

дренированные испытания, а для определения угла внутреннего трения и удельного сцепления выполнялись консолидированно-недренированные испытания. При этом, ввиду невозможности отбора образцов ненарушенного сложения из несвязанных песчаных грунтов, испытания песков выполнялись на искусственных «монолитах», формируемых из образцов нарушенного сложения с плотностью сложения, определяемой по данным статического зондирования.

Показатели сжимаемости грунтов - модуль общей деформации, и коэффициент консолидации, определялись в крайне ограниченном объеме, в случаях, когда в рабочем слое присутствовали слабоконсолидированные, легко сжимаемые глинистые грунты. Определения этих показателей осуществлялось в приборах трехосного сжатия. При этом, для определения модуля общей деформации выполнялись комбинированные консолидированно-дренированные и консолидированно-недренированные испытания. Лабораторные исследования и испытания грунтов выполнялись в специализированных грунтовых лабораториях предприятий Госстроя России. Кроме указанных лабораторных исследований на борту судна выполнялись экспресс-испытания глинистых грунтов полевыми приборами-микропенетрометром и миникрыльчаткой, обеспечивающими определение показателей текучести и сопротивления недренированному сдвигу.

Таким образом, проведен комплекс инженерно-геологических изысканий на море, позволяющий более эффективно провести мероприятия по качественному проектированию и строительству сооружений нефтегазового комплекса на Каспии.

Список литературы

1. Отчет «О результатах морских инженерно-геологических изысканий на объектах обустройства месторождения им. В. Филановского (Каспийское море). Геотехнические работы (итоговый) в 4-х частях. Часть III. Результаты геотехнических работ на площадке ЛСП-1 : в 4-х книгах / ООО «Моринжгеология». Астрахань. 2010.

УДК 624.012.03:681.3.06

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИНЧАТОЙ И СТЕРЖНЕВОЙ РАСЧЕТНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А. В. Синельщиков*, Н. Н. Панасенко**

**Астраханский государственный архитектурно-строительный университет*

***Астраханский государственный технический университет (Россия)*

Анализ качества расчетно-динамических моделей несущих металлоконструкций кранов может быть выполнен на основе сравнения общей изгибной жёсткости пролётных балок и сравнения собственных частот и собственных форм колебаний их расчетно-динамических моделей. В работе приведён сравнительный анализ собственных форм колебаний пластинчатой и стержневой расчетно-динамических моделей грузоподъемного крана, выявлены преимущества двух типов расчетно-динамических моделей, важных для расчётного анализа прочности и сейсмостойкости при проектировании мостовых кранов.

Ключевые слова: грузоподъёмный мостовой кран, несущие металлоконструкции, МКЭ, конечный элемент, расчётно-динамическая модель, собственные колебания, собственные частоты, собственные формы.

The analysis of the quality of computationally dynamic models of load-bearing steel structures of cranes can be performed on the basis of comparison of the total flexural rigidity of passing beams and comparison of natural frequencies and the own vibration modes of their calculation and dynamic models. In the paper, the comparative analysis of the eigenmodes of oscillations of the plate and rod calculation and dynamic models of a crane is given, the advantages of two types of calculation and dynamic models that are important for computational strength analysis and seismic stability in the design of bridge cranes are revealed.

Keywords: load-lifting bridge crane, carrying metal structures, MKE, final element, calculation-dynamic model, natural oscillations, natural frequencies, own forms.

При формировании расчётных моделей крановых сооружений выделяются два типа моделей: расчётная статическая модель, которая служит для определения жёсткостных характеристик (формирования матриц жёсткости) и определения напряжённо-деформированного состояния конструкций различными методами строительной механики [10] и расчётная динамическая модель (РДМ), по которой определяются динамические параметры для описания вынужденных колебаний сооружения во время внешних воздействий. В процессе выполнения расчётов выполняются операции как перехода от расчётной статической модели к РДМ, так и наоборот.

Для целей сравнительного анализа качества разработки РДМ на основе базовых пластинчатых и стержневых КЭ на рис. 1 а, б представлены конечно-элементные пластинчатая (а) и стержневая (б) РДМ мостового крана 130/32 т-33,5 м с траверсой под упаковку груза $Q=100$ т с числом степеней свободы $n=10950$ и $n=7542$, соответственно, (см. рис. 1 а, б), для сравнения эффективности которых на рис. 2 а, б представлены результаты их статического расчёта по матричному уравнению

$$[K]\{V\} = P_{ст}, \quad (1)$$

как частный случай уравнения

$$[M]\{\ddot{V}(t)\} + [K]\{V(t)\} = \{0\}, \quad (2)$$

на полезную нагрузку $Q=100$ т. Из полученных результатов ($\Delta z_{пл} = -21,6$ мм, $\Delta z_{стерж} = -20$ мм) видно их близкую изгибную жёсткость отличающуюся друг от друга на 2,4%,

Для сравнения показателей качества пластинчатой и стержневой РДМ крана (см. рис. 1 а, б) на уровне их СЧ и СФ колебаний из уравнения (2) из уравнения для собственных значений относительно форм колебаний [4]

$$[M]^{-1}[K][\Phi] - [\Phi][\Lambda] = \{0\},$$

в котором $[\Phi]$ - фундаментальная матрица произведения матриц масс и жесткости РДМ $[M]^{-1}[K]$ порядка $n \times n$, составленная из собственных векторов, расположенных по столбцам, такая, что

$$[M]^{-1}[K] = [\Phi][\Lambda][\Phi]^{-1},$$

где $[\Lambda]$ - диагональная матрица собственных значений порядка $n \times n$, элементами которой являются квадраты собственных частот.

