



ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФАКТИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ ПО ПРОИЗВОДСТВУ АММИАКА

В. П. БОРОДАЙ, А. А. ЧЕРЕВКО

Рассмотрено применение метода виброакустической диагностики для оценки текущего технического состояния компрессорных агрегатов по производству аммиака. Проведенные исследования охватывают определенный период эксплуатации агрегатов, что свидетельствует о прослеживаемой динамике в изменении их технического состояния.

Application of the method of vibration acoustic diagnostics for evaluation of the current technical condition of compressor units in ammonia production is considered. Conducted studies cover a certain period of unit operation, which allows stating the traceability of the dynamics of the change of technical condition of these units.

Широкое применение в промышленности центробежных компрессорных машин требует повышенного внимания к обеспечению безаварийной работы в межремонтный период. Гарантированную оценку текущего состояния могут дать методы и средства виброакустической диагностики. Виброакустический сигнал содержит полную информацию о состоянии и взаимодействии деталей и узлов роторного оборудования, а также о состоянии системы, в которую входит это оборудование. Рассматривая распределение энергии гармонических составляющих, анализируя временные, построив контурные характеристики, и следя за изменением и скоростью развития информационных составляющих, можно в полной мере оценить остаточный ресурс агрегата в целом.

Компрессор 102-Г предназначен для сжатия природного газа, поступающего в цех производства аммиака из магистрального коллектора, до давления $43,3 \text{ кг/см}^2$ и подачи его в печь первичного риформинга для проведения конверсии метана паром. Компрессор природного газа состоит из корпуса низкого давления (КНД) типа MCL-455 и корпуса высокого давления (КВД) типа BCL-455, установленных на общей фундаментной раме. В каждом из цилиндров расположено по пять ступеней сжатия. Компрессор имеет маслогазовые уплотнения, предотвращающие утечку газа из полости компрессора. Роторы КНД и КВД вращаются в опорных подшипниках скольжения, имеющих принудительную циркуляционную смазку. Неуравновешенные осевые силы воспринимаются упорными подшипниками.

Обследование компрессорного агрегата 102-Г д.еха по производству аммиака № 3 ОАО «Гродно АЗОТ». Обследования агрегата прово-

дили с 17 января по 30 октября 2006 г. Первоначально целью обследования было определение фактического состояния подконтрольного агрегата в межремонтный период. С февраля текущего года обследования были посвящены определению причин и локализации источников повышенной низкочастотной вибрации.

При обследованиях измеряли среднеквадратические значения виброскорости корпусов агрегата вблизи подшипниковых опор в трех взаимно перпендикулярных направлениях (вертикальном (*B*), горизонтальном поперечном (*Г*) и осевом (*O*) по отношению к оси ротора), в диапазоне частот ISO от 10 до 1000 Гц. Также снимались спектральные

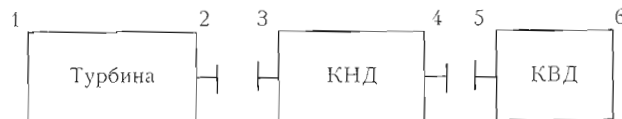


Рис. 1. Принципиальная схема расположения точек измерения 1–6 вибрационных характеристик агрегата 102-Г

Таблица 1. Среднеквадратические значения виброскорости агрегата 102-Г

Точка измерения	Значение, мм/с	Точка измерения	Значение, мм/с
<i>B</i> ₁	0,5	<i>B</i> ₄	1,7
<i>Г</i> ₁	1,9	<i>Г</i> ₄	0,4
<i>O</i> ₁	0,6	<i>O</i> ₄	0,5
<i>B</i> ₂	0,7	<i>B</i> ₅	0,4
<i>Г</i> ₂	1,0	<i>Г</i> ₅	0,3
<i>O</i> ₂	0,5	<i>O</i> ₅	0,2
<i>B</i> ₃	2,8	<i>B</i> ₆	0,3
<i>Г</i> ₃	1,5	<i>Г</i> ₆	0,2
<i>O</i> ₃	1,4	<i>O</i> ₆	0,2

вибрационные характеристики. Схема расположения точек измерения приведена на рис. 1.

Измеренные среднеквадратические значения виброскорости на 17 января 2006 г. приведены в табл. 1.

