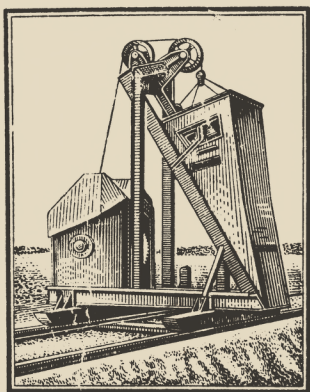


АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

**И. И. АРТОБОЛЕВСКИЙ,
А. П. БЕССОНОВ, А. В. ШЛЯХТИН**

О МАШИНАХ ВИБРАЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

Академик
И. И. АРТОБОЛЕВСКИЙ,
кандидат технических наук
А. П. БЕССОНОВ,
кандидат технических наук
А. В. ШЛЯХТИН

О МАШИНАХ ВИБРАЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
Москва—1956

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

академик

П. А. РЕБИНДЕР

ВВЕДЕНИЕ

При осуществлении того или иного технологического процесса машинами или механизмами ученые и инженеры стремятся к тому, чтобы процесс был максимально эффективным. Эффективность технологических процессов определяется многими факторами, среди которых основные: высокая производительность процесса, его экономичность, безопасность для обслуживающего персонала и т. д.

Для повышения эффективности технологических процессов, выполняемых современными машинами, ученые и инженеры стремятся использовать различные физические и химические явления.

Одним из таких явлений, с которыми мы сталкиваемся в жизни почти на каждом шагу, являются механические колебания, т. е. периодические достаточно малые перемещения систем. В технике с явлением механических колебаний столкнулись уже давно. Еще во времена наполеоновских войн в Испании обрушился цепной мост вследствие совпадения собственной частоты колебаний с частотой возмущающей силы; эти колебания были вызваны колонной солдат, шедших через мост в ногу. В марте 1890 г. произошла крупная авария океанского пассажирского парохода вследствие поперечных колебаний гребного вала. Одна машина была полностью разбита, корпус судна и другая машина получили повреждения.

Можно указать и ряд других примеров, когда колебания в машинах являются причиной их ненормальной работы или аварийной поломки. В этих случаях изучение колебаний имеет цель ослабить вредное воздействие вибраций на машины, строительные конструкции или отдельные узлы и детали.

Развитие теоретических и экспериментальных методов исследования позволило найти ряд эффективных средств борьбы с механическими колебаниями. При изучении колебаний был подмечен также ряд интересных явлений. Например, фундаменты с установленными на них двигателями внутреннего сгорания в отдельных случаях давали значительную осадку; некоторые химические реакции в жидкостях, подверженных воздействию вибраций, протекали быстрее, чем в спокойном состоянии; наблюдалось также уплотнение материалов при колебаниях, перемещение сыпучих сред на вибрирующих поверхностях, погружение твердых тел с большим удельным весом в вязкую или сыпучую среду с меньшим удельным весом при встряхивании.

Все эти явления обратили на себя внимание ученых и инженеров и заставили их задуматься над вопросом о возможности использования механических колебаний для эффективного проведения различных технологических процессов. Стали создаваться специальные вибрационные машины, в которых рабочему органу сообщалась вибрация. Они способствовали значительному повышению производительности труда, снижению трудоемкости и себестоимости производства работ и получили весьма широкое распространение во многих областях народного хозяйства.

В настоящее время вибромашины используются при выполнении самых разнообразных технологических операций, а именно: уплотнение, сепарация, транспортировка и измельчение различных материалов; погружение в грунт свай, шпунтов, труб, бурение горных пород, сверление металлов, пахота, заливка металла в формы, снятие напряжений в отливках, испытания различных контрольно-измерительных приборов и др.; вибромашины нашли применение также и в быту.

Этот далеко не полный перечень процессов, в которых успешно применяются вибрационные машины, указывает на их важную роль в современном производстве. Опыт использования вибрационных машин открывает еще более широкие перспективы их внедрения. Особенное значение будут иметь вибрационные режимы для технологических процессов, если будут разработаны методы, позволяющие воспроизводить колебания заданных амплитуд при высокой частоте самих колебаний. Большие возможности мо-

гут открыться, если будут созданы машины с перенстройкой частот и амплитуд колебаний. Важнейшее значение для развития вибрационных машин будет иметь создание новых видов конструкций и новых принципов работы возбудителей колебаний и т. д.

В данной брошюре рассматриваются основные типы вибромашин и их схемы с описанием принципа действия, даются принципиальные основы расчета вибромашин, отмечаются трудности, которые при этом возникают. В заключение указываются некоторые основные направления дальнейших исследований в области практического использования вибрационных машин.

1. ВРЕДНОЕ ДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИЙ

Развитие промышленности в середине XIX столетия выдвигало задачи создания более быстроходных машин, однако с увеличением скорости движения машин инженеры стали сталкиваться с ощутимым действием сил инерции. Силы инерции появляются в том случае, если материальная точка движется неравномерно или непрямолинейно, причем чем больше ускорение движения точки, тем больше ее сила инерции.

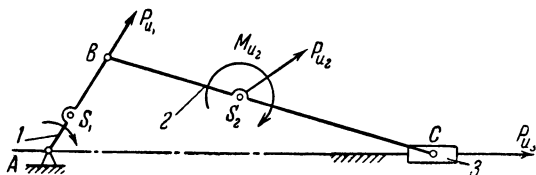


Рис. 1

Отдельные части машин — ее звенья — обычно движутся неравномерно и непрямолинейно. Например, в широко применяемом в различных машинах кривошипно-шатунном механизме (рис. 1) имеются три подвижных звена: кривошип 1, шатун 2 и ползун 3. При работе этого механизма все звенья развивают силы инерции по следующим причинам: кривошип 1, в общем случае, вращается неравномерно, хотя при некоторых условиях неравномерность вращения кривошипа бывает незначительной и практически движение его можно считать равно-

мерным; ползун 3 движется прямолинейно возвратно-поступательно с остановками в крайних положениях, а значит неравномерно; шатун 2 совершает сложное движение, которое в каждый момент времени можно условно представить как сумму двух движений: мгновенно-поступательного вместе с центром тяжести этого звена и мгновенно-вращательного около этого центра тяжести; таким образом, шатун движется и непрямолинейно и неравномерно.

Силы инерции отдельных звеньев механизма являются распределенными силами, так как звенья можно рассматривать как сплошь состоящие из материальных точек. В инженерных расчетах обычно силы инерции учитывают по их суммарному воздействию. Так, в рассматриваемом примере силы инерции можно учитывать следующим образом:

а) силы инерции всех материальных точек кривошипа можно заменить действием одной *равнодействующей* силы инерции, которую, если принять вращение кривошипа равномерным, можно подсчитать по формуле

$$p_{u_1} = -m_1 a_{S_1} = -m_1 l_{AS_1} \omega_1^2,$$

где p_{u_1} — сила инерции кривошипа;

m_1 — масса кривошипа;

a_{S_1} — ускорение центра тяжести кривошипа;

l_{AS_1} — расстояние от оси вращения кривошипа до его центра тяжести;

ω_1 — угловая скорость вращения кривошипа.

Условно предполагается, что эта сила приложена в центре тяжести кривошипа S_1 и направлена в сторону, обратную ускорению центра тяжести a_{S_1} , о чем говорит знак минус;

б) при поступательном движении тела все точки движутся с одинаковым ускорением, поэтому суммарное действие сил инерции ползуна может быть выражено формулой

$$p_{u_3} = -m_3 a_c.$$

где p_{u_3} — сила инерции ползуна;

m_3 — масса ползуна;

a_c — ускорение поступательного движения ползуна.

Условно предполагается, что эта сила приложена в центре тяжести, который обычно совпадает с шарниром C , и направлена в сторону, обратную ускорению движения ползуна;

в) рассматривая движение шатуна как сложное, состоящее из мгновенно-поступательного и мгновенно-вращательного, можно и суммарные силы инерции свести к двум воздействиям:

силе инерции, приложенной в центре тяжести S_2 шатуна и равной

$$p_{u_2} = -m_2 a_{S_2},$$

где p_{u_2} — сила инерции шатуна;

m_2 — масса шатуна;

a_{S_2} — ускорение центра тяжести шатуна, и моменту от сил инерции, равному

$$M_{u_2} = -I_{S_2} \varepsilon_2,$$

где M_{u_2} — момент от сил инерции шатуна;

I_{S_2} — момент инерции шатуна;

ε_2 — угловое ускорение шатуна.

Сила инерции шатуна направлена в сторону, обратную ускорению a_{S_2} , а момент от сил инерции направлен в сторону, обратную угловому ускорению шатуна ε_2 .

Массы и моменты инерции звеньев при движении машины обычно являются постоянными величинами, а ускорения меняются по величинам и направлениям, причем при установившемся движении механизма через определенный период значения ускорений повторяются. Следовательно, ускорения, а значит и силы инерции, являются периодически изменяющимися величинами.

С увеличением скорости движения машины увеличиваются ускорения всех ее звеньев, вот почему особенно сильно ощущаются вредные воздействия сил инерции при переходе от тихоходных к быстроходным машинам.

Внешнее проявление периодически изменяющихся сил инерции, с которым встретились машиностроители, состояло в том, что машину и раму или фундамент, на котором она устанавливалась, начинало трясти, раскачивать, причем это сопровождалось неприятным шумом. Эти перемещения в машине, носящие периодический характер, называют обычно в и б р а ц и е й.

Таким образом, мы видим, что силы инерции могут быть причиной вибраций в машинах. Конечно, силы инерции являются далеко не единственной причиной колебаний в машинах. Так, например, периодически изменяющиеся внешние силы (например, давление газа в цилиндре двигателя внутреннего сгорания) могут также порождать колебания валов двигателей, т. е. так называемые крутильные колебания.

Колебания, возникающие в машинах, вызывают дополнительные динамические реакции в сочленениях машин, что приводит к их повышенному износу, и увеличивают расход смазочных материалов. Отдельные звенья машин вследствие инерционных сил подвергаются динамическим нагрузкам, переменным по величинам и направлениям, которые дополнительно к основным нагрузкам (на преодоление которых рассчитана машина) сжимают и растягивают, скручивают и изгибают детали машин. Поскольку силы инерции являются периодически изменяющимися силами, то напряжения в материале, из которого сделаны детали, получаются знакопеременными; это снижает прочность материала, так как материал «устает», что иногда даже приводит к усталостному разрушению.

Под термином «усталость материалов» подразумевают разрушение материала при постепенном развитии трещины усталости, которая образуется в местах наибольшей концентрации напряжений. Кроме переменности напряжений, для образования трещины необходимо, чтобы действительная величина наибольшего напряжения превысила определенную границу, называемую пределом усталости, или пределом выносливости.

