

А.В. Мицьк, канд. техн. наук, В.А. Фадеев, д-р техн. наук,
В.А. Федорович, д-р техн. наук, Харьков, Украина

РАЗВИТИЕ ВОПРОСОВ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ОБРАБОТКИ В КОЛЕБЛЮЩЕМСЯ РЕЗЕРВУАРЕ

Представлені деякі передумови використання способу віброобробки на основі комбінування схем енергетичних дій стосовно складнопрофільних деталей тіл обертання. За допомогою швидкісної відеозйомки розглянуто динамічний стан резервуару, що коливається, та робочого середовища, дано обґрунтування фізичної суті формування його циркуляційного руху.

Представлены некоторые предпосылки использования способа виброобработки на основе комбинирования схем энергетических воздействий применительно к сложнопрофильным деталям тел вращения. С помощью скоростной видеосъемки рассмотрено динамическое состояние колеблющегося резервуара и рабочей среды, дано обоснование физической сущности формирования ее циркуляционного движения.

Some predictions of the use of vibration treatment method are presented on the base of combining the schemes of electric actions applicably to the complex shaped rotation parts. The dynamic state of vibrating reservoir and working medium is considered, the ground of the physical essence of formation of its circular motion is given with the help of rapid video survey.

Одним из перспективных направлений интенсификации операций виброобработки средне- и крупногабаритных корпусных и тел вращения деталей сложной формы со множеством малодоступных мест поверхностей для традиционно применяемых рабочих сред, имеющих размер гранул 5...35 мм, является разработка более эффективных с широкими технологическими возможностями структур организации процесса, одновременно использующих наряду с воздействием низкочастотных колебаний еще и другие схемы энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали (рис. 1) [1, 2].

Необходимо отметить, что в условиях серийного и массового типа производства совместная виброобработка упомянутых выше партий деталей по принципу «внавал» технологически и экономически нецелесообразна. В этом случае при циркуляционном движении содержимого резервуара вибростанка происходят систематические столкновения обрабатываемых деталей, что приводит к деформации их поверхностей и вызывает появление 25...30 % неисправимого брака [3].

Вполне понятно, что описанная ситуация диктует исключение из внедрения обработки «внавал» и переход к обработке «с закреплением» деталей при их размещении в резервуаре. Кроме того, положительные результаты виброобработки были достигнуты, когда детали, установленные в приспособ-

лении, подвергались дополнительному виду энергетического воздействия. Такие, вновь созданные, разновидности классического способа виброобработки позволили расширить его технологические возможности, применяя мелкодисперсную рабочую среду в виде шлифзерна зернистостью 200...40 и различных шлифпорошков зернистостью 32...16, что положительно отразилось на обработке выделенных нами деталей [4 – 6].

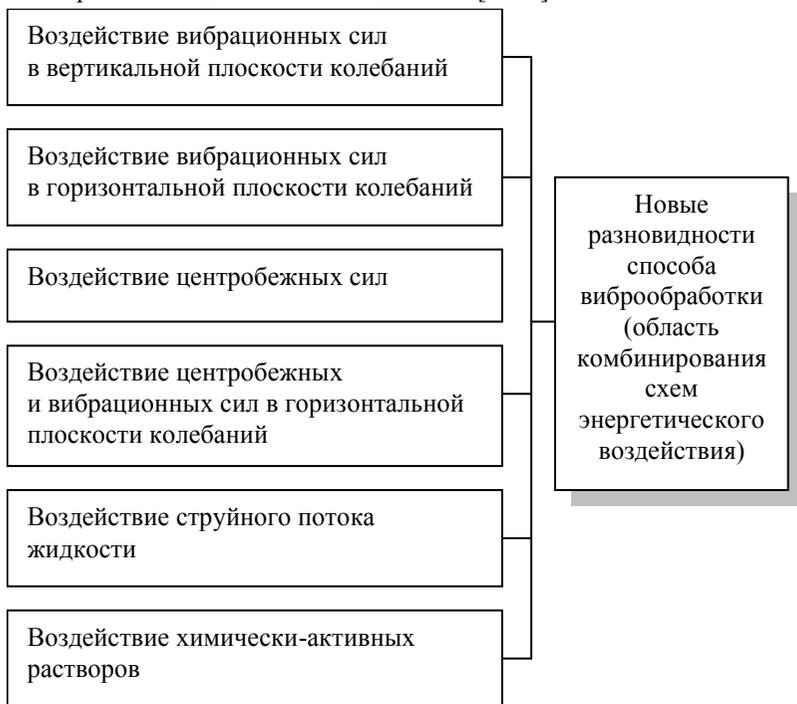


Рисунок 1 – Схемы энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали в процессе отделочно-зачистной обработки

