

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛА ЗАКРЕПЛЕНИЯ СВАЙ В ОПОРНОМ РОСТВЕРКЕ МОРСКОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Ксения Пшеничная-Ажермачёва

Национальная академия природоохранного и курортного строительства

Адрес: Украина. Симферополь, ул. Киевская 181

**Аннотация.** Рассматривается НДС элементов узла закрепления свай в опорном ростверке МСП. Предлагается расчетная модель конструктивного решения узла. Показан характер распределения сдвигающих усилий в межтрубном заполнителе вдоль закрепления и влияние на него соотношения площадей поперечного сечения сваи и направляющего патрубка. Приводится методика определения предельной несущей способности закрепления сваи в ростверке.

**Ключевые слова:** морская платформа, закрепление, сваи, патрубок, межтрубный заполнитель, усилия

### ВВЕДЕНИЕ

Закрепление морских платформ для разведки и добычи углеводородов на шельфе морей чаще всего осуществляется сваями, забиваемыми в морское дно.

Прежде сваи проходили через опорные стойки платформ и забивались в грунт на заданную глубину. После забивки свай межтрубное пространство между сваями и опорой заполнялось мелкозернистым бетоном или цементным раствором, после схватывания, которого создавалась единая монолитная конструкция. Это конструктивное решение требовало большого расхода свай, мелкозернистого бетона или цементного раствора, а также значительных затрат времени на монтажные работы.

### ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время для закрепления морских платформ используют специальные придонные ростверки, которые жестко соединяются с опорными конструкциями платформы и включают специальные направляющие патрубки для установки свай [2, 3] (рис.1). После забивки свай, проходящих через направляющие патрубки, межтрубное пространство между патрубком и сваями заполняется мелкозернистым бетоном или цементным раствором. После набора прочности

мелкозернистым бетоном образуется «каменный замок», который обеспечивает передачу усилий от сваи на опорные конструкции платформы. При этом для обеспечения заданной надежности соединения инженер должен решить следующие задачи:

- определить размеры патрубка (площадь поперечного сечения, диаметр, длину);
- способ его прикрепления к опорной конструкции платформы;
- определить прочностные характеристики заполнителя межтрубного пространства;
- способ и контроль заполнения межтрубного пространства раствором;
- произвести расчет соединения.

На рис.1 показано конструктивное решение узла закрепления сваи 1 в направляющем патрубке ростверка 2 за счет нагнетания цементного раствора и образования цементного камня 3 в межтрубном пространстве. В этом соединении свая 1 и патрубок ростверка 2 работают только на продольную силу, а соединительный элемент 3 цементный камень работает только на сдвиг. К свае 1 приложена сила  $P$ .

Расчетную модель предлагаемого конструктивного решения (рис.1) можно представить как два элемента 1 и 2, работающих на растяжение, соединенных между собой упругим слоем, работающим только на сдвиг (рис.2)

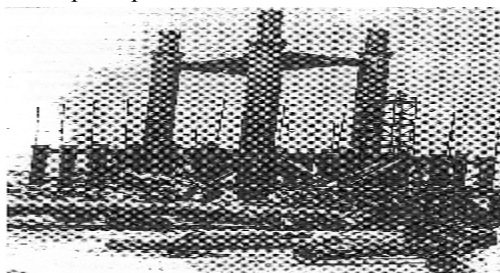


Рис.1. Общий вид опорного блока морской платформы  
Fig.1. General view of supporting block of marine platform

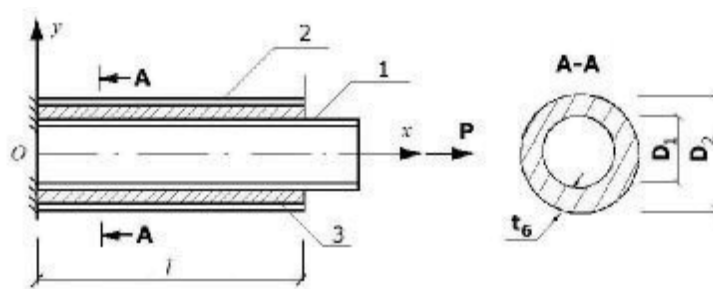


Рис.2. Расчетная модель сваи в направляющем патрубке: 1 – свая, 2 – направляющий патрубок, 3 – цементный заполнитель

