

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ ФУНКЦИИ ВЛИЯНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПО МЕТОДУ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЗАИМНОГО ВЛИЯ- НИЯ. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАС- ЧЕТОВ С ЧИСЛЕННЫМ РЕШЕНИЕМ И ОПУБЛИКОВАННЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ

IMPROVED INFLUENCE FUNCTIONS FOR INFLUENCE FACTORS METHOD CALCULATIONS. COMPARISON OF CALCULATION RESULTS WITH NUMERICAL SOLUTION AND PUBLISHED RESULTS

И. А. БОКОВ

В. Г. ФЕДОРОВСКИЙ, канд. техн. наук

Одним из известных способов расчета осадки вертикально нагруженных свайных групп является метод коэффициентов взаимного влияния (МКВВ). Несмотря на наличие существенных недостатков, метод является перспективным в отношении выполнения быстрых расчетов в рамках разработки концептуального решения, а также для задач автоматизированной оптимизации решений свайного фундамента. В работе представлены результаты исследований направленных на повышение точности метода и сравнение с численными и другими решениями.

Ключевые слова:

Аналитическое решение, метод коэффициентов взаимного влияния свай, осадка

One of the well-known methods for settlement calculations of pile groups is the interaction factors method (IFM). Despite the presence of significant shortcomings, the method is promising in terms of performing quick calculations as part of developing a conceptual solution, as well as for the tasks of automated optimization of pile foundation solutions. The paper presents the results of studies aimed at improving the accuracy of the method and comparison with numerical and other solutions.

Keywords:

Analytical solution, influence coefficient method, numerical solution, piles, pile

сваи, осадка свайного фундамента, численное решение settlement, pile group settlement

Практика применения метода коэффициентов взаимного влияния (МКВВ) наметила следующие основные направления, в которых необходимо производить его совершенствование:

1. Уточнение поведения функции влияния в условиях упругого полупространства (УПП);
2. Учет неоднородности основания (многослойности грунта вдоль свай);
3. Учет наличия грунта отличающейся жесткости в основании ниже свай;
4. Учет наличия несжимаемого подстилающего слоя;
5. Учет неоднородности жесткости (многослойности) грунта под пятой свай;
6. Учет нелинейности поведения свай и свайного фундамента (СФ) под нагрузкой;
7. Учет сжимаемости свай;
8. Взаимное влияние свай неодинаковой длины и диаметра.

В статье представлены результаты работ по направлениям 1...5.

Центральным положением МКВВ является то, что осадка группы определяется с учетом влияния каждой сваи на каждую и определяется как сумма собственной осадки S_i под нагрузкой и дополнительной (наведенной) осадкой S_j (рис. 1).

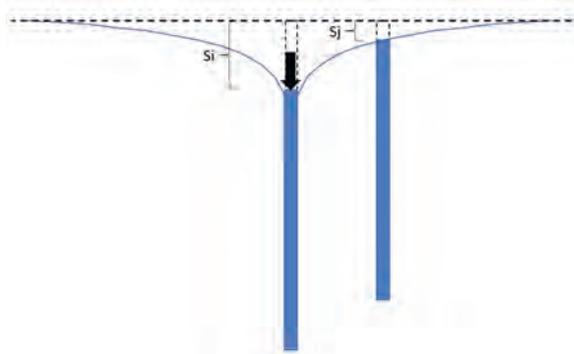


Рис. 1. Схема работы свай по МКВВ

- Собственная осадка S_i определяется по известным решениям задачи об осадке одиночной сваи [3, 8, 13]. Может быть учтена нелинейность поведения сваи под нагрузкой путем использования аппроксимация опытной или расчетной кривой нагрузка-осадка.
- Зависимость дополнительной осадки ненагруженной сваи от расстояния до нагруженной сваи называется *функцией влияния*. Дополнительная осадка $S_j(r)$ вычисляется по известным формулам [10, 13] или по табличным значениям [11] (Подход 1) либо по результатам решения серии задач о взаимном влиянии двух свай в пространственной постановке [11, 16] (Подход 2).

В различных работах [6, 7, 9, 12, 15, 17] было показано, что результаты расчетов по МКВВ одной и той же задачи различными авторами имеют существенные расхожде-

ния, достигающие 2...6 раз при больших размерах группы. Причины этого неясны, но наиболее вероятно, учитывая, что расчеты проведены в линейной постановке, разница обусловлена отличиями в способе вычисления функции влияния. Указанный разброс в результатах соответствует как подходу вычисления функции влияния по методу граничных интегральных уравнений (МГИУ), так и подходу, где функция влияния вычисляется по заранее известным формулам. Указанный факт не позволяет указать подход, обладающий явным преимуществом. В этой связи представляется важным провести исследование второго подхода, в силу того что он на порядки эффективнее по скорости расчета.

