



УДК 624.154.042:623.12

© *Н. И. Горшков, А. Н. Волков, И. Ю. Белуцкий, М. А. Краснов, 2012*

О ПРОЕКТИРОВАНИИ ОСНОВАНИЙ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ИЗ СТАЛЬНЫХ СВАЙ-ОБОЛОЧЕК МКЭ

Горшков Н. И. – канд. тех. наук, доц. кафедры «Мосты, основания и фундаменты», e-mail: Fem_Soft@mail.ru (ТОГУ); *Волков А. Н.* – инженер, начальник технического отдела (ООО ХК «Амур-Мост»); *Белуцкий И. Ю.* – д-р тех. наук, проф., зав. кафедрой «Мосты, основания и фундаменты»; *Краснов М. А.* – специалист кафедры «Мосты, основания и фундаменты» (ТОГУ)

Целью работы является математическое моделирование взаимодействия элементов системы «стальная свая-оболочка - основание», разработка новых способов расчета этой системы на основе МКЭ.

The purpose of the work is the mathematical modeling of the interaction of the “still pile-shell - base” system elements and the development of new calculation means for the system with the finite element method.

Ключевые слова: метод конечного элемента (МКЭ), фундамент, свая, грунт, основание, несущая способность, поверхность скольжения (ПС).

Проблемы оснований фундаментов из стальных свай-оболочек

При строительстве мостовых переходов в районах распространения вечномёрзлых грунтов Сибири и Дальнего Востока всегда будут востребованы новые конструктивно-технологические решения, шадящие геокриологические условия мест их возведения и одновременно обеспечивающие сокращение сроков строительства.

Сжатые сроки строительства мостовых переходов вызывают необходимость применения конструкций фундаментов опор, состоящих из относительно недорогих, доступных в приобретении, многофункциональных несущих элементов, технология устройства которых, включает минимум «мокрых» процессов.

Таким требованиям наиболее полно отвечают безростверковые конструкции устоев и промежуточных опор, фундаменты которых выполняются из пустотелых стальных трубчатых элементов (свай-оболочек), способных охлаждать грунты основания за счёт конвективного теплообмена.

В качестве стальных свай-оболочек, являющихся одновременно несущими и технологическими элементами фундаментов опор, можно использовать



стальные трубы, которые применяются при бурении скважин (обсадные трубы).

Основные преимущества стальных свай-оболочек, в сравнении с железобетонными – сравнительно небольшой вес (в 3 раза меньше при той же длине), большие прочность и жесткость, возможность погружения секциями любой длины на неограниченную глубину, удобства в доставке на объект.

Погружение стальных свай-оболочек производится на всю глубину скважины бурообсадным способом в процессе разработки грунта на ее забое турбобурами, станками ударно-канатного или вращательного действия. При обоснованной необходимости – ускорения погружения, используются вибропогружатели.

Соединение звеньев секций стальной сваи-оболочки при её погружении, осуществляется с помощью сварных соединений, герметичных и равнопрочных основному сечению сваи-оболочки, удовлетворяющих требованиям и указаниям соответствующих нормативных документов.

При погружении свай-оболочек в дисперсные грунты, содержащие твердые включения или проходке верхних частей слоев скальных и полускальных грунтов, её первая секция усиливается специальным ножом. Высокая прочность материала и небольшая площадь поперечного сечения стальной сваи-оболочки способствует проходке таких грунтов даже при ударно-канатном и вращательном бурении и использовании электрических вибропогружателей. Использование вибропогружателей при ударно-канатном и вращательном бурении целесообразно на последнем этапе проходки, при вхождении в несущий слой основания.

Защита от коррозии стальных свай-оболочек должна осуществляться с учётом положений и требований нормативного документа [1], и технологического регламента по противокоррозийной защите, разработанного с учётом климатических условий места строительства.

Как известно, проектирование свайных фундаментов опор мостов и других инженерных сооружений, выполняется по указаниям и требованиям СНиП 2.02.03-85* [2].

В этом документе, выделяют забивные стальные сваи и железобетонные сваи-оболочки, заглубляемые вибропогружателями без выемки или с частичной выемкой грунта и не заполняемые бетонной смесью (п. 2а); сваи-оболочки железобетонные, заглубляемые вибропогружателями с выемкой грунта и заполняемые частично или полностью бетонной смесью (п. 2б).