Сравнение пластинчатой и стержневой РДМ мостового крана 130/32 т-33,5 м, кроме перемещений (1), проводилось в режиме СФ и СЧ колебаний, результаты которого представлены по СЧ в табл. 1, по СФ – на рис. 3-11, из которых видно, что СЧ и СФ по низким частотам до 7,5 Гц практически совпадают, а начиная с СФ №12 СЧ стержневой модели (РДМ) завышаются сначала на 2-3 Гц, а далее, в области СФ №30 различие составляет 10-12 Гц и более (до 16-18 Гц), что графически представлено на рис. 12 [1].

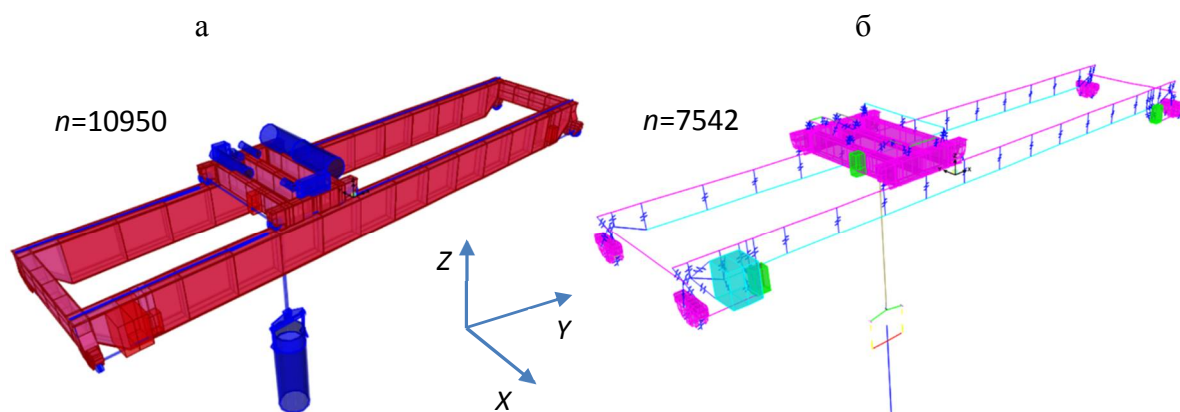


Рис. 1. а,б. РДМ мостового крана 130/32 т-33,5 м: а - пластинчатая конечно-элементная РДМ мостового крана 130/32 т-33,5 м с траверсой под упаковку груза массой 100 т с $n=10950$ степенями свободы; б – стержневая конечно-элементная РДМ мостового крана 130/32 т-33,5 м с траверсой под упаковку груза массой 100 т с $n=7542$ степенями свободы

Таблица 1

Мостовой кран 130/32 т-33,5 м: сравнение СФ и СЧ колебаний по пластинчатой и стержневой РДМ

№	Частота, Гц	
	Пластинчатая	Стержневая
1	0.575	0.575
2	0.904	0.905
3	2.599	2.724
4	3.239	3.325
5	3.801	3.802
6	5.426	5.939
7	5.959	6.216
8	6.849	7.525
9	7.286	7.884
10	7.449	10.415
11	10.416	11.875
12	10.526	13.111
13	10.789	14.665

№	Частота, Гц	
	Пластинчатая	Стержневая
14	11.951	15.644
15	13.067	16.001
16	13.478	17.095
17	13.687	17.748
18	15.635	18.792
19	16.069	19.367
20	17.368	20.563
21	17.836	21.314
22	18.422	22.145
23	19.131	23.295
24	19.728	25.689
25	21.582	27.657
26	21.954	31.188

№	Частота, Гц	
	Пластинчатая	Стержневая
27	22.256	33.284
28	23.349	35.706
29	23.483	37.879

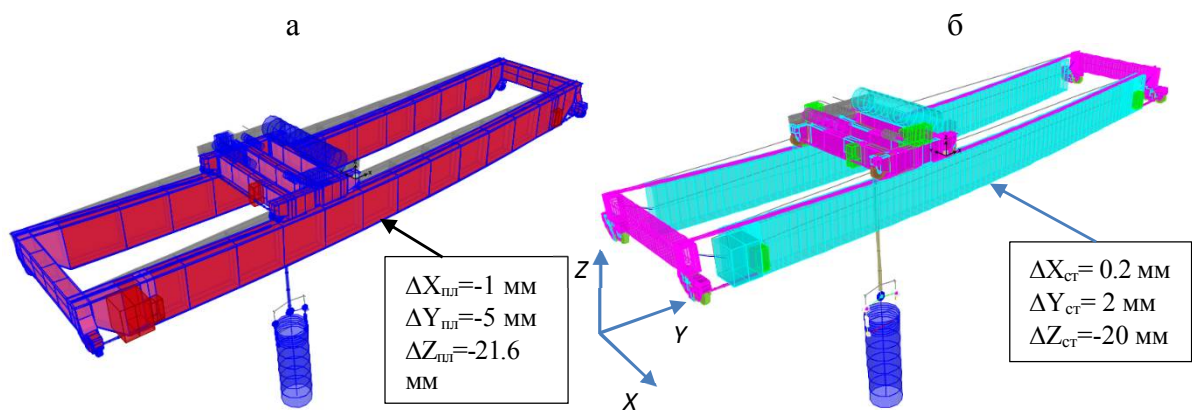


Рис. 2. Сравнительный анализ статического прогиба главных балок мостового крана 130/32 т-33,5 м: а – конечно-элементная пластинчатая РДМ крана; б – то же, стержневая РСМ (условно показаны поперечные сечения)