Очень неприятные действия может оказывать колеблющаяся машина на раму или фундамент, на котором она закреплена. В этих случаях вибрации могут вызывать поломки рам, трещины в фундаментах, передаваться на другие объекты и нарушать нормальные условия их работы. Известно, например, что точные приборы очень чувствительны к вибрациям, которые нарушают правильность показаний приборов, а иногда вообще приводят прибор к поломке. Вибрации в различных точных станках искажают правильность форм и снижают точность изготовления деталей, сильно ухудшают чистоту обработки поверхности.

Вредное физиологическое воздействие оказывают вибрации и на организм человека. Тряска и шум, которыми сопровождаются вибрации, приводят к общей усталости организма. Наблюдение за вибрирующими стрелками приборов и дрожащими предметами быстро утомляет зрение и вызывает головные боли.

Можно привести еще много примеров вредного действия колебаний в инженерных конструкциях. Мы не касаемся здесь колебательных процессов в сооружениях — мостах, фермах, зданиях, корпусах кораблей, самолетов и т. п. Укажем только, что известны случаи разрушения таких конструкций исключительно по причине вибраций. Известно также, что колебания приводили иногда к большим авариям — тяжелые поезда сходили с рельс, обрывались тросы на шахтных подъемниках и т. д.

К настоящему времени имеются очень глубокие исследования по вопросам колебаний, позволяющие инженерам предсказывать возможные колебания в объектах и принимать меры к их устранению.

Прежде всего желательно полностью уничтожить или ослабить сам источник колебаний в машинах. Для этой цели отдельные быстровращающиеся детали или узлы стараются проектировать такой формы, чтобы при вращении они не оказывали дополнительных к силам веса динамических давлений на подшипники. Но в процессе изготовления таких деталей получаются отклонения в размерах, формах; материал также имеет неодинаковую плотность в различных точках деталей. Поэтому даже правильно спроектированная деталь будет развивать значительные силы инерции, которые будут передаваться на подшипники. Чтобы быстровращающаяся деталь все же не оказывала динамических давлений на опоры, в технологический процесс ее изготовления вводится операция — балансировка, которая выполняется на специальных балансировочных машинах.

При балансировке уже готовой детали у нее снимается или добавляется часть материала, чем она доводится до такого состояния, что при вращении почти не оказывает динамических давлений на опоры. В современных машинах балансировке подвергаются роторы электродвигателей, турбогенераторов, газовых и паровых турбин и т. д. Чтобы уравновесить неправильной геометрической формы

вращающиеся и невращающиеся детали, в машину вводятся дополнительные детали — противовесы, которые подбирают так, чтобы они при движении развивали силы инерции, способные частично или полностью уравновесить инерционные силы неуравновешенных деталей. Кроме того, для снижения эффекта колебаний на машинах ставят специальные устройства — успокоители колебаний (демпферы); так, например, широко известны демпферы крутильных колебаний валов.

Несмотря на все принятые инженерами меры все же весьма часто в машинах остаются неуравновешенные силы и, чтобы они не передавались на фундамент и окружающие объекты, машину закрепляют к фундаменту на упругих элементах — амортизаторах. Очень широко используются амортизаторы в различных транспортных устройствах для упругой подвески экипажей, платформ, вагонов и т. п.; особое место занимает амортизация приборных досок на самолетах, судах и других транспортных устройствах, а также при транспортировке точной механической и электронной аппаратуры и оборудования. Таким образом, борьба с вредным эффектом вибраций в машинах является важным вопросом современной науки и техники, и этой борьбе ученые и инженеры уделяют громадное внимание.

2. ВИБРАЦИОННЫЕ МАШИНЫ И ПРИНЦИПЫ ИХ ДЕЙСТВИЯ

В настоящее время вибрационные механизмы получают все большее распространение в различных отраслях промышленности и сельском хозяйстве. В горнорудной и угольной промышленности с помощью вибраций разделяют (обогащают), дробят, измельчают и транспортируют руды и угли. В строительном деле производят глубинное и поверхностное уплотнение бетона, грунтов и насыпей, транспортируют, дробят, измельчают и просеивают различные материалы, погружают вибрационным методом сваи, шпунты и т. д. В сельском хозяйстве и пищевой промышленности вибрационные механизмы используются для просеивания зерна, сахара, муки и других продуктов.

Ведутся исследования по использованию вибрационных принципов при пахоте земли, очистке ковшей от грунта и бетона в различных ковшевых машинах, механиче-

ской обработке металлов, отливке деталей в формы и многих других видах работ. Новый принцип ведения технологических процессов с помощью вибраций охватывает все новые и новые отрасли народного хозяйства. Это объясняется тем, что обрабатываемые среды или твердые тела становятся более «податливыми», если их подвергнуть режиму вибраций, что обычно способствует интенсификации технологического процесса.

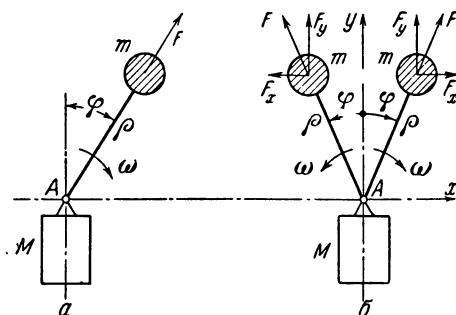


Рис. 2

Вибрационные машины действуют по принципу создания колебаний и передаче их через вибрирующий орган обрабатываемому объекту. Таким образом, одним из главных узлов вибростанов является возбудитель колебаний — вибратор. В настоящее время известно несколько типов вибраторов: 1) дебалансный вибратор, 2) дебалансный вибратор направленного действия, 3) бегунковый вибратор планетарного типа, 4) электромагнитный вибратор. Рассмотрим механизм возбуждения колебаний у каждого из этих вибраторов.

1. Дебалансный вибратор. Устройство дебалансного вибратора показано на рис. 2, а. Неуравновешенная масса m , называемая дебалансом, вращается около оси A с угловой скоростью ω и развивает центробежную силу инерции F , равную

$$F = m\rho\omega^2.$$

Если дебаланс вращается с постоянной скоростью ω , то сила F будет постоянной по величине, а по направле-

нию все время будет изменяться, вращаясь с такой же постоянной скоростью ω , как и дебаланс. Таким образом, сила инерции дебаланса через опору A передается массе M , с которой обычно и связывается рабочий орган вибромашины. Если бы на массу M не действовали бы другие никакие силы, кроме F , то она совершала бы вращательное движение. В общем же случае форма движения массы M определяется характером ее подвески к неподвижной части машины и физико-механическими свойствами среды, с которой взаимодействует рабочий орган машины.

2. Дебалансный вибратор направленного действия. На рис. 2, б показан дебалансный вибратор направленного действия, который отличается от предыдущего вибратора лишь тем, что у него имеется два дебаланса, которые вращаются в противоположные стороны с одинаковой угловой скоростью.

Такие дебалансы в любой момент времени отклоняются от оси y на одинаковый угол φ , т. е. они вращаются синхронно и синфазно. Силу инерции F каждого дебаланса можно разложить по координатным осям на составляющие F_x и F_y . Тогда, как видно из рисунка, горизонтальные составляющие F_x взаимно уравновешиваются, а вертикальные составляющие F_y складываются, образуя суммарную силу инерции P_u , направленную вдоль оси y и равную

$$P_u = 2F_y = 2F \cos \varphi = 2m\omega^2 r \cos \varphi.$$

Эта сила является периодической функцией угла поворота φ ; так как при постоянной угловой скорости угол φ равен ωt , то сила инерции P_u является периодической функцией времени

$$P_u = 2m\omega^2 r \cos \omega t.$$

Максимальное значение силы инерции P_u , равное $2m\omega^2 r$, называют амплитудным значением силы инерции дебаланса. Величина силы инерции P_u меняется по закону косинуса.

Таким образом, возмущающая сила инерции дебалансного вибратора направленного действия по величине меняется по гармоническому закону, а направление дей-

ствия этой силы всегда совпадает с осью y , отчего вибратор и получил название вибратора направленного действия.

3. Бегунковый вибратор планетарного типа. Бегунковый вибратор планетарного типа (рис. 3) является третьим типом механического возбудителя колебаний. Принцип возбуждения колебаний состоит в том, что масса m (бегунок) перекачивается по беговой дорожке массы M , вызывая тем самым ее колебание. С массой M

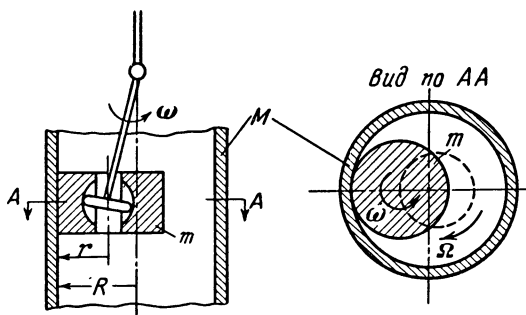


Рис. 3

связывается рабочий орган машины, который непосредственно взаимодействует с обрабатываемой средой, поэтому характер движения массы M будет зависеть от физико-механических свойств среды, а также от способа подвески массы M к неподвижному основанию.

При сообщении массе m угловой скорости вращения ω от электродвигателя, центр тяжести этой массы при обкатке ее по беговой дорожке будет вращаться с измененной угловой скоростью Ω , зависящей от соотношения радиусов бегунка r и бегунковой дорожки R . Поэтому такие вибраторы позволяют получить высокие частоты, что важно для создания высокочастотных вибрационных механизмов. К числу достоинств бегунковых вибраторов относится также тот факт, что в них отсутствуют подшипники, которые ненадежно работают в условиях вибраций.

4. Электромагнитный вибратор. В вибромашинах применяются также электромагнитные вибраторы; они позволяют получать непосредственно возвратно-

поступательное движение рабочего органа. В качестве возмущающей силы в них действуют не центробежные силы инерции как в электромеханических вибраторах, а силы электромагнитного притяжения. Преимущество электромагнитных вибраторов по сравнению с другими типами состоит в том, что они более просты конструктивно, удобны и надежны в эксплуатации. Недостатками этих вибраторов являются сравнительно большой вес, а также шум при работе.

Принцип действия электромагнитных вибраторов основан на хорошо известном явлении. При прохождении тока через катушку с железным сердечником последний намагничивается. Если ток прекращается, сердечник теряет магнитные свойства. Катушка электромагнита соединена с подвижной частью вибратора (якорем) посредством упругой связи. Пульсирующее напряжение получается путем выпрямления переменного тока в специальных устройствах — выпрямителях. Промышленный ток имеет частоту колебаний 50 периодов в секунду: полпериода ток идет в одном направлении и полпериода в обратном. Так как выпрямитель пропускает ток только в одном направлении, то в течение полпериода ток будет отсутствовать и электромагнит будет намагничиваться и размагничиваться 50 раз в секунду, т. е. система будет совершать 3000 колебаний в минуту. Примером такого вибратора может служить электровибратор с селеновым выпрямителем.