Таким образом, этот нормативный документ не выделяет в отдельный вид свай – стальные пустотелые сваи-оболочки.

В целом, по методике этого документа, можно выполнять расчеты свайных фундаментов из стальных свай-оболочек.

Расчёт стальных свай-оболочек и их оснований для районов Сибири и Дальнего Востока должен быть выполнен по предельным состояниям согласно требованиям и указаниям нескольких действующих нормативных документов [2 - 4]:



1) *первой группы*:

- по прочности материала свай-оболочек;
- по несущей способности грунта основания свай-оболочек;
- по устойчивости свай-оболочек против действия сил морозного пучения;

2) *второй группы*:

- по перемещениям свай (горизонтальным u_p , углам поворота головы свай-оболочки ψ_p) совместно с грунтом оснований от действия горизонтальных нагрузок и моментов.

В современной концепции проектирования сооружение и его основания должны рассматриваться в совместном взаимодействии. Для совместного расчета сооружения и основания в рамках модели системы «сооружение-основание» могут быть использованы аналитические, численные и другие методы.

Разработка методики проектирования и устройства конструкций фундаментов опор мостов из стальных свай-оболочек на территориях Сибири и Дальнего Востока, первый вариант которой, в виде методических рекомендаций, составлен заместителем главного инженера ООО ХК «Амур-Мост» (г. Тында) А.Н. Волковым, выполняется при участии сотрудников кафедры «Мосты, основания и фундаменты» ТОГУ.

Численное моделирование взаимодействия системы «свая-основание»

Разработка методики решения прикладных задач транспортного строительства, связанных с моделированием взаимодействия свайных фундаментов безростверковых опор из незаполненных пустотелых стальных трубчатых элементов (свай-оболочек) с грунтовыми основаниями, требует надежного обоснования.

Моделирование взаимодействия свай-оболочек с массивом грунтов выполняется на основе метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в алгоритмах сертифицированного программного средства GenIDE32 (авторы Н.И. Горшков, М.А. Краснов [5]).

По результатам моделирования выполняется:

- Определение несущей способности стальных свай-оболочек на основе решения осесимметричной задачи теории пластичности с применением конечных элементов (КЭ) оболочек вращения первого порядка, если необходимо, учитывается технология устройства свай-оболочек;
- Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) модели системы «конструкция (сооружение) – основание» в рамках решения плоских задач теории пластичности;
- Критериальные оценки элементов модели системы согласно требованиям действующих нормативных документов.



Для выполнения расчетов в условиях осесимметричной задачи в программу был введен оболочечный конечный элемент первого порядка (1D-shell), моделирующий сваю-оболочку.

Применение КЭ первого порядка уменьшает степень дискретизации расчетной области в окрестности сваи-оболочки и время расчета. Для обоснования его использования были выполнены необходимые тестовые расчеты:

1) Пример №1 из монографии [6], цель – сравнение результатов вычисления усилий в элементах 1D-shell;

2) Пример №2 из справочника [7], цель – сравнение результатов вычисления смещений для оболочек с элементами 1D-shell;

3) Пример №3 из монографии [8], цель – сравнение результатов вычислений по программе GenIDE32 с аналогичными результатами, полученными при полевых испытаниях полых конических свай и вычисленными по известной программе МКЭ PLAXIS;

4) Пример №4 из монографии [9], цель – сравнение результатов вычислений по GenIDE32 с аналогичными результатами, полученными на основании расчетов по действующей нормативной методике расчета оснований свайных фундаментов опор мостов.

Результаты расчетов по GenIDE32 и аналогичные, представленные в примерах №1 и №2, практически совпадают.

Ниже приводятся некоторые результаты решения задач для тестовых примеров №3 и №4.

Кроме заявленных выше целей расчета, еще существует необходимость в оценке совместности взаимодействия стандартных осесимметричных КЭ 3D (грунт, бетон) с элементами первого порядка 1D-shell (сталь, бетон).

В монографии [8] приведены результаты полевого определения несущей способности полых железобетонных конических свай марки СПК-3-35, а также результаты определения ее несущей способности на основе расчетов по известной программе МКЭ PLAXIS, см. рис. 1.

