

УДК 502/504 : 624.01 : 624.131

**Ф. В. МАТВЕЕНКОВ, В. Ю. СОБОЛЕВ, И. Н. УСАЧЕВ**

Открытое акционерное общество

«Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРОЧНОСТИ  
НАПЛАВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ,  
УСТАНАВЛИВАЕМЫХ НА НЕПОДГОТОВЛЕННОЕ ОСНОВАНИЕ**

*На поверхности морского дна расположен наиболее слабый слой грунта, прочность грунтов нелинейно изменяется по глубине разреза [1]. Один из вариантов сопряжения конструкции с подобным основанием – устройство системы перекрещивающихся стальных «юбок», вдавливаемых в основание. Поскольку при циклических нагрузках верхний слой основания разжижается, то «юбки» должны прорезать его и передать нагрузку на более прочные нижележащие слои. Задача состоит в выборе таких размеров «юбок» и расстояний между ними, чтобы в момент разжижения реализовывалась схема разрушения по поверхности, проходящая на уровне концов «юбок».*

*Приливная электростанция, наплавной блок, оценка устойчивости к сдвигу при действии внешних горизонтальных сил и моментов, формы разрушения основания, потенциальная поверхность сдвига.*

*There is the softest soil layer on the sea bottom surface, the strength of soils changes nonlinearly along the cut depth [1]. One of the variants of the structure conjugations with a similar foundation is a system arrangement of the crisscross steel «skirts» pressed into the foundation. As at cyclic loadings the top foundation layer is diluted, «the skirts» will cut it and transfer the loading to the stronger underlying layers. The task is to choose such sizes of «skirts» and distances between them that at the moment of dilution the scheme of damage could be realized on the surface, on the level of the «skirts» ends.*

*Tidal power station, floating block, estimation of shift resistance at the action of external horizontal forces and moments, forms of the foundation destruction, potential surface of displacement.*

В последние годы значительно вырос интерес к использованию возобновляемой и экологически безопасной приливной энергии, энергетический потенциал которой сопоставим с речной. Новая волна интереса к приливным электростанциям (ПЭС) в России вызвана успешной 40-летней эксплуатацией Кислогубской ПЭС, которая была сооружена наплавным способом (без перемычек), и созданием нового ортогонального гидроагрегата, что привело к кардинальному снижению капитальных затрат на строительство ПЭС.

*Приливная энергия.* В настоящее время в мире работают промышленная ПЭС Ранс (с 1966 г.), экспериментальные Кислогубская в России и Аннаполис в Канаде (с 1984 г.) и восемь мик-

ро-ПЭС в Китае. Строится приливная электростанция Сихва в Южной Корее, выполнены проекты мощных ПЭС в Англии и в Канаде, проектируются ПЭС в Индии, Австралии, Аргентине и в России. Общая мощность приливных электростанций в рассмотренных на сегодня створах мирового побережья оценивается в 810 ГВт, в том числе в России 115 ГВт. Главное положительное свойство приливной энергии – это постоянство ее среднемесячной мощности, основная особенность – ее внутрисуточная и внутримесячная неравномерности.

**Наплавной способ сооружения ПЭС.** При сооружении классическим способом (за перемычками) пионерной в мире ПЭС Ранс выяснилось, что капитальные затраты на ее строительство более чем в 2 раза превысили затраты

на сопоставимую гидроэлектростанцию (ГЭС). Задачи снижения стоимости приливных электростанций решались при строительстве Кислогубской электростанции, которая впервые в мировой практике гидроэнергетического строительства была сооружена наплавным способом, что позволило более чем на треть сократить расходы. Сооружение Кислогубской приливной электростанции вызвало бум применения наплавного способа при строительстве морских топливно-энергетических сооружений: гидроэлектростанций, тепловых электростанций, шельфовых платформ, подводных туннелей. В результате применения данного способа сметная стоимость строительства снизилась до 45 %.

Наиболее важным вопросом при применении наплавного способа соору-

жения приливных электростанций является исследование устойчивости и прочности наплавных железобетонных конструкций, устанавливаемых на неподготовленное подводное основание.

*Оценка устойчивости наплавной конструкции к сдвигу при действии внешних горизонтальных сил и моментов.* Для оценки устойчивости наплавной конструкции ПЭС исследуются различные формы разрушения основания для определения наиболее опасной. В практике проектирования оснований гравитационных платформ используется набор схем разрушения, по которым проверяется способность основания выдерживать приложенные сдвиговые нагрузки. На рис. 1 представлены типичные схемы разрушения, рекомендованные в [1].