Блок-схема для расчета свайного фундамента общего вида по МКВВ представлена на рис. 2.

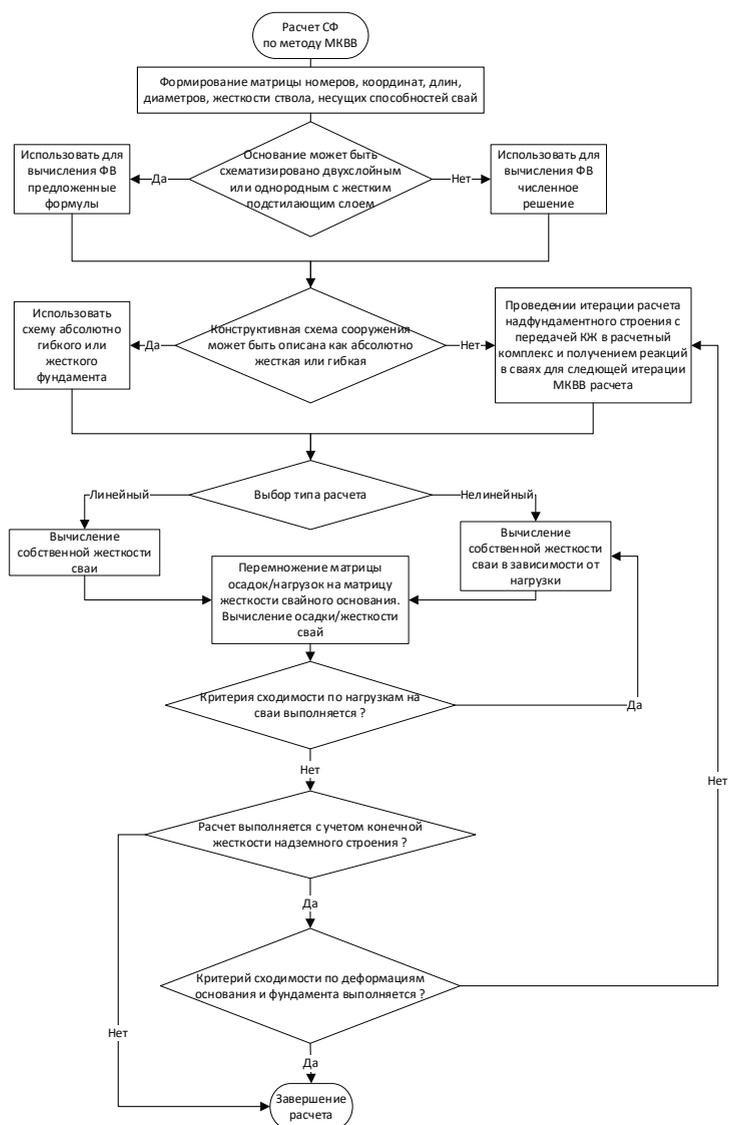


Рис. 2. Блок-схема расчета по МКВВ

Вопросы сопоставимости известных функций влияния с численными решениями для условий упругого полупространства были рассмотрены в работе [2], там же была доказана принципиальная возможность расчета осадки больших свайных групп по МКВВ и предложена формула для вычисления функции влияния, дающая более близкий к численному решению результат.

С учетом указанных обнадеживающих результатов были разработаны усовершенствованные функции влияния для расчетных схем, представленных на рис. 3:

1. Функция влияния для однородного полупространства характеризующегося модулем сдвига G и коэффициентом Пуассона ν ;
2. Функция влияния для двухслойного полупространства характеризующегося модулями сдвига G_1 и G_2 и коэффициентами Пуассона ν_1 и ν_2
3. Функция влияния для основания с несжимаемым подстилающим слоем характеризующегося модулем сдвига G , коэффициентом Пуассона ν и относительной толщиной слоя под пятой сваи h/l (h – толщина слоя, l – длина сваи);

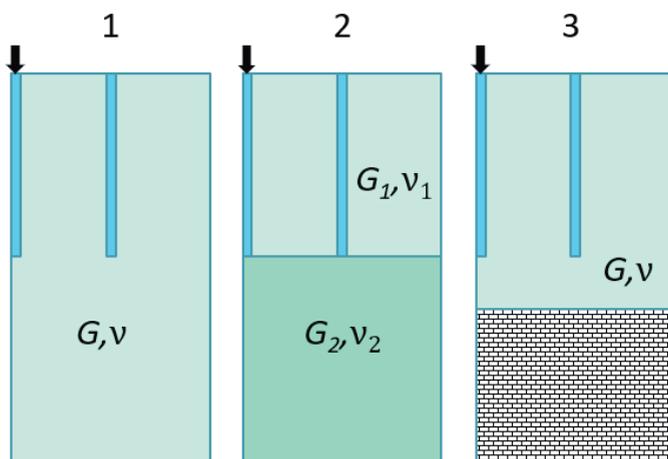


Рис. 3. Схемы грунтовых оснований, принятые для разработки усовершенствованных функций влияния