Известны другие способы получения пульсирующего напряжения, например посредством системы с ионным управлением. В этом случае частота колебаний электромагнитного вибратора может варьироваться в широких пределах путем изменения жесткости упругой связи. В электромагнитном вибраторе, спроектированном Институтом механической обработки полезных ископаемых, применена специальная схема, в которой катушки электромагнита питаются от сети переменного и постоянного токов. В результате сложения переменных и постоянных магнитных потоков на якорь вибратора действует переменная сила притяжения. Этот вибратор имеет частоту колебаний 50 герц. Наряду с рассмотренными типами в вибромашинах применяются пневматические вибраторы, приводимые в действие сжатым воздухом.

Рассмотрим теперь некоторые типы вибрационных машин, которые уже получили применение в различных отраслях промышленности.

Вибрационные уплотнительные машины. При строительстве каналов, плотин, электростанций, а также в дорожном, промышленном и жилищном строительстве укладываются огромные массы бетона и воздвигаются мощные искусственные насыпи грунтов. Для увеличения прочности, а также водонепроницаемости уложенного бетона необходимо его уплотнять.

Если отсыпать грунт в насыпь, то плотность его в насыпи будет невысокой, т. е. грунт будет рыхлым. Воздвигнутое на такой насыпи сооружение может давать осадку сверх допустимой; кроме того, грунт в таких насыпях имеет повышенную водопроницаемость, что особенно опасно в гидротехнических сооружениях типа плотин, дамб и т. п., поэтому грунты в насыпях необходимо уплотнять.

В настоящее время уплотнение бетонных масс и насыпей успешно осуществляется вибрационным методом. Вибрационный метод уплотнения применяется также и для других целей. Известно, например, что для блочного строительства создаются специальные вибрационные площадки, на которых производят уплотнение бетонных и шлакобетонных масс в блоках. Вибрационным методом уплотнения пользуются при упаковке, формовке и т. д. В настоящее время известно много конструкций различных вибрационных машин для уплотнения. Рассмотрим некоторые из них.

Для уплотнения бетонных масс и насыпей применяют глубинные и поверхностные вибрационные машины. Глубинная вибрационная машина называется так потому, что вибрирующий орган ее вводится внутрь уплотняемой массы. На рис. 4 показан общий вид глубинной вибрационной уплотнительной машины И-116, разработанной во ВНИИстройдормаш. Она состоит из вибронаконечника 1, который и является вибратором, гибкого шланга 2, через который передается вращение от мотора к вибратору, и электродвигателя 3. На рис. 5 показана в разрезе нижняя часть вибронаконечника, из которой видно, что в этом вибромеханизме имеется бегунковый вибратор планетарного типа. Машина И-116 имеет электродвигатель трех-

фазного тока мощностью 1 квт с напряжением 36 вольт. Этот двигатель делает 2900 об/мин. Вибронаконечник имеет наружный диаметр 76 мм. Число его колебаний равно 10 000 кол/мин.

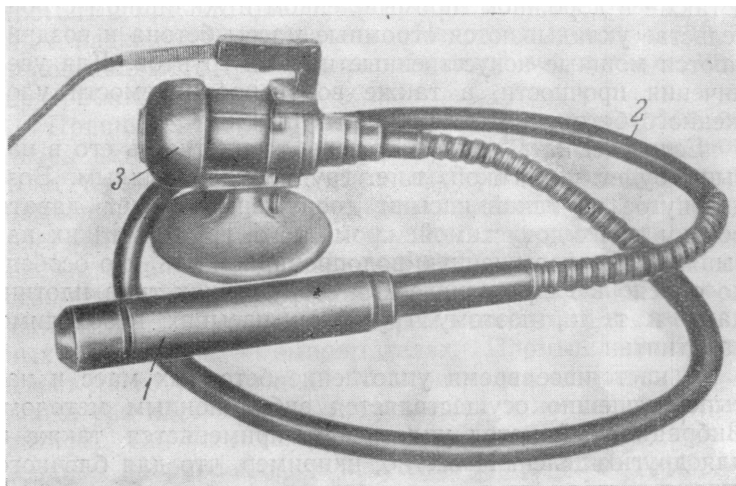


Рис 4

Если погрузить вибронаконечник в уплотняемую массу, то вибрирующий корпус наконечника сообщает колебательные движения среде, в которую он погружен. Эти колебания распространяются на некоторую зону, расположенную около наконечника. Частицы уплотняемой массы, находящиеся в этой зоне, приходят в движение. При этом более крупные тяжелые частицы опускаются вниз, вытесняя вверх более мелкие. При колебании частиц из уплотняемой массы выделяются также воздух и вода в несвязанном состоянии. После уплотнения массы в зоне действия вибратора вибронаконечник помещают в соседнюю зону, постепенно уплотняя большие объемы.

При поверхностном уплотнении рабочий орган машины располагают на поверхности уплотняемой массы. Поверхностная вибрационная уплотнительная машина (рис. 6) состоит из вибратора направленного действия 1, соединенного с корпусом вибромашины, и рабочего органа —

плиты 2, которой передаются колебания от вибратора. Вибрирующая плита, сообщая колебания близлежащим частицам, производит тем самым уплотнение в зоне вибраций. Затем плиту переносят на соседние участки, постепенно уплотняя большие площади.

Иногда такие вибрационные машины делают самоходными, т. е. эти машины медленно перемещаются по поверхности по мере уплотнения.

Следует заметить, что эффективность вибрационного метода уплотнения сильно зависит от свойств уплотняемой среды, например песчаные грунты хорошо уплотняются вибрационным способом, а глинистые — плохо.

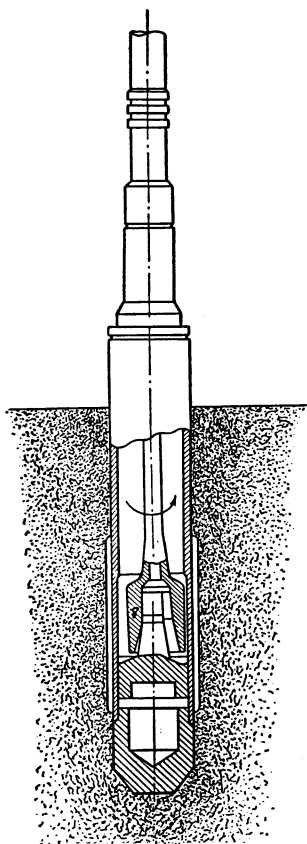


Рис. 5

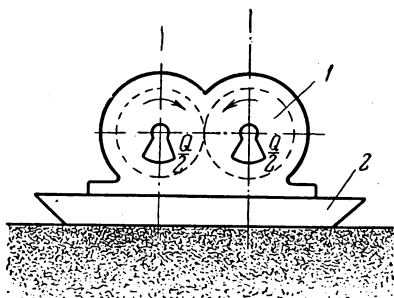


Рис. 6

Вибрационные машины для погружения шпунтов и свай. В Советском Союзе на строительстве гидроэлектростанций впервые получил применение вибрационный метод забивки шпунтов (металлических балок) и свай, предложенный лауреатом Сталинской премии проф. Д. Д. Барканом.

Вибрационное погружение осуществляется следующим образом: к верхнему концу шпунта или сваи крепится вибратор направленного действия. Гармоническая возмущающая сила, создаваемая вибратором, вызывает колебания сваи; под действием собственного веса и веса вибратора свая погружается. Вибрационное погружение по сравнению с обычным (ударным) методом забивки свай является во многих случаях более производительным и экономичным. Так, например, при погружении металлического шпунта на строительстве Сталинградской ГЭС с помощью вибропогружателей типа ВПП-2 достигалась выработка 45—50 шпунтин в смену; глубина погружения в среднем составляла 13—16 метров. При погружении деревянных свай в связные грунты на глубину 10 метров вибропогружателем типа ВПП-4 среднее время погружения составляло 3—6 минут. Производительность молотов (дизельных, паровых, паровоздушных) в два-три раза ниже, а затраты примерно во столько же раз больше. Вибропогружатели значительно легче молотов и не требуют установки кранов большой грузоподъемности. Кроме того, отпадает необходимость в громоздком и дорогом оборудовании — паровых котлах, дизелях, компрессорах. Наконец, работы ведутся более качественно: вибратор не вызывает деформаций и значительно снижает перекосы погружаемых конструкций.

Эффективность вибromетода определяется в основном тем, что некоторые грунты, например водонасыщенные пески, под действием вибраций сильно снижают свое сопротивление погружению свай. В тяжелые глины, в грунты, содержащие прослойки гравия, погружение свай вибрационным способом затруднено. Это объясняется тем, что сопротивление глин и грунтов при колебаниях снижается незначительно, а иногда перевешивает и противоположный эффект — повышение сопротивления вследствие уплотнения грунта.

Рассмотрим процесс вибрационного погружения. Предположим вначале, что на сваю действует только реакция грунта со стороны основания — сила лобового сопротивления. Характеристика этой силы по данным статических и динамических испытаний представлена кривой на рис. 7, где по вертикальной оси отложена сила, по горизонтальной — перемещение. Особенность характеристики состоит

в том, что при погружении сваи в грунт сила изменяется по кривой OB , а при обратном движении — по кривой BC , которая не совпадает с кривой OB за счет необратимых деформаций грунта. Можно предполагать, что при погружении сваи часть грунта из-под основания сваи выдавливается и в упругой отдаче не участвует.

Под действием возмущающей силы свая совершает вынужденные колебания. Пусть, например, в начальный

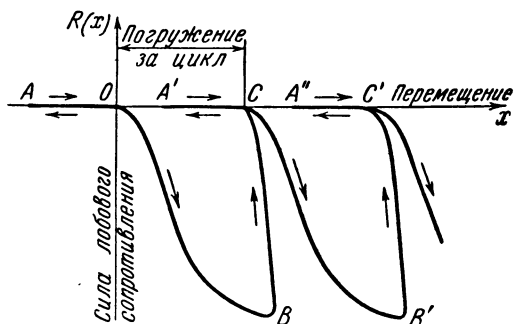


Рис. 7

момент времени свая находится в точке O , затем поднимается (участок OA), опускается (участок AO), погружается в грунт (участок OB) и останавливается в точке B . Далее следует движение вверх по участку BC до начального положения, в котором реакция грунта становится равной нулю. На этом первый цикл движения заканчивается и начинается второй цикл, описываемый кривой CA' , CB' , C' . Погружение сваи за один период (или цикл) определяется на характеристике величиной необратимых деформаций грунта, т. е. отрезком OC . Очевидно, что погрузить сваю в абсолютно упругий грунт невозможно, так как характеристика силы сопротивления при движении вниз и вверх будет изображаться одной и той же кривой (например, $OAОВО$, рис. 7); поэтому положения сваи в начале и в конце цикла будут совпадать.

