

УДК 624.042.42:627 (083.75)

## Аварийные ледовые и сейсмические нагрузки на морские нефтегазопромысловые сооружения

М.Н. Мансуров<sup>1\*</sup>, В.К. Востров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

<sup>2</sup> ООО «Кимрское объединение ВНИПИморнефтегаз», Российская Федерация, 171506, Тверская обл., г. Кимры, ул. Ленина, д. 44

\* E-mail: M\_Mansurov@vniigaz.gazprom.ru

**Ключевые слова:** ледовая нагрузка, ледостойкое нефтегазо-промысловое сооружение, промышленная безопасность, аварийная ситуация, аварийные ледовые и сейсмические нагрузки, опасный производственный объект.

**Тезисы.** Приводится динамический анализ взаимодействия и возникновения автоколебаний на морских нефтегазопромысловых сооружениях при воздействии ледовых полей и сейсмических нагрузок. Анализ выполнен с использованием одномерных математических моделей колебательных процессов в сооружениях, основой которых являются условия возникновения и развития автоколебаний. Определяются динамические ледовые и сейсмические нагрузки на сооружения, и анализируются условия установления автоколебаний наряду с прогнозированием их параметров. Предложены способы определения отсутствующих в национальных и международных нормах СП 38.13330.2012, СП 14.13330.2014 и ISO 19906:2010 аварийных ледовых и аварийных сейсмических нагрузок, а также аварийных расчетных ситуаций, учет которых при проектировании и эксплуатации морских нефтегазопромысловых сооружений является необходимым условием обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов в соответствии с федеральными законами № 116-ФЗ и № 384-ФЗ.

Ледовая нагрузка является результатом контактного взаимодействия льда и сооружения. В основе такого взаимодействия лежит механизм разрушения ледовых образований<sup>1</sup>. Как определено ранее [1], 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. Так, как правило, обстоит дело при воздействии ледовых образований и, в частности, полей ровного и наслоенного движущегося льда на нефтегазопромысловые сооружения с вертикальной передней гранью в зоне контакта. Развивающиеся при воздействии льда контактные силы носят периодический характер, но эта периодичность не задана заранее, а возникает в результате колебаний конструкций, где в роли источника энергии колебаний выступает ледовое поле (образование), движущееся с постоянной скоростью [1].

В ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» кроме постоянных, длительных и кратковременных выделены особые нагрузки как нагрузки, создающие особые ситуации. В примечании указано, что особые воздействия подразделяются на нормируемые (например, сейсмические, в результате пожара) и аварийные (например, при взрыве, столкновении, аварии технологического оборудования или отказе несущего элемента конструкции), которые не определены в явном виде в нормативных документах. При этом под аварийной ситуацией понимается ситуация, соответствующая исключительным условиям работы сооружения, в том числе и при особых воздействиях, которые могут привести к существенным социальным, экологическим и экономическим потерям.

Несмотря на отнесение сейсмических нагрузок в ГОСТ 27751-2014 к нормируемым особым воздействиям, в своде правил СП 14.13330.2014<sup>2</sup> аварийные

<sup>1</sup> См. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*; ISO 19906:2010. Промышленность нефтяная и газовая. Арктические морские сооружения; ГОСТ Р ИСО 19906:2014. Промышленность нефтяная и газовая. Арктические морские сооружения.

<sup>2</sup> См. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81\* (с Изменением № 1).

сейсмические нагрузки и аварийные расчетные ситуации, предусмотренные Техническим регламентом о безопасности зданий и сооружений<sup>3</sup>, не выделяются. Не выделены и не определены аварийные ледовые нагрузки также в СП 38.13330.2012, международном стандарте и проекте национального стандарта<sup>1</sup>.

Глобальные ледовые нагрузки на ледостойкую платформу рассчитываются исходя из среднего давления на номинальную площадь контакта (см. разд. 7 СП 38.13330.2012, ISO 19906:2010 и ГОСТ Р ИСО 19906:2014). Ранее установлено [1], что динамический анализ на основе нелинейных моделей колебания сооружений требуется не для исключения возможности возникновения автоколебаний, как предусматривают ISO 19906:2010 и ГОСТ Р ИСО 19906:2014, а для учета автоколебаний в качестве аварийной расчетной ситуации, необходимость чего при проектировании строительных конструкций регламентирована Законом № 384-ФЗ.