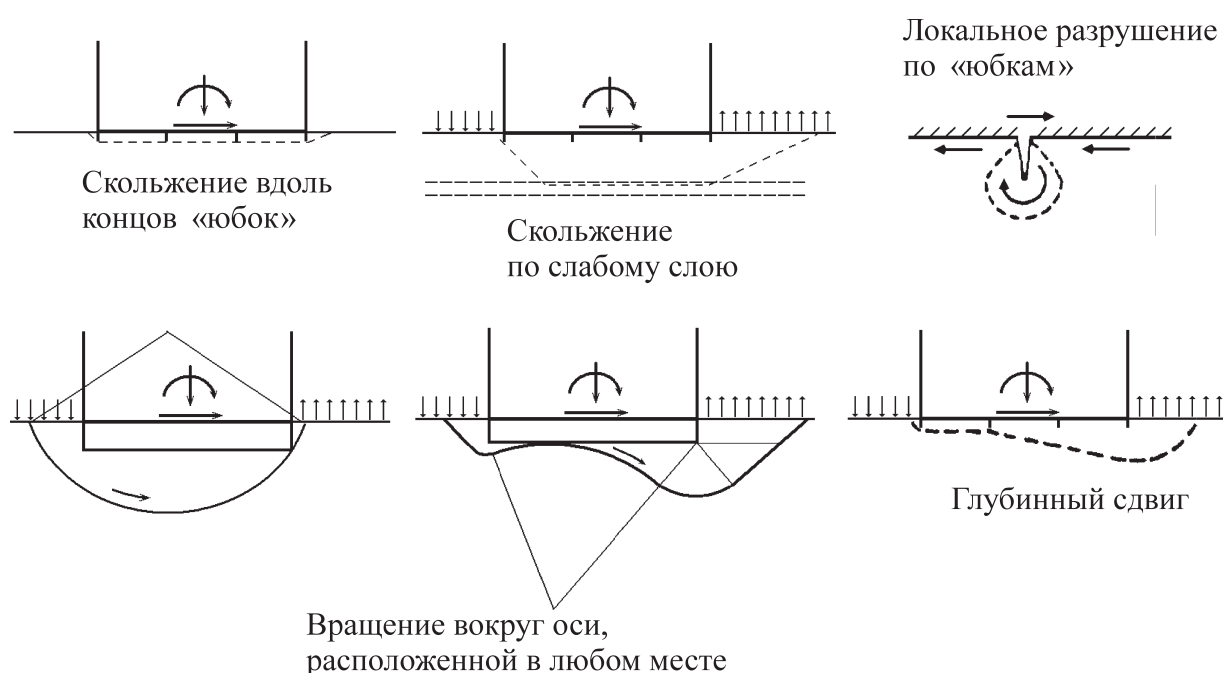


Рис. 1. Возможные формы разрушения основания

Российскими и зарубежными стандартами регламентируются близкие подходы к расчетам устойчивости сооружений при действии горизонтальных нагрузок. Методики расчетов, записанные в этих документах, детально нормируют расчеты устойчивости лишь для самых простых грунтовых

условий, например для однородных оснований или для оснований с линейным изменением прочности с глубиной. Для более сложных условий даются лишь общие указания по выбору формы разрушения. В таких случаях при проведении расчетов пользуются накопленным опытом и

рекомендациями из литературных источников. Для некоторых форм разрушения пригодны методы и компьютерные программы расчета устойчивости откосов, основанные на способе расчленения призмы обрушения на вертикальные отсеки и поиске наиболее опасной круглоцилиндрической или ломаной поверхности сдвига.

Наиболее опасная форма разрушения зависит от ряда факторов (величины и вида нагрузки, строения основания и др.), и не всегда предлагаемые схемы разрушения очевидны. В некоторых случаях, в частности при действии циклической волновой нагрузки, разрушение может происходить в форме скольжения вдоль круглоцилиндрической поверхности с выпуклостью вверх. Эта форма может оказаться наиболее опасной, если учесть совместность деформаций в элементах, расположенных вдоль потенциальной поверхности разрушения, и перераспределение средних касательных напряжений, имеющее место в процессе циклического нагружения [2].