Рассмотрим теперь случай, когда погружаемая конструкция имеет небольшое поперечное сечение (например, шпунт), так что реакция грунта действует в основном на боковую поверхность и силой лобового сопротивления можно пренебречь. Не учитывая сил бокового трения, за-

висящих от скорости, ограничимся реакцией грунта в функции перемещения. Характеристика в этом случае в отличие от рассмотренной выше будет симметричной (рис. 8). При колебаниях около состояния равновесия (точки O) величина неупругих деформаций грунта при движении от A к B и от B к A будет одинакова, и никакого смещения начального положения во втором цикле относительно первого не произойдет. Погружение в этом случае можно объяснить, только учитывая собственный вес системы. Действительно, при колебаниях шпунта сила веса будет увеличивать амплитуду, а следовательно, и величину необратимых деформаций грунта в направлении

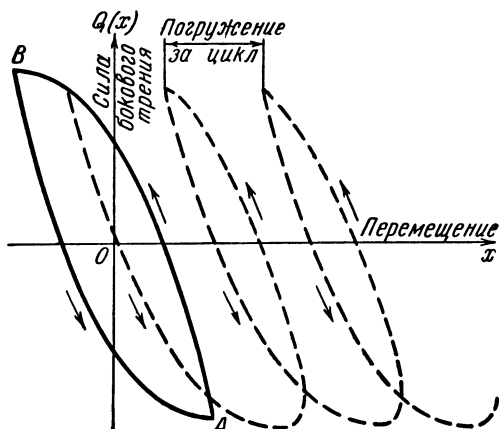


Рис. 8

своего действия и уменьшать их в обратном. В результате получим движение системы в направлении действия силы веса (пунктирная кривая на рис. 8).

В заключение остановимся на интересном явлении: чтобы выдернуть забитую в грунт сваю, не включая вибратора, нужно приложить к ней значительное усилие, направленное вверх. Однако, если выдергивать сваю при включенном вибраторе, то величина требуемого усилия резко снижается и только немногим превосходит силу веса системы. Это явление обычно объясняют тем, что в процессе колебаний сила сопротивления значительно сни-

жается. Однако эффективность вибровыдергивания определяется также динамикой самого процесса. Действительно, если характеристика силы бокового трения определяется кривой *АВА* (см. рис. 8), то сила лобового сопротивления при выдергивании равна нулю. Чтобы выдернуть сваю, не включая вибратора, надо приложить усилие, при котором грунт пластически деформируется. Эти силы должны быть большими по величине (около точек *А* и *В*), так как при малых силах деформации близки к упругим. Если включить вибратор, то в результате только вынужденных колебаний сваи будет достигаться область пластических деформаций грунта (точки *А* и *В*), так что небольшое по величине дополнительное усилие будет сильно увеличивать неупругие деформации в направлении своего действия и уменьшать их в обратном. В результате сравнительно небольшим усилием удастся выдернуть сваю. Рассмотренное явление, повидимому, имеет место и в случае вибропогружения.

Развитие виброметода привело к созданию различных конструкций вибропогружателей, которые нашли широкое применение на строительстве гидротехнических сооружений, при строительстве железнодорожных опор и эстакад, путепроводов, при проходке геологоразведочных скважин и забивке вентиляционных труб в зерновые насыпи.

Применяемые типы вибропогружателей могут быть сведены к трем основным схемам. Первая схема (рис. 9) объединяет вибропогружатели типов БТ-5, БТ-12, 101, 102, 104 и ВП-1 конструкции Д. Д. Баркана, В. Н. Тупикова, Б. П. Татарникова и др. В качестве возбудителя колебаний здесь применяется вибратор направленного действия 1. Привод вибратора осуществляется от электродвигателя 2 посредством зубчатой или клиноременной передачи 3. Для крепления вибратора к погружаемому элементу (шпунту, свае или трубе) служат наголовники различных конструкций 4.

Ко второй схеме относятся вибропогружатели с подрессоренным грузом типов ВПП-1, ВПП-2, ВПП-4, ВПМ-1, ВПМ-2 конструкции О. А. Савинова и А. Я. Лускина (рис. 10). Особенность данной схемы по сравнению с первой состоит в том, что к вибратору 1 присоединяется на упругой связи 4 дополнительная пригрузочная плита 2, на которую устанавливается электромотор 3. Привод

осуществляется посредством клиноременной передачи 5. В процессе вибрационного погружения колебание совершает только свая и нижняя часть вибратора, а пригрузочная плита с электромотором почти не колеблется.

Наконец, к третьей схеме (рис. 11) относятся вибромолоты типов ВЦ-1, ВЦ-2, ЦНИС конструкции С. А. Чаплина. Вибромолот состоит из вибратора, направлен-

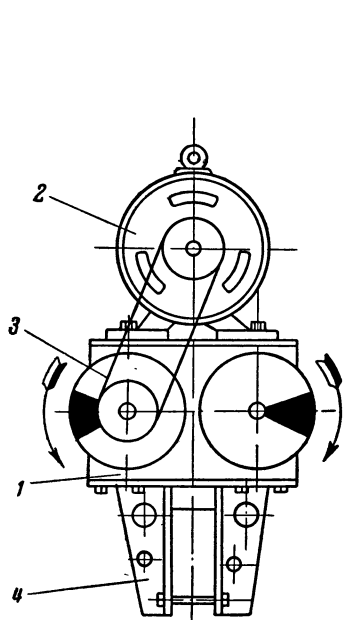


Рис. 9

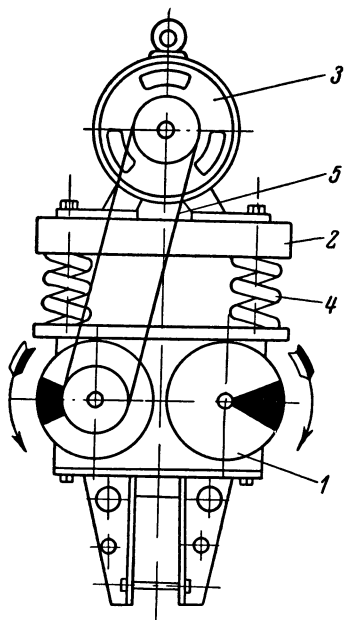


Рис. 10

ного действия, в котором дебалансы установлены на валах двух электромоторов 1, наголовника или плиты 2 для соединения с погружаемой конструкцией. Пружины 3 служат для упругой связи вибратора с наголовником. При вынужденных колебаниях системы зазор между бойками 4 выбирается и вибратор наносит удар по свае; последняя движется вниз, преодолевая сопротивление грунта, причем погружение сваи за цикл определяется величиной неупругой деформации грунта. Можно указать разновидность третьей схемы, когда электромотор соединяется с корпусом вибратора не жестко, а посредством упругой связи.

Такая конструкция значительно снижает воздействие на электромотор виброударного режима работы.

Кроме рассмотренных типов вибропогружателей, имеются и другие погружатели различного технологического назначения. Например, вибропогружатель ВБЛ-3 применяется при буровых работах, в нем в качестве источника энергии используется двигатель внутреннего сгорания. Для извлечения из грунта деревянных шпунтовых ограждений стенок траншей применяется вибратор ВДШ-1, привод которого осуществляется от электромотора посредством гибкого вала.

Вибрационные машины для сортирования, просеивания и подобных им процессов. Известно, какое важнейшее значение для всех отраслей народного хозяйства имеют цветные металлы. Сырьем для получения цветных металлов является руда. Часто руды цветных металлов, находящиеся в недрах земли, непосредственно не пригодны для металлургической переработки, а требуют предварительного обогащения. Процесс обогащения состоит в том, что из руды выделяют один или несколько концентратов, в которых содержатся соответствующие полезные ископаемые.

В настоящее время используются различные методы обогащения, но почти в любой схеме обогащения производят неоднократное грохочение — процесс разделения по крупности кусков, и классификацию — процесс разделения по крупности и удельному весу минералов. Таким образом, в процессе обогащения грохочение является хотя и вспомогательно-подготовительной операцией, но имеющей очень важное значение. В качестве самостоятельной операции грохочение применяется в угольной промышленности для обезвоживания и классификации углей, в результате чего получается определенный сорт угля; в черной металлургии — для выделения крупнокусовой

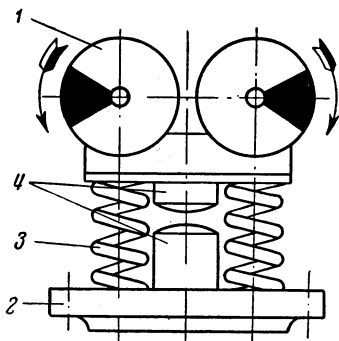


Рис. 11

железной руды и др. В качестве как самостоятельной, так и подготовительной операции процесс грохочения и просеивания используется в строительном деле и в химической промышленности, где он применяется для выделения сырья определенной крупности, однородности и удаления металлических включений из сырья для строительных материалов.

На рис. 12 дана принципиальная схема вибрационного грохота, который состоит из неуравновешенного вала (дебаланса) 1 и короба с ситом 2, опирающегося на рессоры 3. Дебаланс приводится во вращение электродвигателем и при этом развивает силу инерции P_u , которая передается коробу с ситом, вызывая колебания последнего.

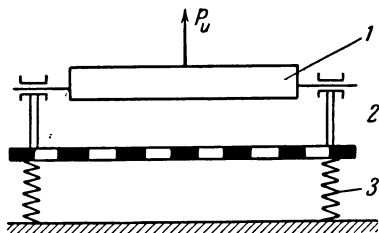


Рис. 12

На рис. 13 изображен общий вид одного из таких грохотов, предназначенного для классификации и обезвоживания углей. Короб грохота подвешивается на упругих подвесках под углом к горизонту. Средняя часть вала расположена эксцентрично осям подшипников, на концах вала насажены неуравновешенные шкивы, которые служат для увеличения или уменьшения возмущающей силы эксцентрично обточенного вала (дебаланса). На вибрирующее сито подается обрабатываемый материал, который на сите встряхивается и разделяется: более мелкие части проваливаются сквозь сито, а более крупные сходят с него.

