

УДК 550.34

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СПБУ

инж. Лившиц Б.Р.

ПАО ЦКБ Коралл, Севастополь;

НАПКС, Симферополь

Современный период становления Украины диктует необходимость развития нефтегазовой сферы. В парке национального оператора бурения ГАО «Черноморнефтегаз» в настоящее время три самоподъемные плавучие буровые установки : СПБУ «Сиваш», СПБУ «Таврида», СПБУ «Петр Годованец» вступившая в строй в 2012 году. Еще одна самоподъемная платформа «Незалежність» начнет бурение в 2013 году.

Территория шельфа Украины находится в сейсмоопасной зоне, что предопределяет необходимость выполнения комплекса расчетов на сейсмическое воздействие для гидротехнических сооружений, при выполнении которых проектировщики сталкиваются со следующими сложностями :

- в нормах ДБН нет рекомендаций по выбору расчетного уровня сейсмического воздействия для участков шельфа;
- в нормах ДБН нет конкретных рекомендаций по расчету конструкций самоподъемных платформ.

Настоящая статья посвящена теоретическим основам и методам получения требующихся при расчете данных по ускорениям грунта.

Учеными Украины выполнено большое количество научных работ, которые позволяют инженерам путем обобщения результатов исследований получить весь комплекс необходимых параметров. Взяв за основу работы Пустовитенко Б.Г. [2], [3], [4] в части определения исходной сейсмологической информации, работы Немчинова Ю.И., в том числе [5], работы Немчинова Ю.И., Кукунаева В.С., Марьенкова Н.Г., Хавкина А.К. и др. [6], [7] в части общего инженерного подхода и методики выполнения расчетов при сейсмическом воздействии, на стадии предпроектных оценок и на стадии разработки технико-экономического обоснования можно составить следующую последовательность:

- определение расчетного уровня сейсмического воздействия;
- определение сейсмических нагрузок на самоподъемную платформу;
- определение прочности основных несущих элементов самоподъемных платформ, в первую очередь опорных колонн.

Ниже представлены основные выкладки по методике определения расчетного ускорения грунта для участков шельфа при выполнении инженерных расчетов сейсмостойкости, что позволит обоснованно определять основную характеристику сейсмического воздействия – ускорение грунта шельфовой зоны.

Обычно в нормативных документах кодификация сейсмической опасности ведется в баллах по шкале сейсмической интенсивности. На

основании карты Общего сейсмического районирования (ОСР) определяется ожидаемая сейсмичность площадки. Эта исходная информация, прежде всего, необходима для предварительной оценки (этап обоснования инвестиций).

Сейсмическую опасность принято характеризовать средним периодом повторяемости землетрясений различной интенсивности. Используется комплект карт ОСР ДБН В.1.1-12-2006 [1] для объектов разной ответственности, на которых сейсмическая опасность соотнесена с периодами повторяемости землетрясений, как максимальная интенсивность сейсмических воздействий, достигаемая раз в 500, 1000, 5000 лет. В иной трактовке таким воздействиям соответствуют 90 % вероятности превышения в течение 50 лет соответственно 10; 5 и 1 %.

Поскольку баллы нельзя непосредственно использовать в инженерных расчетах, оценки сейсмичности площадок размещения объектов из баллов в амплитуды движения грунта переводятся по шкале сейсмической интенсивности (в настоящее время по шкале MSK -64). Однако для расчета ответственных сооружений этих данных недостаточно.

Существенными являются не только сейсмическая интенсивность (ускорения и в реальных количественных значениях), но и скорости смещения грунта, продолжительность и период колебаний. Проектные спектр колебаний грунта и исходная для нулевой отметки (на отметке свободной поверхности грунта) размещения сооружения акселерограмма (сейсмограмма) должны соответствовать ожидаемым значениям основных параметров движения грунта.

При создании норм, используемых в строительстве достаточно сложно предложить расчетный подход, который мог бы в полной мере удовлетворить все потребности, которые необходимо учитывать в инженерных расчетах, предложить модель, учитывающую все возможные проявления сейсмической активности.

Основные возможные подходы при определении исходного уровня ускорений:

1. По протяженности активных разломов. Такой разлом может проходить в непосредственной близости от СПБУ и тогда относится к категории активных.
2. По изгибным деформациям поверхности земной коры.
3. Внерегиональный подход, базирующийся на выявлении и детальном картировании сеймотектонических обстановок различной тектонической природы и относящихся как к сейсмоактивным, так и слабоактивным в сейсмическом отношении территориям.

