

DOI: 10.12737/24096

Абсиметов В.Э., д-р техн. наук, проф.,
Востров В.К., д-р техн. наук, проф.,
Абсиметов М.В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

НЕКОТОРЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КАСПИЙСКОГО ШЕЛЬФА И АВТОКОЛЕБАНИЯ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

kafedrasigsh@mail.ru

Приведен динамический анализ взаимодействия ледовых полей с морскими и шельфовыми нефтегазопромысловыми сооружениями, основой которого являются условия возникновения и развития автоколебаний с использованием одномерных математических моделей колебаний сооружений. Определяются динамические ледовые нагрузки на сооружения и анализируются условия установления автоколебаний наряду с определением их параметров. Предлагаются рекомендации по совершенствованию международного стандарта ISO 19906 и СНиП РК 3.04-40-2006.

Ключевые слова: колебания, автоколебания, устойчивость, ледовые нагрузки, ледостойкие сооружения, контактные воздействия льда.

Значительное расширение работ на шельфе Каспийского моря, связанных с поиском, разведкой и освоением морских нефтяных и газовых месторождений, приводит к острой необходимости разработки современных международных, межгосударственных и национальных нормативно-технических документов регламентирующих проектирование, строительство, эксплуатацию и ликвидацию морских стационарных нефтегазопромысловых сооружений (МСНС), где определяющими при расчете нефтегазопромысловых сооружений, являются нагрузки, вызванные воздействием льда.

Существо проблемы ледовых нагрузок определяется тем, что и сами нагрузки, и движение сооружения являются результатом контактного взаимодействия льда, сооружения и механизма разрушения ледовых образований [1, 2]. Незатухающие колебания в механических системах формируются обычно возмущающими воздействиями периодического характера. Однако, в ряде случаев незатухающие колебания могут поддерживаться за счет источников энергии, не обладающих колебательными свойствами. Подобные случаи возникают, например, при рассмотрении явлений флаттера конструкции в потоке воздуха, автоколебания квазилинейных систем с сухим трением и др. [3–5]. Аналогично обстоит дело при воздействии ледовых образований и, в частности, полей ровного движущегося льда на нефтегазопромысловые сооружения с вертикальной передней гранью в зоне контакта. Развивающиеся при воздействии льда контактные силы, так же, как и при флаттере носят периодический характер, но эта периодичность не задана наперед, а возникает в результате колебаний платформ (верхних строений нефтега-

зопромысловых сооружений), где источник энергии колебаний – ледяное поле (образование) имеет постоянную скорость.

Ледовые нагрузки и условия возникновения автоколебаний

Возможность возникновения автоколебаний платформ тесно связана со свойствами ледовых нагрузок, т.е. с характеристиками зависимости ледовой нагрузки G от скорости V ледяного поля, надвигающегося на неподвижное сооружение. Эта зависимость должна иметь как участок роста нагрузки G с ростом скорости V , где $G'(V) > 0$ при $0 \leq V < V_*$, так и участки постоянства и падения нагрузки при $V > V_*$, т.е. $G'(V) = 0$ и $G'(V) < 0$. Убедимся в том, что причину автоколебаний платформ нужно связывать с существованием ниспадающего участка зависимости $G(V)$ и некоторых характерных точек этой зависимости.

В состоянии покоя на массу m платформы действуют две силы: контактная сила $G=G(V)$ соответствующая скорости V ледяного поля и восстанавливающая сила $-cy$ со стороны опорного блока платформы, где c – коэффициент жесткости опорного блока, y – статическое смещение массы m платформы. В общем случае восстанавливающая сила нелинейная и записывается в виде $c(y)$, где $c(0)=0$.

Если состояние покоя платформы каким-либо образом нарушено, то последующее движение будет описываться дифференциальным уравнением

$$G(V - \dot{y}) - \gamma \dot{y} - c(y) = m\ddot{y}, m = W/g, \quad (1)$$

где γ – коэффициент вязкости (демпфирования), учитывающий силу сопротивления при колебаниях опорного блока платформы в воде, W – вес

верхнего строения, y – отклонение центра тяжести платформы от положения равновесия $y = 0$.

$$G(V - \dot{y}) \approx G(V) - G'(V)\dot{y} + G''(V)\dot{y}^2/2 - G'''(V)\dot{y}^3/6 \quad (2)$$

и уравнение движения (1) переписывается в виде нелинейного уравнения, описывающего колеба-

