

Вибрационные и виброударные нагрузки при механических испытаниях деталей и узлов машин

Искович-Лотоцкий Р. Д., д.т.н., профессор
Манжилевський О. Д., к.т.н., ст. преподаватель
Иванчук Я. В., к.т.н., доцент
Винницький національний технічний університет, Україна

Полезные вибрации, которые широко используются при проведении механических испытаний деталей и узлов машин, имитации реальных и граничных условий их эксплуатации. Необходимость в таких испытаниях обусловлена возрастающими требованиями к надежности приборов и механизмов. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований возникло научно обоснованное представление о механизме возникновения у испытуемых объектах повреждений и о методах их количественного оценивания [1-3].

Испытуемые объекты (ИО) содержат значительное количество конструктивных элементов различного назначения и сложности, которые неодинаково воспринимают воздействие механических вибраций (в том числе ударных, случайных и других периодических нагрузок) при изменении условий эксплуатации. Данные условия необходимо учитывать при разработке методик испытаний соответствующего специального оборудования.

Исследование неисправных ИО (приборов, узлов, соединений) дает возможность выявить две основные причины потери их надежности: усталостное разрушение конструктивных элементов и ослабление зажимов и резьбовых соединений. По результатам оценки условий эксплуатации и изучение особенностей различных повреждений определяются методы и условия испытаний, которые могут быть реализованы на испытательных установках [1].

Всю совокупность конструктивных элементов того или иного ИО, с целью изучения их реакции на вибрационные и виброударные воздействия, можно представить в виде простой линейной системы масс, пружин и демпферов, пример которой показан на рис. 1. Такая многомассовая система характеризуется приведенными коэффициентами жесткости (c_n) и демпфирования (β_n), которые определяются соответствующими параметрами взаимодействия i -х конструктивных элементов при известной массе m_i каждого из них. Эта система которые расположены на общей рабочей основе (вибростоле), которая осуществляет колебания по заданному закону. В случае совпадения собственных частот колебаний элементов системы f_{0i} , с частотой внешнего периодического влияния f_v обеспечивается интенсификация испытательного технологического процесса.

Имитация воздействия механических нагрузок при вибрационных или виброударных испытаниях возможна при использовании различных способов: синусоидального воздействия с фиксированной частотой (данный способ непригоден при необходимости проведения испытаний объектов, элементы которых имеют различные частоты резонанса, поскольку при его применении

обеспечивается резонанс только одного или нескольких элементов); синусоидального воздействия с частотой, которая медленно изменяется в диапазоне между двумя предельными значениями, при этом все конструктивные элементы и детали, подверженных вибрациям, постепенно приводятся в состояние резонанса; широкополосного стохастического воздействия (случайных вибраций), что скорее воспроизводит реальные условия эксплуатации (недостатком данного способа есть трудности с его реализацией); узкополосного стохастического воздействия с амплитудой, изменяющейся по случайному закону, при этом в многомассовой системе ИО в состояние резонанса может быть приведена только определена деталь или один конструктивный элемент; узкополосного стохастического воздействия, средняя частота которого медленно колеблется между двумя фиксированными частотами, позволяет воспроизвести почти все виды воздействий, которые встречаются на практике; ударного или импульсного, периодического воздействия на ИО.