Функции влияния разрабатывались как аналитические аппроксимации численных решений. Подбор вида функции производился путем сопоставления функций, полученных численным расчетом, с набором заранее определенных известных математических функций с различным числом коэффициентов. Результаты сопоставления были проранжированы по величине среднеквадратического отклонения с учетом соответствия вида функции теоретическим представлениям и обеспечения требуемой точности в заданном диапазоне расстояний. Применение выявленной и показанной в работе [1] взаимосвязи между осадкой ненагруженной сваи и осадкой грунта на относительной глубине $z/l = 0,75$ позволило существенно сократить время расчетов и повысить их точность за счет увеличения удельного количества конечных элементов.

Усовершенствованная функция для условий однородного полупространства

В соответствии с принципом Сен-Венана, с удалением от точки приложения нагрузки способ ее приложения не влияет на НДС в удаленной точке. Из этого следует, что функция влияния для случая упругого полупространства на некотором удалении от сваи должна совпасть с решением задачи Буссинеска о приложении нагрузки на поверхности полупространства. Известные функции [3, 10, 13] обращаются в 0 при расстояниях $1 \dots 2$ длины сваи, что показывает их несоответствие решениям теории упругости и занижение осадки при расчете большеразмерных групп свай. Численные расчеты подтвердили предположение, что функция влияния на расстоянии до $\frac{1}{2} l$ имеет вид, близкий к логарифмической функции, а на расстоянии более $2l$ вид, близкий к решению Буссинеска (рис. 4).

Усовершенствованная функция для условий двухслойного полупространства

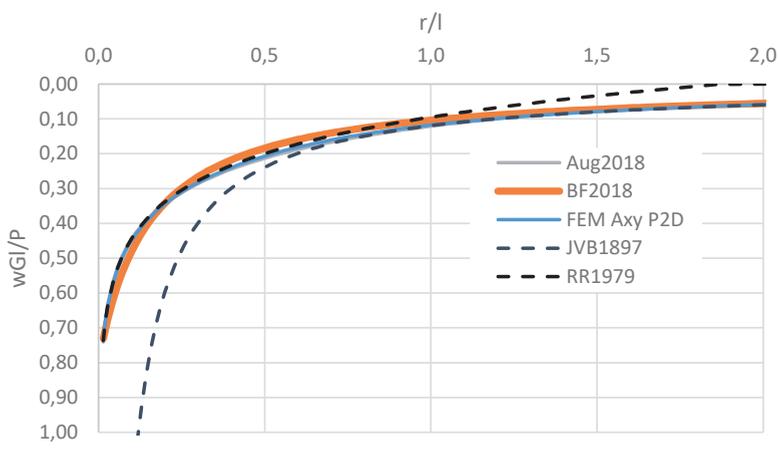


Рис. 4. Осадка ненагруженной сваи (нормализованная по GI/P) в зависимости от относительного расстояния (r/l) от нагруженной в условиях упругого полупространства по результатам МКЭ-расчета и по полученной аналитической аппроксимации (пунктиром показано известное решение Randolph и Wroth (1979) и решение задачи Буссинеска о приложении сосредоточенной силы к полупространству)

В развитие предложений работы [2] были разработаны два варианта функции:

1) Более простая, в форме гиперболической функции, при больших r ($r > l$) стремящейся к аналитическому решению задачи о приложении сосредоточенной силы к полупространства.

$$\delta = \frac{a}{(b+r/l)}, \quad (1)$$

где a и b – коэффициенты:

$$a = \frac{(1-\nu)}{2\pi}, \quad (2)$$

$$b = (0,34 - 0,29\nu) \left(\frac{l}{d}\right)^{-0,163} \quad (3)$$

2) Более точная — в форме сложной функции (отклонение от численного решения в диапазоне до $1,5l$ не превышает 5%) для применения при расчете групп свай шириной до $2l$:

$$\delta = be^{\frac{\left(\frac{r}{l}\right)^{-a}}{\left(\frac{r}{l}\right)^{a+1}}} \quad (4)$$

$$a = (0,22\nu - 0,83) \left(\frac{l}{d}\right)^{\frac{\pi\nu}{70}} \quad (5)$$

$$b = \frac{1}{\frac{(\nu-14)}{(0,25+\nu)} - \left(\frac{l}{d}\right)} - 0,22\nu + 0,4. \quad (6)$$

Усовершенствованная функция для условий двухслойного полупространства

Результаты расчета осадки свай при работе свай в условиях двухслойного полупространства при различных жесткостях нижнего слоя показаны на рис. 5 и рис. 6.