На основании анализа полученных результатов установлено следующее:

интенсивность вибрации турбины достигает 1,9 мм/с и удовлетворяет требованиям ГОСТ 10816-1-97 (не более 4,5 мм/с при длительной эксплуатации). Она определяется оборотной спектральной составляющей вибрации корпуса подшипника со свободной стороны в горизонтальном направлении, обусловленной недостаточной жесткостью крепления подшипника;

интенсивность вибрации КНД составляет 2,8 мм/с и удовлетворяет техническим требованиям. Она определяется оборотной спектральной составляющей вибрации корпуса подшипника со стороны турбины в вертикальном направлении, обусловленной остаточной неуравновешенностью, расцентровкой с турбиной и увеличенным зазором в подшипнике;

интенсивность вибрации КВД составляет 0,4 мм/с, удовлетворяет техническим требованиям и определяется оборотными спектральными составляющими, обусловленными остаточной неуравновешенностью ротора;

в спектре вибрационного сигнала определяющая доля энергии параметра виброскорости приходится на оборотную гармоническую составляющую.

После неплановой остановки цеха с 21.01.06 по 30.01.06 в период резкого снижения температуры окружающего воздуха при проведении первых пусков вибрационное состояние компрессора качественно изменилось. В спектрах вибрации корпусов агрегата в районе опорных подшипников основная энергия вибрационного сигнала приходилась не на оборотную спектральную составляющую (по замерам от 17.01.06), а на составляющую, равную половине оборотной.

По различным причинам пуск цеха задерживался, и было принято решение выполнить ревизию опорных подшипников КНД и КВД и соединительных муфт турбина-КНД и КНД-КВД, а также проверить состояние центровки корпусов агрегата. При ревизии опорных подшипников и соединительных муфт было установлено их удовлетворительное состояние, центровка агрегата не изменилась.

Пуск после стоянки и ревизии подшипников и муфт происходил штатно. Агрегат в течение нескольких дней работал на азоте. Частота вращения приводной турбины составляла 8300 об/мин. Общий уровень вибрации на контролируемых точках не превышал допустимых значений, снятие спектральных характеристик не проводилось.

При переходе на природный газ и повышении оборотов турбины до 8900 об/мин было отмечено повышение вибрации на корпусах агрегата в контролируемых точках до 3,5...3,8 мм/с. В спектрах вибрации определяющее значение имела составляющая, равная половине оборотной. Такой характер спектра наблюдался по всему агрегату, включая турбину.

При повышении частоты вращения турбины до 9240 об/мин уровень вибрации на корпусе подшипника КНД со стороны турбины в горизонтальном направлении достигал 4,5...4,8 мм/с на частоте, равной половине оборотной.

После выхода на нагрузку, близкую к номинальной, интенсивность вибрации агрегата определяли вибрацией корпуса подшипника КНД со стороны турбины в горизонтальном направлении на частоте, равной половине оборотной. Она составляла 2,8 мм/с — общий уровень и 2,3 мм/с — на гармонической составляющей, равной половине от оборотной.

Максимальную виброактивность агрегата наблюдали на недогруженном режиме, при работе на байпас, при нагружении виброактивность снизилась в 2 раза.

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что повышенная виброактивность агрегата определяется вибрацией корпусов подшипников опор в горизонтальном направлении и ее низкочастотной спектральной составляющей.

Причина возникновения низкочастотной спектральной составляющей связана не с состоянием узлов агрегата (подшипников, муфт, уплотнений, роторов или состоянием центровки), а с возникновением субгармонического резонанса, вызванного изменением жесткости системы агрегат-фундамент-присоединительные трубопроводы.

Следующее обследование агрегата проводили 21 и 22 сентября 2006 г. с целью определения места изменения жесткости системы. Обследование включало: измерение вибрационных характеристик агрегата; снятие контурных характеристик по опорам КВД и КНД от крышек подшипников до фундамента и по каждой колонне фундамента от рамы агрегата до места соединения с фундаментом цеха; обследование подводящих и отводящих трубопроводов.

Результаты проведения измерений вибрационных характеристик агрегата в обозначенных точках (нижние индексы) от 11.02 и 21.09 приведены в табл. 2. На рис. 2 приведены графики суммарного уровня вибрации по каждой точке измерения до остановки агрегата (17.01.06) и после пуска агрегата в работу (11.02.06 и 21.09.06), на рис. 3 приведены графики оборотной и половинной от нее гармонической составляющей в зависимости от точки измерения.

