

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ АГРЕГАТА ГАЗО-КИСЛОРОДНОГО РАФИНИРОВАНИЯ СТАЛИ

Проведені натурні випробування та вимірювання рівня вібраційних параметрів агрегату газо-кисневого рафінування сталі у різних періодах виплавки нержавіючої сталі. Представлені осцилограми та амплітудно-частотні характеристики вібропараметрів у контрольних точках вимірювання. По цим даним, з урахуванням додаткового динамічного впливу, виконані відповідні розрахунки та оцінка параметрів рівня навантаження підшипникових опор, несучої конструкції й фундаменту агрегату.

Conducted field tests and measurement of vibration parameters of the unit gas-oxygen steel refining in different periods of melting. Oscillograms and frequency response vibration parameters at the control points of measurement. From these results, given the additional dynamic loads, calculations and estimating the level of loading of bearing arrangements, support structure and foundation of the unit.

Актуальность. Повышенная вибрационная активность технологического процесса конвертерного производства стали, вызванная продувкой и химическим взаимодействием энергоносителей в слое расплавленного металла приводит к дополнительному динамическому нагружению несущей конструкции, опор и фундамента оборудования. Такая динамическая нагрузка обусловлена случайным характером импульсных воздействий на корпус агрегата газо-кислородного рафинирования стали (ГКР) при интенсивной продувке энергоносителей через расплав с жидким металлом; асимметрией расположения фурм относительно оси цапф в вертикальной плоскости, состоянием околофурменных зон, изменением геометрии кладки днища и стен в процессе эксплуатации. Эксплуатация тяжелого оборудования в условиях дополнительного динамического нагружения вызывает обеспокоенность относительно долговечности основных опорных узлов агрегата, его фундамента и несущей конструкции. Теоретические и литературные сведения о величине и характере таких динамических нагрузок, возникающих в агрегатах подобного типа[], не могут быть распространены ни по характеристике возмущения ни по собственным параметрам машины на агрегаты другой конструкции и вместимости. Становится актуальной и необходимой задача по натурному определению таких нагрузок, их оценки и учету в расчетах основных узлов агрегата на прочность и долговечность.

Измерения и аппаратура. Натурные измерения вибрационных параметров несущей конструкции агрегата ГКР, проводились 23.11.2012 г. в условиях АОЗТ «Завод Спецсталь ГКР» (г. Миргород) при плавке стали марки X18H9T. Продолжительность плавки ≈ 40 мин. При подготовке к измерениям выполнен анализ технической и конструкторской документации по опорам, фундаменту и несущей конструкции агрегата ГКР; проведена

предварительная оценка динамических параметров несущей конструкции и составлена расчетная модель колебательной системы агрегата. На основании предварительного аналитического расчета назначены четыре измерительные точки на элементах несущей конструкции и фундаменте; определены места установки вибрационных датчиков на подшипниковой опоре неприводной и приводной цапф агрегата, а также в месте крепления металлоконструкции станины к фундаменту со стороны неприводной цапфы (рис. 1.). Выполнен подбор и подготовка измерительной и регистрирующей аппаратуры для измерения вибраций фундамента и несущей конструкции агрегата ГКР:

- виброизмеритель ВИП-2 с индукционным виброизмерительным преобразователем Д21А,
- виброанализатор спектра СД-12 с пьезоэлектрическим акселерометром АР-28.

Вся используемая аппаратура соответствует требованиям ГОСТ 12.4.012-83 для средств измерения и контроля вибрации.

Измерения вибрации проводились в течение всех трех периодов плавки, расход энергоносителей по которым и их продолжительность приведена в таблице 1.

Таблица 1

Технологические параметры дутья по периодам плавки

№	Продолжительность, мин	Расход энергоносителя, м ³ /мин			
		Кислород		Аргон	
1		Кислород	5,0	Аргон	-
2	10÷12	Кислород	5,0÷0,8 ↓	Аргон	0÷3,0 ↑
3		Кислород	0,8÷3,0 ↑	Аргон	3,0÷0,3 ↓

Регистрация вибрационных параметров (виброускорение, виброскорость и виброперемещения) осуществлялась в контрольных точках в вертикальном (Z), поперечном (Y) и осевом (X) направлениях.