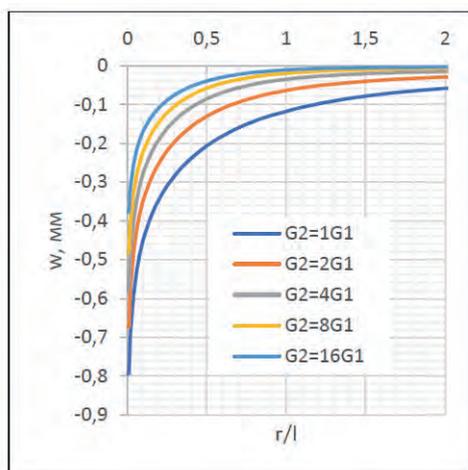


Рис. 5. Осадки свай в двухслойном основании $G_2/G_1 = 1...16$

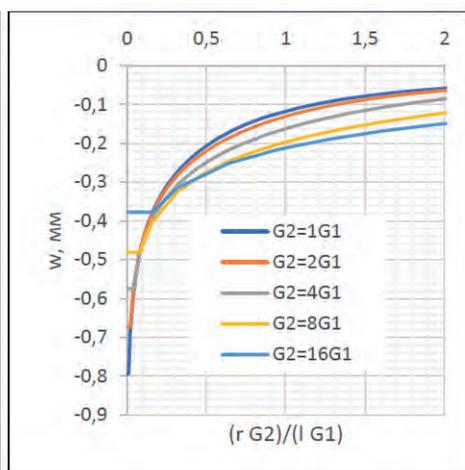


Рис. 6. Осадки свай в двухслойном основании $G_2/G_1 = 1...16$ в координатах $(rG_2)/(lG_1)$

Анализ Рис. 5 показывает, что отличается не только осадка сваи, но и вид функции влияния. Для случая наибольшей разности в сжимаемости $G_2/G_1 = 16$ затухание функции наиболее быстрое, а при отношении $G_2/G_1 = 2$ вид функции от условий однородного полупространства отличается незначительно. Перестроение абсциссы в координатах $(r G_2)/(l G_1)$ (см. рис. 6) показывает, что все линии влияния на начальном участке графика ложатся на одну огибающую, что позволяет применить соответствующую модификацию к члену r/l в формуле (4), что приводит формулу функции влияния к виду

$$\delta = \frac{a}{\left(b + \frac{G_2 r}{G_1 l}\right)} \quad (7)$$

Результат сопоставления с расчетом по МКЭ (рис. 7 и 8) показывает удовлетворительную сходимость.

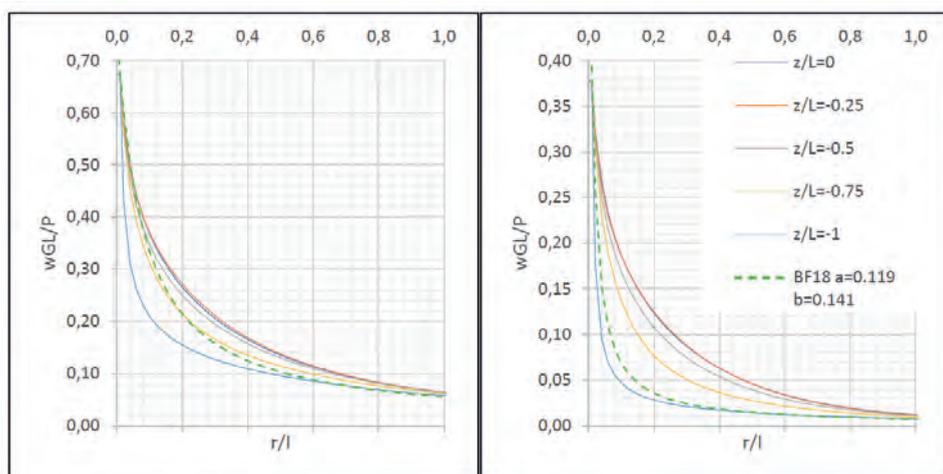


Рис. 7. Сопоставление результатов МКЭ-расчета на различных глубинах ($z/l = 0...1$) с расчетом по разработанной функции $G_2/G_1 = 2$

Рис. 8. Сопоставление результатов МКЭ-расчета на различных глубинах ($z/l = 0...1$) с расчетом по разработанной функции $G_2/G_1 = 16$

Дополнительно было проверен и развит метод расчета осадки одиночной сваи в двухслойном основании, представленный в СП 24.13330.2011 [3], где рассмотрен случай опирания сваи на второй слой только пятой. Дополнительная проработка метода осуществлена в части рассмотрения задачи о частичной заделке сваи во второй слой более жесткого грунта. Интерес к указанному случаю обусловлен тем, что [3], за исключением опирания забивных свай на прочный скальный грунт, не допускает опирания на несущий слой без какой либо заделки в него, кроме того, такая схема также соответствует практике применения СФ. Сопоставление результатов расчётов по формулам п. 7.4.2 [3] и численного решения МКЭ представлено на рис. 9.