### Острый резонанс (авторезонанс) и аварийные сейсмические нагрузки

Как отмечалось ранее, дифференциальное уравнение колебаний сооружения вследствие реакции на ледовые и горизонтальные сейсмические воздействия с учетом поглощения энергии колебаний имеет вид [1]:

$$I_0 \ddot{\phi} + 2I_0 n_0 \dot{\phi} - h_1 F_p (V - v) + (K_0 - mgh_0)\phi = mh_0 \ddot{Y}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса сооружения;  $\phi$  – угол поворота;  $n_0$  – коэффициент затухания;  $K_0$  – жесткость основания при повороте;  $h_0$  – высота центра тяжести сооружения;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $I_0 = mh_0^2 + I_1$  ( $I_1$  – момент инерции сооружения относительно центра тяжести);  $h_1$  – высота приложения ледовой нагрузки относительно оси вращения;  $v = h_1 \dot{\phi}$  – касательная скорость платформы на уровне действия льда;  $\ddot{Y}$  – сейсмическое ускорение основания в горизонтальном направлении;  $V$  – скорость движения ледового поля;  $F_p = nk_1 k_2 F_{b,p}$  ( $n_i$  – общее число колонн сооружения;  $k_1, k_2$  – коэффициенты, определяемые по формуле (60) и табл. 29 СП 38.13330.2012 соответственно;  $F_{b,p}$  – предельная нагрузка на отдельно стоящую колонну, см. формулу (52) в СП 38.13330.2012).

Учитывая, что величина горизонтального смещения  $y$  на уровне  $h_1$  равна  $h_1 \phi$ , из уравнения (1) получаем нелинейное относительно скорости  $V$  уравнение горизонтальных колебаний:

$$\ddot{y} + 2n_0 \dot{y} - G(V - \dot{y}) + \rho^2 y = f \ddot{Y}, \quad (2)$$

где ледовая нагрузка  $G(V) = \frac{h_1^2 F_p (V)}{I_0}$ ;  $\rho^2 = \frac{K_0 - mgh_0}{I_0}$ ;  $f = \frac{mh_0 h_1}{I_0}$ .

Рассмотрим случай отсутствия ледовых нагрузок, когда  $G(V) = 0$ , т.е. на сооружение действуют только горизонтальные сейсмические нагрузки. Тогда из уравнения (2) следует одномерное уравнение колебаний сооружения при наличии вязкого трения и линейной восстанавливающей силы:

$$\ddot{y} + 2n_0 \dot{y} + \rho^2 y = f \ddot{Y}. \quad (3)$$

Правую часть формулы (3) можно рассматривать как некоторую сейсмическую силу, которая увеличивает кинетическую энергию сооружения тогда и только тогда, когда ее знак совпадает со знаком  $v$ . Динамический эффект максимален, когда

<sup>3</sup> См. ст. 16 Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

сейсмическая сила постоянна по модулю и меняет знак при максимальной величине смещения сооружения. Отсюда непосредственно следует, что

$$\ddot{Y} = bg \cdot \text{sign}(\dot{y}), \quad (4)$$

где  $b$  – показатель балльности исследуемого микрорайона. Его можно задавать в предположении, что при возможном землетрясении ожидаемое максимальное ускорение рас-

считывается по формуле (4), т.е.  $b = \frac{\max(\ddot{Y})}{g}$ , причем  $\max(\ddot{Y})$  берется из акселерограмм.

Показатель балльности может также выбираться исходя из сейсмичности площадки строительства, определяемой по нормам СП 14.13330.2014, либо результатов сейсмического микрорайонирования.

Подстановка сейсмического ускорения  $\ddot{Y}$  (см. формулу (4)) в одномерное уравнение (3), составленное для линейной восстанавливающей силы, приводит к нелинейному относительно скорости уравнению колебаний сооружения

$$\ddot{y} + 2\varepsilon\dot{y} + \rho^2 y = fb g \cdot \text{sign}(\dot{y}), \quad (5)$$

где  $\varepsilon = n_0$ .

Нелинейное относительно скорости колебаний уравнение описывает движение системы, в которой возможны автоколебания, т.е. стационарные периодические решения, а по терминологии А.А. Андропова с соавторами [2] – авторезонанс. Указанные сейсмические силы (см. формулу (4)) определены в работе основоположника нелинейной механики разрушения М.Я. Леонова [3], и такой случай колебаний назван им острым резонансом. Эти силы могут быть отнесены к *аварийным сейсмическим нагрузкам, вызывающим аварийную ситуацию – автоколебания*. Вероятность возникновения таких сил мала, их действие непродолжительно, но они важны с точки зрения учета последствий достижения предельных состояний, которые могут возникнуть при остром резонансе (авторезонансе).