В основе первого подхода к оценке магнитуды M_{\max} лежит широко известное корреляционное соотношение между длиной сейсмоактивной структуры L , км и магнитудой M_{\max} , установленное Н.В. Шебалиным:

$$1,8lgL+1,4 \leq M_{\max} \leq 2,0lgL+2$$

Левая часть неравенства характеризует области с низкой тектонической активностью (платформы), правая - тектонически высокоактивные области.

Во втором подходе на основе данных о скоростях современных вертикальных движений земной коры платформы определено поле тензора кривизны-кручения изгибаемой литосферы. Определение интенсивности изгибной деформации и направление максимальной главной кривизны позволяет выявить связь этих характеристик с современными изгибными напряжениями в литосфере платформы. Установлено соотношение между величинами изгибных напряжений и магнитудами произошедших землетрясений. В итоге возникла возможность прогноза магнитуд ожидаемых землетрясений по этим напряжениям в тех местах, где землетрясения еще не произошли.

При третьем подходе анализируются типы сейсмо-тектонических обстановок для платформы в целом.

Зависимость между количеством подземных толчков N и их интенсивностью в эпицентре I_0 в общем виде выражается формулой: $lgN = a + bI_0$, где a и b — некоторые постоянные величины.

Одной из основных задач при оценке сейсмостойкости сооружений шельфа является необходимость корректного определения расчетного ускорения. Если для гражданских и промышленных зданий ошибка в безопасную сторону на величину $0,1g$ при определении величины ускорения ведет к удорожанию строительства на 5-10% [9], то для сооружения типа самоподъемной платформы удорожание составит не менее 20-25%. Учитывая, что район использования СПБУ на шельфе Черного моря может быть очерчен вдоль береговой черты Украины, то задача сводится к поиску приемлемой зависимости, связывающей магнитуду, балльность землетрясения и отстояние гипоцентра от места установки платформы с одной стороны и ускорение (в некоторых случаях энергию воздействия) с другой.

Упрощенное понимание физики явления заключается в том, что от очага землетрясения во все стороны распространяются упругие сейсмические волны, среди которых различают продольные P и поперечные S . По поверхности во все стороны от эпицентра расходятся поверхностные сейсмические волны Рэля и Лява. Очаги землетрясения возникают на различных глубинах (h). Большая часть их залегает в земной коре (на глубине порядка 20—30 км). В некоторых районах отмечается большое число толчков, исходящих из глубин в сотни км (верхняя мантия Земли).

Выделение фаз по видам сейсмических волн связано с тем, что сооружения в зависимости от своих конструктивных особенностей по-разному реагируют на колебания грунта. Короткопериодные колебания, вызываемые продольными глубинными волнами ($T = 0,2 - 0,5$ с), которые имеют скорость прохождения в 1,5 – 2 раза больше, чем поперечные опасны для жестких конструкций (в том числе для СПБУ, установленных на предельном мелководье), а длиннопериодные колебания ($T = 1,0 - 5,0$ с), возникающие при прохождении поперечных глубинных волн – для гибких

сооружений (в том числе СПБУ при установке на глубинах моря от 8-10 метров).

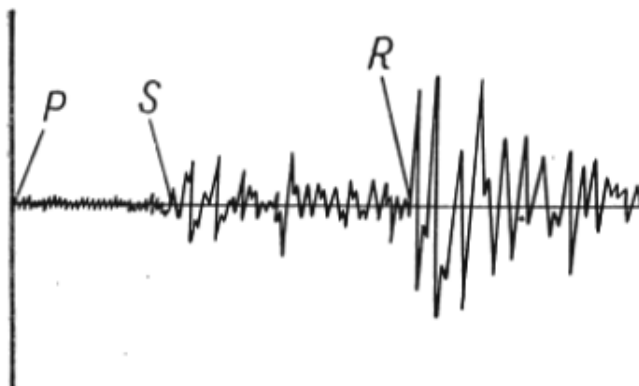


Рис. 1 - Записи показателей сейсмографа
P – продольные волны; *S* – поперечные волны; *R* – поверхностные волны.

Между числом землетрясений N и их магнитудой M существует зависимость, которая приближённо выражается формулой:

$$\lg N = a - bM,$$

где a и b — постоянные величины

Энергия землетрясения (E) связана с магнитудой соотношением вида:

$$\lg E = a_1 + b_1 M$$

Для коэффициентов a_1 и b_1 даются различные значения, но наиболее подходящими следует считать a_1 близкое к 4, а b_1 — к 1,6.