Результаты измерений, обработка. В процессе плавки, при продувке энергоносителей через расплав, корпус агрегата совершает вынужденные колебания стохастического характера сложной структуры в низкочастотном диапазоне возмущения, которые передаются через опоры на несущую конструкцию и фундамент. Дополнительные динамические добавки не превышают 5%, поэтому расчет на прочность основных деталей и узлов агрегата можно проводить на статическую нагрузку. Не зарегистрированы усиления колебаний резонансного или околорезонансного(биения) характера.

Подшипниковые узлы опор цапф(рис. 2.). Максимальные амплитуды перемещений зарегистрированы в направлении минимальной жёсткости(ось X) и не превысили 0,3 мм., а полученные максимальные значения ускорения позволили оценить величину динамической добавки. Последующий прочностной расчет подшипникового узла опор цапф агрегата при статическом нагружении от веса корпуса агрегата с огнеупорной кладкой и жидким

металлом с учетом дополнительных динамических нагрузок при продувке металла, позволяет заключить:

1) наиболее нагружены в опоре подшипники, расположенные ближе к оси агрегата; для них расчетный параметр уровня нагруженности (коэффициент запаса) составил $f_{s(A)} = 3,99$, что удовлетворяет условию статической прочности и соответствует рекомендованному для ответственных тяжело нагруженных опор допускаемому значению $[f_s] = 4$, при условии полного разделения контактирующих поверхностей подшипника смазывающим слоем и обеспечения необходимой его чистоты.

2) для менее нагруженных подшипников цапф, параметр уровня нагруженности составил $f_{s(B)} = 20,45$, что значительно больше допускаемого для длительной эксплуатации коэффициента запаса и гарантирует статическую и длительную прочность по усталости.

3) при рекомендуемом производителем изменении конструкции подшипникового узла, с более рациональным распределением воздействия осевой составляющей нагрузки на подшипники опоры цапфы, параметры уровня нагруженности подшипников соответственно составят $f_{s(A)} = 6,29$ и $f_{s(B)} = 7,15$, что снизит неравномерность эквивалентного нагружения на подшипники и увеличит длительную прочность узла в целом на 57,6 %.

Несущая конструкция. (рис. 3.) Частотный спектр виброскорости верхней части несущей конструкции (НК) со стороны неприводной цапфы агрегата позволил установить усиления колебаний по двум частотам вынуждающих воздействий, которые составляют:

по вертикальному направлению (ось Z) 1,3 Гц; 17 Гц;

по поперечному направлению (ось Y) 6,4 Гц; 16 Гц;

по осевому направлению (ось X) 5 Гц; 17,3 Гц.

Максимальные зарегистрированные значения измеренной виброскорости верхней части НК составили: в вертикальном направлении – 3,84 мм/с;

в поперечном направлении - 5,51 мм/с;

в осевом направлении – 10,01 мм/с.

Во всех периодах плавки наибольшие колебания верхней части НК зарегистрированы в осевом направлении.

При повалке конвертора уровень колебаний верхней части НК ниже в 2...5 раза, чем при продувке энергоносителей через расплав.

Для оборудования VII класса чувствительности к гармоническим колебаниям основания, к которому можно отнести агрегат ГКР, предельная амплитуда скорости колебаний может превышать 10 мм/с [].

Фундамент. (рис. 4.). На станине, в месте крепления опор к фундаменту, зарегистрированы максимальные колебания в поперечном направлении. Частотный спектр виброскорости нижней части НК (фундамента) со стороны неприводной цапфы агрегата позволил установить усиления колебаний по двум частотам вынуждающих воздействий, которые составляют: по вертикальному направлению (ось Z) 1,9 Гц; 5 Гц; по осевому

направлению (ось Y) 2,13 Гц; 2,88 Гц; по поперечному направлению (ось X) 1,38 Гц; 16,9 Гц. Максимальные зарегистрированные значения измеренной виброскорости нижней части НК (верхней грани фундамента) составили: в вертикальном направлении – 1,31 мм/с; в поперечном направлении – 0,89 мм/с; в осевом направлении - 1,15 мм/с.

