранная модель сваи задавливалась с поверхности в грунт на глубину L=1,0 м гидродомкратом и далее с его же помощью испытывалась по стандартной методике ступенчатого нагружения до стабилизации осадок [7]. На рис. 1-внизу представлены усредненные по 3-м повторным испытаниям модели опытные графики "осадка-нагрузка" S=f(N) раздельно вдоль ствола, под конусом и модели целиком.

Схема суммарного сложения долевых графиков базируется на методике [13] и понятна из геометрического построения на рис.1. Она начинается чисто геометрическим замером в градусах углов наклона к горизонтали участков стандартного вида графика по ступеням нагрузок (рис. 1-внизу), отложением этих углов по ординатной оси над осью нагрузок в координатах "угол наклона – ступень нагрузки" (рис.1-вверху) и завершается проведением через полученные точки двух прямых методом линейной корреляции. Пересечение прямых между собой однозначно фиксирует предел пропорциональности N_n =4,3кН общего графика испытания сваи, пересечение прямой второго участка горизонтали с ординатой $\varphi=90^0$ фиксирует предел пропорциональности N_n =4,3кН общего графика испытания сваи, пересечение прямой второго участка горизонтали с ординатой $\varphi=90^0$ фиксирует предел несущей способности (срыв) сваи N_c=5,9кН. Наконец, пересечение продолжения второго участка с осью абсцисс $\varphi=0^0$ фиксирует предельную нагрузку грунта по боковой поверхности сваи. Полученные по указанной методике графики "осадка-нагрузка" модели сваи в целом и отдельно ее острия и ствола свидетельствуют о хорошем качестве конструкции моделей, обеспечившей при стандартной технологии испытаний условно-однозначную фиксацию характеристических фазовых нагрузок – суммарной и раздельных под острием и по боковой поверхности . Характер линеаризованных долевых графиков

показывает, что работа вдавливаемой модели сваи в грунте проходит вдоль ствола по двум фазам, а под конусом - однофазная. На основе линеаризованных графиков φ=f(N) каждую фазу модели (сваи) можно представить формулами, позволяющими аналитически вычислить осадки S_i по ступеням во всем диапазоне нагружения сваи.

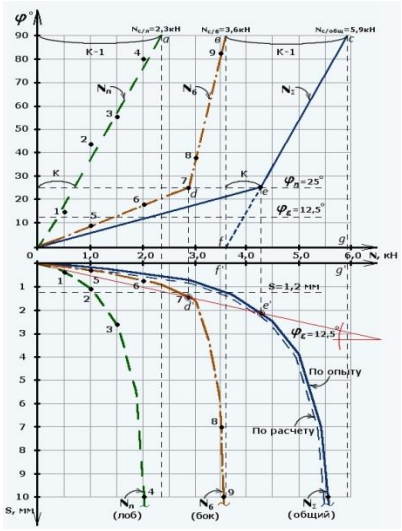


Рис.4.Линейно-угловая аппроксимация графиков испытаний грунта моделью сваи-штампа

Уравнение графика однофазной работы грунта под конусом модели в координатах «φ-N» аналитически выражается прямой, проходящей через две заданные точки«φ_1-N_1» и «φ_2-N_2»:

$$\frac{N-N_1}{N_2-N_1}=\frac{\varphi-\varphi_1}{\varphi_2-\varphi_1} \text{ ……... } (1)$$

Используя, например, в качестве точек на графике «φ-N» пределы пропорциональности N_n (N_1=4,29кН; φ_1 =25°) и несущей способности N_c (N_2=5,9кН; φ_2 =90°) (Рис.4-вверху), получим по ф-ле (1)

$$\frac{N-4{,}29}{5{,}9-4{,}29}=\frac{\varphi-25}{90-25}, \text{ или } \begin{cases}\varphi=40{,}3N-148\\ N=0{,}0248\varphi+3{,}67\end{cases} \text{ ….(2)}$$

где уравнение фазовой прямой общего вида:

$$\varphi=aN+b, \text{.....(3)}$$

действительно на всей оси абсцисс ***N***.