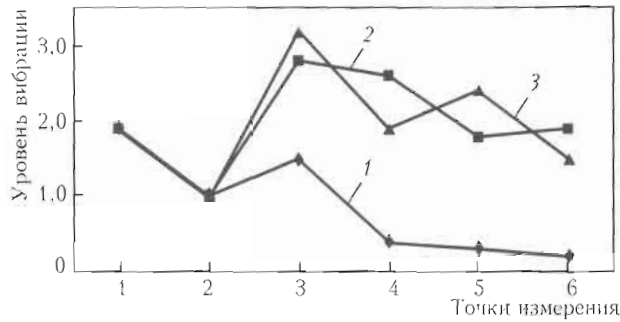


Рис. 2. График суммарного уровня вибрации в горизонтальном направлении по каждой точке измерения до остановки агрегата 17.01.06 (1) и после пуска агрегата в работу — 11.02.06 (2) и 21.09.06 (3)

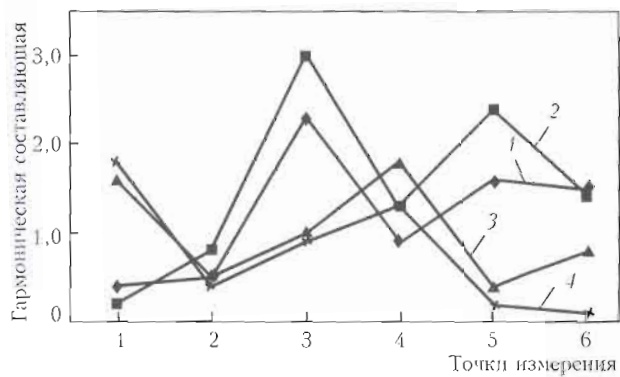


Рис. 3. График оборотной и половинной от нее гармонической составляющей в зависимости от точки измерения: кривые 1, 2 — 80 Гц соответственно 11.02.2006 и 21.09.2006; 3, 4 — 160 Гц соответственно 11.02.2006 и 21.09.2006

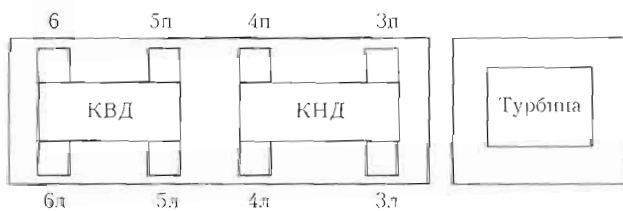


Рис. 4. Схема расположения точек снятия контурных характеристик

Контурные характеристики снимали по подшипниковым опорам КВД и КНД и далее по стойкам, на которые опираются лапы корпусов до нижнего края рамы, лежащего на фундаменте. Схема расположения точек замеров вибрации при снятии контурных характеристик показана на рис. 4. Нумерация точек соответствует нумерации подшипниковых опор. Левая и правая стороны определяются, если смотреть со стороны привода. В табл. 3 представлены результаты измерений виброскорости в обозначенных точках на частоте 80 Гц: 1 — крышка подшипника; 2 — корпус компрессора; 3 — лапа компрессора; 4 — подкладка; 5 — стойка; 6, 7 — соответственно верхний и нижний край рамы.

Таблица 2. Среднеквадратические значения виброскорости агрегата 102-А, измеренные 11.02 и 21.09

Точка измерения	Измеренное значение параметра виброскорости, мм/с					
	Общий уровень		80 Гц		160 Гц	
	11.02	21.09	11.02	21.09	11.02	21.09
B ₁	0,6	0,8	0,1	0,2	0,2	0,7
Г ₁	1,9	1,9	0,4	0,2	1,6	1,8
O ₁	0,6	0,6	0,2	0,3	0,3	0,3
B ₂	0,6	0,7	0,1	0,2	0,2	0,4
Г ₂	1,0	1,0	0,5	0,8	0,5	0,4
O ₂	0,6	0,6	0,2	0,2	0,1	0,2
B ₃	1,4	1,9	0,8	0,9	1,0	1,6
Г ₃	2,8	3,2	2,3	3,0	1,0	0,9
O ₃	1,0	0,9	0,3	0,6	0,6	0,3
B ₄	2,3	2,0	1,0	1,3	1,7	1,5
Г ₄	2,6	1,9	0,9	1,3	1,8	1,3
O ₄	0,7	0,6	0,3	0,5	0,3	0,1
B ₅	0,5	0,5	0,2	0,3	0,4	0,3
Г ₅	1,8	2,4	1,6	2,4	0,4	0,2
O ₅	0,3	1,0	0,2	0,9	0,2	0,1
B ₆	0,4	0,6	0,3	0,5	0,1	0,3
Г ₆	1,9	1,5	1,5	1,4	0,8	0,1
O ₆	0,2	1,3	0,1	1,3	0,1	0,1