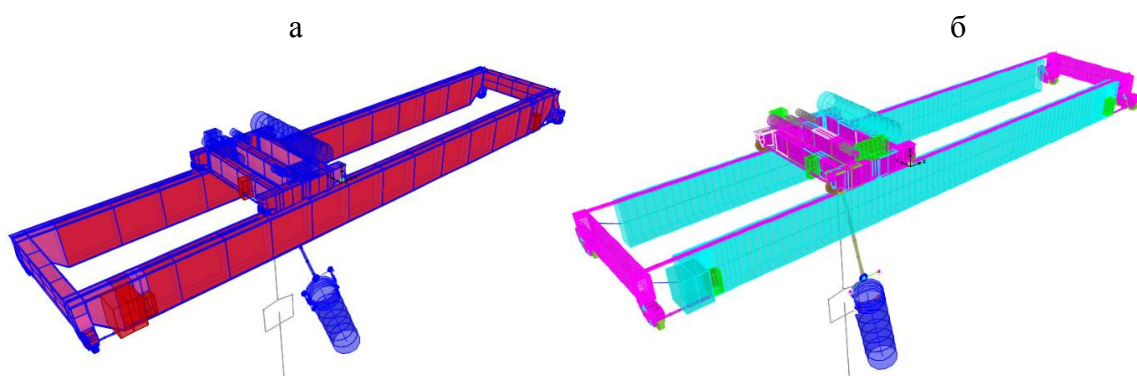


Рис. 3. Собственная форма колебаний №1 (см. табл. 1) мостового крана 130/32 т-33,5 м: а – пластинчатая модель; б – стержневая модель

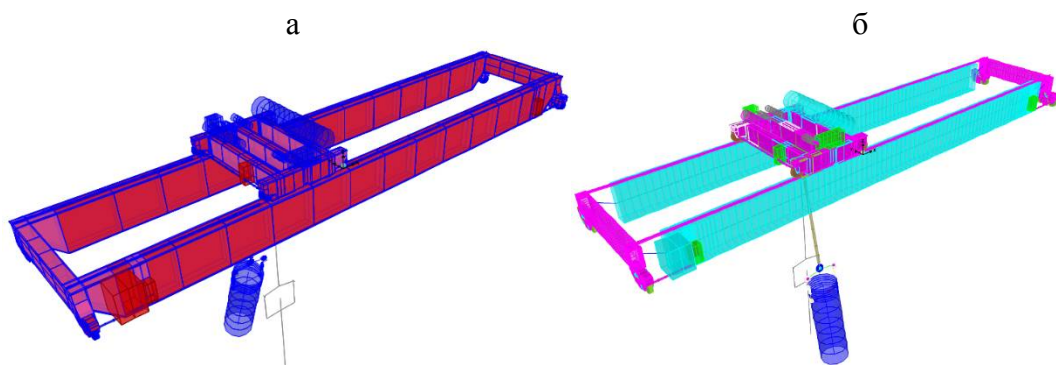


Рис. 4. Собственная форма колебаний №2 (см. табл. 1) мостового крана 130/32 т-33,5 м: а – пластинчатая модель; б – стержневая модель

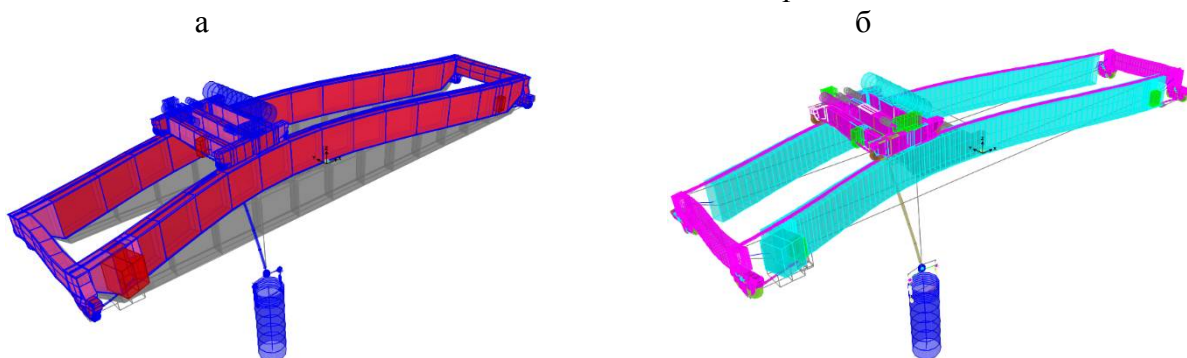


Рис. 5. Собственная форма колебаний №5 (см. табл. 1) мостового крана 130/32 т-33,5 м: а – пластинчатая модель; б – стержневая модель

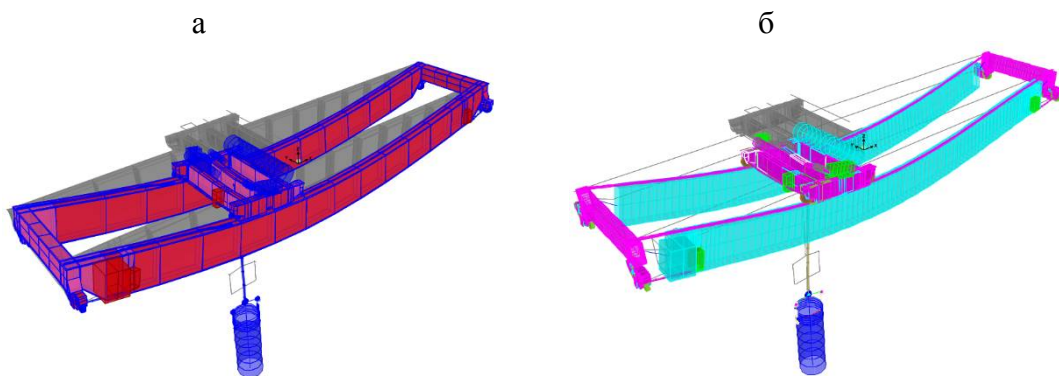


Рис. 6. Собственная форма колебаний №6 (см. табл. 1) мостового крана 130/32 т-33,5 м: а – пластинчатая модель; б – стержневая модель