Для определения из уравнения (5) возможности существования автоколебаний воспользуемся его решением, которое имеет различные ветви в зависимости от знака скорости  $v$ . Построение полного решения требует учета начальных условий нового движения к тому конечному состоянию, в которое привело систему предшествующее движение. Это конечное состояние характеризуется нулевой скоростью и экстремальными смещениями, которые при смене движения должны быть непрерывными. Уравнение (5) в зависимости от знака скорости  $v$  определяет полуколебания

$$y(t) = y_a(t) \pm y_e, \quad (6)$$

где  $y_a(t) = \exp(-\varepsilon t)[Q \cos(\omega t) + R \sin(\omega t)]$  – собственные колебания осциллятора ( $\omega = \rho v$  – круговая частота с учетом затухания, где  $v = \sqrt{1 - D^2}$  при  $D = \frac{\varepsilon}{\rho}$ );  $y_e = \frac{fbq}{\rho^2}$  – статическое отклонение.  $Q$  и  $R$  – произвольные постоянные, определяемые начальными условиями

$$y(0) = y_0, \quad v(0) = v_0. \quad (7)$$

Если движение начинается из крайне левого положения  $y_0 < 0$ , для которого  $v_0 = 0$ , то формулы смещений и их скоростей упрощаются и принимают вид

$$y_a(t) = \pm y_e + (y_0 - y_e) \exp(-\varepsilon t) \left[ \cos(\omega t) + \left( \frac{D}{v} \right) \sin(\omega t) \right],$$

$$v(t) = \left( \rho \frac{y_0 - y_e}{v} \right) \exp(\varepsilon t) \sin(\omega t).$$

Поскольку  $y_0 < 0$ , для первой ветви  $v$  будет положительной и в приведенных формулах при  $t > 0$  выбираются верхние знаки. Смена знака скорости происходит при  $\omega t_n = \pi n$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , и период  $T$  колебаний нелинейного осциллятора в масштабе ре-

ального времени равен периоду свободных демпфированных колебаний, т.е.  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ . Первый максимум смещения достигается при  $\omega t_1 = \pi$  и равен

$$y_1 = y_e - (y_0 - y_e) \exp\left(-\frac{\pi D}{v}\right). \quad (8)$$

Для движения в обратном направлении при  $t > t_1$  требуется переход на вторую ветвь решения, где  $v < 0$ , с начальными условиями  $y(t_1) = y_1$ ,  $v(t_1) = 0$ . Движение в обратном направлении будет продолжаться до тех пор, пока его скорость не обратится в нуль при  $\omega t_2 = \pi$ . При этом минимальное смещение составит

$$y_2 = -y_e - (y_e + y_1) \exp\left(-\frac{\pi D}{v}\right). \quad (9)$$

Для того чтобы рассматриваемое движение представляло чисто периодический процесс с постоянной амплитудой  $A$ , требуется совпадение экстремумов колебаний, т.е. выполнение двух уравнений (8) и (9) при  $y_0 = y_2$ . Определитель этой системы линейных алгебраических уравнений отличен от нуля при  $0 < D < 1$ , и ее решение симметрично, т.е.  $y_2 = -y_1$ , где

$$y_1 = y_e \frac{1 + \exp\left(-\frac{\pi D}{v}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\pi D}{v}\right)}.$$

Видоизменяя эту формулу, получим амплитуду стационарных колебаний в форме, приведенной ранее [4]:

$$A = y_e \operatorname{cth}\left(\frac{\pi D}{2\sqrt{1-D^2}}\right). \quad (10)$$

Функция, описывающая этот процесс автоколебаний (стационарный периодический процесс с периодом  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ), может быть записана в виде различных аналитических выражений в полуинтервалах одного периода:

$$y(t) = y_e + (y_2 - y_e) \exp(-\varepsilon t) \left[ \cos(\omega t) + \left(\frac{D}{v}\right) \sin(\omega t) \right], \text{ если } 0 < t < \frac{\pi}{\omega}; \quad (11)$$

$$y(t) = -y_e + (y_1 + y_e) \exp(-\varepsilon(t - t_1)) \left[ \cos(\omega t) + \left(\frac{D}{v}\right) \sin(\omega t) \right], \text{ если } \frac{\pi}{\omega} < t < 2\frac{\pi}{\omega}. \quad (12)$$

Здесь постоянные интегрирования выбраны так, чтобы соблюдались условия

$y(0) = y\left(2\frac{\pi}{\omega}\right)$  и непрерывности смещений и скорости при  $t = \frac{\pi}{\omega}$ . Причем  $v > 0$  для интервала  $0 < t < \frac{\pi}{\omega}$ ,  $v < 0$  для интервала  $\frac{\pi}{\omega} < t < 2\frac{\pi}{\omega}$ .