Применительно к прогнозу осадок грунта под конусом модели угол наклона касательной к графику испытания грунта конусом S = f (N) составит

$$\varphi=arctg\frac{dS}{dN}, \text{ или } tg\varphi=\frac{dS}{dN} \qquad (4)$$

Тогда осадка конуса по ступеням нагружения выразится формулой

$$S=\int tg\varphi\cdot dN=\frac{1}{\alpha}\int\frac{\sin(\alpha N+b)}{\cos(\alpha N+b)}d(\alpha N+b) \text{ ……(5)}$$

Вводим замену переменных $\alpha N+b=t$:

$$S=\frac{1}{\alpha}\int\frac{\sin t}{\cos t}dt=-\frac{1}{\alpha}\int\frac{d(\cos t)}{\cos t} \text{ ……(6)}$$

Вводим вторично замену переменных $\cos t=x$:

$$S=-\frac{1}{\alpha}\int\frac{dx}{x}=-\frac{1}{\alpha}(\ln|x|+c)=-\frac{1}{\alpha}\{\ln|\cos(\alpha N+b)|+C\} \text{……. (7)}$$

Для граничных значений $N_{S=0}$ *и* $S=0$ имеем

$$0=-\frac{1}{\alpha}\{\ln|\cos(\alpha N_{s=0}+b)|+C\}, \text{ откуда: } C=-\ln|\cos(\alpha N_{s=0}+b)| \text{ ……. (8)}$$

Подставляем значение ***C*** в формулу (7): $S=-\frac{1}{\alpha}\{\ln|\cos(\alpha N+b|-\ln|\cos(\alpha N_{s=0}+b)|\}$,

$$S=\frac{1}{\alpha}\ln\left|\frac{\cos(\alpha N_{s=0}+b)}{\cos(\alpha N+b)}\right|=\frac{2{,}3}{\alpha}\lg\left|\frac{\cos(\alpha N_{s=0}+b)}{\cos(\alpha N+b)}\right| \text{ ……. (9)}$$

При $N=S=0$ получаем уравнение прямой, проходящей через начало координат:

$$S_{(N=s=0)}=\frac{1}{\alpha}\ln\left|\frac{\cos b}{\cos(\alpha N+b)}\right|=\frac{2{,}3}{\alpha}\lg\left|\frac{\cos b}{\cos(\alpha N+b)}\right|, \text{…….. (10)}$$

где a и b - параметры уравнения отдельной фазы стандартного графика $S=f(N)$, линеаризованного в координатах $"\varphi\text{-}N"$.

Из рис.4-вверху видно, что конус при нагружении модели вступает в работу не сразу, а после достижения предельной нагрузки $N_б$ =3,6кН по боковой поверхности ствола при малой осадке S=1,2мм, составляющей 0,024d сваи. На коротком участке N=3,6…4,3кН наблюдается наложение фаз, трактуемое в механике грунтов как проявление упруго-сдвиговых процессов. Общая несущая способность модели сваи N_c достигается при осадке $S \approx 19$мм (или 0,38d сваи), что для производственных забивных свай обычно составляет до (0,1…0,8)d.

Факт линейной зависимости осадки грунта от нагрузки под острием забивных (задавливаемых) свай неоднократно отмечался исследователями ранее [20]. Вступление в работу острия модели сваи после достижения предельной несущей способности стволом (точка f) ставит под сомнение допустимость привычного способа построения единого графика работы сваи по долевым графикам острия и боковой поверхности - путем сложения нагрузок, соответствующих одинаковым осадкам долевых графиков. Такой подход допустим только при одновременном начале работы острия и ствола сваи .