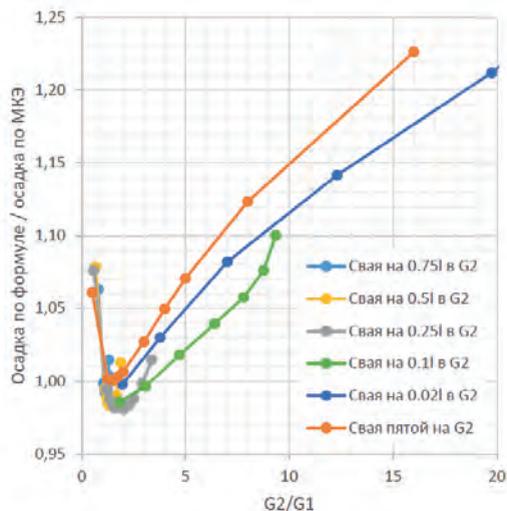


Рис. 9. Результаты сравнения осадок по формуле п. 7.4.2 [3] и МКЭ

Из графика видно, что для диапазона отношений $G_2/G_1 = 1 \dots 10$ результаты расчётов различаются на 10%, а в диапазоне $G_2/G_1 = 10 \dots 20$ разница доходит до 20...24%.

Интересной особенностью является то, что методика работает и в обратную сторону, т.е. позволяет провести расчёт сваи, прорезающей более жёсткие слои грунта и опирающейся на менее жесткие. Очевидно, такая ситуация является нежелательной, но, тем не менее, встречается в инженерной практике. Результаты расчетов показывают, что при отношении $G_2/G_1 = 0,5$ результаты расчётов различаются всего на 7%. Таким образом, можно заключить, что представленная в работе [4] методика учета двухслойности основания может быть применена и для случая расчета осадки сваи, прорезающей различные слои грунта и частично заделанной или опирающейся на слой большей жесткости (в небольших пределах — на слой меньшей жесткости).

Усовершенствованная функция влияния для слоя конечной толщины

Большой интерес представляет НДС грунта при нагружении сваи в условиях наличия несжимаемого слоя грунта. Нередко в инженерно-геологическом разрезе встречаются слои грунта, жесткость которого на порядок или на два порядка превышает жесткость вышележащих слоев грунта, но при этом механические характеристики вышележащих слоев грунта достаточны для обеспечения требований расчёта по первому и второму предельным состояниям, что позволяет применить сваи трения, а не сваи-стойки. Часто от основания сваи до несжимаемого слоя (сжимаемая толща) расстояние составляет менее одной длины сваи.

С целью исследования влияния положения жесткого слоя на осадку сваи и на характер деформации грунта на некотором удалении от сваи была проведена серия МКЭ-расчётов, в которых варьировали длину сваи, коэффициент Пуассона и расстояние от нижнего конца сваи до границы сжимаемого слоя. Анализировались такие результаты расчета как осадка сваи, величина радиуса влияния (в отличие от случая упругого и

двухслойного полупространства, функция влияния в условиях наличия несжимаемого слоя пересекает нулевое значение), отношение величины осадки сваи в конечном слое к осадке в упругом полупространстве и вид функции влияния. С целью рассмотрения указанного эффекта были проведены расчеты с глубиной сжимаемого слоя от 0,002 длины сваи до 20 длин свай.

Помимо функции влияния, была получена зависимость, позволяющая учитывать уменьшение осадки одиночной сваи в условиях наличия несжимаемого слоя. Зависимость осадки сваи от глубины сжимаемого слоя может быть достаточно просто описана логарифмической функцией (рис. 10). Несмотря на ее простоту, обеспечивается точность приблизительно 5% во всём диапазоне рассмотренных длин свай и коэффициентов Пуассона.

$$\frac{w_{fl}}{w_{inf}} = 0,064 \ln\left(\frac{h}{l}\right) + 0,883. \quad (8)$$

Кроме этого, была получена зависимость радиуса влияния одиночной сваи от толщины сжимаемого слоя (рис. 11). Указанная зависимость имеет вид

$$\frac{r_B}{l} = 1,28 \left(\frac{h}{l}\right) + 1,36. \quad (9)$$

Важно, что при наличии жесткого подстилающего слоя в отличие от УПП возникает конечный радиус влияния.