Особый интерес представляет сопоставление амплитуды  $A$  автоколебаний с максимальным значением амплитуды колебаний на одной частоте, а именно на частоте автоколебаний (собственных частот колебаний сооружения  $\omega = \rho\sqrt{1-D^2}$ ), когда

на входе линейной колебательной системы (5) действуют гармонические силы  $P = fbg \cdot \sin \theta t$  (где  $\theta$  – частота периодического воздействия на входе). Этот случай хорошо известен; для него вынужденные колебания также гармонические и описываются формулой  $y(t) = B \sin(\theta t - \beta)$ , где амплитуда  $B$  и фаза  $\beta$  равны и

$$B = y_e \left( (1-s^2)^2 + 4 \frac{\varepsilon^2 s^2}{\rho^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \operatorname{tg} \beta = 2 \frac{\varepsilon \theta}{\rho^2 - \theta^2}, \quad (13)$$

где  $s = \frac{\theta}{\rho}$  – безразмерная частота.

Для этого вводится коэффициент  $h_v(D)$  как величина  $\frac{A}{B_v}$ , где  $B_v$  – значение амплитуды  $B$  при безразмерной частоте  $s = \frac{\omega}{\rho}$ . Подставляя

это значение в формулу для  $B$  (см. (13)), получаем

$$B_v = \frac{y_e}{\left( \frac{D}{\sqrt{4-3D^2}} \right)}, \quad 0 < D < 1$$

и, кроме того,

$$h_v(D) = D \sqrt{4-3D^2} \operatorname{cth} \left( \frac{\pi D}{2\sqrt{1-D^2}} \right). \quad (14)$$

Переходя в этой формуле к пределам при  $D \rightarrow 0$  и  $D \rightarrow 1$ , получим соответственно

$$h_v(0) = \frac{4}{\pi} \approx 1,273 \text{ и } h_v(1) = 1. \text{ Это означает: ам-}$$

плитуда автоколебаний на частоте  $\omega$  превосходит приближенное резонансное значение амплитуды  $B_v$  входящего воздействия на той же частоте во всем интервале значений коэффициента затуханий  $0 < D < 1$ , но не более чем на величину 0,273 (при  $D = 0$ ); амплитуды равны в случае вырождения колебаний – перехода к аperiodическому движению при  $D = 1$ .

Результаты, полученные методом А.А. Андропова с соавторами [2], дают право сделать три утверждения: во-первых, стационарная амплитуда действительно будет единственной, что приводит к неустойчивости положения равновесия и мягкому возбуждению колебаний; во-вторых, каковы бы ни были начальные условия, в системе устанавливаются незатухающие

колебания; в третьих, эти незатухающие колебания орбитально устойчивы, так как отклонения в обе стороны от стационарного режима затухают, т.е. система неустойчива в малом и устойчива в большом [4]. Таким образом, строительные конструкции с линейной восстанавливающей силой и демпфированными одномерными колебаниями при действии горизонтальных сейсмических нагрузок могут испытывать острый резонанс (авторезонанс), т.е. относятся к автоколебательным системам.

В СП 14.13330.2011 и СП 14.13330.2014 для строительства в сейсмических районах выдвинуто требование выполнять расчет сооружения для двух расчетных ситуаций – ПЗ (проектное землетрясение) и МРЗ (максимальное расчетное землетрясение). Расчеты по ПЗ следует выполнять для всех зданий и сооружений, а расчеты по МРЗ – только для специальных зданий и сооружений, перечисленных в позициях 1 и 2 таблицы 3 СП 14.13330.2014.

В качестве *проектного* принимается наиболее сильное землетрясение, которое может произойти на площадке строительства один раз в 100 или 500 лет. Расчет воздействия ПЗ выполняется с целью предотвращения частичной или полной потери сооружением эксплуатационных свойств.