Разнообразие схем энергетического воздействия, промышленно-применяемых при отделочно-зачистной виброобработке, используемое в области логически возможного комбинирования, является одной из основных предпосылок создания системы развития новых разновидностей виброобработки, позволяющих не только совершенствовать известные технологические возможности, но и создавать технологические процессы, качественно изменяющие эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей.

Качественная и количественная интенсификация наблюдается при реализации всех новых разновидностей способа виброобработки, которые сформированы комбинированием схем энергетического воздействия на рабочую

среду и обрабатываемые детали. Интенсивность виброобработки согласно новым ее разновидностям возросла в 1,8...2,5 раза в сравнении с классической технологией применяемой для обработки деталей различной формы сложности, изготовленных из металлов с различными физико-механическими свойствами [3].

Принимая во внимание положительные результаты, полученные при интенсификации процесса виброобработки комбинированием схем энергетического воздействия на рабочую среду и детали, можно предположить, что углубленное изучение физических и технологических особенностей механизма протекания процесса, выявление функциональных взаимосвязей его основных параметров, а также их влияние на конечный технологический результат, будет иметь несомненную научную новизну и практическую ценность для тех способов отделочно-зачистной обработки, в основу которых положены колебательные процессы свободной рабочей среды и обрабатываемых деталей.

Из существующей классификации технологий и оборудования отделочно-зачистной обработки [1, 7] виброобработку можно выделить как способ механической обработки свободной абразивной средой, а при введении химически-активных растворов ее следует отнести к комбинированным технологиям, в частности к группе механо-химических способов обработки. Вместе с тем, все разновидности способа виброобработки являются динамическими и сопровождаются силовым воздействием колеблющейся рабочей среды в виде множества соударений ее гранул с поверхностью обрабатываемой детали, механохимическими взаимодействиями рабочей среды и материала детали, а также воздействием ударных волн. Перечисленные явления, присутствующие в процессе виброобработки, не следует рассматривать изолированно, они действуют комплексно, дополняя или ослабляя влияние того или иного явления на технологический результат обработки.

Известно, что съем металла и шероховатость поверхности, которыми оценивается конечный результат технологии виброобработки, определяется взаимным давлением и относительным перемещением гранул рабочей среды и обрабатываемых деталей в колеблющемся резервуаре вибростанка. В современной металлообработке используется до 40 % отделочно-зачистных технологий, которые осуществляются на вибростанках с резервуарами «U» - образной или близкой к ней формы. Среди признаков этих технологий можно отметить общность таких определяющих факторов, как амплитудно-частотные характеристики, траектории движения резервуара и его содержимого, характеристики рабочей среды и характер ее взаимодействия с обрабатываемыми деталями [1, 8, 9].

Если говорить о комбинированных технологиях виброобработки, в которых используются различные схемы энергетических воздействий, то указанные тенденции общности сохраняются, а перечень режимных факторов, связанных с динамикой и кинематикой процесса, ранее присущих только дейст-

вию вибровозбудителя, значительно расширяется за счет действия дополнительно используемых шпиндельных, импеллерных, а также гидродинамических устройств, которые в определенных комбинациях оказывают одновременное энергетическое воздействие на рабочую среду и обрабатываемые детали, создавая необходимый эффект процесса виброобработки.

Рассматривая применимость комбинированных технологий виброобработки к отделочно-зачистным операциям сложнопрофильных корпусных, а также тел вращения деталей можно отметить, что ранее были установлены причины по которым исключалось применение классической виброобработки «внавал» и делался уклон к обработке «с закреплением» [4 – 6]. В этом случае, когда по всему внутреннему объему резервуара детали пакетами устанавливаются в приспособлении, жестко связанном с резервуаром, выявляются негативные особенности протекания процесса виброобработки и получения его конечного результата, в частности при использовании мелкодисперсных рабочих сред. Такие особенности находятся в прямой связи с кинематикой и динамикой рабочей среды и возможностью создания ею условий стабильности реализации процессов микрорезания и упругопластического деформирования на всей площади поверхности обрабатываемых деталей.