Величина $K = \lg E$ иногда называется энергетическим классом землетрясения. При землетрясении, для которого $M = 5$, из очага выделяется энергия $\sim 10^{12}$ дж, $K = 12$; при $M = 8$, $E \sim 10^{17}$ дж, $K = 17$.

По глубине расположения гипоцентры землетрясения, которые могут воздействовать на СПБУ, установленные на шельфе Черного и Азовского морей делятся на три типа:

- мелкофокусные (0 - 70 км);
- среднефокусные (70 - 300 км);
- глубокофокусные (300 - 700 км).

Учитывая, что магнитуда M , интенсивность I_0 и глубина очага h взаимосвязаны между собой, для определения в первом приближении одной из величин по двум другим можно пользоваться таблицей 1.

Таблица 1

Соотношение магнитуды и балльности в зависимости от глубины очага

h, км	Магнитуда, М			
	5	6	7	8
10	7	8 — 9	10	11 — 12
20	6	7 — 8	9	10 — 11
40	5	6 — 7	8	9 — 10

Более сложное уравнение характеризует связь между интенсивностью колебания I_0 , магнитудой M и глубиной очага H :

$$I_0 = aM - b / gH + c,$$

где a, b, c - коэффициенты, определяемые эмпирически для конкретного района землетрясения.

Интенсивность проявления землетрясений на поверхности измеряется в баллах и зависит от глубины очага и магнитуды землетрясения, служащей мерой его энергии.

Магнитуда связана с полной энергией землетрясения, но эта зависимость не прямая, а логарифмическая, с увеличением магнитуды на единицу энергия возрастает в 100 раз.

Применительно к тематике статьи следует отметить, что Северо-западная часть шельфа Черного моря расположена в одной из сейсмоопасных зон Украины. В соответствии с ДБН В.1.1-12-2006 (карта общего сейсмического районирования) прибрежные районы расположены в зонах с прогнозируемой интенсивностью сейсмических воздействий $I = 8_1$ и 7_1 баллов и уточнение параметров воздействия может иметь большое значение для поиска наиболее экономичных решений. Непосредственно для проведения динамического расчета СПБУ программы, реализующие метод конечных элементов предусматривают ввод максимального ускорения грунта в явном виде, а в случае расчета на заданную акселерограмму в график реализации должен содержать пиковую величину. Путем вполне доступного анализа имеющейся информации можно получить эти величины для оценочных расчетов, но при уточнении следует использовать научный потенциал ведущих отечественных исследовательских центров (НИИСК, г.Киев; Крымский экспертный совет по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений, г.Симферополь, КрымНИИпроект, г.Симферополь, НАПКС, г.Симферополь) путем заказа соответствующих НИР.

На рисунке 2 представлена карта эпицентров землетрясений шельфа Черного моря и прилегающих областей из которой видно, что наибольшую опасность представляют очаги в е регионе Вранча. В непосредственной близости от месторождений северо-западной части шельфа Черного моря на расстоянии $D < 25$ км, не известны очаги сильных землетрясений.

Сейсмически опасными для сооружений шельфа Украины являются [8]:

1. Активные структуры сочленения Южных и Восточных Карпат (горы

Вранча). В этом сейсмически локализованном районе часто происходят землетрясения с наблюдаемыми магнитудами в диапазоне $M = 6 - 7,5$. При большой глубине очагов порядка 100 - 150 км эти землетрясения вызывают сотрясения на огромной территории, вследствие малого затухания энергии с расстоянием. Расчетное прогнозное значение $M_{\max} = 8,0$.

2. Сейсмический район Добруджа, где возможны землетрясения с магнитудами до 7,0. Здесь известно несколько землетрясений с магнитудой $M = 5,5 - 7,0$ с интенсивностью в эпицентре $I > 5$ баллов.