Новый подъем сельского хозяйства в нашей стране выдвигает задачи максимальной механизации всех основных процессов сельскохозяйственного производства, и в первую очередь — процесса уборки и переработки зерна — основного сельскохозяйственного продукта. В области механизации сельского хозяйства и пищевой промышленно-

сти значительное место занимают машины типа грохотов, сортировок, веялок и т. д., в которых обрабатываемый продукт подвергается быстрым колебаниям и встряхиваниям, что способствует ведению таких технологических процессов, как сортирование, просеивание, очистка и т. п.

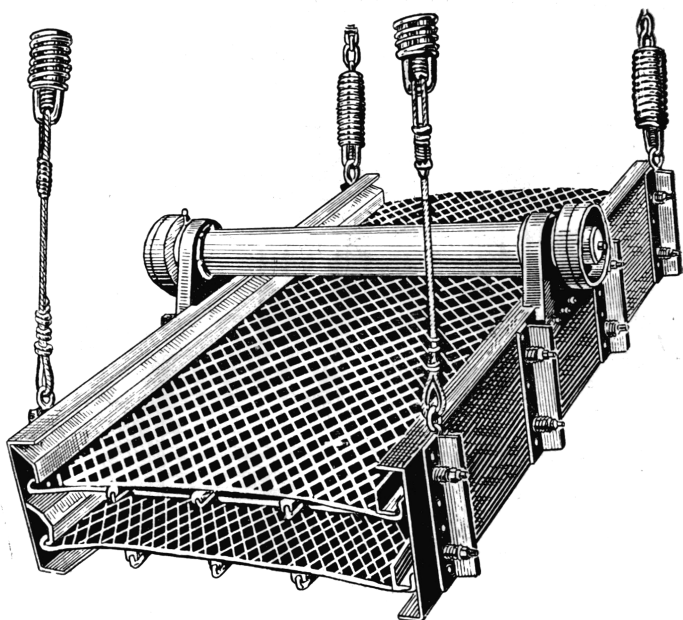


Рис. 13

Различают машины для очистки зерна от посторонних примесей и машины для сортирования продуктов переработки зерна. В последнее время для выполнения всех этих процессов в мукомольном и комбикормовом деле, в пищевой промышленности и сельском хозяйстве все чаще и чаще применяются вибрационные машины.

На рис. 14 дана принципиальная схема машины для просеивания продуктов переработки зерна. Эта машина состоит из двух корпусов 1, содержащих набор деревянных рам с плоскими ситами, подвешенными на четырех тросах 4. Корпуса скреплены между собой рамой, в которую вмонтирован дебалансный вибратор 5. Дебаланс при-

водится во вращение с помощью гибкого вала 3 от электромотора через редуктор 2. При вращении дебалансов корпуса совершают примерно круговое поступательное движение, продукт переработки зерна, находящийся на ситах, приходит в движение относительно сита, осуществляя тем самым процесс просеивания.

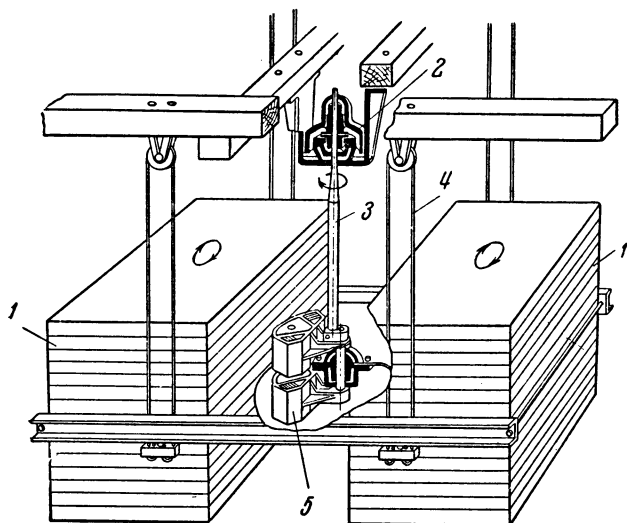


Рис. 14

Вибрационные машины для измельчения. Дробление материалов применяется в самых различных областях: при производстве строительных материалов, в мукомольной и пищевой промышленности, на металлургических заводах, на электростанциях. В большинстве случаев очень важно получить тонкий помол материала. Действительно, использование тонко измельченного песка и извести увеличивает прочность строительных деталей, а иногда позволяет заменять цемент. Тонкий помол цемента повышает его активность, ускоряет затвердевание бетона и повышает его прочность; тонкое измельчение красителей повышает качество окрашиваемых тканей. Применение в стекольной промышленности тонко измельченного песка почти вдвое увеличило производительность печи и значительно снизило себестоимость продукции. На-

конец, особо важное место занимает тонкий помол при производстве вяжущих материалов из местного сырья.

Измельчение материалов обычно производится на шаровых, молотковых, роликовых и других мельницах. Шаровая мельница представляет собой барабан, загруженный тяжелыми металлическими и неметаллическими шарами. При вращении барабана шары увлекаются корпусом и, падая, размельчают загруженный материал. В молотковых мельницах измельчение осуществляется специальными «билами», которые вращаются с большой скоростью. В роликовых мельницах истирание материала осуществляется посредством роликов, обегających стальной корпус машины. Однако применение таких типов мельниц или не позволяет получить достаточную степень измельчения материала, или такое измельчение требует большой затраты времени и электроэнергии. Так, например, мельницы обычных типов дают частицы материала размером около десятой доли миллиметра, т. е. сравнительно крупные частицы. Между тем в промышленности и строительстве все чаще требуются материалы, частицы которого измеряются микронами и долями микрона.

Для получения материала тонкого и сверхтонкого помола может быть использована вибромельница, которая позволяет получить размер частиц до десятых долей микрона при высокой производительности и сравнительно небольшой затрате мощности. В настоящее время известно несколько типов вибромельниц для промышленных и лабораторных целей. На рис. 15 приведен общий вид, а на рис. 16 схема мельницы типа М-200, разработанной Всесоюзным научно-исследовательским институтом технологии строительных материалов на базе тонкого измельчения. Эти мельницы имеют частоту 1500 и 3000 колебаний в минуту и мощность электродвигателя 14—20 квт.

Вибромельница состоит из цилиндрического корпуса 1, вибратора 2, упругой пружинной подвески 3, опорной рамы 4. Привод осуществляется от электродвигателя 5 через упругую муфту 6. Вибратор дебалансного типа расположен внутри корпуса мельницы и защищен от рабочей полости двумя трубами, между которыми циркулирует охлаждающая вода. Рабочая полость мельницы на 75—80% своего объема заполняется мелющими телами — шарами и цилиндрами различных диаметров от 8 до

16 мм. Здесь могут быть использованы забракованные или изношенные шарики и ролики от подшипников. В оставшуюся часть рабочего объема загружается материал с размером частиц не выше 2 мм.

При вращении дебалансов возникают вынужденные колебания корпуса мельницы с частотой, равной частоте возмущающей силы. Вся масса мелющих тел при этом

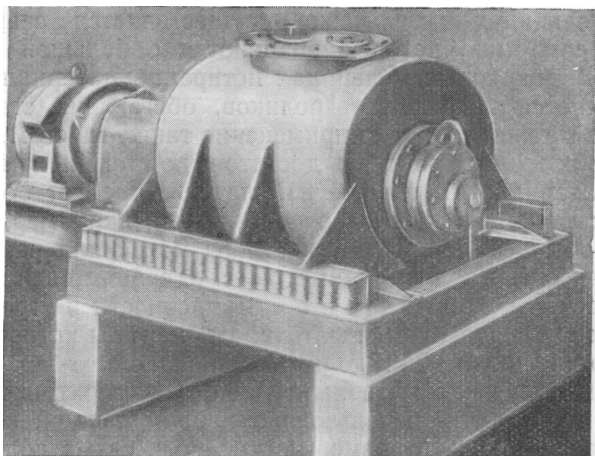


Рис. 15

медленно движется в сторону, обратную круговым колебаниям корпуса. Отдельные мелющие тела перемещаются друг относительно друга и непрерывно соударяются. В результате загруженный материал подхватывается со дна корпуса, увлекается, дробится и истирается мелющими телами.

Помол в вибромельницах может проводиться по принципу периодического и непрерывного действия. По первой схеме материал загружается в мельницу, где и производится его измельчение в течение 10, 20 минут и более в зависимости от тонкости помола, свойств измельчаемого материала, режима работы и т. д. После окончания процесса материал выгружают. При непрерывном режиме работы материал должен удаляться из рабочего пространства непрерывно либо посредством специальных отсасы-

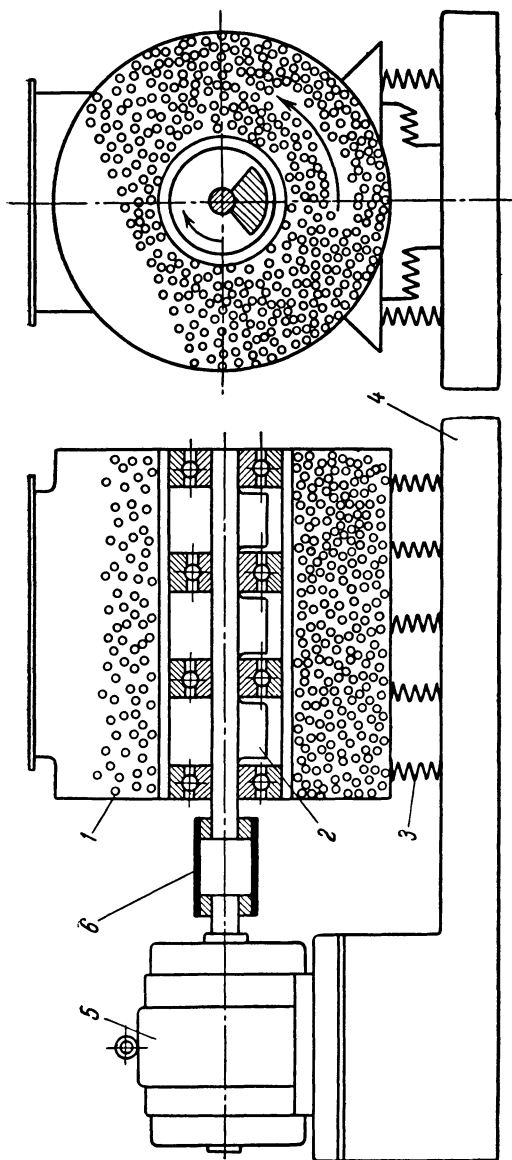


Рис. 16

вающих устройств, либо путем работы «на проход», т. е. свободного выхода измельченного материала через открытый люк. В последнем случае загрузочный и отборный люки располагаются по диагонали.