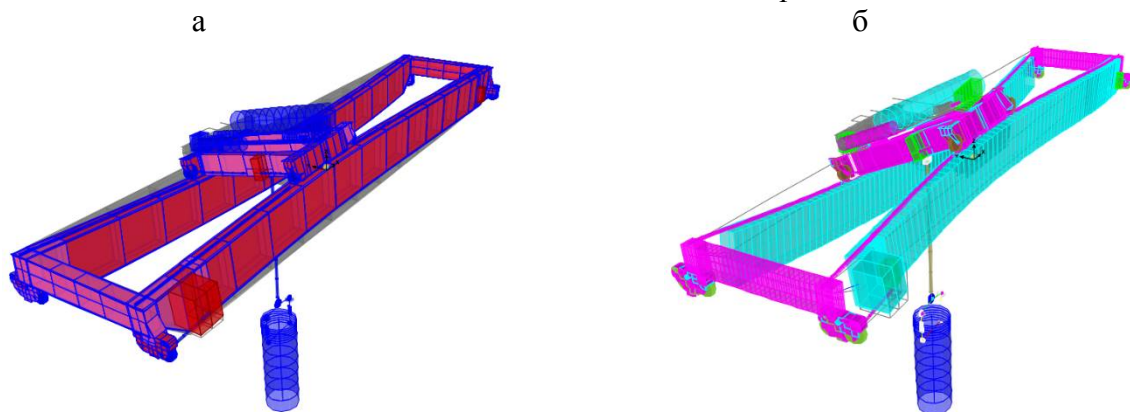


Рис. 7. Собственная форма колебаний №8 (см. табл. 1) мостового крана 130/32 т-33,5 м: а – пластинчатая модель; б – стержневая модель

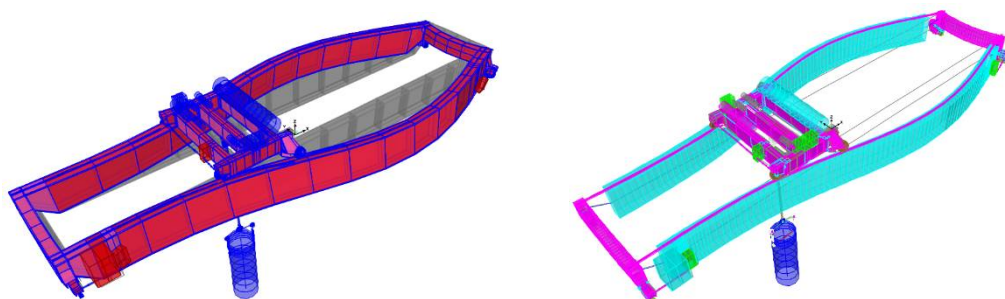


Рис. 8. Собственная форма колебаний №9 (см. табл. 1) мостового крана 130/32 т-33,5 м: а – пластинчатая модель; б – стержневая модель

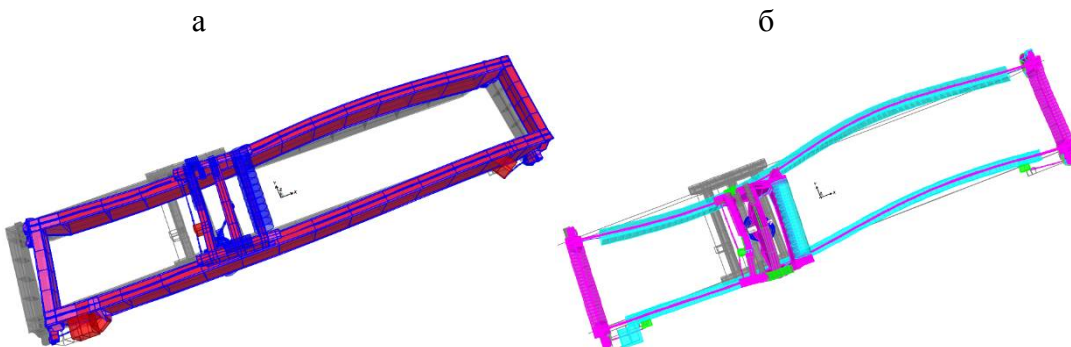


Рис. 9. Собственная форма колебаний №10 (см. табл. 1) мостового крана 130/32 т-33,5 м, вид сверху на кран: а – пластинчатая модель; б – стержневая модель