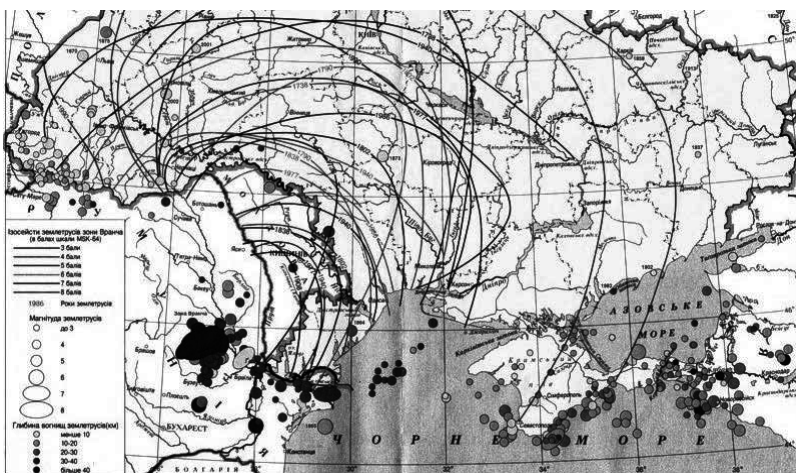


Рис. 2 - Карта эпицентров землетрясений шельфовой зоны.

3. Местная сейсмичность, связанная с тектоническими нарушениями в фундаменте Восточно-Европейской платформы и разрывными нарушениями области шельфа и континентального склона западной части Черного моря.

О потенциально высокой сейсмичности структур шельфа свидетельствуют сейсмические события, зарегистрированные в период 1961-1996 г.г. сетью высокочувствительных станций Крыма. Только в 1992 г. здесь произошло 12 землетрясений в диапазоне $M = 2 - 3,8$ с глубинами очагов $H \sim 10$ км. Цепочка морских эпицентров вытянута вдоль диагонального северо-восточного направления, параллельно береговой линии. На продолжение этого линеамента (его юго-западную часть) ложится эпицентр землетрясения 1865 г. с магнитудой $M = 6,4$.

4. Наибольшую сейсмическую опасность для северо-западного шельфа Черного моря представляют сотрясения от глубокофокусных землетрясений зоны Вранча. Только за последние 200 лет 7 раз регистрировались воздействия с $I = 6$ баллов и дважды в 1802 и 1940 гг. с $I = 7$ баллов. Землетрясения зоны Вранча расположены в очень локализованном объеме литосферы размером $100 \times 70 \times 150$ км³, в котором выделяется большое количество энергии с мощностью около $8,57 \times 10^{11}$ дж/год/км². Этот район

характеризуется также большой глубиной очагов землетрясений: 75% всех землетрясений с $M \geq 4$ происходит на глубинах $H = 100 - 170$ км и частыми землетрясениями больших магнитуд ($M > 7$). Установлена тенденция к заглублению очагов с увеличением магнитуды. Верхний предельный контур зависимости «магнитуда M_{\max} - глубина очага H_{\max} » показывает, что для каждого уровня магнитуд существует своя предельная глубина очага, выше которой не могут возникать землетрясения.

Исходя из уравнения предельного контура:

$$H_{\max} = 16,7M_{\max} - 155 M_{\max} + 365$$

на глубинах очагов $H=160 - 200$ км возможно возникновение землетрясений с магнитудой $M=7,6 - 8,0$. Это же значение M_{\max} может быть получено из закона повторяемости магнитуд. Зависимость нормированной на время частоты повторяемости землетрясений от магнитуды хорошо аппроксимируется функцией:

$$\lg(N/T) = -0.236 M^2 + 2.35 M - 6.07$$

Расчетным путем получен график затухания интенсивностей I от землетрясений в зоне Вранча в направлении Северо-западного шельфа Украины, который носит сложный характер. Для примера на рисунке 3 показана зависимость интенсивности от расстояния в направлении “очаг в зоне Вранча– м/р Штормовое”.

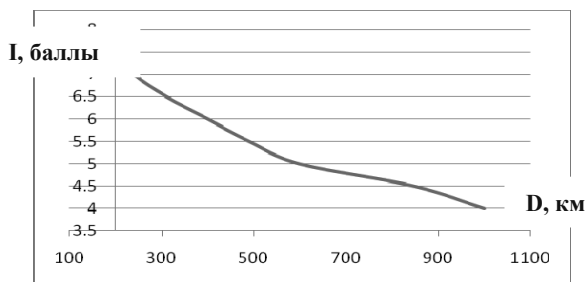


Рис. 3 - Кривая затухания интенсивности I от зоны Вранча в направлении северо-западного шельфа

Важной особенностью проблемы оценки сейсмической опасности СПБУ является представление сейсмической опасности в ускорениях движения грунта. В значениях пиковых ускорений следует рассматривать сейсмическую опасность шельфовой зоны Украины.