Оценим сжимаемость грунто-свайного основания из уплотненного моделью сваи грунта через «приведенный» модуль деформации $E_{пр}$ [13] по формуле (11), используя осредняющую прямую 0–e' (рис. 1-внизу), проходящую под углом φ_E =12,5^0 к горизонтали из начала координат через точку предела пропорциональности e' на стандартном графике S=f(N)

$$E_{пр} = \frac{(1-\mu^2)N}{0{,}53d(L-\Delta)S} = \frac{(1-0{,}35^2)\quad 4{,}3}{0{,}53\bullet 0{,}05\bullet(1{,}0-0{,}2)\bullet 0{,}0021} = 85000\,кПа = 85{,}0\,МПа, \ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

где: μ – коэффициент Пуассона грунта основания; d, L, Δ – соответственно диаметр ствола, глубина погружения модели ниже уровня планировки и критическая глубина (3…5)d воронки поверхностного выпора, м; N, S – нагрузка не более предела пропорциональности (кН) и соответствующая нагрузке осадка (м) сваи в границах осредняющей прямой (точка e'). Переход к штамповому E (и далее - компрессионному $E_к$) модулям исходного (природного) грунта выполним последовательным расчетом по ф-лам (12)

$$E=E_{пр} / m_ш=85{,}0 / 4{,}0=21{,}3МПа; \quad E_к=E / m_к=21{,}3 / 4{,}3=4{,}95МПа,\ldots \quad (12)$$

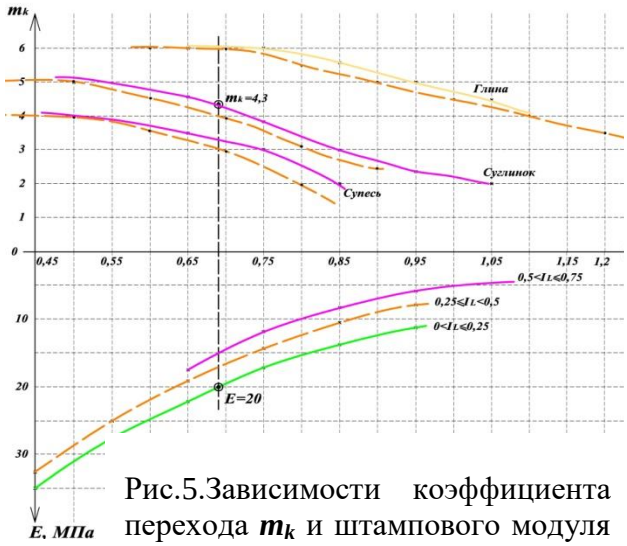


Рис.5.Зависимости коэффициента перехода m_k и штампового модуля E грунтов от коэффициента пористости e

где: $m_ш$=4,0 и $m_к$=4,3 - коэффициенты перехода соответственно от "приведенного" модуля к штамповому [8, 15] и далее - от штампового модуля к компрессионному (Рис.5-вверху). Близость рассчитанного таким способом компрессионного модуля к его опытному лабораторному значению $E_к$ (Табл.1, п.11), а рассчитанного штампового – к его табличному значению E по СП (Рис.5-внизу) подтверждают возможность вычисления стандартных характеристик сжимаемости грунта на основе типового графика $S=f(P)$ статического испытания грунта вдавливаемой моделью сваи.

Используя аналогичный подход, проанализируем типового вида график $S=f(N)$ стандартного полевого испытания забивной натурной сваи (рис.6). Ступени нагрузки N и