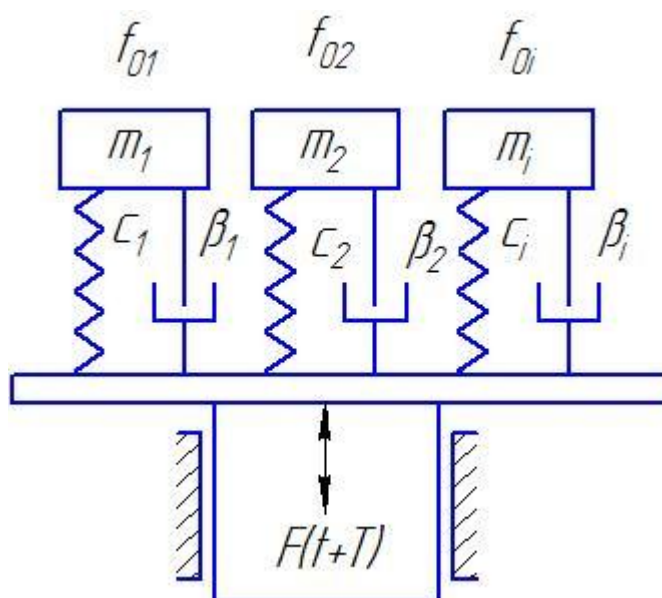


Рисунок 1 – Расчетная схема многомассового ИО

В каждом из указанных способов внешнее периодическое влияние на линейную систему ИО вызывает изменение ускорений элементов его конструкции по синусоидальному закону. Исследования [1] показали, что ускорение i -й массы $a_{m,i}$ пропорционально механическому напряжению в соответствующем упругом элементе. Это позволяет рассматривать величину $a_{m,i}$ как основной параметр нагрузки, а ускорение a_0 , что вызывает данная нагрузка – как параметр внешнего силового воздействия. Отношение ускорений $a_{m,i}/a_0 = A$ определяет передаточный коэффициент системы ИО.

На рис. 2 приведены графики, характеризующие изменение параметров воздействий на ИО, а также его реакцию. Сам ИО представлен в виде линейной упругой системы, подвергается воздействию внешней синусоидальной нагрузки с фиксированной частотой. Наибольшие напряжения в ИО возникают при совпадении его собственной частоты f_{0i} с фиксированной частотой синусоидальной нагрузки f_0 . Соответствующее внешнее ударное или импульсное

воздействие на ИО $a_0(t)$ характеризуется длительностью τ , что мало отличается от нуля. Реакция на такой ударное или импульсное внешнее воздействие $a_0(t)$ определяется зависимостью $a_{m,i}(t)$, которая показана на рис. 3 и может быть разбита на интервалы: ($t < \tau$ – текущая реакция на удар и $t > \tau$ – ударное последствие. При очень низких частотах ($f_0 \ll 1/\tau$ (рис. 3, б) реакция системы на удар имеет вид синусоидальных колебаний. Для частот f_0 сравнимых с $2/\tau$ (рис. 3, д), текущая реакция системы имеет первое пиковое значение $a'_{m,i}$ и последствие с первым пиковым значением $a''_{m,i}$. Для очень высоких частот $f_0 \gg 1/\tau$ (рис. 3, е) ускорение массы $a_{m,i}(t)$ квазистатически повторяет влияние $a_0(t)$ [1].

Для определения количественных параметров усталостных повреждений, которые возникают в ИО, необходимо установить их зависимость от числа воздействий, имеющих заданные амплитудные значения пиковых нагрузок, характеризующиеся ускорениями $a_{m,i}$, а также от критерия усталостных разрушений в элементах конструкции ИО. Полученные теоретические зависимости [1] подтверждены экспериментально. По ним можно рассчитать срок службы элементов системы ИО, что подвергается различным внешним периодическим силовым воздействиям.

Виды испытаний

Механические испытания по функциональному назначению разделяются на испытания на прочность, во время которых при определенных условиях эксплуатации оценивается сопротивление конструктивных элементов ИО разрушению, а также для испытания работоспособности, при которых определяется способность ИО нормально функционировать в заданных условиях эксплуатации. Обычно продолжительность испытаний работоспособности ИО меньше, чем продолжительность испытаний прочности. В связи с тем, что непосредственной причиной возникновения повреждений и выхода из строя ИО является ускорение, влияющие на его конструктивные элементы, на практике для испытаний работоспособности и прочности обычно используют одинаковые методы и испытательные установки.

Испытание на прочность проводятся выборочно и предназначены для определения в ИО слабых мест, которые возникают в следствии повреждения элементов конструкции или усталости материала. Для уменьшения времени проведения испытаний и достижения их наибольшего соответствия эксплуатационным условиям применяют так называемый коэффициент жесткости [1, 2]. Минимальная продолжительность испытаний или наименьшее число ударов обычно определяют путем теоретического анализа расчетной модели или проведением соответствующих экспериментов. Считают, что ИО выдержал испытания, если после его окончания визуально не обнаруживаются механические повреждения или изменения. Испытание работоспособности может быть как выборочным, так и сплошным. Результаты испытаний считаются успешными, если ИО при внешнем силовом воздействии работает безупречно, в соответствии с техническими паспортными данными. Технологические испытания проводятся в процессе изготовления изделий. Целью их является выявление технологических причин преждевременного выхода из строя изделия или возникновения механических дефектов в резьбовых соединениях и в местах