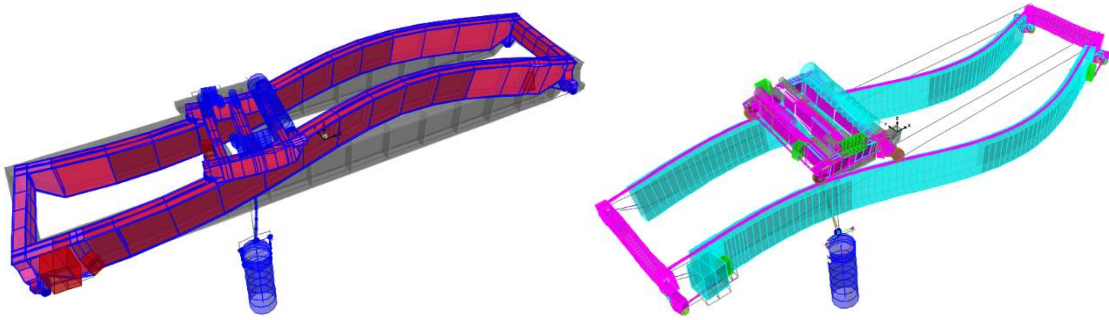


Рис. 10. Собственная (кососимметричная) форма колебаний №11 (см. табл. 1) мостового крана 130/32 т-33,5 м: а – пластинчатая модель; б – стержневая модель

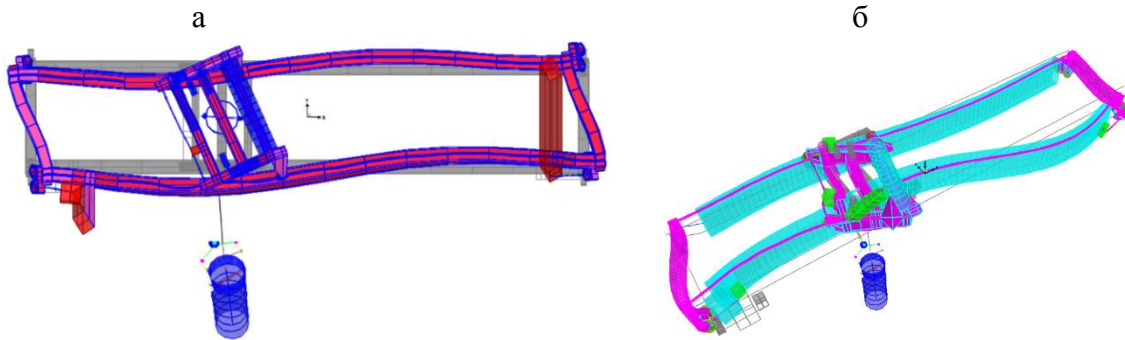


Рис. 11. Собственные кососимметричные формы колебаний мостового крана 130/32 т-33,5 м (см. табл. 1): а – пластинчатая модель (№14); б – стержневая модель (№15)

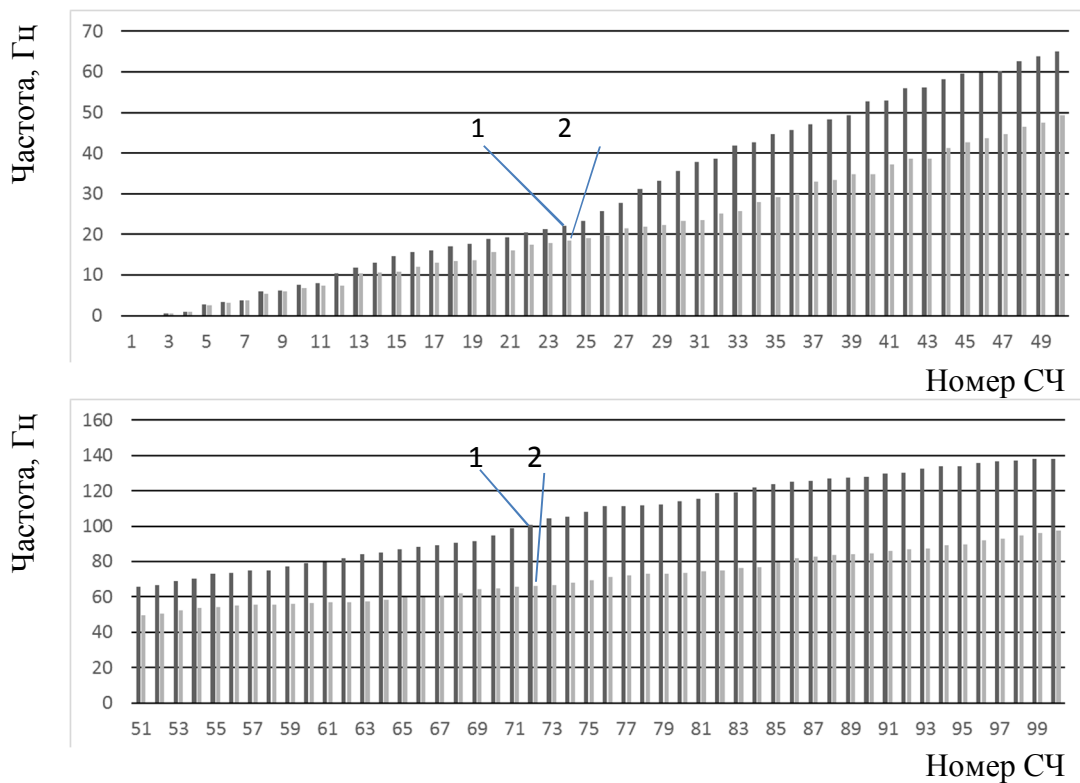


Рис. 12. Графическое представление сравнения СЧ пластинчатой и стержневой РДМ крана 130/32 т-33,5 м - зависимость собственной частоты от ее номера: 1 – СФ и их частоты стержневой РДМ; 2 – то же, пластинчатой РДМ (см. рис. 1 а, б и табл. 1)

Сравнение пластинчатой и стержневой РДМ показало, что при использовании ЛСМ для проектирования кранов в сейсмостойком исполнении [8] при ограниченном учёте генерирующих расчётные сейсмические нагрузки СЧ до 30 Гц для стержневой РДМ будет использовано 27 СФ, а для пластинчатой РДМ - 37 СФ (см. рис. 12).