Грунт основания (принятый для расчетов по программе PLAXIS) – суглинок: $\gamma=0,018$ МН/м³, $E=6,1$ МПа, $\nu=0,42$, $\varphi=17$ град., $c=0,020$ МПа.

Геометрические размеры конической сваи: длина 3,00 м, верхний диаметр 0,35 м, нижний 0,29 м, толщина стенок 0,06 м, класс бетона В 25.

Особенности решения: осесимметричная задача теории пластичности (реологическая модель Мора-Кулона); ступенчатое приложение вертикальной нагрузки к голове сваи; без учета технологии устройства.

Для сравнительной оценки здесь приводятся результаты решений для расчетных схем:

1) системы «свая-основание», где полая коническая железобетонная свая моделируется стандартными осесимметричными КЭ (3D);

2) тоже, но полая коническая железобетонная свая находится в стальной конической оболочке, моделируемой оболочечными КЭ первого порядка (коническая железобетонная свая в конической стальной обсадной трубе);



3) то же, но коническая часть железобетонной сваи моделируется оболочечными конечными элементами первого порядка (1D-shell).

Расчетные параметры: бетон класса В 25 ($\gamma=0,025 \text{ МН/м}^3$, $E= 30000 \text{ МПа}$, $\nu=0,20$, $R_c=11,5 \text{ МПа}$, $R_t=0,95 \text{ МПа}$), сталь ($\gamma=0,077 \text{ МН/м}^3$, $E= 200000 \text{ МПа}$, $\nu=0,20$, $R_c=200 \text{ МПа}$, $R_t=189 \text{ МПа}$, $t=0,024 \text{ м}$).

Результаты расчетов по программе приведены на рис. 1-3.

Графики зависимости нагрузка-осадка или зависимости « F_y-u_y » (кН-м), для узла, где прикладывается вертикальная сила, для трех расчетных схем практически подобны и близки по значениям вычисленных величин, в сравнении с результатами, приведенными в монографии [8], см. рис. 1 ($F_{y\max}=80 \text{ кН}$, $u_{y\max}=0,175-0,0120=0,163 \text{ м}$).

На рис. 2 показаны зоны «пластичности» или предельного состояния модели системы «свая-основание». Для всех трех расчетных схем результаты практически одинаковы (размеры и напряженное состояние зон «пластичности»).

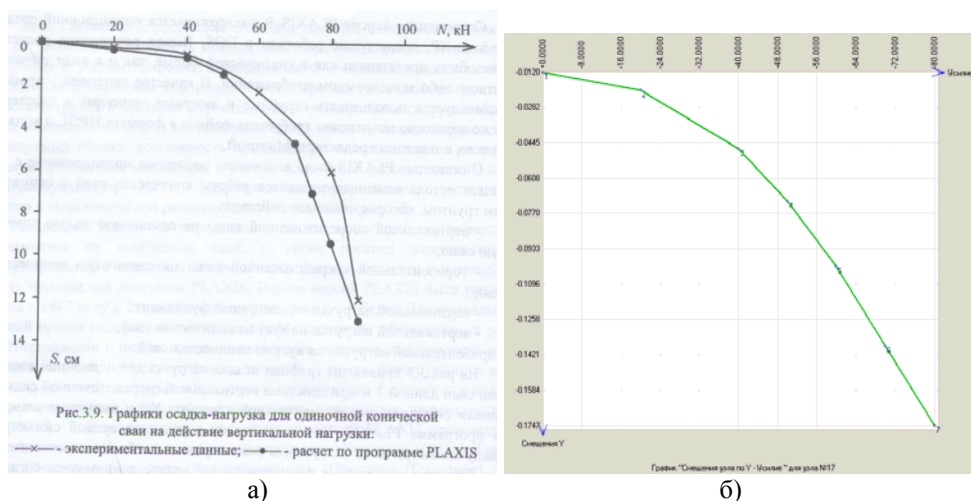


Рис. 1. Графики зависимости « F_y-u_y » (кН-м): а) из монографии Пономарева А.Б (расчеты по программе PLAXIS выполнялись для схемы №1); б) по программе GenIDE32 (схема №3)

В процессе моделирования нагружения сваи вертикальной нагрузкой, можно по заранее выделенной поверхности скольжения (слой контактных со свай конечных элементов) выполнять оценку устойчивости, например, на основе варианта оценки «предельных касательных напряжений» [10]: $k_{st}=\tau_u/\tau \geq [k_{st}]=1,00$, где τ_u и τ – предельные (по Мору-Кулону) и расчетные значения касательных напряжений.

