УДК 551.466:622.276(26.03)

В.В.ВАСИЛЬЕВА, Т.Д.МОРДВИНА
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

ВЛИЯНИЕ СЛОЖНОЙ ГИДРОЛОГИИ НА ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СТОЙКИ ПОГРУЖНЫХ И ПОЛУПОГРУЖНЫХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Количественная оценка силового воздействия двухслойной среды на цилиндрические стойки полупогружных и погружных буровых установок выполнена с учетом течения, вынужденных поверхностных и внутренних волн. Результаты расчетов сравниваются с лабораторными данными эксперимента в стратифицированном бассейне. Выполненная работа позволяет сделать вывод о существенном влиянии сложной гидрологии на гидродинамические характеристики цилиндрических стоек.

Quantitative evaluation of the mass-flow effect of seawater with inhomogeneous density upon the vertical cylinders (supports of submersible and semi submersible drilling platforms) has been performed considering water flows, induced superficial and internal waves. Calculated results are compared with experimental data obtained previously in the basin with stratiphied water. The modal structure and amplitude-phase parameters of internal waves generated by a vertical cylinder crossing the free surface and the surface pycnocline are studied as functions of the cylinder velocity and submergence depth relative to a density jump.

Введение. Для изучения Мирового океана необходимо расширение фундаментального исследования в различных областях науки и техники. Освоение морских месторождений нефти и газа требует детализации научных исследований в отдельных районах Мирового океана.

С целью разведки и эксплуатации природных ресурсов, находящихся под дном моря в шельфовых зонах, используют полупогружные и погружные буровые установки (ПБУ). В конструкцию ПБУ входят верхнее строение и стабилизирующие колонны. Высота колонн выбирается из условия обеспечения необходимого клиренса между днищем верхнего строения и расчетной поверхностной волной, а также из условия глубины шельфовой зоны в районе эксплуатации. В стационарных ПБУ устанавливают сваи. Все эти вертикальные стойки подвержены внешнему воздействию водной среды.

В настоящее время силовое воздействие жидкости на стойки нефтедобывающей платформы определяется без учета сложной гидрологии и морских течений. В основном выполняются приближенные оценки влияния ветровых волн. Между тем в зоне арктического шельфа повсеместно существует резкий пикноклин, в котором возможно возникновение и существование внутренних волн (ВВ). Кроме того, там же действуют значительные дрейфовые и конвекционные течения.

Постановка задачи. При наличии резкого сезонного пикноклина и морского течения стойка обтекается потоком, имеющим две границы: свободную поверхность и слой скачка плотности. В последнем при определенных условиях могут возникнуть ВВ. Скорость морских течений невелика, порядка 1 м/с, поэтому волновое сопротивление в обычном понимании будет отсутствовать. Однако если жидкость неоднородна и имеется резкий пикноклин, то возникает вероятность появления вынужденных ВВ и их взаимодействия с поверхностными волнами. В результате возможно появление дополнительной нагрузки на вертикальные стойки. Для оценки этого влияния на колонны и сваи ПБУ выполнено теоретическое, численное и экспериментальное исследование.

Рассматривается обтекание цилиндрических стоек с учетом взаимодействия ВВ

со свободной поверхностью. Фундаментальное решение поставленной задачи выполнялось В.В.Васильевой [2]. Получена функция Грина, потенциал вызванных скоростей при обтекании цилиндрической стойки весомой жидкостью с учетом поверхностных и внутренних волн. Выведены формулы для определения гидродинамических характеристик. Для определения коэффициента волнового сопротивления, обусловленного внутренним волнообразованием на границе раздела сред, с учетом взаимодействия со свободной поверхностью при наличии морского течения, можно записать выражение

$$C_x = \frac{2}{\pi \mathrm{Fr}^2}\left(\frac{P_1}{S_1} + \frac{P_2}{S_2}\right),$$

где Fr – число Фруда, $\mathrm{Fr} = U / \sqrt{gD}$; P_1 и P_2 – коэффициент волнового сопротивления с учетом границ, обусловленный вынужденными поверхностными и внутренними волнами и их взаимодействием соответственно в верхней жидкости с плотностью ρ_1 и нижней жидкости с плотностью $\rho_2 > \rho_1$; S_1 – безразмерная площадь смоченной поверхности стойки, находящейся в верхней жидкости плотностью ρ_1 и глубиной h; S_2 – безразмерная площадь смоченной поверхности стойки, находящейся в нижней жидкости плотностью ρ_2; U – скорость течения; D – диаметр стойки.