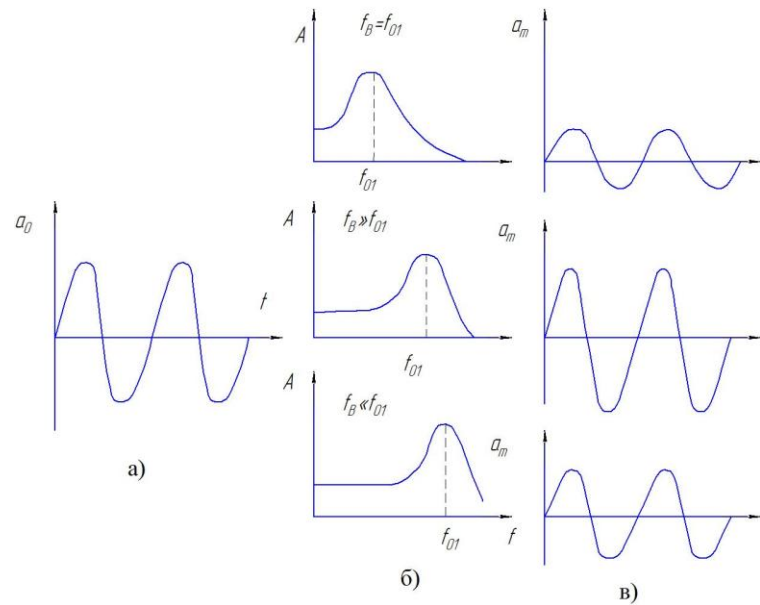


Рисунок 2 – Характер влияния на ИО внешней синусоидальной нагрузки с фиксированной частотой: а) – внешнее влияние; б) – зависимость передаточного коэффициента от частоты внешнего влияния; в) – реакция системы