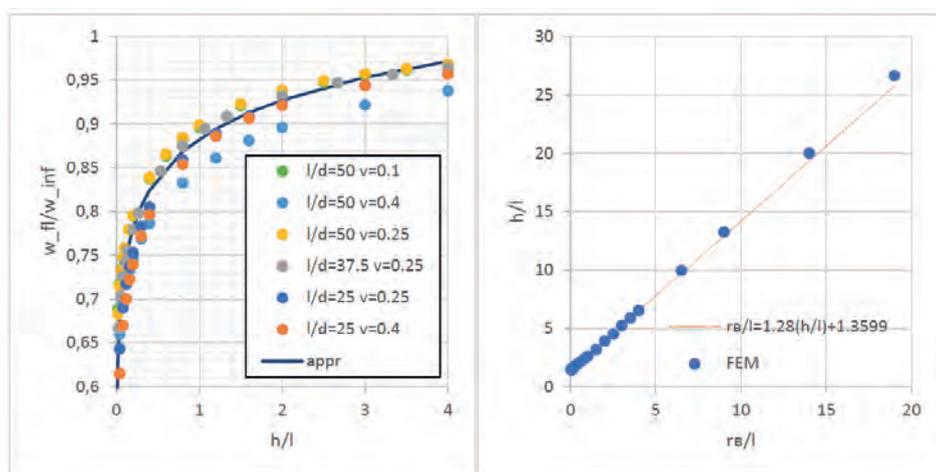


Рис. 10. Зависимость осадки одиночной сваи при наличии несжимаемого слоя относительно осадки сваи в условиях УПП

Рис. 11. Зависимость радиуса влияния одиночной сваи при наличии несжимаемого слоя

Функция влияния для условий наличия жесткого подстилающего слоя имеет следующий вид:

$$\delta = \frac{1}{a^{\ln(\frac{r}{l})}} + b. \quad (10)$$

$$a = \frac{(0,042v^5 + 0,004) \cdot \ln(h/l)}{e^{\frac{h}{l}}} - 0,01v + 1,12. \quad (11)$$

$$b = \frac{(0,09 - 0,1v^3) \cdot A \tan(h/l) - 0,15v^{1,5} - 1}{e^{\frac{h}{l}}}. \quad (12)$$

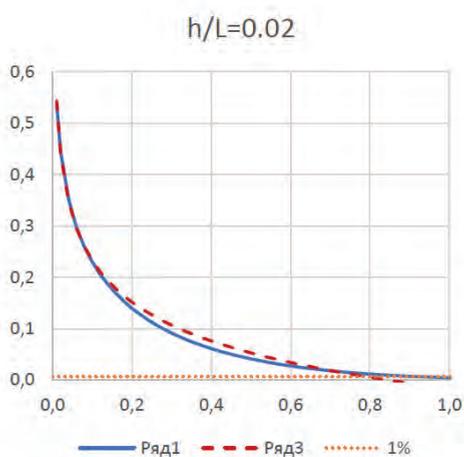


Рис. 12. Сопоставление функций влияния расчета по предлагаемой функции с МКЭ-расчетом $h/l = 0,02$

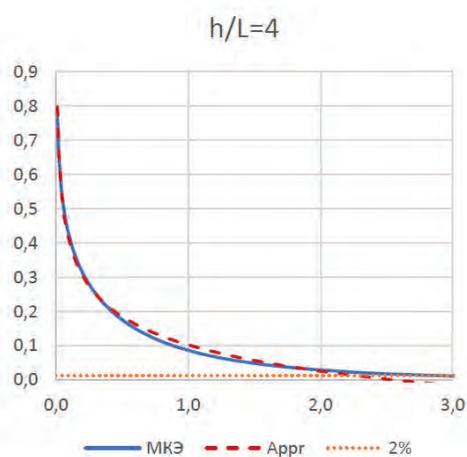


Рис. 13. Сопоставление функций влияния по предлагаемой функции с МКЭ-расчетом $h/l = 4$

Сопоставление результатов расчетов по разработанным функциям с численным МКЭ расчетом и опубликованными результатами расчетов по различным методикам

В целях оценки применимости полученных функций влияния и метода МКВВ в целом для расчета осадок групп свай были проведены серии МКЭ-расчетов в пространственной постановке. Для расчетов использовались программа Plaxis 3D 2018.

Было выполнено сопоставление величины средней жесткости сваи в составе группы, рассчитанной по трем методам, с МКЭ-расчётами в пространственной постановке. Сопоставление выполнялось для свай $l/d = 30$, глубина расчетной области под нижними концами этих свай задавалась равной 1, 2 и 5 длинам свай. При анализе рис. 14 можно отметить что между значениями жесткостей, рассчитанными по предлагаемой функции и МКЭ-расчетом, наблюдаются хорошая сходимость при глубине сжимаемой толщи, равной $5l$ и условно соответствующей случаю упругого полупространства (УПП). Случаи глубины сжимаемой толщи l и $2l$ лучше описываются функциями влияния, имеющими конечный радиус влияния или более резкое затухание. На рис. 15 показаны ре-

зультаты сопоставления расчетов по МКБВ с МКЭ для случая двухслойного основания. В указанном случае, как и ранее, наблюдается хорошее совпадение для всех рассмотренных размеров групп.