Вибромельница работает в достаточно тяжелых условиях, и вопрос о прочности ее деталей является очень важным. Разрушение деталей в вибромельницах носит главным образом усталостный характер, основной причиной которого является наличие концентраций напряжений. В результате совместной работы ученых и конструкторов были созданы промышленные образцы этой машины. Если в первых образцах усталостное разрушение наступало после 10—30 часов работы, то образцы промышленного типа выдерживают свыше 6000 часов работы без признаков усталости деталей.

Создание вибромельницы, позволяющей получать тонкий и сверхтонкий помол различных материалов, несомненно, открывает новые перспективы дальнейшего развития многих отраслей народного хозяйства.

Вибрационные машины для транспортировки. Вибрационный принцип ведения технологического процесса используется также при транспортировке различных материалов. Особо большое значение имеет применение вибрационного метода для транспортирования горячих, газифицирующих и пылящих материалов. В металлургии свинца, например, в результате обжига со спеканием из мелкой руды получают более крупные куски свинцовых концентратов, которые называются агломератами. В дальнейшем процессе выплавки свинца эти агломераты, нагретые до 500°C , необходимо перемещать на значительные расстояния.

Для выполнения этих и им подобных операций в настоящее время успешно может быть применен электровибрационный трубчатый транспортер, спроектированный сотрудниками Института механической обработки полезных ископаемых. На рис. 17 показан общий вид этого транспортера, состоящего из двух главных частей — транспортирующей трубы 1 и электромагнитного вибратора 2, причем в зависимости от требуемой длины конвейера используется несколько секций труб и вибраторов, соединенных последовательно. Труба на хомутах прикрепляется к вибраторам, а вибраторы на упругих подвесках закрепля-

ются на арматуре. Принцип действия такой вибромашины состоит в следующем.

Электромагнитный вибратор возбуждает колебания направленного действия под углом к трубе, которые через трубу передаются транспортируемому материалу. При такой конструкции точки трубы совершают овальные траектории в вертикальной плоскости, при этом частицы мате-

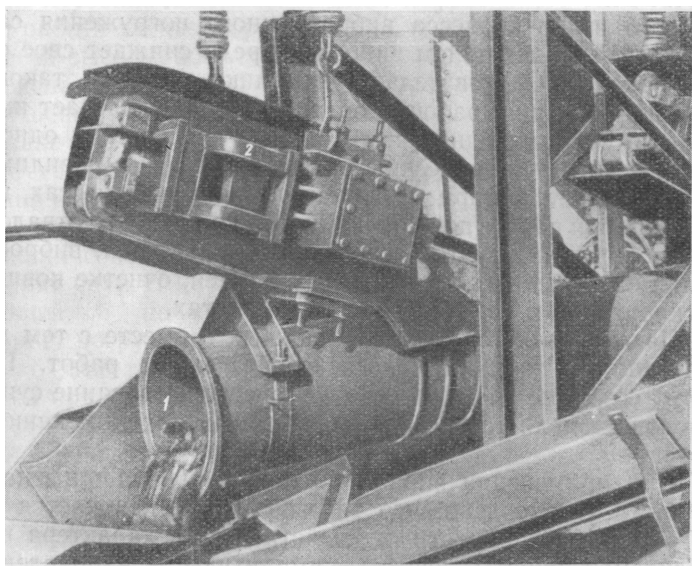


Рис. 17

риала отрываются от трубы и совершают «перелет» на очень малые расстояния, но при большой частоте колебаний транспортируемая масса в целом непрерывно перемещается по трубе. Такие трубчатые транспортеры имеют большое преимущество перед открытыми лотковыми или ленточными, так как применение закрытой трубы исключает возможность выделения горячих газов и пыли на линии транспортирования. Вибрационные транспортирующие конвейеры надежны в эксплуатации и улучшают санитарные условия труда.

Вибрационные конвейеры применяются также при

транспортировании бетонных масс к месту укладки. Так, для доставки бетона в глубокие колодцы применяют так называемые виброхоботы, позволяющие доставлять бетон через довольно узкие проходы. Вибрационные конвейеры применяют также во многих других отраслях промышленности.

Применение вибраций для других технологических процессов. Из подробно рассмотренного выше процесса вибрационного погружения следует, что под действием вибраций среда снижает свое сопротивление. Следовательно, динамика процесса такова, что вибрирующий рабочий орган легче преодолевает имеющееся сопротивление, чем в случае воздействия одного статического усилия. Существо этого явления, повидимому, сохраняется и при других аналогичных процессах, например при пахоте почв плугами с вибрирующим отвалом, при обрушении грунтов с помощью виброклина, виброрезании естественных строительных камней, очистке ковшей экскаваторов и некоторых других работах.

Пахота является одной из важных и вместе с тем достаточно трудоемких сельскохозяйственных работ. Поэтому создание новых плугов и усовершенствование существующих является одной из основных задач механизаторов.

При применении вибраций рабочего органа при вспашке было установлено, что тяговое усилие снижается на 10—40% в зависимости от свойств почвы, характера выполняемой работы, частоты, амплитуды и направления колебательного движения рабочего органа. Так, например, плуг П-5-35 с четырьмя корпусами и почвоуглубителями работал на второй передаче трактора СТЗ-НАТИ. При пахоте на глубину 25—27 см под действием вибраций почвоуглубителя тяговое сопротивление агрегата снизилось с 1580 до 1360 кг; частота вынужденных колебаний была при этом 1740 в минуту.

В качестве возбудителя колебаний на почвообрабатывающих машинах обычно применяются механические дебалансные вибраторы с приводом через карданный вал от вала отбора мощности трактора. Для получения нужной частоты вращения вала вибратора (1200—2000 об/мин) применяют редукторы или коробки передач.

Как показали исследования, при вибрационной вспаш-

ке на малых скоростях несколько снижается расход мощности по сравнению со вспашкой без применения вибраций. В то же время применение вибрационной вспашки увеличивает неравномерность тягового усилия на крюке трактора и изменяет структуру почвы.

Вибрационный метод обрушения грунта был предложен лауреатом Сталинской премии В. И. Платовым. Применяется он при разработке глубоких выемок, где работа экскаватора по всей высоте забоя сопряжена с опасностью обрушения грунта на экскаватор.

Установка для обрушения грунтов (рис. 18) состоит из виброклина 1, металлической рамы 2, которая служит направляющей в начальной стадии погружения, а также для транспортировки при производстве работ. Подъем клина после очередного обрушения осуществляется посредством лебедки 3 грузоподъемностью 3 т и блоков 4. Для удобства транспортировки рама устанавливается на деревянные окованные железом полозья.

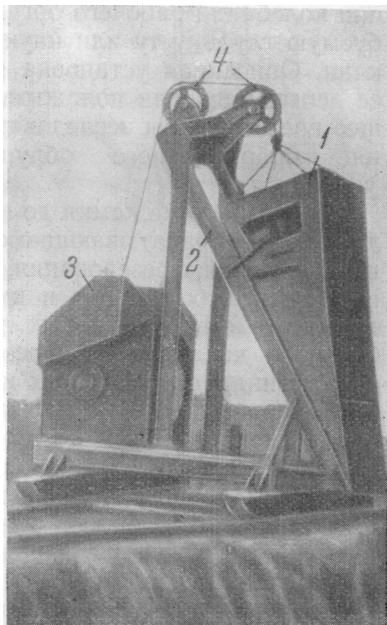


Рис. 18

Корпус виброклина представляет собой жесткий металлический каркас из швеллеров, покрытый листовой сталью толщиной 5 мм. Внутри корпуса установлен вибромолот с двумя электродвигателями конструкции ЦНИС-1. Мощность двух электродвигателей 8,4 квт, число оборотов в минуту 2925.

Работа по обрушению грунта состоит в следующем. Виброклин устанавливается на верху забоя на расстоянии 40—60 см от края откоса. Тормоза лебедки освобождают-

ся, и виброклин под действием собственного веса врезается в грунт. Затем включается вибромолот, и клин погружается до основания забоя, вызывая обрушение грунта. Посредством лебедки виброклин поднимается в исходное положение, и установка перемещается для проведения очередного обрушения. Работа виброклина по своему характеру близка к процессу виброударного погружения свай. Здесь и там собственным весом системы при наличии колебаний рабочего органа удастся погрузить на требуемую глубину ту или иную конструкцию: шпунт, сваю, клин. Описанная установка является экспериментальной, ее испытания дали положительные результаты; в настоящее время работы исследователей направлены на внедрение вибрационного обрушения в производственные условия.

При обработке камня до настоящего времени применялись камнеобрабатывающие станки, работающие по принципу точения, фрезерования, пиления и др. Большая энергоемкость этих методов и их низкая производительность требовали создания новых эффективных способов обработки. К числу таких способов относится виброрезание естественных строительных камней.

Экспериментальное исследование этого процесса и его сравнение с обычным резанием показали его существенные преимущества. Так, например, усилие резания и затрачиваемая работа при виброрезании строительного камня (гранита, базальта) в 5—7 раз меньше, чем при обычных способах резания. Качество обрабатываемой поверхности вполне удовлетворительно и близко к тому, которое получается при точении и фрезеровании. Эффективность виброрезания, очевидно, зависит от амплитуды и частоты колебаний инструмента, от механических свойств материала, от типа применяемого инструмента, ширины образца и некоторых других факторов.

На рис. 19 приведена принципиальная схема установки для виброрезания. Обрабатываемое изделие 1 крепится к крестовине 2 и подается к режущему инструменту гидравлическим устройством 3. Резцодержатель 4 с резцами крепится к столу 5, возвратно-поступательное движение которого создается специальным кривошипно-шатунным механизмом. Привод последнего осуществляется от электромотора. Особенность данной схемы состоит в том, что

ход стола и период движения устанавливаются независимо один от другого.

Следует заметить, что привод рабочего органа от кривошипно-шатунного механизма принципиально отличается от воздействия на рабочий орган возмущающей силы механических, электромагнитных и других типов вибраторов. Если в последнем случае мы имеем вынужденные колебания, зависящие от сил, действующих в системе, то в первом случае движение определяется кинематикой механизма и является условно вибрационным.

Кроме рассмотренных технологических процессов, можно указать ряд других, в которых успешно используется эффект вибраций: ультразвуковые колебания для получения отверстий сложной конфигурации в твердых металлах; удаление газов и шлаковых включений из жидкого металла воздействием высокочастотной вибрации на формы для улучшения качества металла; вибрационная очистка ковшей экскаваторов; отделение щепы от древесной массы при помощи вибрационной щеполовки и во многих других технологических процессах.