Таблица 3. Результаты измерения виброскорости при снятии контурных характеристик

Точка измерения	Точка измерения и измеренное значение, мм/с							
	3л	3п	4л	4п	5л	5п	6л	6п
B ₁	1,0	0,7	1,3	1,2	0,3	0,5	0,5	0,4
Г ₁	3,1	3,0	1,3	1,3	2,3	2,1	1,4	0,6
O ₁	0,6	0,5	0,6	0,8	1,0	1,3	1,2	1,1
B ₂	1,2	1,6	1,2	1,4	Не определено			
Г ₂	3,0	3,0	1,3	1,4				
O ₂	0,6	0,7	0,6	0,8				
B ₃	0,7	0,7	0,8	0,9	0,2	0,8	1,1	0,7
Г ₃	2,7	2,6	1,9	1,9	2,1	1,8	0,8	1,0
O ₃	0,4	1,2	0,4	0,9	1,6	1,5	1,9	1,9
B ₄	0,5	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,2	0,6
Г ₄	2,7	2,4	1,9	1,7	2,0	1,6	0,9	1,0
O ₄	0,4	1,2	0,4	0,8	1,6	1,2	1,6	1,7
B ₅	0,5	0,9	0,7	1,0	0,1	0,9	0,1	0,5
Г ₅	2,7	2,4	1,8	2,0	1,7	1,6	1,0	1,0
O ₅	0,4	0,8	0,5	0,8	1,7	1,3	1,3	1,6
B ₆	0,3	0,9	0,3	0,9	0,1	0,6	0,5	0,4
Г ₆	1,3	1,1	1,2	0,8	0,3	0,1	0,3	0,4
O ₆	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,6
B ₇	0,2	0,7	0,2	0,7	0,1	0,6	0,1	0,4
Г ₇	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,3	0,3

Таблица 4. Результаты измерений вибрации при снятии контурных характеристик фундамента

Точка измерения	Номер колонн и измеренное значение вибрации, мм/с							
	1	2	3	4	5	6	7	8
G ₁	—	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,4	—
G ₂	0,04	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	—
G ₃	0,1	1,1	0,5	0,2	0,4	0,5	0,9	—
G ₄	0,1	1,5	0,7	0,3	0,3	0,7	1,2	0,3
G ₅	0,1	1,1	0,5	0,2	0,4	0,7	0,9	0,1
G ₆	0,03	0,4	0,2	0,1	0,2	0,3	0,5	0,1

При визуальном обследовании фундамента нарушений его целостности обнаружено не было. Контурные характеристики фундамента снимались по высоте вдоль каждой колонны от места стыковки с рамой до нулевой отметки, с интервалом примерно 1 м. На рис. 5 показана схема расположения точек измерения вибрации при снятии контурных характеристик фундамента, в табл. 4 приведены результаты измерений. Нумерация точек измерения сверху вниз, нумерация колонн по часовой стрелке от первой колонны под турбиной.

При снятии контурных характеристик колонн № 2, 3, 6 и 7 отмечено увеличение амплитуды виброскорости на уровне Н-образной металлоконструкции. Замер вибрации на самой конструкции показал, что ее величина полностью определяется спектральной составляющей 80 Гц и составляет 9,5 мм/с со стороны нагнетания и 7,7 мм/с со сто-

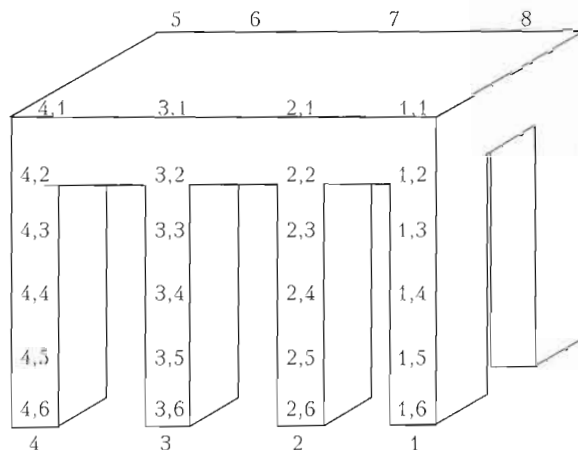


Рис. 5. Схема расположения точек измерения вибрации при снятии контурных характеристик фундамента

роны всасывания. Спектральные характеристики вибрации конструкции в точке со стороны нагнетания в горизонтальном направлении приведены на рис. 6.