Уровни вибрации фундамента существенно ниже показаний вибропараметров верхнего уровня несущей металлоконструкции (по оси Z – в 2,93 раза; Y – в 6,19 раза; X – в 8,7 раза). Значительное снижение уровня виброскорости в осевом направлении обусловлено меньшей изгибной жесткостью станины в этом направлении. Визуальный осмотр фундамента станин агрегата не выявил сколов, трещин и других повреждений, которые могли бы снизить его несущую способность. Повреждений фундаментных болтов крепления станин не обнаружено.

Результаты аппаратной обработки полученных данных по измерению ускорений, скоростей и перемещений в контрольных точках агрегата; анализ осциллограмм виброускорений, среднеквадратичные значения вибрационных параметров и их спектрограммы представлены табл. 2.

Таблица 2

Результаты натурных измерений вибрации *

Точка измерения	Место измерения	Направление вибрации	Среднеквадратические/Максимальные значения вибропараметров		
			Ускорение, м/с ²	Скорость, мм/с	Перемещение, мм
Опора неприводной цапфы	крышка	Z	0,113/0,42 0,99/0,64**	0,57/1,73 0,39/0,90**	0,026/0,053 0,060/0,106**
		Y	0,183/0,6	1,56/4,33	0,022/0,063
		X	0,212/0,89	2,49/8,42	0,050/0,143
	корпус	Z	0,147/0,56	1,12/3,84	0,059/0,106
		Y	0,19/0,64	1,64/5,51	0,026/0,080
		X	0,181/0,68	3,73/10,01	0,133/0,263
Нижняя часть станины (фундамент) со стороны неприводной цапфы		Z	0,027/0,116	0,402/1,31	0,022/0,051
		Y	0,021/0,12	0,362/0,89	0,111/0,203
		X	0,037/0,167	0,348/1,15	0,046/0,073
Опора приводной цапфы*	крышка	Z	-	0,5...1,2	0,02...0,045

* Измерения проводились вибронализатором спектра СД-12.

** Результаты при завершении 3-го периода плавки.

** Измерения проводились виброметром ВИП-2.

Выводы:

1. Колебательные процессы в упругих системах несущей конструкции агрегата ГКР вызваны:

- случайным характером импульсных возмущающих воздействий на корпус агрегата ГКР при продувке энергоносителей через расплав и их химическим взаимодействием с жидким металлом;
- реальным состоянием фурм, их асимметрией относительно оси цапф, а также состоянием околофурменных зон и изменении геометрии кладки днища и стен в процессе эксплуатации;
- интенсивной подачей энергоносителей через фурмы.

Снижение уровней вибрации существующего оборудования ГКР без изменения технологических параметров дутья и(или) конструкции агрегата не представляется возможным.

2. Подшипники опор приводной и не приводной цапф агрегата ГКР удовлетворяют условию статической прочности и длительной эксплуатации (по усталости), при условии полного разделения контактирующих поверхностей подшипника смазывающим слоем и обеспечения его чистоты, а также выполнения требований «Инструкции по монтажу и эксплуатации ГКР» (Периодически 1-2 раза в месяц производить несколько полных поворотов агрегата в одну сторону).

3. Несущая металлоконструкция. Максимальный уровень виброскорости верхней части НК не превышает рекомендуемой для подобного класса машин по чувствительности к гармоническим колебаниям основания, что позволяет рекомендовать дальнейшую эксплуатацию агрегата ГКР в заданном технологическом режиме.

4. Фундамент. В соответствии со СНиП 2.02.05-87. «Фундаменты машин с динамическими нагрузками» предельно допустимые амплитуды горизонтальных и вертикальных колебаний для фундаментов подобных машин составляют 0,25 мм. Максимальные значения амплитуд, зафиксированные при натурных измерениях на нижней части станины (верхней грани фундамента) в поперечном направлении составили 0,203 мм (при средних значениях 0,111 мм), что меньше нормированных показателей. В целом состояние фундаментов агрегата ГКР удовлетворительно и соответствует существующим нормам.