углы наклона хорд к горизонтали φ, соответствующих этим ступеням, пронумерованы (№ 2 ÷ 10). Нанесенные вверху в координатах N-φ точки дали при линеаризации наибольший приведенный коэффициент корреляции над точкой 6 (r=0,992). Полученный таким геометрическим путем линеаризованный график представлен ломаной линией «O-6-b» с пределом пропорциональности N_n ==308kH, углом на пределе пропорциональности $\varphi=32^o$; и пределом несущей способности N_c=551kH с углом $\varphi=90^o$, который теоретически соответствует полному срыву сваи в грунте. Важно отметить, что значение N_n совпадает с точкой c^1 пересечения первичного типового графика копией кривой разгрузки, проведенной из начала координат. Это подтверждает физическую основу предела пропорциональности – возможность расчетов грунтов основания в первой фазе по упругим законам. Заслуживает внимания и факт срыва грунта по боковой поверхности сваи при достижении этой же нагрузки N_n=308kH, которой соответствует (как будет показано далее) предельная сдвиговая осадка $S_{сд}$ = 1,4мм (0,003d сваи). Еще одним доводом физической значимости N_n как границы I-ой фазы (уплотнения) является прохождение прямой линии, проведенной под усредненным углом к горизонтали φ_E =0,5 (φ_0+ φ_n)=16° из начала координат к исходному криволинейному графику $S=f(N)$ и пересекающей его при той же нагрузке N_n.

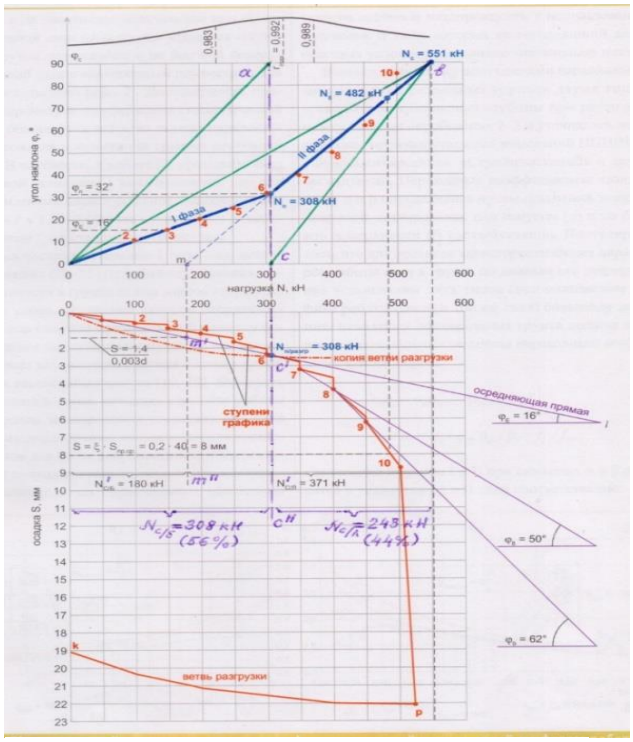


Рис. 6. Угловая аппроксимация - и векторное представление кривой «осадка-нагрузка» испытания грунта забивной сваей

Выводы.

1. Анализ работы сваи в грунте требует аппроксимации опытного графика "осадка-нагрузка" по единой методике, например, используемой в данной статье, – для снижения случайных погрешностей опыта на ступенях нагружения.

2. Аппроксимированный график делится на участки по фазам работы системы "свая-грунт" – для определения характеристических показателей опытного графика таких, как предел пропорциональности, предел несущей способности (срыв) и "приведенный" модуль деформации.

3. Вид аппроксимированного графика из 2-х прямых линий, концы каждой из которых определяют искомые пределы нагрузок, отражает двухфазную модель работы сваи в грунте, принятую в инженерной практике проектирования.

4. Пересечения концов каждой из 2-х прямых линий: начала первой - с осью абсцисс (нагрузок), а конца второй – с осью, ордината которой $\gamma=90^0$, позволяют определить: соответственно погрешность испытания сваи в начале нагружения (провисание прогибомерной нити, перегруз упорной системы) и предельную по несущей способности нагрузку сваи (если испытание было прервано возможностями оборудования, выходом анкерной сваи, течью домкрата, ошибкой отсчета по прогибомеру).