Fig.2. A calculation model of pile is in the directing union coupling: 1 – a pile, 2 – directing union coupling, 3 – cementfiller

Такие расчетные модели широко применяются в отечественной и зарубежной практике [5, 6, 7, 8, 10] при соединении плоских элементов, а в последнее время – при образовании стыков труб круглого и прямоугольного сечения [3, 4, 9, 14], при работе этих соединений на сдвиг.

Рассмотрим распределение сдвигающих усилий вдоль цементного закрепления. Вырежем полоску шириной 1 см вдоль образующих направляющего патрубка и сваи (рис.3). Пусть к вырезанной полоске сваи приложена продольная сила N, которая растягивает ее. Площадь вырезанной полоски сваи равна  $A_1$ , а, соответственно, вырезанной полоски из направляющего патрубка —  $A_2$ .

При приложении силы N (рис.2) к элементу 1 он растягивается, и точка K, которая находится на расстоянии X от начала координат, перемещается в точку  $K_1$ . Элемент 1 в этом сечении получает удлинение  $S_1$ . А точка m элемента 2, которая вначале находилась в одном сечении с точкой K, за счет деформации цементного камня переместилась в точку  $m_2$ . Элемент 2 получил в этом сечении удлинение  $S_2$ . Перемещение точек K и m будет тем больше, чем больше будет смещение заполнителя:  $\Delta S = S_1 - S_2$ .

Тогда удельное сдвигающее усилие в заполнителе можем записать [13]:

$$g_x = G(S_1 - S_2). \quad (1)$$

Растягивающая сила элементарного участка элемента 1 на расстоянии X от начала координат:

$$dN_{1x} = g_x dx, \quad (2)$$

Или:

$$dS_1 = \frac{N_{1x} dx}{EA_1}. \quad (3)$$

Здесь E — модуль упругости материала сваи и патрубка; G — модуль сдвига цементного камня.

Из (3) продольная растягивающая сила в элементе 1:

$$N_{1x} = EA_1 \frac{dS_1}{dx}. \quad (4)$$

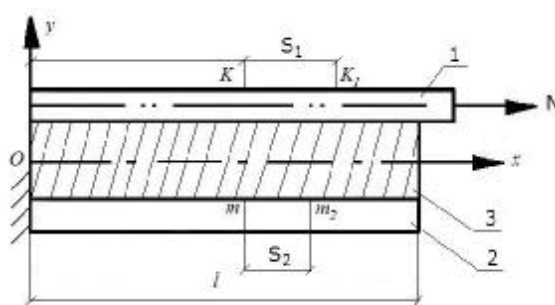


Рис.3. Расчетный элемент закрепления сваи в направляющем патрубке

Fig.3. Calculation element of fixing of pile is in the directing union coupling

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛА ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Учитывая (2), удельное сдвигающее усилие на элементарном участке:

$$g_x = \frac{dN_{1x}}{dx},$$

запишем для элемента 1:

$$g_x = EA_1 \frac{d^2 S_1}{dx^2}. \quad (5)$$

Для элемента 2 аналогично запишем:

$$dN_{2x} = -g_x dx, \quad (6)$$

$$dS_2 = \frac{N_{2x} dx}{EA_2}, \quad (7)$$

откуда:

$$-g_x = EA_2 \frac{d^2 S_2}{dx^2}. \quad (8)$$

Здесь  $N_{2x}$  — растягивающая сила элемента 2 на расстоянии  $X$  от начала координат.