*Максимальным расчетным* называется землетрясение максимальной интенсивности, повторяющееся на площадке строительства один раз в 1000 или 5000 лет, или – по терминологии А.Н. Бирбраера [5] – наиболее сильное потенциально возможное на данной площадке землетрясение. Целью расчета воздействия МРЗ является предотвращение глобального или частичного обрушения, создающего угрозу безопасности людей. Следовательно, МРЗ должно определять вероятность возникновения автоколебаний сооружения (острого резонанса), являющихся расчетным аварийным воздействием при максимальной расчетной сейсмичности площадки строительства.

В результате выделяются аварийные сейсмические горизонтальные нагрузки (см. формулу (8)) как нагрузки, создающие аварийную ситуацию – возникновение режима автоколебаний (авторезонанса) для стационарных платформ – и приводящие к нарушению прочности или устойчивости сооружений или к нарушению нормативных требований

по вибрации, действующей на обслуживающий персонал и оборудование<sup>4</sup>.

### Колебания при сейсмических нагрузках в случае квадратичного демпфирования

В случае квадратичного демпфирования (турбулентного сопротивления) для плавучих объектов, которые в соответствии с международными нормами ISO 19906:2010 отнесены к стационарным сооружениям, сопротивление ( $N_C$ ) можно определить по формуле

$$N_C = N_0 v^2,$$

где  $N_0 = \frac{C_x A_l \rho_0}{2}$  ( $C_x$  – продольный коэффициент

лобового сопротивления;  $A_l$  – лобовая продольная площадь парусности;  $\rho_0$  – плотность воды).

Уравнение колебаний платформы записывается в виде:

$$\ddot{y} + Q_e v^2 \text{sign}(v) - G(V - v) + \rho^2 y = f\ddot{Y}, \quad (15)$$

где  $Q_e = \frac{N_0}{h_1}$  – коэффициент квадратичного сопротивления.

Уравнение движения (15) механического осциллятора, описывающее собственные колебания при отсутствии внешних ледовых и сейсмических нагрузок, хорошо известно (см., например, [4]) и определяет периодические затухающие колебания при любых начальных условиях, если  $Q_e > 0$ , и периодические возрастающие колебания, если  $Q_e < 0$ . При  $Q_e = 0$  и  $\dot{Y} = G = 0$  уравнение (15) представляет собой осциллятор с линейной восстанавливающей силой и определяет стационарные периодические решения.

При сейсмических нагрузках острого резонанса (см. формулу (4)) и отсутствии ледовых нагрузок уравнение (15) заменяется линейным уравнением собственных колебаний с коэффициентом демпфирования  $Q = Q_e - fbg$  и  $G = 0$ . Таким образом, если коэффициент квадратичного сопротивления  $Q_e > fbg$ , то колебания будут периодическими затухающими при любых

начальных условиях. В противном случае, т.е. при  $Q_e < fbg$ , колебания платформы будут периодическими возрастающими. И, наконец, если  $Q_e = fbg$ , то  $Q = 0$  и колебания платформы будут описываться линейным консервативным осциллятором  $\ddot{y} + \rho^2 y = 0$ , решение которого находится непосредственно и представляет собой стационарный периодический процесс с перио-

$$\text{дом } T = 2\frac{\pi}{\rho}.$$

В итоге, в отличие от колебаний сооружений с вязким демпфированием при автоколебаниях платформ в случае турбулентного сопротивления при сейсмических воздействиях острого резонанса не возникает, но возникают стационарные периодические колебания, амплитуда которых зависит от начальных условий. Если  $Q_e > fbg$ , колебания платформ устойчивы и затухают при  $t \rightarrow \infty$ . В случае  $Q_e < fbg$  наблюдается сейсродинамическая неустойчивость, когда с течением времени амплитуда колебаний неограниченно возрастает. При  $Q_e = fbg$  возникают стационарные периодические движения с периодом, не зависящим от амплитуды колебаний, и амплитудой, зависящей от начальных условий.

Следовательно, при  $Q_e < fbg$  возникает аварийная ситуация, связанная с неограниченным ростом колебаний и достижением ими недопустимых значений за время действия землетрясения. Кроме того, стационарные периодические колебания, возникающие при  $Q_e = fbg$ , несмотря на малую вероятность их возникновения, могут вызвать аварийную расчетную ситуацию. Если амплитуда колебаний становится недопустимо большой, возможны нарушение прочности и устойчивости сооружения, а также превышение нормативного воздействия вибрации на обслуживающий персонал или оборудование<sup>4</sup>.