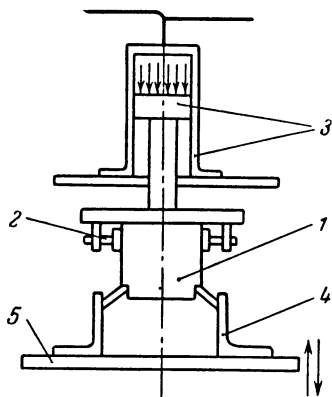


Рис. 19

3. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН

Некоторые сведения из теории колебаний. Колебание представляет собой периодическое движение, т. е. такое движение, которое полностью повторяется по истечении некоторого промежутка времени — периода колебаний. Величина, обратная периоду, называется частотой и измеряется числом колебаний в секунду; наибольшее отклонение колеблющегося тела от состояния равновесия принято называть амплитудой.

В технике различают колебания механические, электрические, акустические, колебания видимого и невидимого

мого оптического спектра и некоторые другие. Во всех случаях колебания могут возникать в системах, обладающих определенными физическими свойствами. В вибромашинах обычно создаются и используются для технологических процессов механические колебания.

Простейшая механическая колебательная система состоит из тела массы m и восстанавливающей силы H , вели-

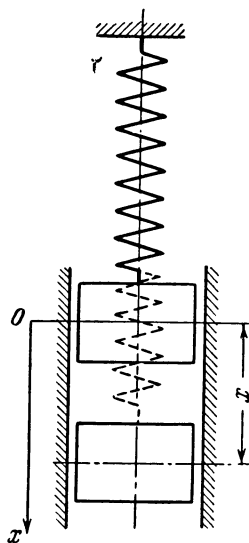


Рис. 20

чина которой пропорциональна отклонению тела от положения равновесия и всегда направлена в сторону последнего. Примером могут служить колебания груза на пружине постоянной жесткости z (рис. 20); восстанавливающая сила здесь будет равна произведению жесткости пружины на смещение x груза от положения равновесия:

$$H = -zx.$$

При отклонении груза вниз восстанавливающая сила H направлена вверх, и, наоборот, при смещении груза вверх эта сила направлена вниз.

Если положение системы можно определить одной координатой, то говорят, что система имеет одну степень свободы. В случае, когда несколько масс связаны между собой упругими элементами, положение каждой из них должно фиксироваться соответствующей координатой и число степеней свободы будет равно числу масс.

В случае упругого тела вместо нескольких сосредоточенных масс мы имеем систему, состоящую из бесконечно большого числа частиц, между которыми действуют силы упругости. Такая система будет иметь бесконечно большое число степеней свободы, так как ее положение будет определяться бесконечно большим числом координат.

В теории колебаний различают консервативные и диссипативные системы. Консервативные системы — это такие, в которых работа действующих сил зависит только от

координат ее начального и конечного положений. Диссипативные системы отличаются тем, что в них, кроме сил, зависящих от перемещения, имеются еще диссипативные силы — силы, зависящие от скорости. Появление этих сил обычно обусловлено трением колеблющихся тел о направляющие или среду, в которой они находятся. Так, например, тело (см. рис. 20) движется в направляющих, поверхность которых смазана. Сила сопротивления в первом приближении будет равна произведению скорости движения на коэффициент трения и направлена в сторону, обратную скорости.

Системы, в которых силы пропорциональны только первым степеням координат и скоростей, относятся к числу линейных. Примером таких систем могут служить колебания маятника или боковая качка судна при малых углах отклонения от положения равновесия; колебания упругих тел в случае, когда материал следует закону Гука; колебания масс на пружинах с линейной жесткостью и некоторые другие задачи.

Математический аппарат для исследования линейных систем разработан достаточно подробно, и получить все необходимые сведения о движении системы обычно сравнительно просто. Следует заметить, что увеличение числа степеней свободы усложняет решение задачи, однако никаких принципиальных трудностей при этом не возникает.

В реальных физических системах связь между силами, с одной стороны, и перемещениями и скоростью — с другой, выражается достаточно сложными нелинейными зависимостями. Но в ряде технических задач можно пренебречь степенями координат и скоростей выше первой и свести тем самым систему к линейной. При исследовании малых колебаний такая идеализация вполне оправдана, так как оказывается возможным отыскать движение системы с достаточной для практических целей точностью.

Однако в некоторых случаях колебания не настолько малы, чтобы можно было пренебрегать нелинейными членами. Например, при больших колебаниях маятника восстанавливающая сила пропорциональна синусу угла отклонения φ ; если при малых колебаниях $\sin \varphi$ можно заменить углом φ , то при больших колебаниях такая замена внесла бы существенную неточность.

Примером нелинейных сил сопротивления могут служить силы сухого трения, которые возникают при относительном скольжении тел с несмазанными поверхностями. Эти силы постоянны по величине и направлены против относительного движения. Поэтому при изменении направления движения сила сухого трения скачком меняет знак, в чем и состоит ее нелинейность.

Приведенные нелинейные системы следует отнести к числу простейших. К таким и аналогичным схемам могут сводиться только некоторые механические системы путем значительной идеализации всех действующих на них сил. Встречающиеся в технике машины и механизмы достаточно сложны, так что дать точную расчетную схему для большинства из них просто не представляется возможным. В тех схемах, которые обычно принимаются в качестве расчетных, учитываются основные, существенные факторы, определяющие поведение системы, и тем не менее исследование их вызывает большие трудности.

Трудности исследования обуславливаются тем, что общие аналитические методы решения нелинейных задач механики слабо развиты. Более того, во многих случаях отыскать точное аналитическое решение в виде конечной комбинации элементарных функций не представляется возможным просто в силу того, что таких комбинаций не существует. Поэтому расчет нелинейных систем обычно проводится с помощью приближенных методов. В системах с малой нелинейностью успешно применяются аналитические методы, для задач с большой нелинейностью — графические, графо-аналитические и численные методы.

Основная цель исследования колебательных систем состоит в том, чтобы найти периодические движения системы, установить влияние различных параметров на их характер и тем самым получить возможность управлять колебательным движением.

В теории колебаний различают свободные и вынужденные колебания. Пусть на тело действуют только восстанавливающие и диссипативные силы. Если такую систему вывести из состояния равновесия путем приложения и быстрого удаления внешней силы, то она будет совершать свободные колебания. Так как на преодоление сил трения необходимо затрачивать работу, то введенная

в систему энергия будет убывать и колебания со временем затухнут — система вернется в устойчивое состояние равновесия.

Однако если на колебательную систему действуют возмущающие периодические силы, зависящие от времени, то система не остановится, а будет совершать вынужденные колебания. Как это было показано выше, в вибромашинах применяются специальные устройства — вибраторы, которые создают возмущающую силу, воздействующую на рабочий орган машины. Отсюда следует, что основная задача механики при исследовании вибромашин состоит в определении вынужденных колебаний системы с учетом всех действующих на нее сил. Цель исследования состоит в определении оптимальных параметров вибромашин, т. е. таких параметров, при которых может быть осуществлен наиболее эффективный технологический процесс.

Вопросы теории и расчета. Мы рассмотрели несколько типов вибрационных машин для выполнения различных технологических процессов. Что же можно заметить общего для всех этих машин?

Во-первых, мы можем сделать вывод, что вибрационная машина является колебательной системой, состоящей из возбудителя колебаний — вибратора и колеблющейся массы — рабочего органа и жестко скрепленных с ним деталей. Следовательно, движение такой машины определяется динамическими факторами, т. е. соотношениями между массами, силами и ускорениями вибратора и колеблющейся массы.

Во-вторых, рабочий процесс в вибрационных машинах получается в результате суммарного эффекта громадного количества отдельных циклов, следующих один за другим. Возьмем, например, вибрационную машину для погружения свай, шпунтов и т. п. Рабочий процесс в этой машине состоит в том, что, например, сваю погружают на глубину 15—20 и более метров, но такой эффект погружения складывается из «суммы» погружений за один цикл. Внутри одного цикла, который обычно равен одному полному колебанию рабочего органа машины, свая поднимается и опускается на небольшие расстояния, погружаясь за цикл на величину порядка одного миллиметра. В вибрационном конвейере рабочий процесс состоит в транспортировке материала на расстояние в несколько

десятков метров, но за один цикл, соответствующий одному колебанию трубы или лотка, частица материала перемещается лишь на несколько миллиметров.

Таким образом, за один цикл в вибрационной машине выполняется очень небольшая работа, но так как современные вибромашины быстроходны и имеют частоту циклов порядка тысячи, а иногда и нескольких тысяч в минуту, то вибрационные машины являются высокоэффективными. Эффективность действия вибромашин состоит также и в том, что при сообщении обрабатываемой среде колебаний последняя становится как бы более «податливой». Так, при виброуплотнении частицы приходят в движение и сами укладываются более плотным образом. При вибропогружении колеблющийся грунт уменьшает сопротивление продвижению сваи. При вибросепарации смесь распределяется так, что сама способствует разделению по крупности, удельному весу, форме и т. д.

Теперь становится ясно, что для того, чтобы изучить рабочий процесс в машине вибрационного действия, необходимо самым тщательным образом изучить процесс внутри одного цикла, который является очень кратковременным и совершается в сотые доли секунды.

Изучить процесс внутри цикла — значит найти движение рабочего органа вибромашин за цикл. Зная этот закон, мы будем знать характер движения рабочего органа, частоту и амплитуду его колебания. Все эти вопросы можно получить из рассмотрения динамики вибрационных машин.

Динамическое исследование состоит в том, что составляется и решается уравнение движения интересующей нас системы. В вибромашинах такой системой является рабочий орган машины, который совершает вынужденные колебания под действием возмущающей силы вибратора. Характер движения системы определяется также способом подвески рабочего органа вибромашин, например, в плоском рассеве, грохоте или конвейере, и взаимодействием вибрирующего рабочего органа со средой, например в виброуплотнительных машинах или вибропогружателях.

Таким образом, в уравнение движения рабочего органа машины входят: 1) возбуждающая сила вибратора, 2) восстанавливающие силы, зависящие от способа под-

вески рабочего органа, 3) силы взаимодействия вибрирующего рабочего органа со средой, 4) силы инерции рабочего органа. Решить такие уравнения движения точно и в общем виде, как правило, не удастся, поэтому обычно ищут лишь приближенное решение, отыскать которое также бывает не всегда просто.

Как пример динамического исследования вибрационной машины внутри одного цикла рассмотрим в общем виде динамику вибропогружателя.

При динамическом исследовании обычно требуется определить скорость вибропогружения сваи в зависимости от параметров системы и сопротивления среды. Если бы мы попытались решить эту задачу точно, учитывая все действующие внешние силы, все упругие и инерционные силы и другие физические свойства системы, то уже при самой постановке задачи, при попытке описать ее движение соответствующими уравнениями механики мы встретили бы неразрешимые трудности.