Для малой скорости \dot{y} платформы можно принять

нения платформы вблизи положения равновесия с учетом различного числа членов разложения (2):

$$\ddot{x} + f(\dot{x}) + f_v(x) = 0 \quad (3)$$

где

$$F(\dot{x}) = 2n\dot{x} - q_2\dot{x}^2 + q_3\dot{x}^3, f_v(x) = (c(x + y_{ст}) - G(V))/m \quad (4)$$

$$x = y - y_{ст}, 2n = (\gamma + q)/m, \rho^2 = c'(y_{ст})/m$$

$$q_2 = G''(V)/(2m), q_3 = G'''(V)/6m, q = G'(V)$$

Значение $y_{ст}$ статического положения равновесия является корнем уравнения $c(y) = G(V)$ если $c(y)$ возрастающая функция положения платформы y и $c'(0) < G'(0)$. Для линейной восстанавливающей силы $f_v(x) = \rho^2 x$, $\rho^2 = c/m$, $y_{ст} = G(V)/c$.

На восходящих и нисходящих участках зависимости $G(V)$ ледовой нагрузки $q \neq 0$ и в уравнении (3) можно пренебречь квадратичным и кубичным слагаемыми и (3) превращается для линейной восстанавливающей силы в классическое линейное однородное уравнение.

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \rho^2 x = 0, \quad (5)$$

описывающее колебания сооружения с демпфированием вблизи положения равновесия $y_{ст}$.

Решение уравнения (5) описывает периодические затухающие колебания около положения равновесия $y = y_{ст}$ с частотой $\rho_1/2\pi$ (периодом $T = 2\pi/\rho_1$), где $\rho_1^2 = \rho^2 - n^2$, если $n < \rho$ и затухающие апериодические движения к положению равновесия, если $n \geq \rho$.

Противоположное явление – возрастание амплитуд колебаний или апериодического движения может происходить, если скорость V ледяного поля расположена на ниспадающем участке зависимости $G(V)$. Здесь производная $G'(V)$ отрицательна и параметр $q < 0$, т.е. в системе появляется отрицательное затухание и колебания при $q < -\gamma < 0$ будут происходить с увеличением амплитуд или платформа будет удаляться от положения равновесия при апериодическом движении.

Таким образом, при $V < V_*$ (восходящий и постоянный участки характеристики $G(V)$) колебания платформы оказываются затухающими, а при $V > V_*$ (падающий участок характеристики) колебания и апериодические движения платформы оказываются возрастающими. Здесь V_* – абсцисса точки начала ниспадающего участка характеристики $G(V)$. Это значение ско-

рости можно назвать предельной скоростью ледяного поля.

Аналогично задаче о флаттере [4] для устойчивости колебаний платформы необходима скорость ледяного поля меньшая предельной, т.е. $V < V_*$.

Проведенный анализ устойчивости движения платформы под действием ледовых нагрузок весьма неполон. Неполнота исследования, сведенная к одномерным колебаниям, заключается в том, что вследствие линеаризации, как и в задаче о флаттере, установлены лишь условия, при выполнении которых могут возникнуть автоколебания. Однако ответа на вопрос о параметрах установления и установившегося автоколебательного процесса не получено.

В точке максимума $V = V_*$ ледяной нагрузки $G(V)$ параметр $q = 0$, а параметр $q_2 < 0$. При $V > V_*$ коэффициент n может обратиться в нуль, и уравнение (3) для малых колебаний приводится при $q_3 = 0$ к линейному уравнению относительно квадрата скорости, исследованному в [3, 5, 6]. Но, тем не менее, для исследования качественного поведения решений нелинейных уравнений (1), (3) воспользуемся теоремой Пуанкаре-Бендиксона [6].

Анализ колебаний ледостойких сооружений с вертикальной передней гранью на основе теоремы Пуанкаре-Бендиксона

Фазовую плоскость автоколебательных системы всегда можно разделить на области возрастающих и убывающих колебаний, разграниченных предельными циклами. Поэтому периодические движения автоколебательных систем возможно только при совершенно определенных значениях амплитуд,

Таким образом, для определения возможности возбуждения автоколебания, описываемых уравнениями (1), (3) и их устойчивости (неустойчивости) необходимо для ледяной нагрузки $G(V)$ выяснить условия существования предельных циклов. Ответ на этот вопрос дается с

помощью теоремы Пуанкаре-Бендиксона [6]. Существование единственного предельного цикла для уравнения (3) связано с двумя ограничениями, накладываемыми на ледовую нагрузку $G(V)$ и коэффициент γ демпфирования колебаний в воде.