Результаты оценки устойчивости системы «свая-грунт» по контактной поверхности грунта приведены на рис. 3. На втором этапе нагружения, зоны «пластичности», развивающиеся снизу-вверх по контактному слою грунта, практически доходят до поверхности основания (график на рис. 1 становится

нелинейным), при этом происходит потеря устойчивости, см. рис. 3 а). На последующих этапах нагружения также фиксируется потеря устойчивости ($k_{st} = \text{const} \approx 0,95 < [k_{st}] = 1,00$), см. рис. 3 б). Этот факт указывает на происходящие в контактном слое грунта деформации сдвига, переходящие в скольжение грунта по свае. Но, есть еще и грунт ниже острия, который продолжает нести сваю!

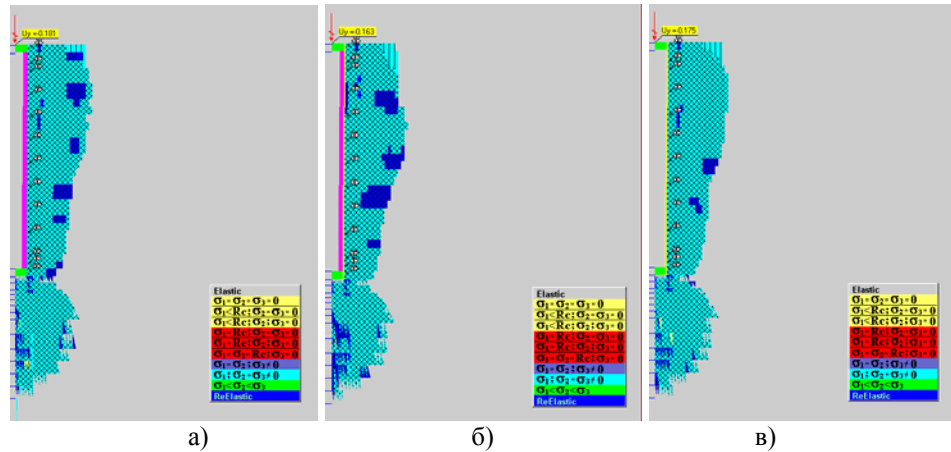


Рис. 2. Зоны «пластичности» модели системы «свая-основание»: а) расчетная схема №1; б) то же №2; в) то же №3

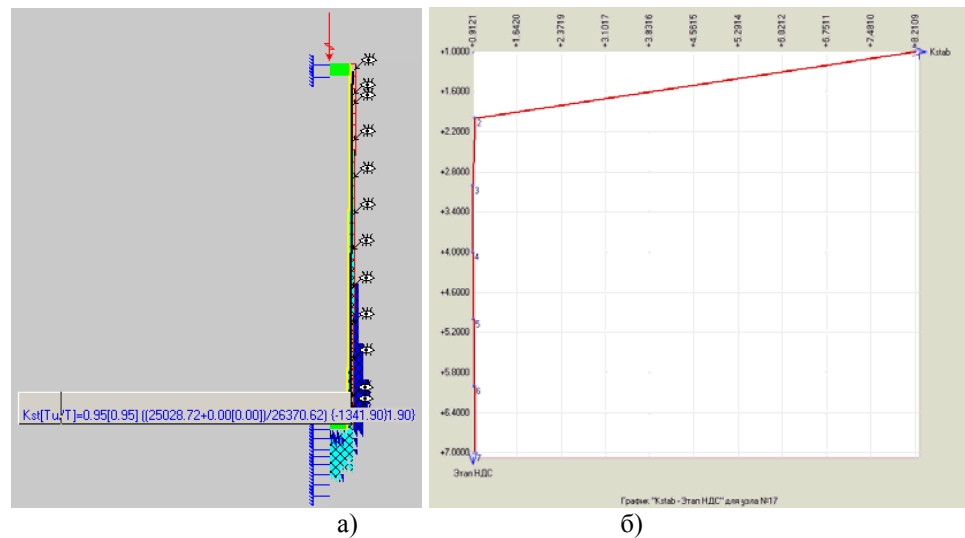


Рис. 3. Результаты оценки устойчивости системы по контактной поверхности сваи: а) условие устойчивости после второго этапа нагружения: $k_{st} = 0,95 < [k_{st}] = 1,00$; б) график зависимости «этап нагружения – k_{st} »