### Автоколебания морских ледостойких нефтегазопромысловых сооружений при ледовых нагрузках

Как определено ранее [1, с. 122], при воздействии только ледовых нагрузок одномерные колебания при наличии вязкого демпфирования приводятся к обобщенному однородному уравнению Релея

$$\ddot{x} + (2n - q_2 \dot{x} + q_3 \dot{x}^2) \dot{x} + \rho^2 x = 0. \quad (16)$$

<sup>4</sup> См. ISO 6897. 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.

Введением собственного времени  $\tau = \rho t$  это нелинейное уравнение приводят к каноническому виду

$$x'' + (D - q_2 x' + D_2 (x')^2) x' + x = 0, \quad (17)$$

где штрих обозначает производную по переменной  $\tau$  и, кроме того,  $D = 2 \frac{n}{\rho}$ ,  $D_2 = \rho q_3$ .

Для определения качественного и количественного поведения решения однородного нелинейного уравнения (16) воспользуемся методом гармонического баланса, аналогично тому, как это сделано в работе В.К. Вострова и В.В. Третьякова [6]. Основная идея метода гармонического баланса состоит в том, что колебания сооружения предполагаются синусоидальными, т.е.

$$x(\tau) = A_0 + A_1 \cos(\tau) + A_2 \sin(\tau), \quad (18)$$

где параметры  $A_i$  предполагаются постоянными, не зависящими от времени. Выражение для смещения (см. формулу (18)) вместе с производной подставляется в нелинейную функцию  $F(x') = (D - q_2 x' + D_2 (x')^2) x'$ , и получающаяся функция с периодом  $2\pi$  разлагается в ряд Фурье с удержанием первых членов ряда, т.е.

$$F(x') \approx a_0 + a_1 \cos(\tau) + a_2 \sin(\tau), \quad (19)$$

$$\text{где } a_0 = -\frac{q_2 A^2}{2}, \quad a_1 = D A_2 + \frac{3 D_2 A_2 A^2}{4},$$

$$a_2 = -\left( D A_1 + \frac{3 D_2 A_1 A^2}{4} \right) \text{ и, кроме того,}$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2.$$

Переписывая представление (19) в виде разложения через смещение  $x$  и его скорость  $x'$  в виде

$$F(x') \approx b_0 + b_1 x + b_2 x', \quad (20)$$

для коэффициентов  $b_i$  получим выражения

$$b_0 = a_0 - A_0 b_1, \quad b_1 = \frac{a_1 A_1 - a_2 A_2}{A^2}, \quad b_2 = \frac{a_1 A_2 - a_2 A_1}{A^2}.$$

Заменяя приближенным выражением (20) нелинейную функцию  $F(x')$  в уравнении (15), приходим к линейному уравнению 2-го порядка

$$x'' + b_2 x' + x = x_A, \quad (21)$$

$$\text{в котором } b_2 = D + \frac{3 D_2 A^2}{4}, \quad x_A = \frac{q_2 A^2}{2}.$$

Таким образом, нелинейный член уравнения (15) «гармонически линеаризован», причем в линеаризованном выражении (уравнении) стоящий перед скоростью  $x'$  коэффициент  $b_2$  зависит как от амплитуды колебаний  $A$ , так и от параметров сооружения и ледовой нагрузки.

Периодическое решение этого уравнения при  $0 \leq b < 1$  имеет вид

$$x_1(\tau) = x_A + e^{-b\tau} [C_1 \cos(p\tau) + C_2 \sin(p\tau)],$$

$$b = \frac{b_2}{2}, \quad (22)$$

где  $p$  – частота колебаний,  $p^2 = 1 - b^2$ ;  $C_1, C_2$  – произвольные постоянные, определяемые начальными условиями.