Если следовать расчётной акселерограмме 7 баллов MSK-64 (рис. 13) [9] и её сейсмическому спектру ответа (рис. 14) [9], то для расчётного сейсмического анализа крана МДА результаты эквивалентных напряжений в главных балках моста 39 и 47,6 МПа будут отличаться на 18% (рис. 15). При расчётах ЛСМ, как это следует из ССО (см. рис. 14), расчётные сейсмические нагрузки на кран будут завышены при расчёте по стержневой РДМ на СФ от 22 до 36 на более низких частотах от 20 до 30 Гц (см. ССО рис. 14).

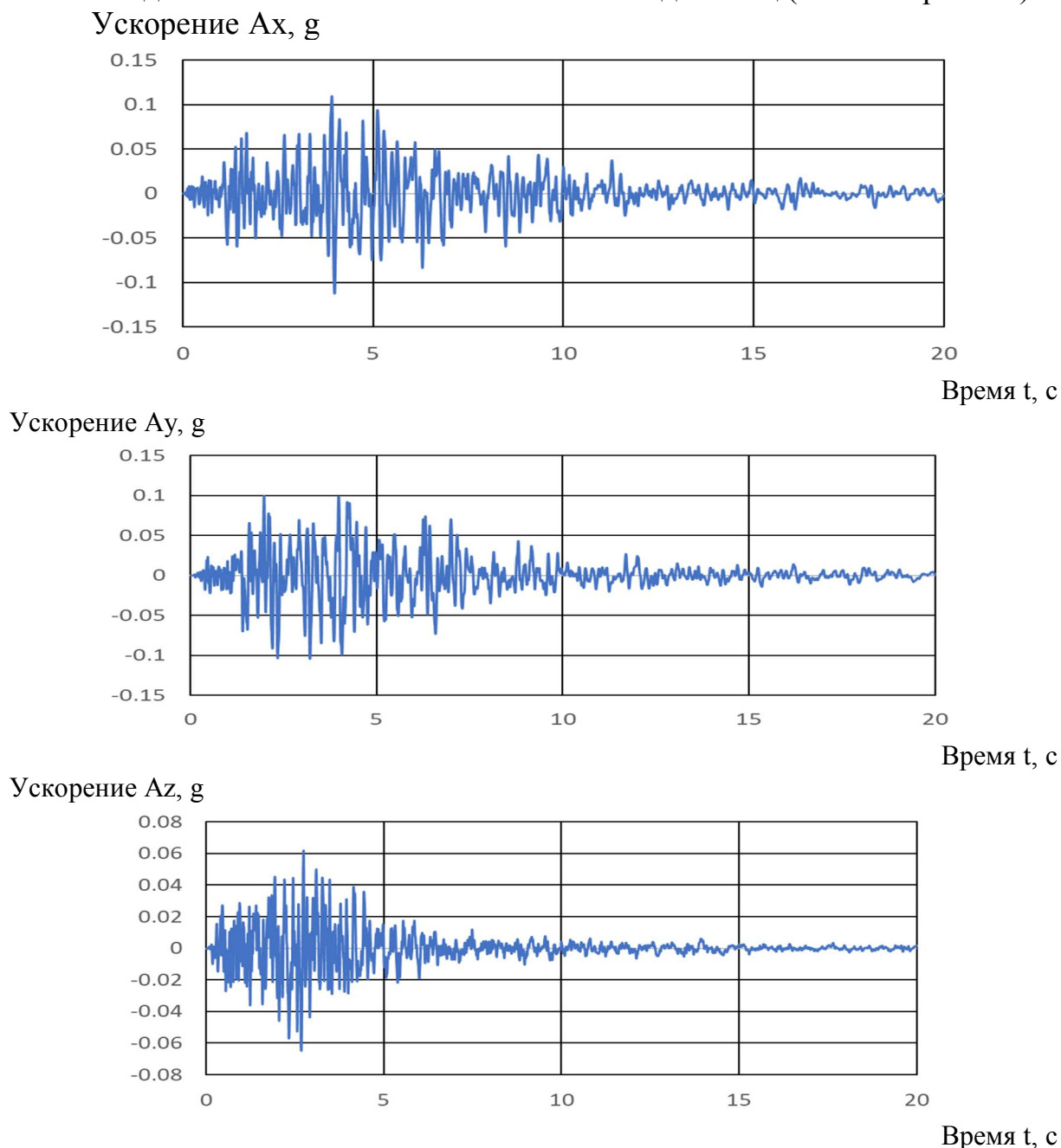


Рис. 13. Расчётная модельная акселерограмма 7 б по MSK-64 на уровне отметки КРП крана 130/32 т-33,5 м [8]