Мы нашли зависимости между  $S_1$ ,  $S_2$  и  $g_x$ . Подставив (1) в (5) и (8), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$EA_1 \frac{d^2 S_1}{dx^2} = G(S_1 - S_2), \quad (9)$$

$$EA_2 \frac{d^2 S_2}{dx^2} = -G(S_1 - S_2). \quad (10)$$

Интегрирование этих уравнений дает [12]:

$$S_1 = C_1 e^{nx} + C_2 e^{-nx} + C_3 x + C_4, \quad (11)$$

$$S_2 = -\beta C_1 e^{nx} - \beta C_2 e^{-nx} + C_3 x + C_4, \quad (12)$$

и

$$\Delta S = S_1 - S_2 = C_1(1 + \beta)e^{nx} + C_2(1 + \beta)e^{-nx}. \quad (13)$$

Здесь приняты обозначения:

$$\beta = \frac{A_1}{A_2} \quad \text{и} \quad n = \sqrt{\frac{(1 + \beta)t_\sigma}{EA_1 t_1}}. \quad (14)$$

Коэффициент  $n$  характеризует сдвиговую жесткость цементном камня в межтрубном пространстве.

Используя (6) и (7), а также (11) и (12), запишем:

$$N_{1x} = EA_1 n C_1 e^{nx} - EA_1 n C_2 e^{-nx} \quad (15)$$

$$N_{2x} = -EA_2 n C_1 e^{nx} + EA_1 n C_2 e^{-nx} \quad (16)$$

Для определения постоянных интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  учтем граничные условия:

при  $x=0$ :  $N_{1x} = 0$ ;  $N_{2x} = N$ ,

при  $x=l$ :  $N_{1x} = N$ ;  $N_{2x} = 0$ .

Эти условия позволяют определить постоянные  $C_1$  и  $C_2$ . Подставив значения постоянных в (13), получим:

$$\Delta S = S_1 - S_2 = \frac{N}{EA_1 n shnl} [chnx + \beta chn(l-x)], \quad (17)$$

Отсюда:

$$g_x = \frac{GN}{EA_1 n shnl} EA_1 \frac{d^2 S_1}{dx^2}. \quad (18)$$

Полученное выражение для сдвигающих усилий в цементном камне межтрубного пространства (18) позволяет определять их величину в любой точке по длине закрепления. Анализ формулы (18) показывает, что при равенстве площадей  $A_1$  и  $A_2$ :

$$\beta = \frac{A_1}{A_2} = 1,$$

распределение усилий  $g_x$  носит симметричный характер (рис.4). Максимальное значение  $g_x$  имеет место при  $x=0$  и  $x=l$ . В средней части закрепления значения сдвигающего усилия  $g_x$  уменьшаются. И чем длиннее закрепление, тем больше разница между сдвигающими усилиями.

В то же время при  $\beta < 1$  симметрия распределения сдвигающих усилий  $g_x$  по длине закрепления нарушается (рис.5). Значение сдвигающих усилий  $g_x$  со стороны элемента 1 возрастает, а со стороны элемента 2 снижается. Это получается в результате того, что элемент 1, имея меньшую площадь сечения по сравнению с элементом 2, от одной и той же силы  $N$  получает при растяжении большие деформации и, соответственно, возникают большие сдвигающие усилия в заполнителе.

Для применения выведенной формулы к расчету закрепления свай в направляющих

патрубках придонного блока морских платформ можно идти следующим путем.

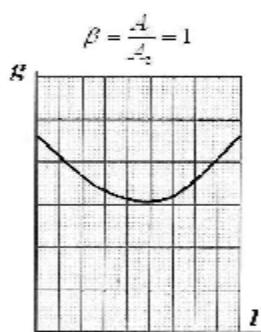


Рис. 4. Зависимость сдвигающих усилий в цементном камне  $g_x$  от относительной длины при параметре  $\beta = 1$

Fig. 4. Dependence of moving efforts in a cement filler  $g_x$  from relative length at a parameter  $\beta = 1$

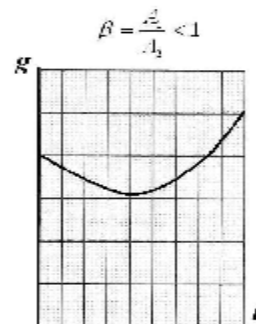


Рис. 5. Зависимость сдвигающих усилий в цементном камне  $g_x$  от относительной длины при параметре  $\beta < 1$

Fig. 5. Dependence of moving efforts in a cement filler  $g_x$  from relative length at a parameter  $\beta < 1$

В соответствии с прочностью цементного камня в межтрубном заполнителе принимается предельное расчетное усилие на срез. Далее необходимо рассчитать соединение таким образом, чтобы в крайней, наиболее напряженной, точке соединения расчетное усилие не превышало бы расчетного сопротивления цементного камня межтрубного пространства на сдвиг.