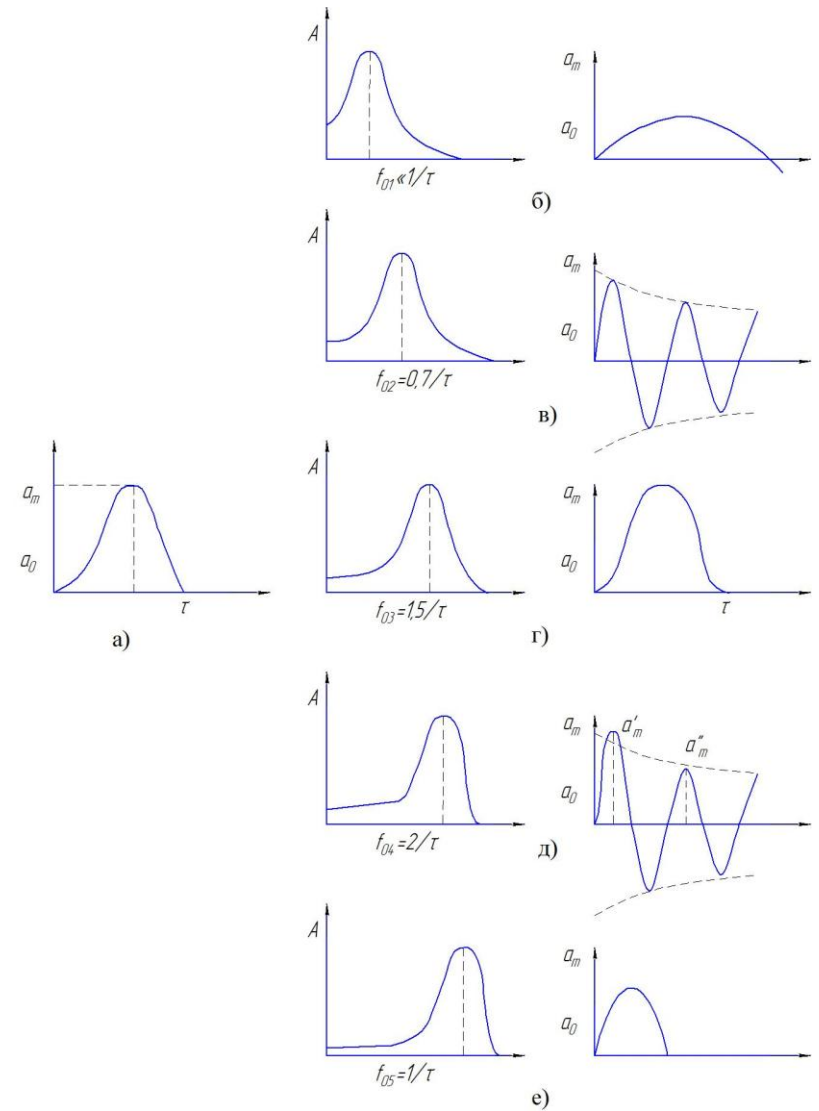


Рисунок 3 – Реакция системы ИО на ударное внешнее влияние: а) – внешнее влияние; б - е) – зависимость передаточного коэффициента от частоты внешнего влияния (слева) и реакция системы (справа) $\mathbf{a}_0(t) = \mathbf{a}_0 \cdot \sin \pi t / \tau$; $0 < t < \tau$

холодных паек. При технологических испытаниях успешно применяются воздействия с малым числом ударов и с небольшими ускорениями.

Способы испытаний

Методика проведения испытаний разрабатывается на основе исходных требований к работоспособности испытываемой системы (соответствии основных рабочих параметров паспортным данным) или прочности ее элементов с анализом возможности реализации способов испытаний на имеющемся испытательном оборудовании и оценкой его эффективности. Испытание на работоспособность и прочность заключаются в определении ряда параметров ИО при воздействии внешних механических нагрузок, обеспечивающих реальные условия эксплуатации системы. К примеру, при испытаниях на работоспособность проверяют такие параметры: устойчивость сопротивления однократной, многократной и многократной циклической (усталостной) нагрузки. Подобным исследованиям подвергаются радио- и электротехнические приборы, машины и установки, узлы и детали машин, выходящих из строя вследствие динамического и усталостного разрушения, а также ослабление зажимов и резьбовых соединений.

Выбор способа испытаний определяется объемом и содержанием данных о ИО и условия его эксплуатации, а также наличием испытательного оборудования. Наиболее распространенными являются два способа проведения механических испытаний: на специальном испытательном оборудовании, например, при создании принудительных механических колебаний (вибраций) ИО по синусоидальному закону с фиксированной частотой; на обычных грузовых транспортных средствах при создании механических колебаний ИО по закону, который определяется рельефом дороги и скоростью транспортного средства. Однако указанные способы проведения механических испытаний не всегда обеспечивают исчерпывающую информация о параметрах ИО, а кроме того, они являются неэкономическими и длительными в реализации. В настоящее время разработаны новые способы проведения механических испытаний ИО, которые наиболее полно учитывают реальные условия эксплуатации. Эффективность процесса испытаний определяется ускорением силового воздействия при поочередном воздействии на ИО синусоидальной вибрации, ударной нагрузки и стохастических вибраций. Указанные внешние воздействия, в свою очередь, могут быть классифицированы следующим образом.

Синусоидальная вибрация: с фиксированной частотой; с частотой, которая ступенчато изменяется; с частотой, которая плавно изменяется; постоянной продолжительности; с постоянным числом циклов.

Ударная нагрузка: отдельными ударами; серией ударов; из заданным изменением ударного импульса; виброударная.

Стохастическая вибрация с фиксированными частотами; широкополосным или узкополосным шумом; с частотой, которая плавно меняется, с узкополосным шумом, который плавно изменяется; с многократным узкополосным шумом.

Эффективность применения внешних воздействий определенного типа оценивается с помощью исходной упрощенной линейной модели (см. рис. 1), на

которой указываются конструктивные элементы с различными резонансными частотами от 10 до 100 Гц [1]. Рассмотрим, характерные типы внешних воздействий. При внешнем воздействии на ИО синусоидальной вибрации с фиксированной частотой в течение промежутка времени испытаний t_n усилия нагрузки определяется виброускорением с амплитудным значением \bar{a}_0 и частотой внешнего воздействия f_b . Совпадение собственной частоты f_{0i} определенного конструктивного элемента m_i с частотой внешнего воздействия f_b соответствует резонансной нагрузке с ускорением a_p , что значительно превышает \bar{a}_0 . Такой способ внешнего влияния на ИО целесообразно при известных частотах f_b , которые возникают в условиях реальной эксплуатации или транспортировки.