Расчет металлоконструкции показал, что ее собственная частота в зависимости от жесткости закрепления изменяется от 60 до 125 Гц. На рис. 7 представлена расчетная форма колебаний металлоконструкции в предположении, что жесткость соединения закладная-бетон в местах приварки металлоконструкции нарушена.

На нагнетающем и всасывающем трубопроводах первой ступени было сделано по одному замеру вибрации в направлении максимальной вибрации

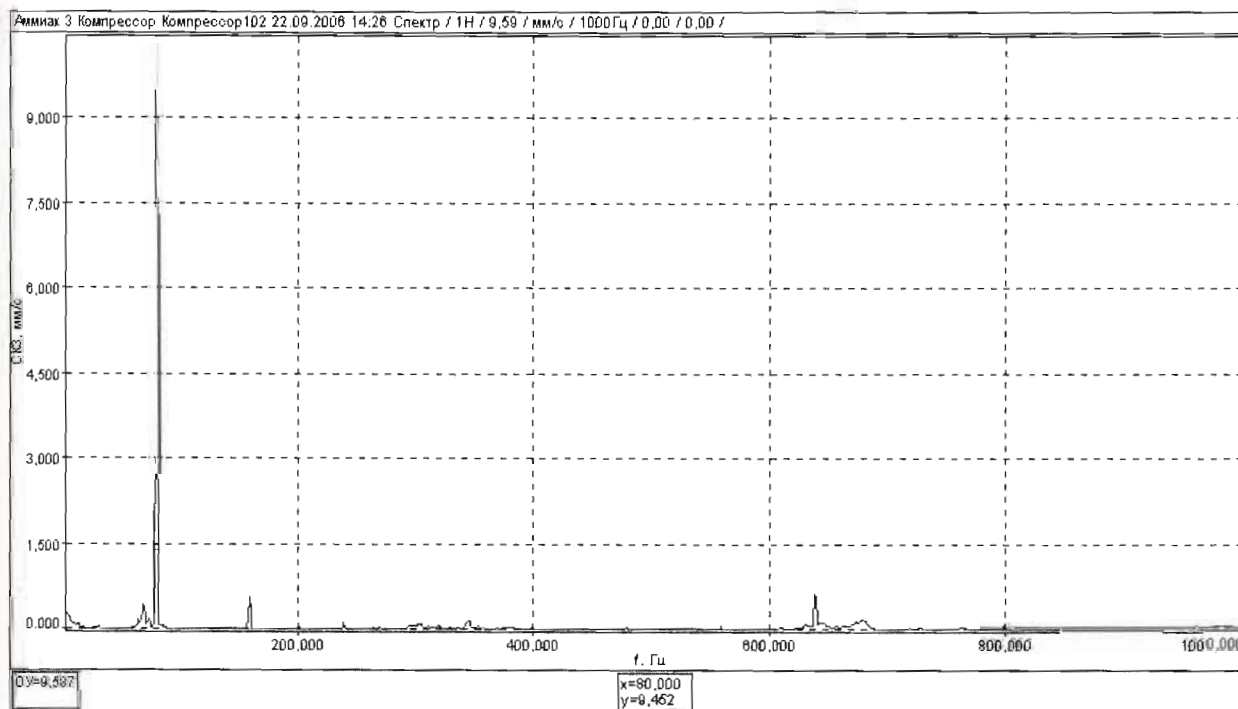


Рис. 6. Спектральная характеристика конструкции для раскрепления трубопроводов со стороны нагнетания первой ступени

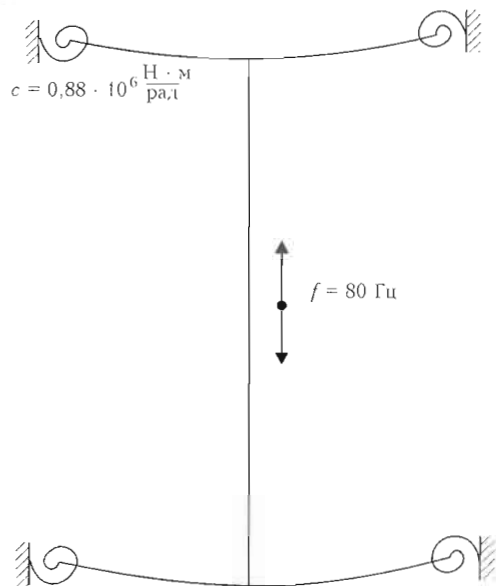


Рис. 7. Собственная форма колебаний при действительном значении жесткости

на корпусе КНД. Уровни вибрации на частоте 80 Гц составили, соответственно, 0,2 и 0,6 мм/с.