Функции P_1 и P_2 зависят от соотношения плотностей верхней и нижней среды $\overline{\rho} = \rho_1 / \rho_2$, от глубины залегания слоя скачка h и от числа Фруда.

Основные результаты. Разработаны алгоритм и численный метод сформулированной задачи, позволяющие определить силовое воздействие вынужденного внутреннего волнообразования и морского течения на цилиндрическую стойку, пересекающую свободную поверхность и границу раздела сред различной плотности. Значение коэффициента волнового сопротивления стойки, обусловленное влиянием границы раздела, весьма значительно на малых числах Фруда. Оно превышает максимальные значения C_x для глубоко погруженных тел, движущихся вблизи резкого пикноклина. Возрастание C_x в данном случае, как показывают расчеты, связано не с взаимодействием поверхностных и внутренних волн, как отмечалось автором ранее [1], а с воздействием невозмущенной свободной поверхности. Влияние последней как «твердой крышки» приводит к значительному увеличению волнового сопротивления стойки на ВВ. Максимум коэффициента волнового сопротивления сдвигается в сторону больших значений Fr ($\mathrm{Fr} > 0{,}1$). Максимальное значение волнового сопротивления при обтекании сваи достигается при глубине залегания пикноклина $h \approx 0{,}5H$, где H – глубина шельфа. Для стоек полупогружных БУ максимальное силовое воздействие слоя скачка наблюдается при $h \approx (0{,}8\text{-}0{,}9)T$, где T – высота стойки.

Данный вывод подтверждается результатами экспериментальных исследований. В стратифицированном бассейне Института прикладной физики РАН были выполнены замеры вынужденных ВВ при буксировке вертикального цилиндра, пересекающего термоклин и свободную поверхность. Диапазон скорости цилиндра соответствовал числам Фруда, при которых, согласно теоретическим расчетам, возникает наибольшее волновое сопротивление на ВВ и, следовательно, генерируются ВВ наибольшей амплитуды: $0{,}03 \le \mathrm{Fr} \le 0{,}12$. Обнаружено, что модовая структура поля ВВ не зависит от осадки цилиндра T и определяется его скоростью относительно линейного предела фазовой скорости соответствующей моды U/C_i. На рис.1 приведены изменения температурного поля при скоростях движения цилиндра $U/C_2 = 1$ (амплитуда волны противоположна по фазе амплитуде температурного поля, 1 °С эквивалентен 1 см высоты волны). На рис.2 приведены амплитуды ВВ при скоростях течения U равных фазовой скорости первой моды C_1.

При скоростях течения, меньших или равных C_2, вертикальная структура вынужденных ВВ типична для вертикального профиля второй моды: когда осадка цилиндра $T < h$, возмущение пикноклина представляет собой утолщение, при $T > h$ первая присое-

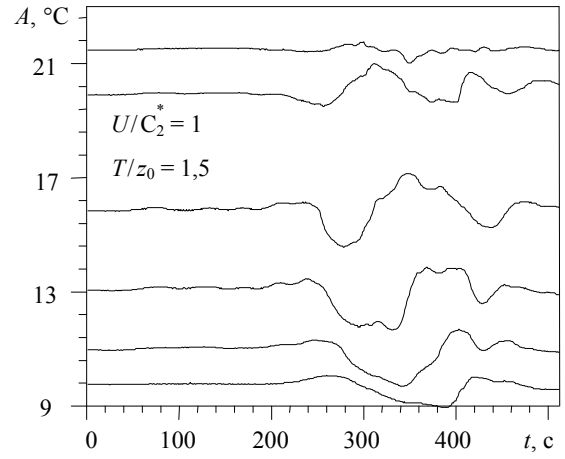


Рис.1. Вертикальная структура поля вынужденных ВВ за цилиндром при скорости течения U, равной скорости ВВ второй моды