Бібліографічний список

1. Агрегат газо-кислородного рафинирования вместимостью 5.т. ГКР-5-0,65. Инструкция по монтажу и эксплуатации 5201.00.00.000 ИЭ
2. ГОСТ 12.2.099-84. Агрегаты для выплавки стали. Общие требования безопасности.
3. ГОСТ 12.4.012-83. ССБТ. Вибрация. Средства измерения и контроля вибрации на рабочих местах. Технические требования.

4. ГОСТ 26043-83. Вибрация. Динамические характеристики стационарных машин. Основные положения.
5. ГОСТ 12.1.012-90. ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования.
6. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками.
7. Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций / Под ред. проф. Б.Г. Коренева и проф. А.Ф. Смирнова.- М.: Стройиздат, 1986.
8. Динамический расчет зданий и сооружений. Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1984.-304 с.
9. Справочник по динамике сооружений / Под ред. проф. Б.Г. Коренева и проф. И.М. Рабиновича.— М.: Стройиздат, 1972.
10. Швец Н.С., Седин В.Л., Киричек Ю.А.. Конструктивные способы снижения вибраций фундаментов машин с динамическими нагрузками.-М.: Стройиздат, 1987.

Проведены натурные испытания и измерения уровня вибрационных параметров агрегата газо-кислородного рафинирования стали в различных периодах плавки. Представлены осциллограммы и амплитудно-частотные характеристики вибропараметров в контрольных точках измерения. По этим результатам, с учетом дополнительной динамической нагрузки, выполнены расчеты и оценка параметров уровня нагруженности подшипников опор, несущей конструкции и фундамента агрегата.

Відомості про авторів

Зданевич Сергій Володимирович, 12.05.61 р.н., к.т.н., доцент каф. теоретичної механіки Національної металургійної академії України. Тел.сл. (056)3748387, тел.дом. (056)7428010, тел.моб. (050)4527952, домашня адреса: 49050, Дніпропетровськ, пр.Кірова

Погребняк Родіон Петрович, 18.05.60 р.н., к.т.н., доцент каф. прикладної механіки Національної металургійної академії України. Тел.сл. (056)3748387, тел.дом. (056)7433276, тел.моб. (095)4997554, домашня адреса: 49050, Дніпропетровськ, вул. Козакова,35А