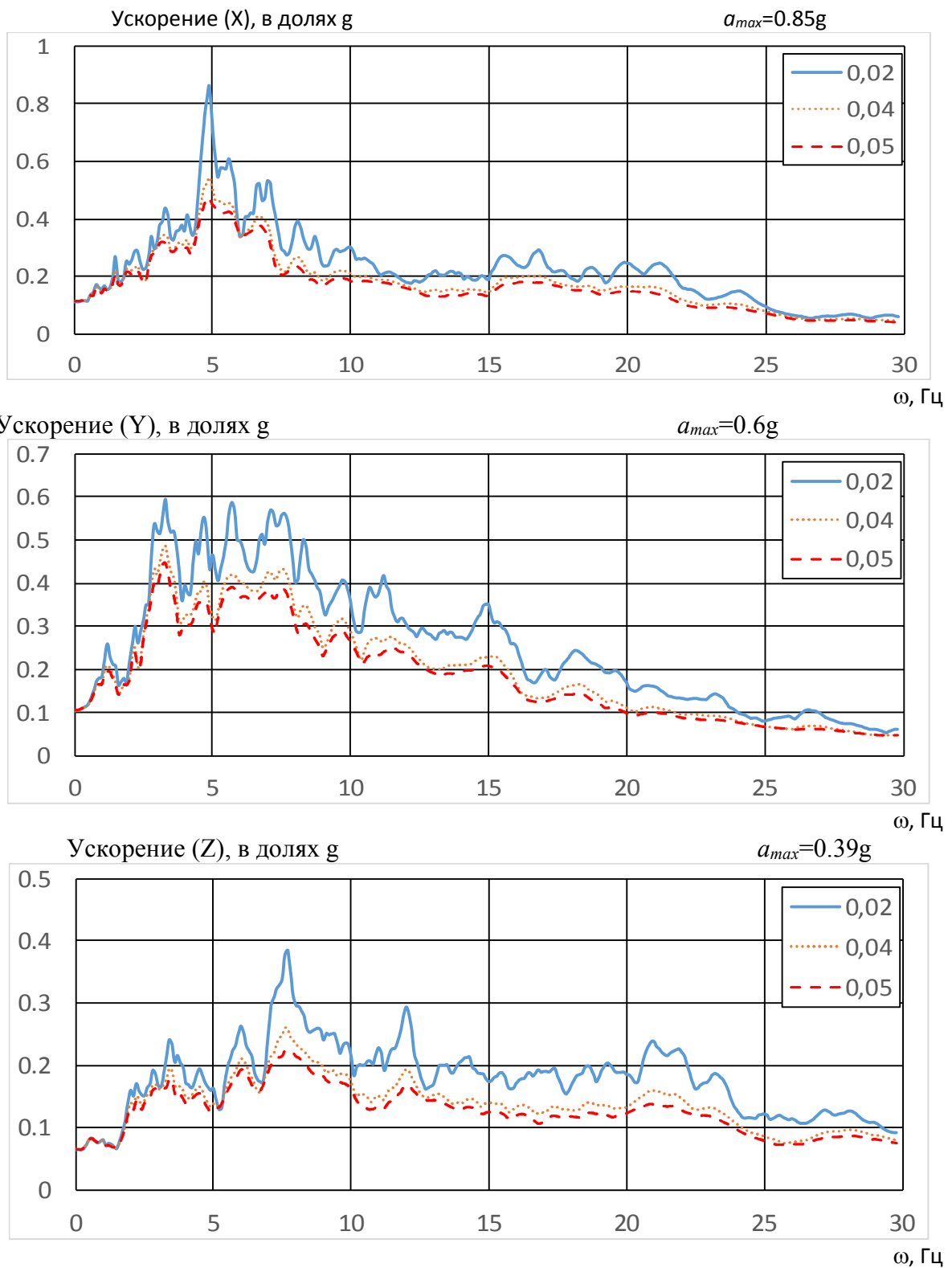


Рис. 14. Сейсмический спектр ответа акселерограммы 7 баллов по MSK-64 на уровне отметки КРП крана 130/32 т-33,5 м при относительном затухании 2%, 4% и 5%