Испытание внешним воздействием с частотой, которая ступенчато меняется, рекомендуются для ИО определенными резонансными частотами конструктивных элементов. При этом важно правильно установить последовательность ступенчатого изменения частот внешнего воздействия. Преимущество данного способа испытаний заключается в том, что они проводятся только на тех частотах, при которых конструктивные элементы ИО подвергаются наибольшей нагрузке. Недостатком способа является трудности с определением резонансных частот для систем ИО. Целесообразным является плавное изменение частоты нагрузки в определенном диапазоне, в результате которой каждый конструктивный элемент ИО, который имеет расчетную жесткость, рано или поздно окажется в режиме резонанса.

Испытания отдельными ударами необходимо проводить через значительные интервалы времени, чтобы к моменту начала воздействия каждого следующего удара амплитуды колебаний всех конструктивных элементов ИО уменьшались бы до определенной величины. Последнее достигается выбором и обеспечением соответствующего закона изменения ударного импульса. Основой для определения условий испытаний могут служить зависимости ударного ускорения от времени, а также вид ударного спектра.

В последнее время в промышленности нашел применение способ испытания влиянием на ИО ударами сложной (комплексной) формы. Данный способ является прогрессивным, но не получил широкого распространения из-за больших расходов на изготовление испытательных установок способных достаточно точно воспроизводить необходимую форму сложных ударных импульсов. Способы испытаний при создании случайных стохастических воздействий точно отражают реальные условия эксплуатации. Однако большого распространения и эти способы также не получили из-за большой трудоемкости и значительных расходов на изготовление специального испытательного оборудования для их реализации.

Условия испытаний

Для определения рабочих параметров испытаний при выбранном способе их проведения необходимо иметь данные о жесткости и продолжительность исследований, а также о специфических параметрах и характеристики внешнего воздействия.

Жесткость испытаний находится в прямой зависимости от заданного значения ускорения. Например, для случая ударного влияния определяющим параметром является максимальное ударное ускорение. Продолжительность испытаний зависит от способа реализации внешнего воздействия, вида механической модели ИО и реальных условий эксплуатации.

Специфические параметры внешнего воздействия определяются, в основном, механической моделью ИО, условиями эксплуатации и техническими возможностями средств испытаний. Испытаниям вибрационными воздействиями подвергаются приборы, устройства и соединения, которые по условиям эксплуатации должны сохранять работоспособность и иметь соответствующие характеристики прочности при воздействии на них импульсных нагрузок. Испытания при помощи серии ударных воздействий рекомендуется проводить для воспроизведения нагрузок, возникающих при часто повторяемых в процессах эксплуатации и транспортировки ИО толчках и встряхиваниях. Для проведения испытаний ударными воздействиями рекомендуется применять полусинусоидальные удары [1].

В работе [1] приведены рекомендуемые режимы испытаний приложением ударных воздействий. Ударные воздействия воспроизводят режим эпизодической импульсной нагрузки ИО при эксплуатации или транспортировке.

Кроме полусинусоидальных импульсов, в качестве внешнего влияния при испытаниях можно использовать треугольные и трапецеидальной ударные импульсы. В работе [1] приведены рекомендуемые значения относительных (a_0 / g) пиковых ускорений и продолжительности действия удара (τ) на ИО в зависимости от необходимого режима испытаний.

Испытательные стенды

Вышеупомянутые способы и условия испытаний можно реализовать на малогабаритных вибрационных стендах с гидроимпульсным приводом (ГИП) (рис. 4 - 5).

Вибростенд, который изображен на рис. 4, в предназначен для создания на дифференциальном плунжере 2 вибростола кратковременных периодических нагрузок, что обеспечивает в моменты разрядки одноциклового гидроаккумулятора 6 в полость исполнительного гидроцилиндра (основы) значительные мгновенные мощности. Благодаря возможности реализации таких вибрационных и виброударных нагрузок импульсный вибростенд можно рекомендовать для применения в составе испытательных машин. Управление ГИП вибростенда осуществляется встроенным золотником 5, который взаимодействует с шариком 7. При достижении в гидросистеме расчетного давления настраиваемый золотник 5 перемещается влево и открывает доступ рабочей жидкости с напорной гидролинии в полость В, отделяя ее одновременно от слива. При этом нарушается условие устойчивой посадки дифференциального плунжера 2 на кольцо, которое герметизирует полости А и В. На плунжер 2 начинает действовать направленная вверх сила, соответствующая импульсному увеличению рабочей нагрузки на ИО. При обратных ходах вибростола под действием сил тяжести и упругости элементов

упругого возврата в моменты столкновения вибростола и основы генерируются ударные нагрузки.