5. Экстраполяция начала второй прямой до пересечения с осью нагрузок фиксирует начало работы острия и переход к срыву нагрузки по боковой поверхности сваи, а значит, начало совместной работы острия и боковой поверхности сваи.

6. Полностью оправдался стандартный принцип отечественных норм - переход от параметров зондирования к нагрузке сваи через сумму сопротивлений грунта под конусом и по боковой поверхности зонда на базе соответствующих коэффициентов α и β, зависящих от удельной прочности грунта.

7. Новизна предлагаемой методики оценки работы сваи по зондированию предусматривает прогноз осадок во всем диапазоне нагружения путем введения в формулу перехода от зонда к свае разных коэффициентов $\alpha_н$ и $\beta_н$, зависящих от вида фазовой нагрузки.

8. Рассчитываемый по зондированию "приведенный" модуль деформации основания сваи учитывает совместную работу сваи с уплотненным ею окружающим грунтом и определяется в границах I-го линейного участка графика испытания сваи по эмпирической формуле - через удельное сопротивление грунта под конусом зонда.

9. Близость опытных и расчетных данных по предлагаемой методике превышает сравнительные данные общероссийских и зарубежных стандартов, что позволяет уменьшить число или вообще отказаться от полевых испытаний забивных свай, заменив их зондированием.

10. Разрабатываемые на базе приведенной методики приемы позволят статистически оценить возможный разброс опытных данных для назначения степени безопасности, выбрать нагрузку на одиночную сваю с учетом допустимой осадки сооружения, использовать методику для других видов и технологий устройства свай, а также зондирования иными конструкциями установок.

Литература.

1. СП 24.13330.2011 "СНиП 2.02.03-85 "Свайные фундаменты"//-М. -Федеральное агентство по техрегулированию и метрологии. -2015 г.

2. Мангушев Р.А., Карлов В.Д., Сахаров И.И., Осокин А.И. Основания и фундаменты. М.: //Издат. АСВ.-С.20,21,52,53.-2011.

3. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

4. ГОСТ 20276-2012. "Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2013.

5. ГОСТ 19912-2012. "Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием".

6. ГОСТ 5686-2012. "Грунты. Методы полевых испытаний сваями".

7. Мангушев Р.А., Карлов В.Д., Сахаров И.И. Механика грунтов. -М. // -Изд. АСВ, -С. 20, 21, 52, 53.-2011.

8. Ильичев В.А., Петрухин В.П., Трофименков Ю.Г. Некоторые итоги X**1** Международного конгресса по механике грунтов и фундаментостроению. -М.//ОФМГ.-1986.-№2.- с.29-30

9. Несмит У.М., Фокс Д. Практические вопросы проектирования и устройства буронабивных свай без выемки грунта. М.: // ООО "Геомаркетинг", Международный журнал "Геотехника", -2010. -№1.- с. 25-31.

10. Добровольский К.И. Испытание свай и грунтов пробной нагрузкой в связи с расчетом низких свайных ростверков. Тифлис: Закавказский ин-т инженеров путей сообщения, 1935.

11. Попов Б.П. Применение анализа размерностей к опытам с пробными нагрузками. – Сб. «Инженерно-геологические исследования для гидроэнергетического строительства», т. II. -М.-Госэнергоиздат,1950.

12. Гольдфельд И.З. Интерпретация графика осадка-нагрузка по фазам сопротивления грунта основания // ж. Транспортное строительство. - 1973. - №7.

13. Гольдфельд И.З., Пырченко В.А., Панюкова И.М. Программа " Прогноз несущей способности свай по данным зондирования" (SVAN) // ВНТИЦентр, П004968, МОФАП ЦНИИПроект, 1-Н-196.

14. Гольдфельд И.З, Смирнова Е.А. Графоаналитическая обработка результатов статических испытаний грунтов забивными сваями и зондированием.-М. // ж. ОФМГ, - изд. дом. "Экономика, Строительство, Транспорт".- №5. -2011г. с.35-40.