Рассмотрим соединение, представленное на рис. 3. Принимаем, что площадь сечения  $A_1 \leq A_2$ , т.е.  $\beta \leq 1$ . В этом случае наибольшее значение  $g_x$  получается при  $x=1$ .

Подставляя это значение в формулу (18) и при известной длине закрепления  $l$ , можем определить ту силу  $N$ , которая является предельной для вырезанного элемента.

Преобразуя формулу (18), получим:

$$N_{np} = \frac{(1 + \beta)g_{x\max} shnl}{n(chnl + \beta)} \quad (19)$$

На графике (рис. 6) показана зависимость предельной силы  $N_{np}$  от длины соединения  $l$ . Анализ графика показывает, что:

1) при коротких соединениях предельная несущая способность  $N_{np}$  растет почти пропорционально длине шва, но с дальнейшим увеличением длины  $l$   $N_{np}$  замедляет свой рост, асимптотически приближаясь к предельному значению, так что увеличение длины закрепления  $l$  становится неэффективным (малоэффективным);

2) предельное значение  $N_{np}$  тем больше, чем меньше  $n$ ;

3) предельная сила  $N_{np}$  уменьшается с уменьшением коэффициента  $\beta$ , т.е. когда один из соединенных элементов имеет значительно меньшее сечение, чем другой.

Из сказанного выше видно, что чем больше длина соединения, тем относительно ниже его несущая способность. Для графической иллюстрации этого выразим при помощи (19) среднюю величину сдвигающего усилия для всего соединения:

$$g_{cp} = \frac{N}{l} = \frac{(1 + \beta)g_{x\max}}{nl(chnl + \beta)} \quad (20)$$

Эта величина убывает с возрастанием  $l$ .

Удобнее вместо (20) рассмотреть ее отношение к фактическому расчетному усилию  $g_{\max}$ , т.е. величину

$$\mu = \frac{g_{cp}}{g_{x\max}} = \frac{(1 + \beta)shnl}{nl(chnl + \beta)} \quad (21)$$

График изменения этой величины в функции  $l$  показан на рис.7.

График построен для  $\beta=1$ . С уменьшением  $\beta$   $\mu$  тоже уменьшается. Т.к. ни при какой длине соединения сила  $N$  не может превзойти некоторого предела, то возникает естественный вопрос — достаточен ли этот предел для того, чтобы соединение могло выдержать силу, приходящуюся на сваю; или же соединение будет заведомо слабее и, следовательно, материал сваи будет в известной мере затрачен неэффективно.

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛА ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Для выяснения этого определим, исходя из предельной допустимой силы  $N_{np}$  то напряжение в материале, которое можно допустить при работе сваи. Это напряжение  $\sigma_{np}$ , очевидно, равно:

$$\sigma_{np} = \frac{N_{np}}{A_1} \leq R_y, \quad (22)$$

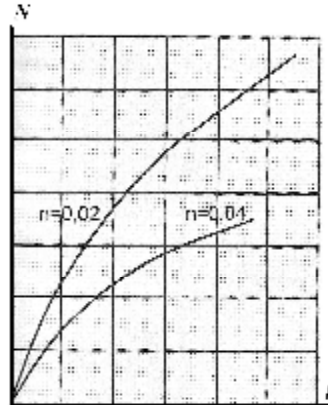


Рис.6. Зависимость предельной силы от длины соединения при разной сдвиговой жесткости.