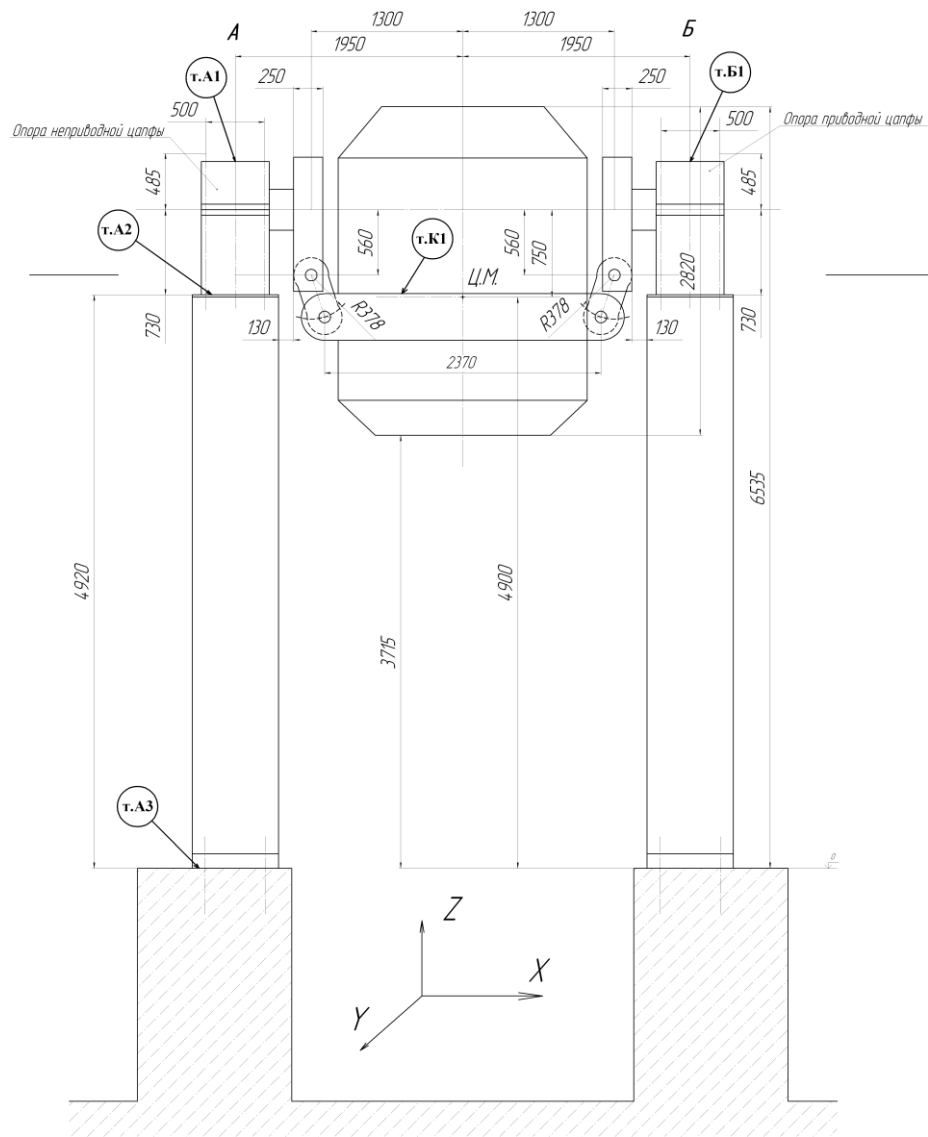
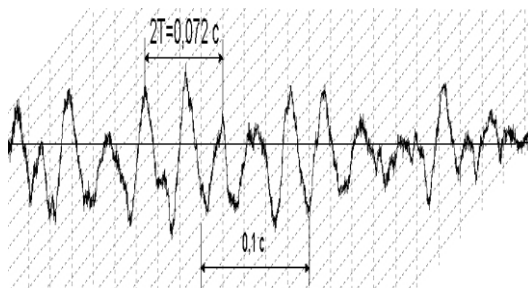
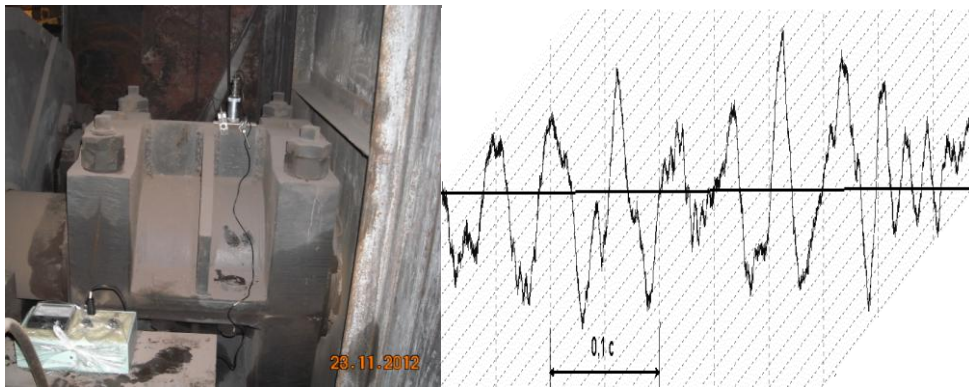


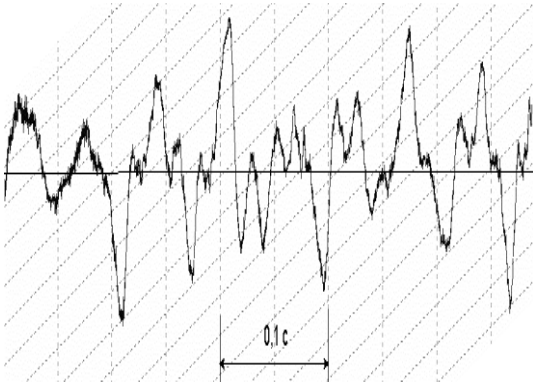
Рис. 1. Схема расположения точек измерения вибрационных характеристик агрегата ГКР



a)