В монографии [9], в прил.1, приведён пример расчета промежуточной однорядной опоры моста из железобетонных свай-оболочек $d=1,6$ м.



Грунт основания (сверху-вниз): песок мелкий $\varphi=32$ град., супесь $I_L=0,40$, глина $I_L=0,40$ и $e=0,60$.

Параметры грунтов основания: песок мелкий $\gamma=0,0105$ МН/м³, $E=28,00$ МПа, $\nu=0,30$, $\varphi=32$ град., $c=0,00$ МПа; супесь $\gamma=0,0105$ МН/м³, $E=24$ МПа, $\nu=0,30$, $\varphi=26$ град., $c=0,015$ МПа; глина $\gamma=0,022$ МН/м³, $E=22$ МПа, $\nu=0,42$, $\varphi=20$ град., $c=0,060$ МПа.

Геометрические размеры сваи-оболочки: длина от низа ригеля $\ell=20,00$ м, свободная длина $\ell_0=6,00$ м, внешний диаметр 1,60 м, толщина стенок 0,16 м, класс бетона В 25. Высота бетонной пробки от низа сваи 5,00 м, то же под ригелем 1,00 м.

Результаты расчетов по программе приведены на рис. 4-5.

Несущая способность сваи-оболочки, определенная авторами книги по нормативному документу СНиП II-17-77 (предшественник СНиП 2.02.03-85*) равна $F_d=7,28$ МН.

В первой серии расчетов, выполненных на основе решения осесимметричной задачи теории пластичности, определялась несущая способность сваи: реологическая модель материалов Мора-Кулона; ступенчатое приложение вертикальной нагрузки к голове сваи; без учета технологии устройства; свая-оболочка моделируется оболочечными КЭ (1D-shell), бетонные пробки (низ и верх) стандартными осесимметричными КЭ (3D).

При численном моделировании нагружение сваи-оболочки вертикальной нагрузкой производилось согласно рекуррентной зависимости: $F_i = F_{i-1} + dF_i$, где $F_{i-1}=0$, $dF_i=0,5$ МН ($F_{max}=7,5$ МН).

График зависимости « F_y-u_y » (кН-м) для узла, где прикладывается вертикальная сила, приведен на рис. 4 а). Линейная зависимость между вертикальным усилием и вертикальным смещением наблюдается до нагрузки 2,5 МН. Вертикальное смещение сваи-оболочки от начального НДС, при вертикальной нагрузке $F_y=7,5$ МН, составило $u_y=0,41-0,15=0,25$ м. В целом, на графике, наблюдается нелинейное деформирование системы без «провалов». Назначение величины несущей способности сваи при пологой кривой зависимости « F_y-u_y » должно производиться по каким-то специальным критериям, например, по предельным деформациям.

Во второй серии расчетов, выполненных на основе плоской задачи теории упругости и пластичности (плоская деформация), определялись усилия и смещения в свае-оболочке. Свая-оболочка моделировалась в виде одномерного стержня.

Ниже приведены результаты решения по теории упругости и пластичности, при разовом приложении внешних сил ($F_y=-2,85$ МН, $F_x=0,20$ МН, $M=0,45$ МНм) и учете объемных сил для элементов системы, сваи и грунтов основания.

Сравнительные результаты (в примере и по МКЭ – упругое решение): $M_{max}=2,04$ и $1,88$ МНм, $T_{max}=0,288$ и $0,149$ МН (по длине сваи, погруженной в основание), $u_x=0,0284$ и $0,0141$ м, $\psi=0,00362$ и $0,00100$ рад, место с $T_{max}=0,0$ на глубине 2,5 и 3,3 м от расчетной поверхности грунта.