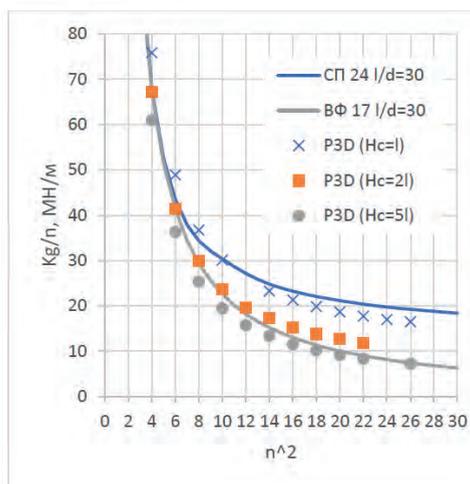


Рис. 14. Сравнение МКЭ-расчетов для разной глубины сжимаемой толщи с расчетами по МКБВ

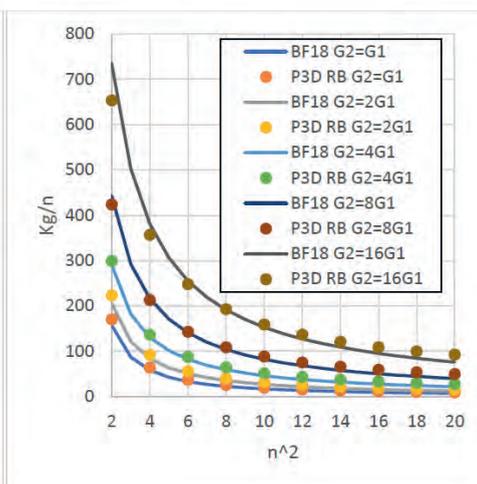


Рис. 15. Сопоставление результатов расчетов свайных групп по МКБВ и МКЭ с помощью Plaxis 3D 2018 RB

В работе [14] был опубликован сопоставительный график результатов расчетов свайных групп размером от одиночной сваи до 20×20 свай (400 свай). Расчеты выполнялись по программам PIGLET, DEFPIG и PGROUP [5, 12, 15]. Результаты расчетов представлены в виде нормализованной жесткости свайной группы, вычисляемой как $K/(\sqrt{n} sG)$, где K — жесткость группы, МН/м; n — число свай в группе; s — шаг свай; G — модуль сдвига грунта. Нормализованная жесткость группы показана на графике относительно квадратного корня из количества свай. Рассмотрены шаги свай $s/d = 2,5$ и 5. Во всех случаях принят коэффициент Пуассона $\nu = 0,49$. Указанные результаты показаны совместно с расчетами по МКБВ по предлагаемым функциям на рис 16 и 17. Также на графике нанесено значение жесткости, соответствующее фундаменту на естественном основании, ниже которого, очевидно, опускаться линии на графике не должны. Позднее различные авторы [7, 9, 17] добавляли на указанный график результаты расчетов по собственным программам, что к настоящему времени позволило получить сравнение результатов с помощью наиболее известных программ для расчета свай.

При анализе результатов можно отметить, что отдельные результаты существенно превышают жесткость группы, а иные существенно занижают. Наиболее расходящиеся линии соответствует ранним программам PIGLET и DEFPIG. Следует отметить что жесткость группы по программе DEFPIG получаются даже ниже, чем жесткость фундамента на естественном основании. Представляется, что при увеличении размера группы линию жесткости фундамента на естественном основании могут пересечь также результаты GRUPPALO и GASGROUP.

В середине диапазона лежат результаты двух самых современных программ — это GRUPPALO и PRGROUPN. Обе программы используют для расчёта МГИУ, при этом программа PGroupN выполняет полный расчёт для всех свай в группе одновременно, а GRUPPALO использует МГЭ для расчета функции влияния.