T – осадка цилиндра; z_0 – глубина залегания центра пикноклина

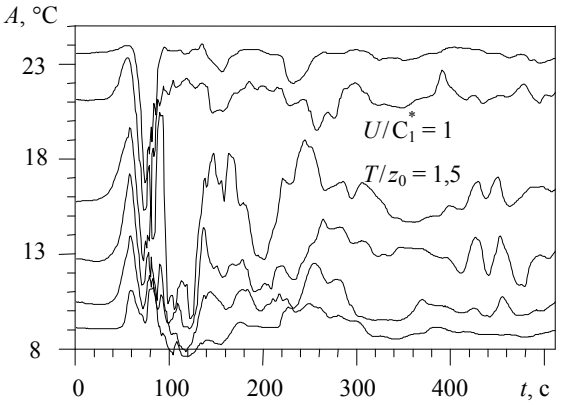


Рис.2. Вертикальная структура поля вынужденных ВВ за цилиндром при скорости течения U, равной скорости ВВ первой моды

диненная вынужденная ВВ – это сужение пикноклина. Суммарная волновая нагрузка при этих скоростях отсутствует, так как ВВ находятся в противоположных фазах.

С увеличением скорости течения U наблюдается изменение структуры волнового профиля. При $U = C_1$ весь пикноклин охвачен ВВ, находящимися в одной фазе. Эти скорости соответствуют тем числам Фруда, при которых, по расчетным данным, имеется максимум волнового сопротивления.

Известно [1], что при движении глубоко погруженного тела вблизи резкого пикноклина, прекращается генерация вынужденных ВВ при скорости движения тела, превышающей фазовую скорость ВВ первой моды. Экспериментально и теоретически показано, что при обтекании стойки, пересекающей свободную поверхность и пикноклин, со скоростью потока, превышающей фазовую скорость ВВ первой моды, продолжается генерация вынужденных ВВ и их амплитуда увеличивается. При этом поверхностных волн не наблюдалось.

Кроме оценок влияния внутреннего волнообразования проведены также расчеты для нахождения нагрузки от ветровых волн на стойку нефтедобывающей платформы по принятой в настоящее время методике [3]. Расчеты показали, что нагрузка от ветровых волн – величина значительная. Коэффициенты сил на единицу осадки цилиндра от ветровых волн ($C_x = 0{,}64$-$1{,}0$) и от вынужденных ВВ ($C_x = 0{,}8$-$1{,}0$) – величины одного порядка. Сравнительные расчеты показывают, что при наличии течения и резкого пикноклина возникает дополнительная нагрузка, соизмеримая с гидродинамической силой от ветровых волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Богатырев С.Д.* Экспериментальные исследования вынужденных внутренних волн и сопротивления шара в стратифицированной жидкости / С.Д.Богатырев, В.В.Васильева, О.Д.Шишкина // Повышение эффективности экспериментальных исследований гидродинамики судна для решения проблемных задач в судостроении. Л.: Судостроение, 1991. С.164-170. (Тр. ВНТО им. ак.А.Н.Крылова).

2. *Васильева В.В.* Генерация внутренних волн дрейфующим айсбергом / В.В.Васильева, Л.Г.Писаревская, О.Д.Шишкина // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1995. Т.31. № 6. С.842-851.

3. *Лаппо Д.Д.* Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения / Д.Д.Лаппо, С.С.Стрекалов, В.К.Завьялов / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидротехники им. Б.Е.Веденеева. Л., 1990. 432 с.