Действительно, свая или шпунт является упругой системой. С ней шарнирно соединены два дебаланса, связанные между собой зубчатой передачей. Один из дебалансов соединен с якорем электромотора посредством гибкой клиноременной передачи. Якорь электромотора имеет массу, которая упруго связана с остальной системой, внося тем самым в систему дополнительную степень свободы. Клиноременная передача, в свою очередь, является упругой системой, которая может совершать и продольные и поперечные колебания, и т. д. Если еще учесть сложность характеристики крутящего момента электромотора, силы сопротивления среды, которые действуют со стороны основания сваи и по боковой поверхности и нелинейно зависят от перемещений, скоростей и ускорений, распределение сил трения по высоте погружаемой конструкции, трение и удары в шарнирах, трение о воздух, изменение сил сопротивления грунта по мере погружения и т. д. и т. п., то становится очевидным, что для того, чтобы можно было составить соответствующие уравнения механики и с их помощью произвести динамическое исследование системы, надо создать некоторую «идеализированную» расчетную схему, которую и подвергнуть исследованию.

При идеализации системы мы должны учесть по возможности все существенные ее особенности так, чтобы ре-

зультаты теоретического и экспериментального исследования были возможно ближе.

В нашем примере вибропогружателя простейшего типа (см. рис. 9) идеализируем задачу до следующей расчетной схемы (рис. 21, а). На абсолютно жесткое тело с массой m (масса вибратора и сваи) действует гармоническая возмущающая сила, равная $F \sin \omega t$, где F — амплитудное (наибольшее) значение силы; ω — частота; t — время. На сваю действует сила сопротивления со стороны основания $R(x)$ и по боковой поверхности $Q(x)$. Будем предполагать, что эти силы зависят только от перемещения сваи и на некотором участке погружения сохраняют постоянное значение. Кроме того, сложная нелинейная зависимость этих сил от перемещения аппроксимируется ломаной линией, состоящей из прямолинейных отрезков.

Таким образом, действительная система заменяется схемой, модель которой изображена на рис. 21, б. Стержень 1 (свая) зажат между двумя пластинами 2 (грунт). Пружины 3 моделируют упругие свойства силы бокового трения; пружина 4 воспроизводит упругие свойства сил лобового сопротивления; положение пробки 5 определяет глубину погружения сваи. Между стержнем и пластинами, а также между пробкой и грунтом действуют силы сухого трения. Пока силы взаимодействия между указанными элементами не превосходят сил сцепления и трения покоя, а пружина 4 сжата на некоторую величину, имеет место движение стержня только в пределах упругих деформаций сил лобового сопротивления и бокового трения, т. е. силы линейно зависят от перемещения. В случае срыва стержня относительно пластин или пробки относительно грунта силы сопротивления будут постоянными. Любой другой случай движения даст попрежнему линейную зависимость сил от перемещения.

Несмотря на сравнительно большую идеализацию, расчетная схема является все же достаточно сложной, так что для определения установившегося движения могут быть применены только некоторые специальные методы исследования. Рассмотрим сущность одного из них.

Движение системы на некотором прямолинейном участке характеристики силы сопротивления описывается линейным дифференциальным уравнением, которое легко

может быть разрешено. Если при этом в начале участка известно состояние системы, т. е. ее координата и скорость, то можно определить ее состояние и в конце

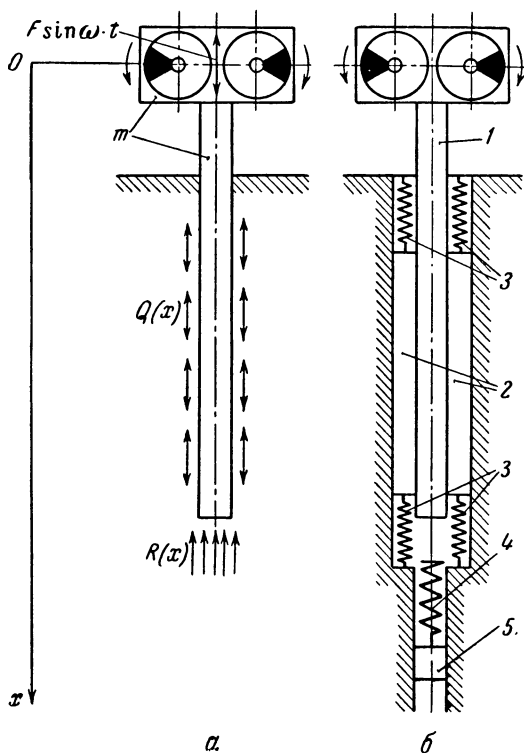


Рис. 21

участка. Условия на конце данного участка будут начальными для следующего участка и т. д. Выбирая за начало отсчета точку, в которой известна скорость, например в нижнем положении, когда скорость сваи равна нулю, определяем координату из некоторого дополнительного условия, принимая, например, что период установившегося движения равен периоду возмущающей силы.

В результате мы будем располагать несколькими алгебраическими, обычно трансцендентными, уравнениями,

которые описывают в совокупности установившееся периодическое движение сваи в зависимости от параметров системы и сил сопротивления.

Исследуя найденные уравнения тем или другим выбранным способом, оказывается возможным выявить влияние параметров системы на скорость вибропогружения и установить их оптимальные значения для различных конструкций погружаемых элементов, для различных грунтов. Следует заметить, что приведенный способ расчета сравнительно трудоемок, не дает конечных формул для выбора оптимальных параметров, однако он позволяет отыскать установившееся движение системы для любой сколь угодно сложной характеристики сил сопротивления с достаточной для практических целей точностью.

4. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ В ОБЛАСТИ ТЕОРИИ МАШИН ВИБРАЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ

Для создания высокоэффективных машин вибрационного действия необходимо решить ряд важных научных и технических задач.

В первую очередь, надо изучить структурно-механические свойства тех сред, которые обрабатываются вибрационными машинами. Это требует изучения механики сыпучих, вязких и упруго-пластических сред, с которыми мы имеем дело при применении вибрационных машин. Изучение механики этих сред должно вестись как путем развития теоретических исследований, так и постановкой углубленных экспериментальных работ.

Далее, необходимо на основе изучения физико-механических свойств среды и полученных характеристик сред развивать механику вибрационных машин, т. е. решение основных вопросов динамики той колебательной системы, к которой может быть сведена исследуемая машина. Вопросы механики вибрационных машин будут в первую очередь состоять в определении оптимальных параметров вибрационных машин, к которым относятся частота и амплитуда их колебаний.

Действительное движение вибрационной машины зависит не только от механических ее параметров, но и от

характеристики рабочей среды, геометрии рабочего органа и энергетического баланса машины и других факторов. Поэтому изучение механики этих машин является очень сложной комплексной задачей, решение которой требует глубоких теоретических и экспериментальных исследований.

В большинстве случаев движение вибрационных машин описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Поэтому весьма важно дальнейшее развитие методов приближенного решения этого типа дифференциальных уравнений.

Вибрационные машины работают при очень сложных динамических режимах. Поэтому второй задачей является развитие методов расчета деталей этих машин на прочность и износ.

Необходимо, далее, изучать вопрос о том, какую энергию потребляют вибрационные машины и каков их коэффициент полезного действия, так как в ряде случаев потребляемые мощности не соответствуют конечному рабочему эффекту, который должен быть получен от внедрения этого типа машин. Мы не останавливаемся здесь на других важнейших задачах науки и техники в области вибрационных машин, отмечая только те из них, которые являются наиболее важными в области теории и расчета данных машин.

* * *

Современная техника применяет все большее количество вибрационных машин для осуществления самых различных технологических операций. Но возможности этого принципа работы машин еще далеко не исчерпаны. До сих пор они работают на сравнительно низких частотах колебаний, большое количество потребляемой ими энергии затрачивается на непроизводительные сопротивления, велики расходы металла на их изготовление, не всегда подобраны наиболее оптимальные режимы их работы и т. д.

Задача ученых и инженеров состоит в том, чтобы шире развернуть исследования этих машин, внедряя принципы работы вибрационных машин во все те технологические процессы, в которых они могут дать значительный народнохозяйственный эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абезгауз В. Д., Гальперин М. И. Вибратор на стройках. Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1955.
 2. Баркан Д. Д. Устройство оснований сооружений с применением вибрирования. Машстройиздат, 1949.
 3. Зубанов М. П. Вибрационные дорожностроительные машины. Машгиз, 1948.
 4. Левенсон Л. Б., Прейгерзон Г. И. Дробление и грохочение полезных ископаемых. Гостехиздат, 1940.
 5. Левин Л. П. Электровибрационные машины на горно-обогатительных предприятиях. Горный журнал, № 8, 1955.
 6. Мнджоян К. А. Эффективность виброрезания естественных строительных камней. «Механизация строительства», № 11, (1955).
 7. Могиленко Н. Плуг с вибрирующими почвоуглубителями. «Машинно-тракторная станция», № 1, (1955).
 8. Петрунькин Л. П. Основы теории глубинных вибраторов для углубления бетонных смесей. Исследование вибраторов и электрических молотков, т. VI. Машгиз, 1953.
 9. Савинов О. А., Лускин А. Я., Цейтлин М. Г., Плеханова С. В. Свайные вибропогружатели с подрессоренной пригрузкой. Л.—М., 1954.
 10. Сапожников М. Я., Кугель Р. В. Вибрационные мельницы и их испытания. «Механизация строительства», (1955).
 11. Соколов А. Я. Технологическое оборудование элеваторов, мельниц, крупяных и комбикормовых заводов. Заготиздат, 1950.
 12. Хажинский Ю. Н., Якименко Ю. Ф., Фельдман В. Г. Опыт использования вибрационного конвейера конструкции «НИГРИС» для транспортирования горячего оборотного агломерата. «Цветные металлы», 1955, № 5.
 13. Хархута Н. Я. Машины для уплотнения грунтов. Машгиз, 1953.
 14. Черняев В. И. Обрушение грунта виброклином. «Механизация строительства», № 4, (1955).
-

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Вредное действие вибраций	5
2. Вибрационные машины и принципы их действия	10
3. Элементы теории вибрационных машин	35
4. Научные задачи в области теории машин вибрационного действия	44
Литература	46

*Печатается по постановлению Президиума
Академии наук СССР*

*

Редактор издательства *В. И. Митин*
Технический редактор *А. А. Павловский*

*

Сдано в набор 3/II 1956 г. Подп. к печ. 13/II 1956 г.
Формат бум $84 \times 108^{1/2}$. Печ. л. $1,5=2,46$. Уч.-изд. лист. 2,3
Тираж 5000 экз. Т-01476 Изд. № 1694. Тип. ~~л.~~ 109.

Цена 70 коп.

Издательство Академии наук СССР.
Москва, Б-64, Подсосенский пер., д. 21

2-я тип. Издательства Академии наук СССР.
Москва, Г-99, Шубинский пер., д. 10

Цена 70 к.