После останова агрегата 30 сентября 2006 г. и вскрытия корпусов были обнаружены следующие дефекты:

растрескивание и выкрашивание баббитового слоя правой (со стороны привода) части нижнего вкладыша опорно-упорного подшипника КНД;

растрескивание баббитового слоя правой (со стороны привода) части верхнего вкладыша опорного подшипника КНД;

износ гребней концевое лабиринтного уплотнения со стороны опорно-упорного подшипника; следы касания ротором лабиринтных уплотнений по всей длине проточной части.

Возникновение дефекта внутри агрегата (разрушение баббитового слоя опорного и опорно-упорного подшипников КНД) после восьми месяцев работы с низкочастотной вибрацией при его отсутствии во время вибрационных обследований в январе и ревизии в феврале 2006 г. явилось следствием низкочастотной вибрации, вызванной субгармоническим резонансом (обследование 11.02.06).

Увеличение вибрации корпусов подшипников агрегата на частоте, равной половине оборотной, при снижении частоты вращения привода свидетельствует об отсутствии зависимости величины вибрации с частотой $0,5f_{об}$ от дефектов вращающихся деталей (роторов и муфт) или об отсутствии этих дефектов. Увеличение вибрации на частоте, равной половине оборотной, при снижении частоты вращения объясняется наличием резонансной зоны 8800... 9100 об/мин системы компрессор-фундамент-присоединенные трубопроводы.

Основным диагностическим признаком дефектов опорных подшипников (снижения несущей

Таблица 5. Средние квадратические значения виброскорости на корпусах подшипниковых опор компрессора на различных режимах работы

Точка измерения	Измеренное значение, мм/с		
	8640 об/мин	9060 об/мин	9180 об/мин
V_1	0,2	0,3	0,3
Γ_1	0,6	0,8	0,5
O_1	0,4	0,6	0,4
V_2	0,2	0,4	0,5
Γ_2	0,4	0,8	0,8
O_2	0,3	0,6	0,4
V_3	0,5	1,1	0,8
Γ_3	1,0	1,5	0,8
O_3	0,5	0,8	0,5
V_4	0,5	1,2	0,8
Γ_4	0,9	1,4	1,0
O_4	0,2	0,6	0,2
V_5	0,2	0,2	0,1
Γ_5	0,2	0,2	0,2
O_5	0,2	0,3	0,2
V_6	0,1	0,3	0,2
Γ_6	0,1	0,3	0,1
O_6	0,2	0,3	0,2

способности в результате разрушения баббитового слоя) является наличие в спектре вибрации опоры низкочастотной ($0,5f_{об}$) спектральной составляющей.

Низкочастотная вибрация подшипниковых опор, вызванная внешним воздействием (субгармоническим резонансом), привела к разрушению опорных подшипников КНД. Разрушенные подшипники генерировали низкочастотную вибрацию и после устранения внешнего возбуждения. Длительный период работы агрегата с низкочастотной вибрацией объясняется тем, что изначально ее источник находился вне агрегата.

Расположение мест разрушений на вкладышах опорных подшипников КНД свидетельствует о наличии расцентровки турбина-КНД. Турбина находится выше и смещена вправо (если смотреть со стороны турбины) относительно КНД.

После проведения ремонта вибродиагностические обследования при пуске проводили на различных скоростях вращения привода. Первоначальное обследование при работе на азоте и скорости вращения 8640 об/мин, следующее — после перехода на природный газ и скорости вращения 9060 об/мин, окончательное — при полной нагрузке и скорости вращения 9180 об/мин. Результаты обследований представлены в табл. 4. Спектральные характеристики вибрации в точках 3 и 4 в горизонтальном направлении при различных скоростях вращения приведены на рис. 8 и 9.