Приближенные оценки ускорений сейсмических колебаний грунтов можно выполнить по корреляционным соотношениям между сейсмическими баллами I и пиковыми ускорениями a :

$$Iga = 0.33I_{\max} - 2,22$$

Вышеприведенная формула получена по многочисленным экспериментальным данным в основном по записям сильных движений грунта при землетрясениях с очагами в земной коре. По этой формуле рассчитывалась карта ОСР Крыма для периода 500 лет.

Для глубокофокусных землетрясений Вранча предлагается иная формула, полученная с учетом реальных сейсмических воздействий:

$$a = 0,04e^{0,53I}$$

Максимальные ускорения поверхности грунта от воздействия зоны Добруджа могут быть определены с использованием выражения:

$$Ilg(a_{\max}/600)=0,011D(-7,60+1,72M-0,1M^2)$$

где D – отстояние до гипоцентра, м;
 a_{\max} - в см/с²

Карта сейсмической опасности для СПБУ, установленных на шельфе в пиковых ускорениях a_g может быть построена для выделенных зон, для периода повторяемости 500 лет.

Для северо-западной части шельфа Черного моря расчетное значение I составляет: 6 – 7 (точное значение 6.5) баллов со средним периодом T раз в 500 лет, 7 баллов – $T = 1000$ лет и 8 баллов – $T = 5000$ лет.

На рисунке 4 очерчена зона возможного расположения СПБУ, разделенная на зоны для проверки сейсмостойкости, выбранные для удобства вычисления таким образом, чтобы в центральной части каждой зоны располагалась нефте-газозонная структура. Откладывая расстояние D, от каждого из возможных гипоцентров и располагая сведениями о глубине расположения очага и максимальной магнитуде или балльности по представленным выше формулам может быть определено расчетное пиковое ускорение для каждого участка, которое и является искомым.

Для практических расчетов преобладающий период воздействия может быть определен по формуле :

$$IlgT=0,15M_S+0,25IlgR+C1+C2\pm 0,2$$

T – видимый период колебаний;
 M_S – магнитуда, определяемая по поверхностным волнам;
R – гипоцентральное расстояние в километрах;
 $C1 = 0,1$ – для сдвигов ;
 $C2 = -1,9$ – для учета влияния неучтенных факторов.

2. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Борисенко Л.С., Поречннова Е.И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма [ОСР-98]//Геофиз.журнал, 1999 - 20,№ 1- с.3 – 14.
3. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Долговременная сейсмическая опасность Крыма и ее представление в геоинформационной системе//Геоинформатика, 2004,№ 4- с.34 – 40.
4. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Вольфман Ю.М., Пустовитенко А.А.,Сафронов О.Н. Сейсмическая опасность юго-западной части Украины// Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво), Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. ДП НДІБК. – 2004.- № 60. - с.114 – 119.
5. Немчинов Ю.И. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости/ Ю.И.Немчинов, Н.Г.Марьенков, А.К.Хавкин, К.Н.Бабик -К.: Гудименко С.В., 2012 - 384 с.
6. Немчинов Ю.И. Государственные нормы ДБН В.1.1 – 12 : 2006 «Строительство в сейсмических районах Украины» и задачи обеспечения сейсмобезопасности зданий и сооружений / Немчинов Ю.И., Хавкин А.К., Марьенков Н.Г., Калюх Ю.И., Бамбура А.Н., Гурковский А.Б., Жарко Л.А., Шарапов В.Г., Егупов К.В., Сорока Н.Н, Червинский Я.И. Кукунаев В.С. // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво), Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. ДП НДІБК. – 2008.- № 69. - с.3 – 25.
7. Немчинов Ю.И. Состояние и задачи обеспечения сейсмической безопасности и дальнейшего развития сейсмостойкого строительства в Украине / Немчинов Ю.И., Хавкин А.К., Марьенков Н.Г., Золотарев И.Г., Кукунаев В.С., Дорофеев В.С., Егупов К.В. // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво), Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. ДП НДІБК. – 2010. - № 73. - с.35 – 43.
8. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Новые карты общего сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности//Геофиз.журнал, 2006 - 28,№ 3- с.54 – 77.
9. Кукунаев В.С. Оценка сейсмического риска существующих объектов строительства в АР Крым / Кукунаев В.С., Лобанов О.Л./ Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво), Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. ДП НДІБК.- 2010.- № 73. - с.239 – 245