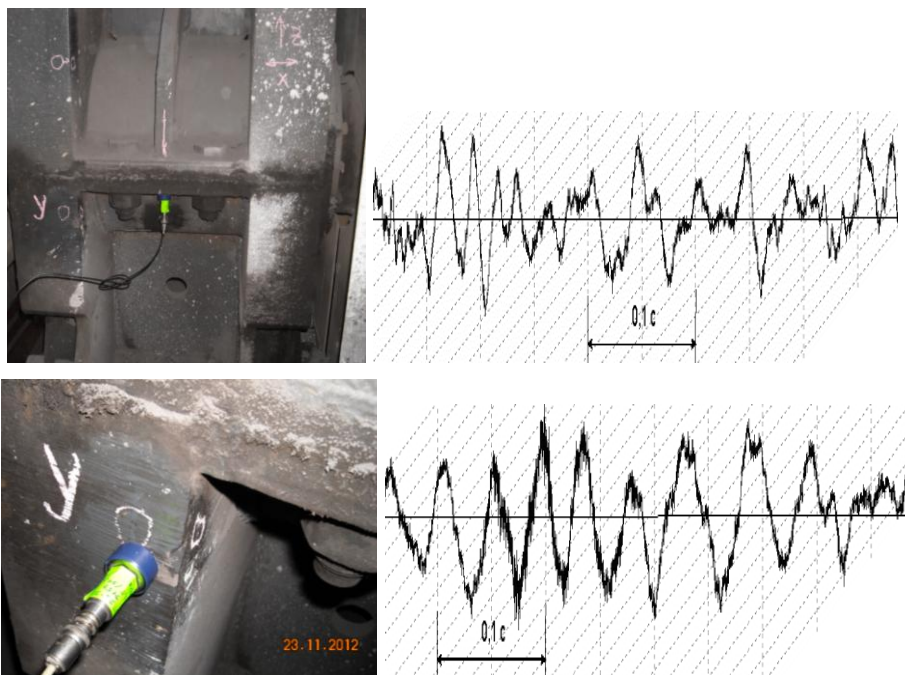


б)



в)

Рис.2. Места установки датчиков вибрации на крышке подшипниковой опоры: а) неприводной цапфы (т.А1); б) приводной цапфы (т.Б1) и акселерограмма колебаний крышки подшипниковой опоры неприводной цапфы агрегата ГРП при продувке кислородом (5,0 м³/мин): а) $\ddot{Z}$; б) $\ddot{Y}$; в) $\ddot{X}$ (м/с²)