Для упругого решения можно отметить, что учет технологии (определение начального НДС основания+погружение стержня+приложение внешних сил), влияет только на вид эпюры значений нормальных усилий в стержне, когда значение сил уменьшается по длине стержня; без учета технологии, эпюра имеет максимум в слое супеси.

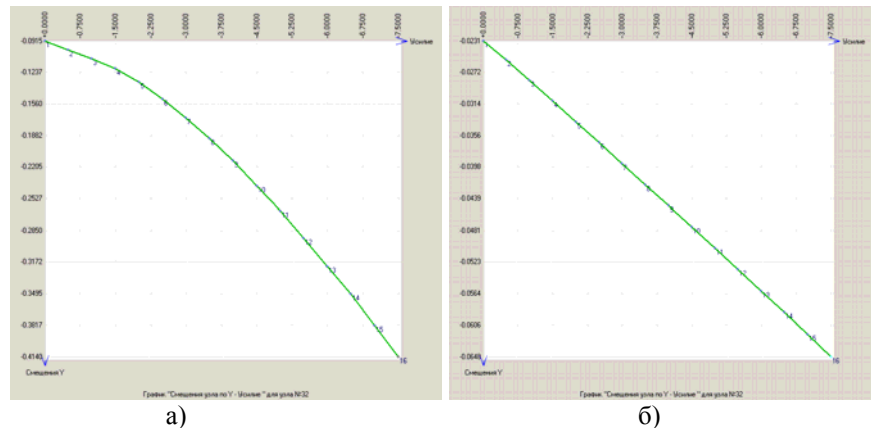


Рис. 4. График зависимости « $F_y - u_y$ » (кН-м) для узла, где приложена вертикальная сила: а) опорный слой глина тугопластичная; б) то же алевролит

Устройство стержня моделируется постановкой условия «изменение удельного веса»: $dy = \gamma_{\text{бетона}} - \gamma_{\text{грунта}}$, (разница между средними значениями удельных весов бетона и грунтов основания).

Сравнительные результаты (в примере и по МКЭ – упругопластическое решение): $M_{\text{max}} = 2,04$ и $1,89$ МНм, $T_{\text{max}} = 0,288$ и $0,153$ МН (по длине сваи, погруженной в основание), $u_x = 0,0284$ и $0,0221$ м, $\psi = 0,00362$ и $0,00139$ рад, место с $T_{\text{max}} = 0,0$ на глубине 2,5 и 4,8 м от расчетной поверхности грунта.

Сравнительный анализ результатов решений показывает одинаковый вид эпюр, один и тот же порядок значений в усилиях и смещениях в примере монографии и по МКЭ. В то же время анализ показал, что результаты упругопластического решения МКЭ ближе к нормативному решению, по сравнению с упругим решением МКЭ.

Здесь можно отметить, что в расчетной схеме МКЭ учитывалась неоднородность основания и сваи-оболочки (для части сваи с бетонными пробками учитывались геометрические параметры всего сечения), разные, для слоев грунта, параметры прочности и деформируемости грунтов.

Кроме этого, была решена модельная задача № 5, созданная на основе тестового примера № 4.

Цель – демонстрация возможностей МКЭ по определению несущей способности стальных свай-оболочек с учетом технологии их устройства.



В отличие от примера № 4, моделирование выполняется для стальной свай-оболочки $d=1,6$ м с толщиной стенки $t=0,012$ м, параметрами материала: $\gamma=0,077$ МН/м³, $E=3\,000\,000$ МПа, $\nu=0,20$, $R_c=140,5$ МПа, $R_t=100,5$ МПа.

Свая опирается на скальный грунт – алевролит (вместо глины тугопластичной в примере №4). Параметры алевролита: $\gamma=0,026$ МН/м³, $E=220$ МПа, $\nu=0,22$, $R_c=20$ МПа, $R_t=5$ МПа.

Расчеты выполнялись для двух схем моделирования:

1. Учет технологии устройства сваи и последовательное приложение нагрузки к голове сваи ($F_i = F_{i-1} + dF_i$).

2. Приложение нагрузки к голове сваи сразу ($F_{max}=7,5$ МН), без учета технологии устройства.