Fig.6. Dependence of maximum force on length of connection at different change inflexibility

Предельное значение  $N_{np}$  получается из (19) при  $l \rightarrow \infty$  и равно:

$$N_{np} = \frac{(1 + \beta)g_{x \max}}{n}. \quad (23)$$

Отсюда:

$$\sigma_{np} = \frac{(1 + \beta)g_{x \max}}{nA_1} \leq R_y. \quad (24)$$

Выше мы рассматривали расчетную модель в виде полоски, вырезанной из соединения сваи и направляющего патрубка придонного ростверка. Для определения полной несущей способности всего соединения необходимо элементарную предельную силу  $N_{np}$  умножить на длину окружности сваи, т. е.:

$$P_{np} = N_{np} \pi D_1, \quad (25)$$

или:

$$P_{np} = \frac{\pi D_1 (1 + \beta) g_{x \max}}{n}. \quad (26)$$

Мы получили теоретическое значение несущей способности соединения из условия работы цементного камня на сдвиг. Однако в практике строительства морских платформ и, в частности, закрепления их сваями, мы встречаемся со случаями:

- опорная конструкция морской платформы установлена в море, проведена забивка свай через направляющие патрубки и без большого перерыва произведено закачивание цементного раствора в межтрубное пространство между внутренней поверхностью направляющего патрубка и внешней поверхностью сваи;

- опорная конструкция морской платформы установлена в море, произведена забивка свай через направляющие патрубки, а закачка цементного раствора в межтрубное пространство произведена через один-два месяца.

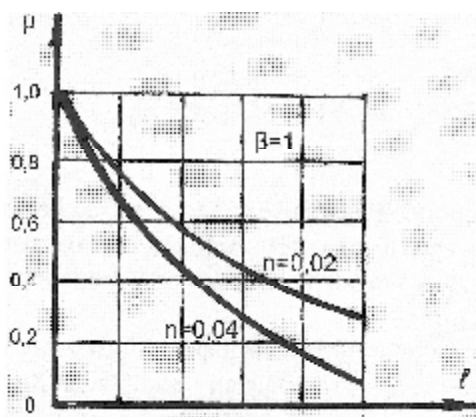


Рис.7. Значение коэффициента  $\mu$  в зависимости от  $n$  и  $l$

Fig.7. Value of coefficient  $\mu$  depending on  $n$  and  $l$

Первый случай считается наиболее благоприятным с точки зрения выполнения качественного соединения свай с опорным блоком платформы, но необходимо иметь в виду, что после набора прочности цементным камнем в межтрубном пространстве прочность его по длине соединения может оказаться неоднородной в зависимости от того, как будет подаваться раствор для заполнения межтрубного пространства; какое сцепление цементного раствора с поверхностью сваи и внутренней поверхностью направляющего патрубка; могут наблюдаться и усадочные трещины у поверхностей сваи и патрубка, и т. п. Поэтому в рабочих проектах закрепления должны вводиться коэффициенты условий работы соединения, величина которых больше единицы.

При рассмотрении второго случая может наблюдаться следующее. При продолжительном сроке нахождения стальных труб в морской воде в замкнутом пространстве (межтрубном) может наблюдаться коррозия металла, а также биологическое поражение поверхности с образованием слизи. В этом случае несущая способность соединения будет значительно меньше проектной, к тому же ее невозможно оценить. Для обеспечения заданной надежности и несущей способности соединения необходимо обеспечить непроскальзывание сваи относительно раствора и несдвиговость раствора относительно внутренней поверхности направляющего патрубка и внешней поверхности сваи. Для этого лучше всего предусматривать анкерные устройства на внутренней поверхности направляющего патрубка и внешней поверхности сваи в зоне заделки ее в патрубков. Это значительно повысит надежность и предсказуемость работы соединения.

Поэтому при разработке рабочих проектов закрепления свай в опорном ростверке при назначении длины направляющего патрубка необходимо применять коэффициент условий работы  $\gamma \geq 4-6$ .