На поверхности морского дна расположен наиболее слабый слой грунта, прочность грунтов нелинейно изменяется по глубине разреза [3]. Один из вариантов сопряжения конструкции с подобным основанием – устройство системы перекрещивающихся стальных «юбок», вдавливаемых в основание. Поскольку при циклических нагрузках верхний слой основания разжижается, то «юбки» должны прорезать его и передать нагрузку на более прочные нижележащие слои. Задача заключается в выборе таких размеров «юбок» и расстояний между ними, чтобы в момент разжижения реализовывать схему разрушения по поверхности, проходящей на уровне концов «юбок».

Ниже описывается метод оценки устойчивости подобных фундаментов на двух неравнопрочных слоях грунта, основанный на теореме о верхнем пределе пластичности [4].

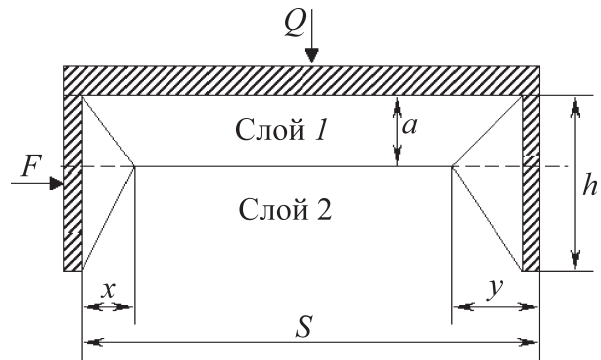


Рис. 2. Механизм локального разрушения при плоском сдвиге

Учитывая, что при динамических нагрузках верхний песчаный слой основания будет находиться в разжиженном состоянии, для оценки устойчивости рассматривались механизмы разрушения, вид которых для одного пролета фундамента представлен на рис. 2.

Предположим, что скольжение будет происходить по кровле слоя 2 с образованием возле «юбок» жестких клиньев. Если считать, что скорость перемещения фундамента по слою 2 задана, можно вычислить скорости скольжения по всем отрезкам механизма разрушения, на которых происходит рассеяние энергии. Выражение для величины сдвигающей силы  $F$  определяется из равенства ее мощности и скорости рассеяния энергии, а верхняя граница  $F$  находится с помощью минимизации этого выражения относительно величин  $x$  и  $y$  (см. рис. 2). С учетом описанных выкладок можно показать, что критическое значение  $F$  определяется по формуле [5]

$$F = \frac{s_{u1}}{a} \left[ (h - a) \left( 2 \frac{(1 + \eta)a^2 + \chi^2}{\chi} + \eta S \right) + h(S - 2\chi) \right] + 2s_{u2} \left[ \frac{(1 + \eta)(h - a)^2 + \chi^2}{\chi} \right],$$

где  $\chi = \sqrt{\frac{(1 + \eta)(h - a)[(h - a)s_{u2} + as_{u1}]}{s_{u2} - s_{u1}}}$ ;  $s_{u1}$  и  $s_{u2}$  – расчетные значения сопротивления недренарованному сдвигу первого и второго слоев грунта;

$\eta$  – коэффициент снижения прочности грунта на контакте с днищем и «юбками» ( $0 \leq \eta \leq 1$ ); остальные обозначения приведены на рис. 3.

В соответствии с теоремой о верхнем пределе пластичности (кинематический метод) несущая способность фундамента не превышает этого значения. Формула позволяет вычислить сопротивление одного погонного метра пролета фундамента с «юбками». Общее сопротивление плоскому сдвигу определяется суммированием предельных сил для всей ширины фундамента по всем пролетам.

Для оценки предельной горизонтальной нагрузки на сооружение, сопряженное с грунтом с помощью системы «юбок», на ранних стадиях проектирования обычно используется методика Murff'a и Miller'a [5], которая тоже основана на теореме о верхнем пределе пластичности, но по-другому учитывает неоднородность основания.