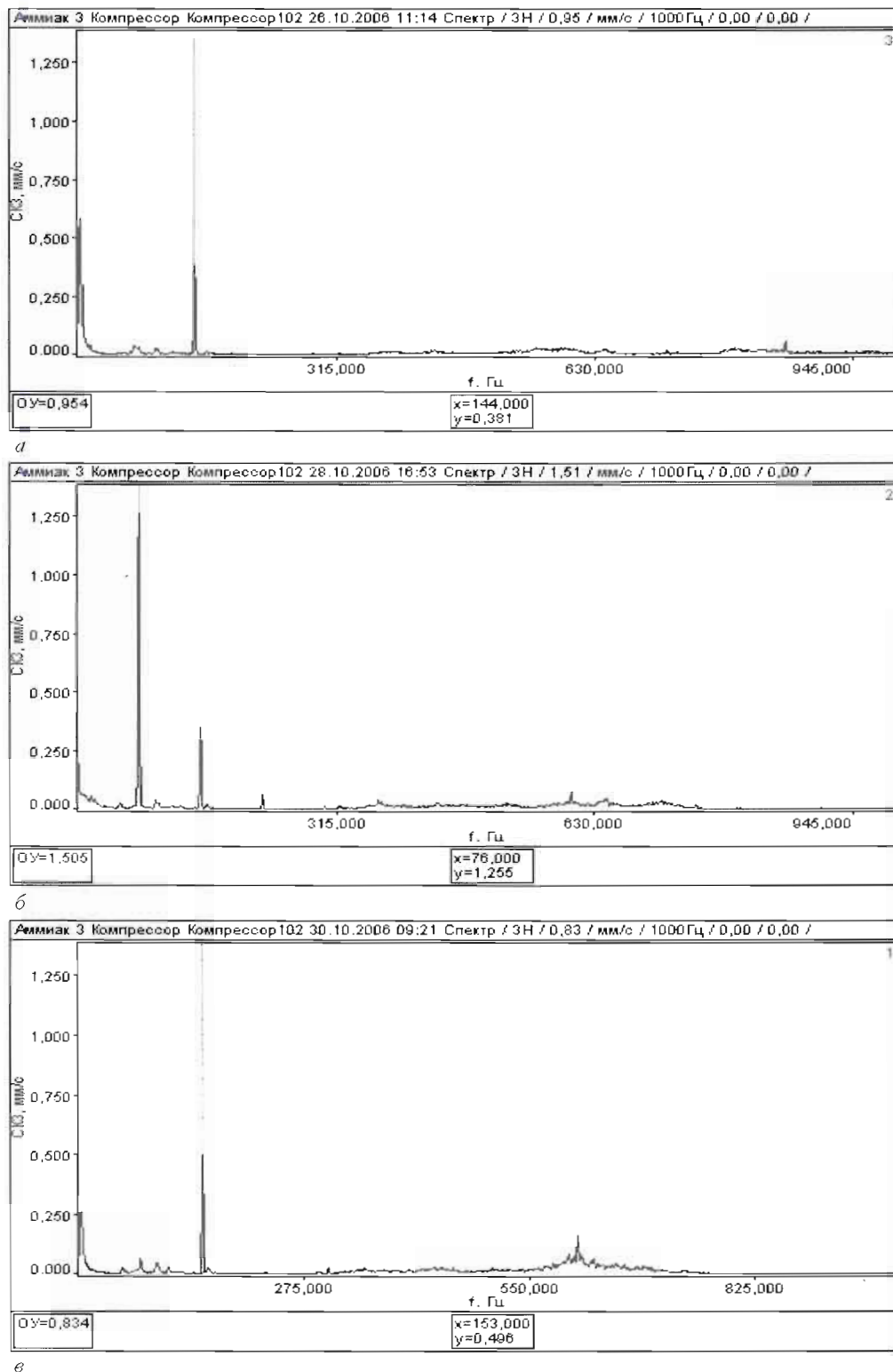


Рис. 8. Спектральные характеристики вибрации в точке 3 в горизонтальном направлении при различных скоростях вращения: а — 8640; б — 9060; в — 9180 об/мин

Выводы

При выходе из ремонта вибрационное состояние агрегата удовлетворительное и допускает его длительную эксплуатацию. По вибрационным параметрам агрегат доводки не требует, но длительная работа агрегата в диапазоне скоростей вращения 8800...9100 об/мин не допускается.

Причиной появления низкочастотной вибрации на корпусах подшипниковых опор КНД и КВД в горизонтальном направлении явился субгармонический резонанс системы компрессор-фундамент-присоединенные трубопроводы в рабочем диапазоне агрегата, возникший вследствие ослабления жесткостных связей в фундаменте.