Условия убывания/нарастания колебаний и их устойчивость устанавливаются на основе зависимости  $b_2(A)$ . Параметр  $b_2$  обращается в нуль при  $A = A_s$ , где

$$A_s^2 = -\frac{4D}{3D_2} \quad (23)$$

и амплитуда  $A_s$  существует, если  $\frac{D}{D_2} < 0$ . Когда

$A < A_s$ ,  $b < 0$  и, следовательно, происходят колебания с нарастающей амплитудой; при  $A > A_s$  параметр  $b > 0$  и происходят колебания с убывающей амплитудой. При  $b = 0$  ( $A = A_s$ ) происходят периодические незатухающие колебания. Эти колебания устойчивы, так как при любом возмущении, которое увеличивает или уменьшает амплитуду, осциллятор возвращается к колебательному процессу с амплитудой  $A_s$ . Ввиду того что колебания сооружения происходят в окрестности положения равновесия  $x = 0$  ( $y = y_{ст}$  где  $y_{ст} = G(V)/\rho^2$ ), из (22) следует, что  $x_A = 0$  или, что то же самое,  $G''(V) = 0$ . Это условие определяет скорость ледового поля, соответствующую точке перегиба  $V = V_e$  зависимости  $G(V)$ , в которой  $G''(V_e) = 0$ .

Таким образом, для существования автоколебаний с ненулевой амплитудой при дрейфе ледового поля на сооружение с вертикальной передней гранью достаточно выполнения двух условий

$$G''(V) = 0 \text{ и } \frac{D}{q_3} < 0, \quad (24)$$

впервые полученных с помощью теоремы Пуанкаре – Бендиксона [7], а также методами

гармонического баланса и Б. ван дер Пола [6]. При этом амплитуда автоколебаний определяется формулой (23), а уравнения (16) и (17), описывающие колебания ледостойкого сооружения, представляют собой известное, нелинейное относительно скорости колебаний, уравнение Релея

$$\ddot{x} + (2n + q_3 \dot{x}^2) \dot{x} + \rho^2 x = 0.$$

В результате проведенного анализа выделяются *аварийные ледовые воздействия* как воздействия, создающие аварийную ситуацию, а именно автоколебания стационарных и плавающих платформ вследствие воздействия максимальных за время эксплуатации ровных и слоенных ледовых полей.

\*\*\*

Таким образом, причиной возникновения автоколебаний морских ледостойких нефтегазопромысловых сооружений является нелинейная зависимость ледовой нагрузки  $G$  от скорости  $V$  ледового поля, дрейфующего 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 (соответствует ниспадающему участку зависимости  $G \sim V$ ).

В международном стандарте ISO 19906:2010(E) и идентичном ему национальном стандарте ГОСТ Р ИСО 19906 оговаривается только возрастающая ветвь нагрузки  $G(V)$  с указанием ее максимальной точки, но ниспадающая ветвь не упоминается. Следовательно, при использовании этих стандартов определить возможность установления автоколебаний

и их параметры, а также динамические ледовые нагрузки реально только на основании дополнительных предположений о нагрузках, следующих за максимальной.

В российских нормах СП 38.13330.2012 определяется нагрузка в результате воздействия движущихся ледовых полей на сооружение с вертикальной передней гранью, а статические нагрузки зависят от скорости ледового поля и имеют как возрастающую ветвь нагрузки, так и постоянный и ниспадающий участки. По своду правил возможно определить автоколебания нефтегазопромысловых сооружений и их параметры, а также динамические ледовые нагрузки. Но требования к учету аварийной расчетной ситуации – возникновению автоколебаний ледостойких морских нефтегазопромысловых сооружений – отсутствуют, и их необходимо вводить при пересмотре СП 38.13330.

На основе результатов исследований движений сооружения с помощью нелинейных уравнений и существования для этих уравнений устойчивых предельных циклов, приводящих к возникновению стационарных периодических решений-автоколебаний, предложены способы определения аварийных сейсмических нагрузок, отсутствующие в СП 14.13330.2014.

Расчетная ситуация «максимальное расчетное землетрясение» должна определять вероятность возникновения автоколебаний (острого резонанса) сооружения, вызываемых сейсмической силой, постоянной по модулю и меняющей знак на противоположный при экстремальных значениях смещений сооружения. Эта сейсмическая сила соответствует расчетному аварийному сейсмическому воздействию при максимальной расчетной сейсмичности площадки строительства, определяемой в том числе по результатам сейсмического микрорайонирования.

## Список литературы

1. Мансуров М.Н. Критические ледовые воздействия на морские нефтегазопромысловые сооружения / М.Н. Мансуров, В.К. Востров // Вести газовой науки: Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. – № 1. – С. 120–129.
2. Андронов А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Наука, 1981. – 568 с.
3. Леонов М.Я. Острый резонанс за пределами упругости при сейсмических колебаниях простейших сооружений / М.Я. Леонов // Известия АН Киргизской ССР. – 1974. – № 5. – С. 61–66.
4. Магнус К. Колебания: введение в исследование колебательных систем / К. Магнус; пер. с нем. В.И. Сидорова, В.В. Филатова. – М.: Мир, 1982. – 304 с.

5. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А.Н. Бирбраер. – СПб.: Наука, 1998. – 256 с.
6. Востров В.К. Строительные проблемы российского шельфа и автоколебания ледостойких стационарных нефтегазопромысловых сооружений / В.К. Востров, В.В. Третьяков // Журнал нефтегазового строительства. – 2015. – № 2. – С. 44–51.
7. Парс Л.А. Аналитическая динамика / Л.А. Парс; пер. с англ. К.А. Лурье. – М.: Наука, 1971. – 635 с.

## Abnormal ice and seismic loads to marine oil-gas field facilities

M.N. Mansurov<sup>1\*</sup>, V.K. Vostrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Projektiruemyy proezd # 5537, Razvilka village, Leninsky district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

<sup>2</sup> Kimry Branch of VNIPImorneftegaz LLC, Bld. 44, Lenina street, Kimry, Tver Region, 171506, Russian Federation

\* E-mail: M\_Mansurov@vniigaz.gazprom.ru

**Abstract.** The article reveals dynamic analysis of interactions and self-oscillations at marine oil-gas industrial facilities in case of ice forcing and seismic loads. Analysis is done by means of one-dimensional math simulators of oscillations in constructions. The simulators are based on conditions favorable for origination and development of self-oscillations. Dynamic ice and seismic loads are determined. Terms for setting of self-oscillations are studied together with forecasting of their parameters. The new methods for determination of ice and seismic loads absent in national and international standards, namely SP 38.13330.2012, SP 14.13330.2014 and ISO 19906:2010, are suggested, as well as methods for detection of design emergency events, which are to be considered at construction and operation of the marine oil-gas field facilities. According to the federal laws no. 116-FZ and 384-FZ, consideration of these events is a necessary requirement regarding provision of industrial safety.

**Keywords:** oscillations, self-oscillations, resistivity, ice load, ice-resistant oil-gas field facility, industrial safety, emergency, abnormal ice and seismic loads, dangerous industrial object.

### References

1. MANSUROV, M.N., V.K. VOSTROV. Crippling ice impact to offshore oil-and-gas-production facilities [Kriticheskiye ledovyye vozdeystviya na morskoye neftegazopromyslovyye sooruzheniya]. *Vesti Gazovoy Nauki*: collected scientific technical papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2017, no. 1(29): Improvement of reliability and safety at gas-industry facilities, pp. 119–128. ISSN 2306-8949. (Russ.).
2. ANDRONOV, A.A., A.A. VITT and S.E. KHAYKIN. *Theory of oscillations* [Teoriya kolebaniy]. Moscow: Nauka, 1981. (Russ.).
3. LEONOV, M.Ya. Sharp resonance beyond elasticity at seismic oscillations of the simplest structures [Ostryy rezonans za predelami uprugosti pri seymicheskikh kolebaniyakh prosteyshikh sooruzheniy]. *Izvestiya AN Kirgizskoy SSR*. 1974, no. 5, pp. 61–66. (Russ.).
4. MAGNUS, K. *Oscillations: introduction to research of oscillator systems* [Kolebaniya: vvedeniye v issledovaniye kolebatelnykh system]. Translated from the German [Schwingungen. Stuttgart, 1976]. Moscow: Mir, 1982. (Russ.).
5. BIRBRAYER, A.N. *Seismic analysis of structures* [Raschet konstruksiy na seymostoykost]. St. Petersburg: Nauka, 1998. (Russ.).
6. VOSTROV, V.K. and V.V. TRETYAKOV. Issues of building engineering at Russian shelf and self-oscillations of stationary ice-resistant oil-gas-production facilities [Stroitelnyye problemy rossiyskogo shelfa i avtokolebaniya ledostoykikh statsionarnykh neftegazopromyslovykh sooruzheniy]. *Zhurnal neftegazovogo stroitelstva*. 2015, no. 2, pp. 44–51. ISSN 2307-0498. (Russ.).
7. PARS, L.A. *A Treatise on analytical dynamics* [Analiticheskaya dinamika]. Translated from the English. Moscow: Nauka, 1971. (Russ.).