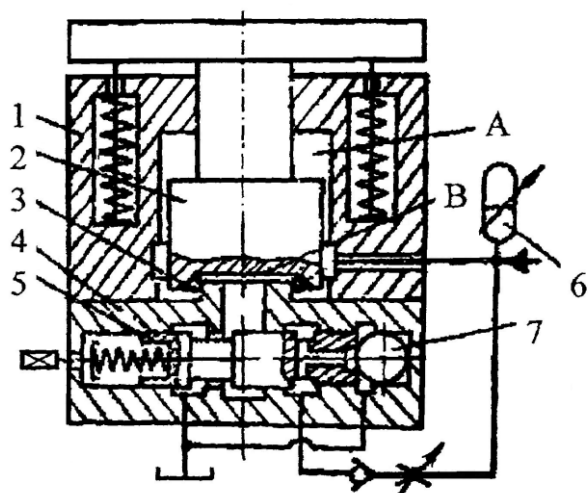


Рисунок 4 – Малогабаритный вибростенд на основе ГИП

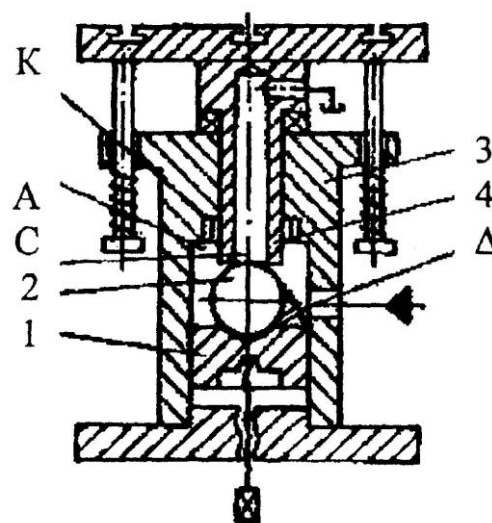


Рисунок 5 – Малогабаритный вибростенд на основе ГИП С шариковым запорным элементом

Вибростенд, который изображен на рис. 5 имеет сравнительно простой узел управления приводом вибраций и незначительные габаритные размеры за счет выполнения исполнительного элемента в виде подвижного плунжера с осевой расточкой, к которому под влиянием перепада давлений между полостями А и С прижат шариковый запорный элемент 2. Расчетный зазор Δ , определяющий необходимый перепад давлений, устанавливается с помощью подвижного поршня 1, который под влиянием регулировочного винта перемещается в расточке цилиндра 3. При повышении давления в полости А плунжер 4 перемещается вверх, шариковый запорный элемент 2 отрывается от седла на плунжере 4, что вызывает падение давления в полости А и возвращение рабочего стола вибростенда в исходное положение. Когда между шариковым запорным элементом 2, что садится на поршень 1, и кромками седла на плунжере 4 установится зазор соответствующий исходному зазору Δ , между полостями А и С восстанавливается необходимый перепад давлений, при котором шариковый запорный элемент 2 будет прижат к седлу.

На предлагаемом оборудовании можно достаточно точно имитировать реальные условия эксплуатации. Для правильного решения поставленной задачи осуществляется анализ нагрузок, которым подвергаются ИО в реальных условиях работы. Например, при погрузке и разгрузке изделий преобладают одиночные удары, непосредственно на рабочем месте создаются стационарные условия эксплуатации, при транспортировке на автомобилях возникают стохастические (случайные) воздействия. После анализа условий эксплуатации решается ряд важных задач: проводится оценка влияния сил на ИО, которые вызывают повреждения, в зависимости от различных условий эксплуатации; выбираются условия испытаний, соответствующие заданным условиям эксплуатации; осуществляется определение допустимых условий эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ленк А. Механические испытания приборов и аппаратов / А. Ленк, Ю. Ренетц – М.; Мир, 1976. – 264с.
2. Искович-Лотоцкий Р. Д. Машины вибрационного и виброударного действия / Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев, В. А. Крат. – К.: Техніка, 1982. – 208 с. : ил.
3. Искович-Лотоцький Р. Д. Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій. Монографія/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Обертюх Р. Р., Севостьянов І. В. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 291 с