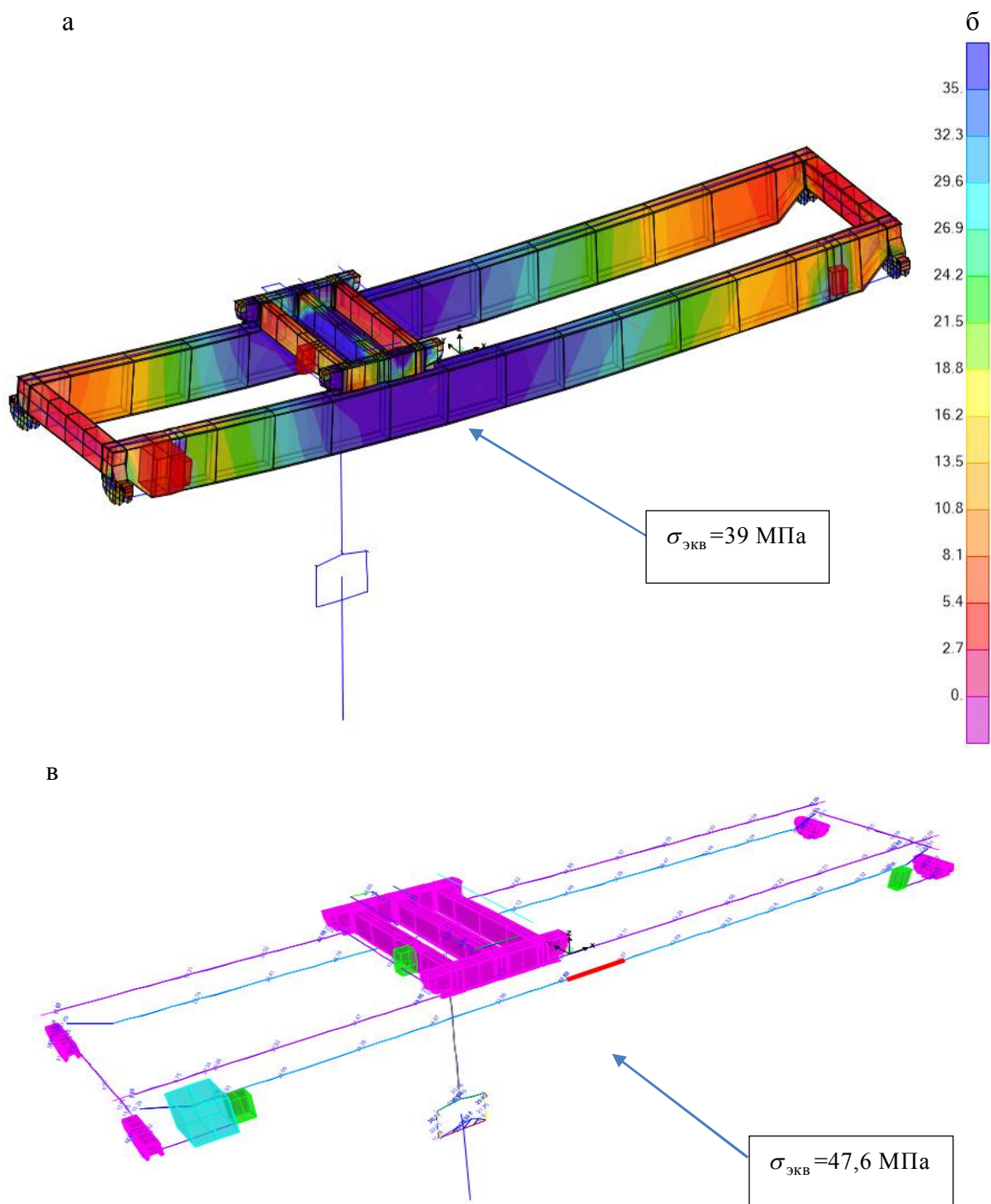


Рис. 15. Мостовой кран 130/32 т-33,5 м: а – эквивалентные напряжения по III теории прочности в середине пролётной балки моста в момент времени действия акселерограммы $t=3,3 \text{ с}$, $\sigma_{\text{ЭКВ}}=39 \text{ МПа}$ на основе конечно-элементной пластинчатой РДМ; б – шкала эквивалентных нагрузжений; в – то же, 47,6 МПа, стержневой РДМ

Авторы настоящей работы стремились облегчить действия проектировщиков по выбору РДМ между пластинчатой и стержневой, следуя предпочтениям уравнений равновесия (1) и уравнений движения типа (2) и разработке на их основе методов расчёта, которые могут выполняться либо во временной области МДА, когда определяются непосредственно функции времени [2], удовлетворяющие уравнению, либо в частотной области, например, ЛСМ [3, 4, 5], когда определяются частоты и амплитуды ряда гар-

монических функций времени, также удовлетворяющих уравнению движения. Дополнительным вкладом в пользу пластинчатой РДМ, как уже отмечалось, является возможность расчётного анализа НДС узловых сварных швов несущих конструкций кранов, проектируемых как пространственные сварные сооружения, что следует, в частности, из НП-043-11[7].

Список литературы

1. Панасенко Н. Н., Синельщиков А. В. и др. Конечно-элементные компьютерные модели подъёмных сооружений // Современное машиностроение. Наука и образование : мат-лы IV Международной научно-практической конференции. СПб. : Изд-во СПб. гос. политехн. ун-та, 2014. С. 743 – 756.
2. Panasenko N. N., Sinelshchikov A. V., Rabey V. V. The Calculated Justification of Seismic Stability of Load-Lifting Cranes // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2014. V.9. P. 104–123.
3. Панасенко Н. Н., Рабей В. В., Синельщикова Л. С. Конечно-элементная модель демпфирования колебаний несущих металлоконструкций грузоподъёмных кранов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Астрахань : Изд-во АГТУ, 2013. № 2 (56). С. 41 – 49.
4. Котельников В. С., Панасенко Н. Н., Синельщиков А. В. Разработка модели землетрясений в расчётном анализе сейсмостойкости подъёмных сооружений / Безопасность труда в промышленности. 2007. № 9. С. 42–46.
5. Панасенко Н. Н., Божко С. Г. Сейсмостойкие подъёмно-транспортные машины атомных станций. Красноярск : Изд-во Красноярского государственного университета, 1988. 208 с.
6. Панасенко Н. Н. Динамика и сейсмостойкость подъёмно-транспортного оборудования атомных станций: дисс. ... д-ра техн. наук: в 2 ч. Ч. 1. Новочеркасск : НГТУ, 1992. 475 с.
7. НП-043-2011. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъёмных кранов для объектов использования атомной энергии (в редакции приказа Ростехнадзора от 19 ноября 2013 г., № 549). М.: Ростехнадзор, 2014. 14 с.
8. Синельщиков А.В. Вероятностно-статистическая модель расчётного сейсмического воздействия на ОИАЭ г. Железногорска / В. И. Мацеля, П. Н. Сеелев, Н. Н. Панасенко, А. В. Синельщиков [др.] // Механики XXI века. Братск : Изд-во БрГУ, 2016. С. 263–277.
9. Синельщиков А. В., Панасенко Н. Н., Синельщикова Л. С. Математическая модель сейсмических спектров ответа для проектных основ сооружений с крановыми нагрузками. Астрахан: Вестник АГТУ, 2012. № 1 (53). С. 66–74.
10. Юзиков В. П., Завьялова О. Б. Расчет тонкостенных стержней открытого профиля с учетом сдвига срединной поверхности. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 1 (625). С. 108–115.

УДК 624

УЧЕТ КОНСТРУКТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ РАБОТЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ, ИМЕЮЩИХ ГИБКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

О. Б. Завьялова

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет
(Россия)*

В статье рассмотрена методика расчёта строительной конструкции на прочность и жесткость с учетом нелинейной работы гибких связей. Определены условия, при которых