Для существования единственного предельного цикла уравнения (1) требуется [6], чтобы производная по переменной \dot{x} функции

$$F(\dot{x}) = \frac{\gamma}{m} \dot{x} - \frac{1}{m} [G(V - \dot{x}) - G(V)] \quad (6)$$

была четной и непрерывной вместе со своей производной. Кроме того, требуется существование такого положительного числа $B > 0$, что при $0 < \dot{x} < B$ функция $F(\dot{x})$ была отрицательной, а при $\dot{x} > B$ была положительной и монотонно возрастающей. В этих условиях, накладываемых на $F(\dot{x})$ и ее производную, начало координат $x = \dot{x} = 0$ (положение равновесия, $y = y_{ст}$, $\dot{y} = 0$) представляет собой неустойчивое положение равновесия, и существует единственный предельный цикл Γ . Всякая фазовая траектория, начинающаяся внутри кривой Γ , стремится к предельному циклу изнутри. Для начальных условий, расположенных вне кривой Γ , фазовая траектория также стремится к предельному циклу при $t \rightarrow \infty$. То есть независимо от начальных условий система стремится к единственному режиму периодических незатухающих колебаний, представляющих собой режим автоколебаний.

Для нелинейного уравнения (3), с учетом разложения в ряд Тейлора функции $F(\dot{x})$ и удерживания первых трех членов разложения, получается приближенное представление в виде кубической параболы (4). Условия существования единственного устойчивого в большом предельного цикла (режима автоколебаний) сводятся к требованию четности производной от функции $F(\dot{x})$, т.е. $q_2 = 0$ и тому, что параметр B определяется положительным корнем кубического уравнения

$$x(2n + 3q_3x^2) = 0 \quad (7)$$

Это уравнение имеет три корня – один нулевой и два – действительных кратных $x_k^2 = -2n/(3q_3)$, если $2n/(q_3) < 0$. Следовательно, параметр $B > 0$ существует и равен

$$B = -2n/(3q_3), \text{ если } 2n/(q_3) < 0 \quad (8)$$

Если существует такая скорость V_2 ледового поля, что одновременно

$$2n(V_2) = q_3(V_2) = 0, \quad \lim_{V \rightarrow V_2} 2n/q_3 = D_q$$

и коэффициент $D_q < 0$, то параметр B также существует и равен $B = |D_q|$.

Таким образом, для существования ненулевого предельного цикла-автоколебаний с ненулевой амплитудой достаточно выполнению двух условий.

$$G''(V) = 0, \quad (\gamma + G'(V))/q_3 < 0 \quad (9)$$

первое из которых определяют точку перегиба $V = V_p$ на ниспадающей ветви ледовой нагрузки, где $V_p > V_*$.

Таким образом, уравнение (3) с кубической зависимостью (4) обладает единственным предельным циклом при выполнении условий (9). Движение, описываемое эти уравнением, стремится к некоторому периодическому колебанию (автоколебаниям), но амплитуда предельных колебаний остается неизвестной и подлежит дополнительному определению, например, методом гармонического баланса или методом Ван-дер-Поля [3–5].

Анализ международных и национальных норм по определению статических и динамических ледовых нагрузок на ледостойкие сооружения

Ввиду того, что возникновение автоколебаний ледостойких сооружений экспериментально и натурно установленный факт, проведем краткий анализ того, как действующие и вводимые международные и национальные стандарты определяют статические и динамические ледовые нагрузки на морские и шельфовые нефтегазопромысловые сооружения, а также отклик этих сооружений на ледовые нагрузки.

В СНиП 2.06.04-82* [8] и СНиП РК 3.04-40-2006 [9] определяются статические ледовые нагрузки на неподвижные сооружения, и они либо не зависят от скорости ледового поля, либо ей пропорциональны. Это означает, что ниспадающая ветвь зависимости $G(V)$ отсутствует и определить автоколебания нефтегазопромысловых сооружений под действием ледовых нагрузок в соответствии с указанными нормами не представляется возможным.

Международный стандарт ISO 19906:2010(E) [7] и окончательная редакция проекта идентичного ему стандарта РФ ГОСТ Р ИСО 19906 [10] содержат разделы, определяющие общие, перпендикулярные плоскости контакта нагрузки при дроблении равного или наслоенного льда в зоне контакта (ватерлинии) жестких конструкций с вертикальными стенами.

В приложении А приводится формула для одноосной прочности льда в зависимости от скорости нагружения $\dot{\epsilon}$ и общей доли v_T свободного объема (рассол и воздух)

$$\sigma_c = A_s \dot{\epsilon}^{0,22} \quad (10)$$

в которой коэффициент A_s различен для направлений нагружения столбчатого и гранулированного льда.