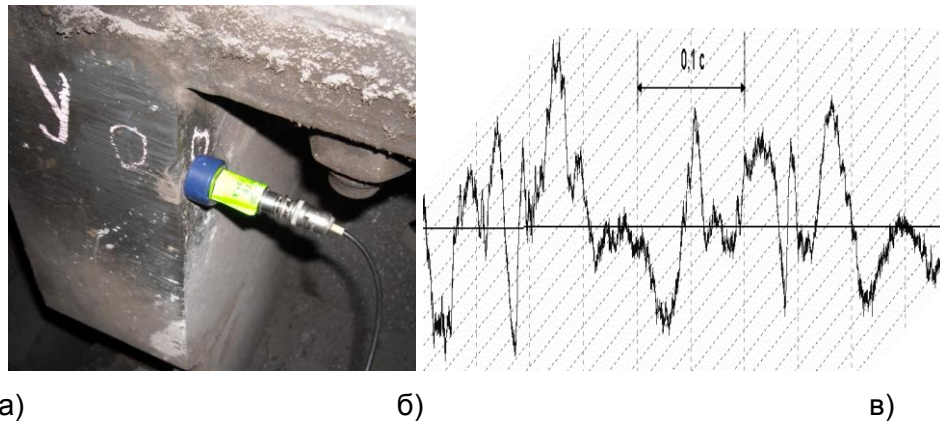
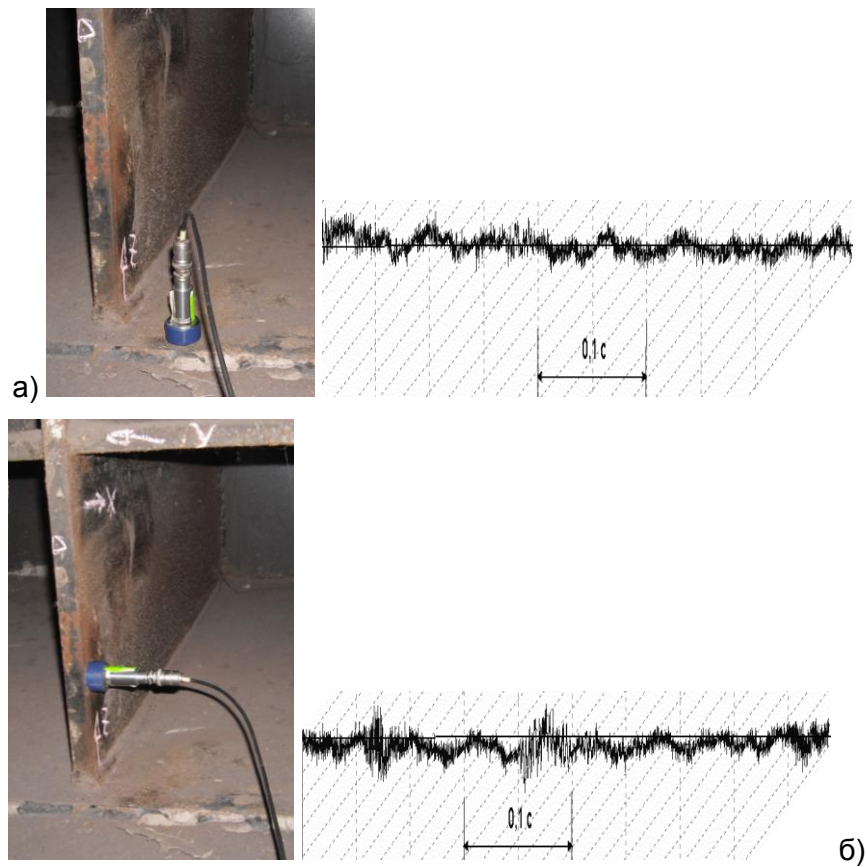


Рис.3. Места установки датчика на корпусе подшипниковой опоры не приводной цапфы (т.А2) при измерении вибропараметров в вертикальном (а), поперечном (б) и осевом (в) направлениях. Акселерограмма колебаний корпуса подшипниковой опоры не приводной цапфы агрегата ГКР при продувке кислородом (5,0 м³/мин): а) $\ddot{Z}$; б) $\ddot{Y}$; в) $\ddot{X}$ (м/с²)



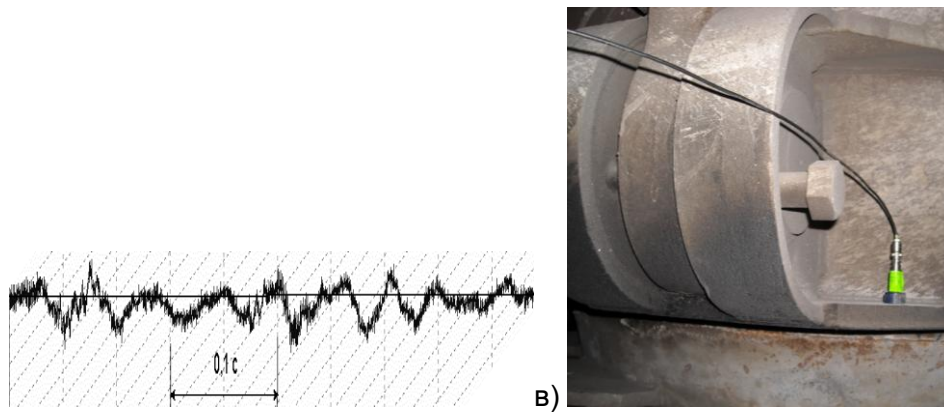


Рис.4. Места установки вибродатчика: а) на нижней части НК (верхняя грань фундамента, т.А3); б) на корпусе агрегата (т.К1) и акселерограмма колебаний нижней части НК (фундамент) под опорой неприводной цапфы агрегата ГКР при продувке кислородом

(5,0 м³/мин): а) $\ddot{Z}$; б) $\ddot{Y}$; в) $\ddot{X}$ (м/с²)