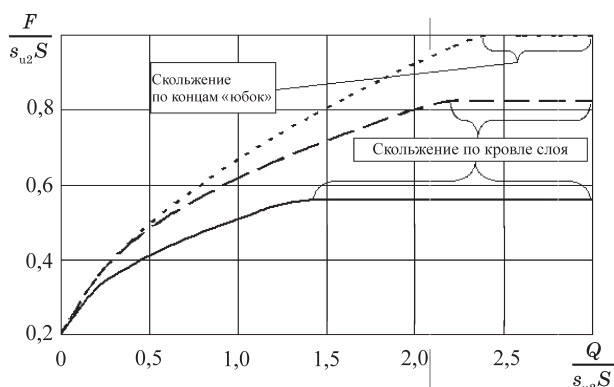


Рис. 3. Зависимость предельной горизонтальной силы от вертикальной нагрузки: .....Murff и Miller; ----- кинематический метод, шероховатые поверхности; — кинематический метод, гладкие поверхности

На рис. 3 несущая способность одного из вариантов сопряжения сравнивается с предельной сдвигающей силой, полученной по методике [5]. Расчеты проведены при следующих значениях параметров:  $S/h = 6,2$ ;  $x/h = 0,4$ ;  $s_{u1}/s_{u2} = 0,07$  для случая шероховатой поверхности днища и «юбок» ( $\eta = 1$ ).

Приведенный пример показывает, что при значительной неоднородности прочностных свойств основания и при-

нятой величине  $S/h$  плоский сдвиг по концам «юбок» не может реализоваться ни при каких вертикальных давлениях.

Для рассмотренного двухслойного основания потенциальная поверхность сдвига на глубине концов «юбок» может быть реализована при следующих условиях:

если на основание действует достаточная вертикальная нагрузка  $Q$ ;

если сопротивление грунта сдвигу по этой плоскости не превосходит предельной сдвигающей нагрузки  $F$ , вычисленной по приведенной формуле, что требует ограничения относительно расстояния между «юбками».

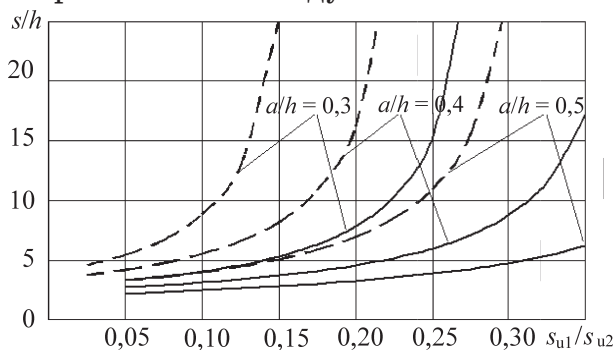


Рис. 4. Расстояния между «юбками», необходимые для 100%-й эффективности сопряжения фундамента с грунтом: — гладкие поверхности; ----- шероховатые поверхности

На рис. 4 показаны требуемые для 100% -го сопряжения фундамента с двухслойным основанием относительные расстояния между «юбками»  $S/h$  в зависимости от соотношений  $a/h$  (см. рис. 3) и прочностных свойств слоев грунта.

### Выводы

Предложенная схема разрушения и метод расчета устойчивости к сдвигу позволяют получать более надежные величины нагрузки на основание, приводящие к его разрушению.

Из изложенного видно, что для оценки устойчивости сооружения необходим тщательный выбор механизма разрушения, так как существует опасность получения чрезмерно завышенной разрушающей нагрузки.

1. **Сирота Ю. Л., Беллендир Е. Н., Романовский С. Л.** Влияние траектории нагружения на прочность и деформируемость грунтов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1986. – Т. 193. – С. 41–45.

2. **Andersen K. H.** Properties of soft clay under static and cyclic loading // NGI. – Oslo. – № 176. – 1988. – P. 1–20.

3. **Беллендир Е. Н., Беллендир Е. Н., Векшина Т. Ю., Прокопович В. С., Смирнов Ю. Г.** Оценка устойчивости морской гравитационной платформы при возможном разжижении верхнего слоя основания // Труды Международной геотехнической конференции. – Алматы, 2004. – С. 617–622.

4. **Снитко Н. К.** Определение действительного бокового давления грун-

та по уравнению совместности перемещений сдвига // Основания, фундаменты, механика грунтов. – 1963. – № 1. – С. 4–7.

5. **Murff J. D., Miller T. W.** Stability of Offshore Gravity Structure Foundations // OTC 2896. – 1977.

Материал поступил в редакцию 14.04.09.

**Матвеев Федор Викторович**, инженер  
Тел. 8 (495) 493-51-38

E-mail: fedorman@mail.ru

**Соболев Вячеслав Юрьевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
НТИЦ приливной энергетики

Тел. 8 (495) 492-95-41

E-mail: katerinasf84@mail.ru

**Усачев Игорь Николаевич**, кандидат технических наук, директор НТИЦ приливной энергетики

Тел. 8 (495) 497-50-50