Диапазон скоростей деформации, на который распространяется данная формула, изменяется от $\dot{\epsilon} = 10^{-7}$ до $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ 1/сек. Учитывая, что скорость деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ соответствует максимальной прочности льда на сжатие, получаем, что зависимость ледовой нагрузки от скорости ледового поля V , построенная по формуле (10), содержит только восходящую ветвь с максимальным значением и не содержит ни участка постоянства, ни ниспадающей ветви. А это, как показано выше, означает, что определить колебания (автоколебания) нефтегазопромысловых сооружений под действием ледовых нагрузок в соответствии со стандартами [7, 10] возможно только с использованием предположений о поведении зависимости (10) при $\dot{\epsilon} > 10^{-3}$.

В приложении А стандартов [7, 10] кроме статических ледовых нагрузок приведен раздел по динамическим ледовым воздействиям, в том числе на вертикальные конструкции. Руководящие указания этого раздела основаны большей частью на данных измерений полномасштабной модели узких конструкций и включают периодическое дробление льда, вибрации с захватом частоты (резонансные автоколебания) и случайные вибрации при непрерывном дроблении льда. При этом основной целью динамического анализа ледовых нагрузок и отклика на них сооружения считается уход от захвата частоты конструкцией (резонансных автоколебаний).

Наряду с описанием эффектов взаимодействия льда с сооружениями на рис. А.8.22 [7, 10] показана идеализированная диаграмма динамики ледовых нагрузок, вызванных периодическим дроблением льда. На рис. А.8.23 показана предполагаемая динамика ледовой нагрузки в условиях захвата частоты конструкцией (резонансных автоколебаний) для определения реакции конструкции при вибрациях. Идеализированные графики ледовой нагрузки в условиях захвата частоты (резонансных автоколебаний) имеют пилообразный характер с линейной нагрузкой и почти вертикальной разгрузкой в течение одного периода T .

В Российских актуализированных нормах СП 38.13330.2012 [11] определяется нагрузка от воздействия движущихся ледовых полей на сооружения с вертикальной передней гранью по формулам (50)–(53) раздела 7. При этом, в отличие от международного стандарта [7] и идентичного ему окончательного проекта Российского национального стандарта ГОСТ Р ИСО

19906:2014 [10] статические нагрузки зависят от скорости V ледового поля и имеют как возрастающую ветвь нагрузки, так и ее ниспадающий участок.

В формулы свода правил [11] входит коэффициент k_V , зависящий от размерного параметра $\dot{\epsilon}_e$ – эффективной скорости деформации льда в зоне его взаимодействия с опорой, где $\dot{\epsilon}_e = V/(bk_e)$, b – ширина опоры по фронту на уровне действия льда, k_e – безразмерный коэффициент, зависящий от параметра λ , значения которого так же, как и коэффициента k_V приведены в таблице 19, причем $2 \leq k_e(\lambda) \leq 4$. Здесь важно отметить, что коэффициент $k_V(\dot{\epsilon})$ сначала возрастает при $\dot{\epsilon} \geq 10^{-7}$ от значения $k_V = 0,1$ до 1 при $\dot{\epsilon} \geq 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$, затем монотонно убывает до значения $k_V = 0,3$ при $\dot{\epsilon} \geq 10^{-2}$, т.е. содержит точку перегиба в ниспадающей зоне.

Выводы:

Ввиду того, что скорости ледовых полей в районах расположения шельфовых и морских нефтегазопромысловых сооружений Каспийского моря не регулируются и могут превышать предельные скорости, вызывающие автоколебания, необходимо проведение динамического анализа взаимодействия льда с проектируемой конструкцией. Динамический анализ, проводимый на основе нелинейных моделей колебания сооружений, требуется не для исключения возможности возникновения автоколебания, как предусмотрено международном стандарте в [7], а для учета их в качестве аварийной расчетной ситуации при проектировании строительных конструкций.

1. Причиной возникновения самовозбуждающихся колебаний (автоколебаний) морских и шельфовых ледостойких нефтегазопромысловых сооружений с вертикальной передней гранью в зоне контакта со льдом является нелинейная зависимость ледовой нагрузки G от скорости ледового поля V , надвигающегося на сооружение, имеющая участки роста и участки падения нагрузки с ростом V . Одномерное уравнение, описывающее горизонтальные колебания сооружения под действием ледовой нагрузки, будет нелинейным, и режим автоколебаний возникает при скорости ледового поля большей предельной, соответствующей ниспадающему участку зависимости $G \sim V$.