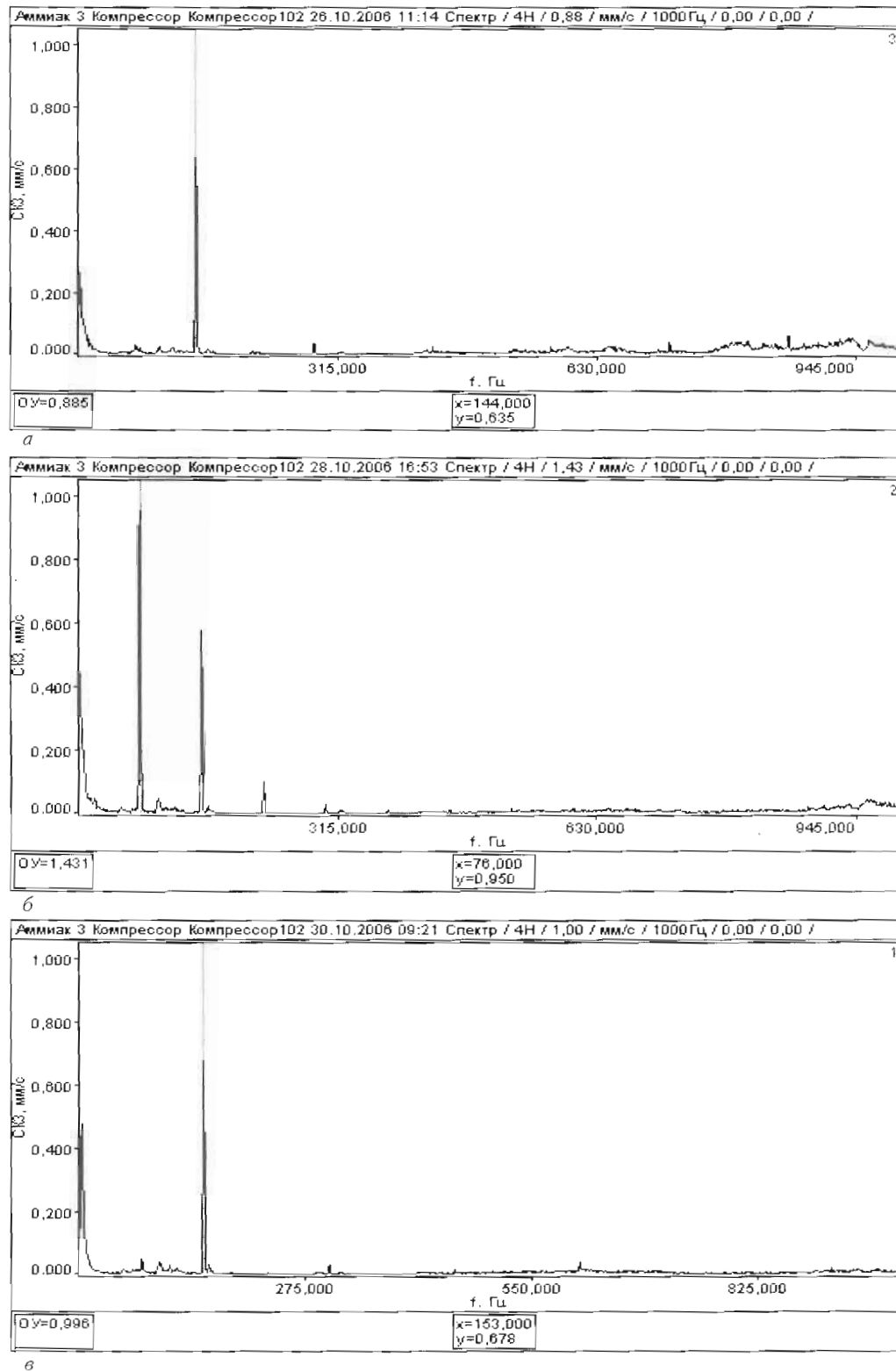


Рис. 9. Спектральные характеристики вибрации в точке 4 в горизонтальном направлении при различных скоростях вращения: а — 8640; б — 9060; в — 9180 об/мин

Отстройка рабочего диапазона от резонансной зоны выполнена путем повышения собственной частоты H-образной металлоконструкции между стойками фундамента добавлением дополнительных ребер жесткости.

ООО «ТРИЗ»,
г. Сумы

Поступила в редакцию
08.12.2006