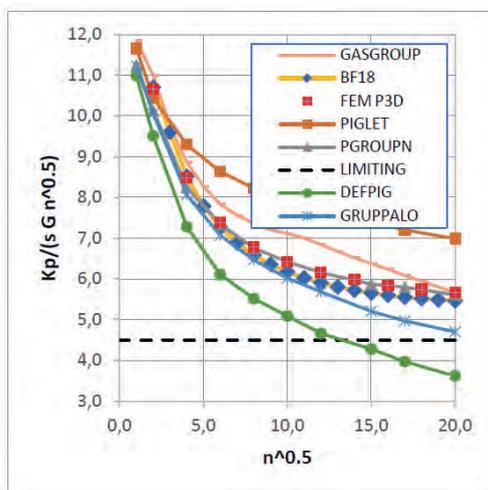


Рис 16. Сопоставление результатов расчетов свайных групп по опубликованным данным [6, 7, 9, 12, 15, 17]. УПП, $l = 25$, $s = 2,5$, $G = 10$, $\nu = 0,49$.
Формула 3 (BF18)

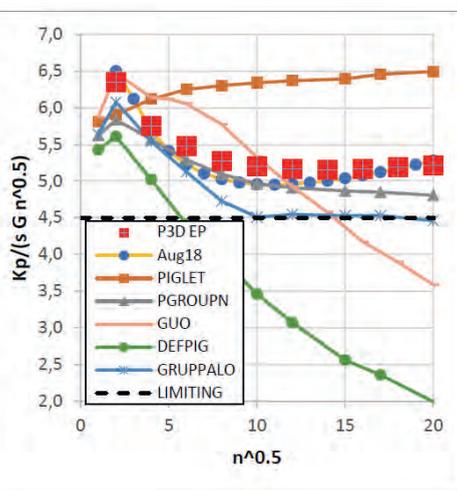


Рис 17. Сопоставление результатов расчетов свайных групп по опубликованным данным [6, 7, 9, 12, 15, 17]. УПП, $l = 25$, $s = 5$, $G = 10$, $\nu = 0,49$.
Формула 6 (Aug18)

Результаты расчетов по МКВВ с применением формул 3 и 6 показывают хорошее совпадение с расчётом по Plaxis 3D, а по сравнению с остальными программами соответствуют среднему результату.

Библиографический список

1. Боков И.А., Федоровский В.Г. О применимости функции влияния, полученной по результатам расчетов одиночной сваи для расчета свайных групп // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2018. – Т.6, №6. – С.2–7.
2. Боков И.А., Федоровский В.Г. О расчете осадки группы свай с использованием коэффициентов взаимного влияния по модели упругого полупространства // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – №6. – С.2–8.
3. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты / НИИОСП им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР.
4. Федоровский В.Г. Расчет осадок свай в однородных и многослойных основаниях. Дисс. ... канд. техн. наук / Федоровский Виктор Григорьевич; НИИОСП им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР. – Москва, 1974.
5. Banerjee P.K., Driscoll R.M., Davies T. Program for the analysis of pile groups of any

geometry subjected to horizontal and vertical loads and moments, PGROUP (2.1), 1978.

6. *Banerjee P.K., Davies T.G.* The behavior of axially and laterally loaded single piles embedded in nonhomogeneous soils // *Géotechnique*. – 1978. – Т.28, №3. – С.309–326.

7. *Basile F.* Non-linear analysis of pile groups under general loading conditions / University of Glasgow. – Glasgow, 1999.

8. *Fleming W.G.K.* Piling engineering. – London, New York: Taylor & Francis Group, op. 2009.

9. *Guo W.D.* Theory and Practice of Pile Foundations. — CRC Press, 2012.

10. *Mylonakis G., Gazetas G.* Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil // *Geotechnique* 0016-8505. – 1998. – Т.48, №1. – С. 55–72.

11. *Poulos H.G.* Analysis of the Settlement of Pile Groups // *Géotechnique*. – 1968. – Т. 18, №4. – С. 449–471.

12. *Poulos H.G.* User's guide to program DEFPIG-Deformation Analysis of Pile Groups, Revision 6 // School of Civil Engineering, University of Sidney. – 1990.

13. *Randolph M.F., Wroth C.P.* An analysis of the vertical deformation of pile groups // *Geotechnique* 0016-8505. – 1979. – Т. 29. – С. 423–439.

14. *Randolph M.F.* Design methods for pile groups and piled rafts // *Proc. 13th ICSMGE*. – 1994. – Т. 5. – С. 61–82.

15. *Randolph M.F.* PIGLET Analysis and design of pile groups // The University of Western Australia– 1996.

16. *Russo G.* Numerical analysis of piled rafts // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 1998. – Т. 22, №6. – С. 477–493.

17. *Viggiani C., Mandolini A., Russo G.* Piles and pile foundations. London: Taylor & Francis, 2012.

Авторы:

Виктор Григорьевич ФЕДОРОВСКИЙ, канд. техн. наук, зав. лабораторией механики грунтов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Victor FEDOROVSKY, Ph. D. (Engineering), Head of Soil Mechanics Laboratory, НИОСП named after N.M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: geconltd@mail.ru

тел.: +7 (499) 170-69-41

Игорь Алексеевич БОКОВ, научный сотрудник лаборатории механики грунтов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Igor BOKOV, Researcher of Soil Mechanics Laboratory, НИОСП named after N.M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: igor.bokov@gmail.com

тел.: +7 (499) 170-69-41