2. В СНиП 2.06.04-82*, СНиП РК 3.04-40-2006 определяются ледовые нагрузки на неподвижные сооружения, и они либо не зависят от скорости ледового поля, либо ей пропорциональны. Это значит, что ниспадающий участок зависимости $G(V)$ отсутствует и определить автоколебания нефтегазопромысловых сооружений при воздействии ледовых нагрузок в соот-

ветствии с указанными нормами невозможно. В международном стандарте ISO 19906:2010(E) [7] содержится только возрастающая ветвь нагрузки $G(V)$ и указывается максимальное значение этой нагрузки, но ниспадающая ветвь отсутствует.

3. В Российских актуализированных нормах СП 38.13330.2012 определяется нагрузка от воздействия движущихся ледовых полей на сооружения с вертикальной передней гранью. При этом, в отличие от стандартов [7, 10] статические нагрузки зависят от скорости ледового поля и имеют как возрастающую ветвь нагрузки, так и постоянный и ниспадающий участки. Следовательно, в соответствии с нормами [11] возможно определение автоколебаний нефтегазопромысловых сооружений и их параметров, а также динамических ледовых нагрузок.

4. Для пересмотра норм СНиП РК 3.05-27-2004 по проектированию, строительству и эксплуатации морских стационарных нефтегазопромысловых сооружений (МСНС) в северной части Каспийского моря и внутренних водоемах Республики Казахстан необходимо пересмотреть (актуализировать) СНиП РК 3.04-40-2006 на основе гармонизации с СП 38.13330.2012 путем введения возрастающей и ниспадающей ветвей зависимости $G \sim V$, а также для удовлетворения норм по оценке воздействия общей вибрации на обслуживающий персонал и оборудование [12].

5. Для применения международного стандарта ISO 19906:2010(E) для проектирования, строительства и эксплуатации МСНС в Каспийском море и внутренних водоемах Республики Казахстан необходим его пересмотр с учетом введения требования по учету аварийной ситуации – возникновения автоколебаний, а также введения ниспадающей ветви зависимости «ледовая нагрузка – скорость надвигающегося на сооружение ледового поля». Кроме того, вместо предположений о характере динамических ледовых нагрузок вызывающих вибрации конструкций, принятых в [7] необходимо теоретическое решение задачи о возникновении автоколебаний, и как следствие, определение динамиче-

ских ледовых нагрузок, вызывающих автоколебания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Востров В.К., Береснев А.В. Актуализация СНиП 2.06.04-82* и некоторые строительные проблемы освоения Российского шельфа // Промышленное и гражданское строительство. 2011. №9. С. 60-64.
2. Салганик Е.А., Шхинек К.Н. Использование преобразований Фурье для анализа колебаний морских сооружений под действием льда // Материалы международной научно-практической конференции. ч.1– СПб: изд-во политехн. Ун-та, 2011, С. 25–26.
3. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1981, 568 с.
4. Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем. М.: Наука, 1967, 418 с.
5. Магнус К. Колебания. Введение в исследование колебательных систем. М.: Мир, 1982, 304с.
6. Парс Л.А. Аналитическая динамика. М.:Наука,1971,635 с.
7. ISO 19906:2010 (E). Промышленность нефтяная и газовая. Арктические морские сооружения.
8. СНиП 2.06.04-82* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).
9. СНиП РК 3.04-40-2006. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).
10. ГОСТ Р ИСО 19906:2014. Промышленность нефтяная и газовая. Арктические морские сооружения.
11. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*.
12. ISO 6897-1984. Руководство по оценке воздействия низкочастотного горизонтального движения (от 0,063 до 1 Гц) на лиц, находящихся в стационарных конструкциях, в частности в зданиях и прибрежных сооружениях.

Absemetov V.E., Vostrov V.K., Absemetov M.V.

SOME CONSTRUCTION PROBLEMS OF THE CASPIAN SHELF AND OSCILLATIONS OF FIXED OFFSHORE OIL AND GAS STRUCTURES

An analysis of the dynamic interaction between ice floes with the marine and offshore oil and gas field facilities, which are the basis of the conditions of occurrence and development of self-oscillation using a one-dimensional mathematical model of oscillations facilities. Determined by dynamic ice loads on structures and analyzed the conditions for establishing self-oscillations along with the definition of their parameters. Offers recommendations for improving the international standard ISO 19906 and SNIP RK 3.04-40-2006.

Key words: vibrations, oscillations, stability, ice loads, ice-resistant structures, contact the effects of ice.

Абсиметов Владимир Эскендерович, доктор технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: kafedrasigsh@mail.ru

Востров Владимир Кузьмич, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией.

ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова»

Адрес: Россия, Москва, ул. Архитектора Власова, 49.

Абсиметов Максим Владимирович, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.