На первом этапе выполнялось определение начального НДС основания.

Последовательное моделирование устройства сваи выполнялось постановкой на каждом этапе условий: погружение свай-оболочки – «изменение удельного веса», разработка грунта внутри сваи – «экскавация», устройство бетонных пробок – «насыпь», см. документацию на программу GenIDE32 (www.femsoft.ru).

По результатам расчетов можно сделать вывод, что учет технологии устройства сваи (три этапа) влияет на величину вертикального смещения сваи $u_y=0,0493$ м, при разовом приложении нагрузки $u_y=0,0648$ м.

Зависимость « F_y-u_y » (кН-м) для узла, где прикладывается вертикальная сила (разовое приложение), имеет линейный вид, стальная свая-оболочка с бетонной пробкой обладает высокой несущей способностью, см. рис. 4 б). Вертикальное смещение свай-оболочки от начального НДС, при вертикальной нагрузке $F_y=7,5$ МН, составило $u_y=0,0648-0,0231\approx 0,042$ м.

Здесь необходимо обратить внимание на предложение, вынесенное в заголовки статьи авторами работы [11]. В статье приведен обзор исследований работы свай в скальных грунтах, где отмечается, что большая часть нагрузки на сваю воспринимается не в результате сопротивления скального грунта под нижним концом сваи, как это подразумевает документ [2], а за счет сопротивления сдвигу по его боковой поверхности.

Сравнивая результаты расчетов примеров № 4 и № 5 (рис. 5) можно увидеть, что несущая способность сваи действительно определяется условиями заделки сваи в скальный грунт.

Средства интерфейса программы позволяют выполнять критериальные оценки НДС системы «фундамент-основание» согласно требованиям действующих нормативных документов.

Сравнительный анализ результатов представленных расчетов на основе МКЭ и по действующим нормативным документам указывает на возможность их использования в проектировании фундаментов опор мостов из полых стальных свай-оболочек.

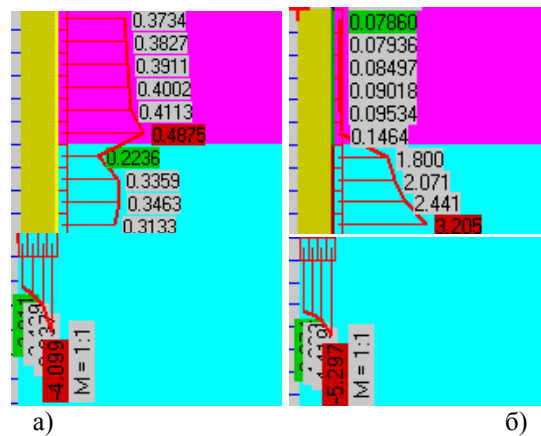


Рис. 5. Эпюры значений напряжений в окрестности заделки сваи τ_{xy} и σ_{yy} , МПа: а) опорный слой глина тугопластичная; б) то же алевролит

Библиографические ссылки

1. СНиП 2.03.11-85. «Защита строительных конструкций от коррозии». – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
2. СНиП 2.02.03-85*. Свайные фундаменты / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
3. СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.
4. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах /Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990.
5. Программа GenIDE32 для решения прикладных задач геомеханики / Горшков Н.И., Краснов М.А. СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р ГОССТАНДАРТ РОССИИ. СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ № РОСС RU.СП15.Н00262, 21.09.2009 (www.femsoft.ru).
6. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов: – М.: Высшая шк., 1985.
7. Справочник по теории упругости (для инженеров-строителей) под редакцией Варвака П.М. и Рябова А.Ф. «Будивельник», 1971.
8. Пономарев А.Б. Основы исследований и расчета фундаментов из полых конических свай: Учебное пособие. – М.: АСВ, 2005.
9. Силин К.С., Глотов Н.М., Завериев К.С. Проектирование фундаментов глубокого заложения. – М.: Транспорт, 1981.
10. Способ оценки несущей способности основания и устойчивости системы «штамп-основание» на основе МКЭ / Горшков Н.И., Краснов М.А. // Вестник Тихоокеанского государственного университета. - 2011. - № 3 (18).
11. О расчете свай в скальных грунтах / Зерцалов М.Г., Конюхов Д.С. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – №1.