## ВЫВОДЫ

1. Принятая расчетная модель узла закрепления сваи в придонном ростверке довольно четко позволяет получить картину напряженно-деформированного состояния его элементов.
2. Сдвигающие усилия по длине закрепления в межтрубном пространстве распределяются по параболическому закону.
3. При равных площадях поперечных сечений сваи и направляющего патрубка закон распределения сдвигающих усилий имеет симметричный характер.
4. При разных значениях площадей сечения сваи и направляющего патрубка сдвигающие усилия со стороны меньшего поперечного сечения возрастают в результате больших продольных деформаций элемента при одинаковых продольных усилиях в рассматриваемом сечении.
5. При расчете узла закрепления необходимо принимать во внимание наибольшие сдвигающие усилия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ажермачёв Г.А., 2011: Конструктивные решения сооружений и расчетные модели.// Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. тр. НАПКС. – Вып. .35./Межд. конф. «Геодинамика, сейсмическая опасность, сейсмостойкость сооружений», 193 - 197.
2. Ажермачёв Г.А., 1998: Морские сооружения для добычи нефти и газа на континентальном шельфе Азово-Черноморского региона.// Металлические конструкции. - Т.1. Киев, 47- 49.
3. Долгова Е., 2009. Численное исследование напряженно деформированного состояния опорных стоек морских стальных ледостойких платформ.// MOTROL. - №11В, 72 – 77.

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛА ЗАКРЕПЛЕНИЯ

4. Газизов Х.В., 1990. Напряженное состояние клеевых соединений трубопроводов и пути повышения их прочности.// Современные проблемы буровых и нефтепромысловых работ. - Уфа, Уфимский нефт.институт, 16 - 21.
5. Зандберг А.С., 1989. Численное решение задачи о напряженном состоянии «заплат» в магистральных трубопроводах с использованием метода малого параметра.// Математические методы исследования в трубопроводном строительстве, 93 -103.
6. Механика разрушения и прочность материалов, 1988.: Справочное пособие в 4 томах, т.1. - К., Наукова думка. – 437.
7. Николаев Г.А., Винокуров В.А., 1990: Сварные конструкции. – М., Высшая школа. – 446.
8. Pao Yi-Hsin, Norman K.N., Dickie R.A., 1990: On the effect of an interfacial on the fracture behavior of interface and subinterface cracks in sinlelap shear joints.// J. Adhes. Sci. and Technol. - №5, 503-520.
9. Проектирование металлических конструкций, 1990. Под ред. В.В. Бирюлева. – Л., Стройиздат. – 432.
10. Сборский И.В., 1989: Расчет напряженного состояния сварных соединений труб из термопластов. – Математические методы исследования в трубопроводном строительстве. Москва. – 73 - 82.
11. Сварные конструкции, 1995. – Международная конференция. Киев. – 87.
12. Симаков Г.В., Шхинек К.Н., Смелов В.А. и др., 1989: Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе. - Л., Судостроение. - 328.
13. Смирнов В.И., 1957: Курс высшей математики, т.2. - М.: ГИТТЛ. - 628.
14. Тимошенко С.П., 1960: Сопроотивление материалов., т.1. - М.: ГИФМЛ. - 380.
15. Шейнцвит М.И., Смелова М.В., 1990: Исследование надежности клеевых стыков эксплуатационных коробчатых пролетных строений мостов. – М.: Содержание, ремонт и эксплуатация искусственных сооружений на автомобильных дорогах, 43 - 55.
16. Agermachev G., Abdurakhmanov A., Mennanov E., 2009. The application of energy absorber in the dynamic systems/// MOTROL. - №11A, 59 – 63.
17. Ажермачев Г., Перминов Д., 2009. Снижение концентраторов напряжений в узлах стальных рамных каркасов.// MOTROL. - №11A, 94 – 100.

### TENSE-DEFORMED CONSISTING OF ELEMENTS OF KNOT FIXING OF PILES OF SUPPORTING GRILLAGE OF MARINE STATIONARY PLATFORM

**Summary.** The tense-deformed consisting of elements of knot of fixing of piles is examined of supporting grillage of MSP. The calculation model of structural decision of knot is offered. Character of distributing of moving efforts in an interpipe filler along fixing and influence on it of correlation of areas of cross-sectional of pile and sending union coupling is rotined. A method over of determination of maximum bearing strength of fixing of pile is brought in a grillage.

**Key words:** marine platform, fixing, piles, union coupling, interpipe filler, efforts.