Упомянутые условия кинематики и динамики рабочей среды в свою очередь зависят от силового воздействия на нее рабочих поверхностей резервуара вибростанка. В принятом случае, когда используется «U» - образный резервуар, силовое воздействие его рабочих поверхностей на среду не превышает 65 % периода колебания, что является основной причиной образования в центральной части резервуара зоны неактивной обработки, где скорость относительного перемещения рабочей среды и деталей, а также их взаимное давление минимальны, процессы микрорезания и упругопластического деформирования отсутствуют и, как следствие, операции виброобработки не происходят [10].

По мнению авторов статьи, сложившемуся на основании результатов экспериментальных исследований, выход из ситуации, при которой детали, расположенные в центральной части резервуара, не подвергаются обработке, состоит в принятии способов виброобработки, где значительный рост динамической активности рабочей среды достигается при независимом движении резервуара и приспособления с обрабатываемыми деталями. Здесь используется комбинирование энергетических воздействий вибрационных сил, действующих, как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях колебаний, воздействия центробежных сил, как отдельно, так и в сочетании с вибрационными силами, а также воздействие струйного потока жидкости [3]. При этом скорость циркуляции среды увеличивается, неактивная зона в центральной части резервуара ликвидируется, и его силовое воздействие на среду приближается к 90 % в течение периода колебания.

Рассматривая физическую модель процесса виброобработки можно отметить, что при колебательном движении рабочих поверхностей резервуара рабочая среда, воспринимая колебания, совершает циркуляционное движение в плоскости колебаний резервуара и в направлении, противоположном вращению вала вибровозбудителя.

Величина скорости циркуляционного движения среды в резервуаре вибростанка находится в пределах 0,2...0,8 об/мин. Колебания гранул среды представляют собой переносные движения с частотой взаимодействия среды с рабочими поверхностями резервуара, а также относительные перемещения с собственной частотой в массе загрузки резервуара. Скорость этих переносных движений и перемещений составляет 0,8...1,0 м/с. Колебания и переменные ускорения наряду с циркуляционным движением среды вызывают ее динамическое воздействие на поверхность обрабатываемых деталей в виде суммарного действия гранул слоев рабочей среды, что обеспечивает процессы микрорезания и упругопластического деформирования для выполнения операций виброобработки.

Рассмотрим динамическое состояние колеблющегося резервуара и рабочей среды, а также проведем теоретическое обоснование физической сущности возникновения и формирования циркуляционного движения среды применительно к технологиям виброобработки. Для полноты анализа последовательно изучим движения рабочих поверхностей резервуара, единичной гранулы и граничного слоя в течение периода колебаний.

В процессе виброобработки резервуар вибростанка совершает гармонические колебания, а точки его рабочих поверхностей движутся по траектории в большинстве случаев соответствующей вертикально вытянутому эллипсу (рис. 2), о чем свидетельствуют графики траектории движения резервуара, полученные по точкам покадрового измерения скоростной видеосъемки (рис. 3). В момент времени t_1 , соответствующий движению резервуара в точке 1 со скоростью V_1 , вектор скорости \vec{V}_1 имеет горизонтальное направление. В момент времени t_2 вектор скорости \vec{V}_2 направлен под углом к горизонтали и раскладывается на горизонтальную $(\vec{V}_x)_2$ и вертикальную $(\vec{V}_y)_2$ составляющие. Скорость V_2 с которой движется резервуар в точке 2 равна:

$$V_2 = \sqrt{V_{2x}^2 + V_{2y}^2} \quad (1)$$

Горизонтальная составляющая $(V_x)_2$ скорости V_2 движения резервуара определяется из выражения:

$$(V_x)_2 = V_2 \sin \psi \quad (2)$$

где ψ – угол, равный произведению угловой скорости на промежуток времени t_2 , в течение которого резервуар пройдет расстояние от точки 1 до точки 2 траектории своего движения.

Вертикальная составляющая $(V_y)_2$ скорости V_2 движения резервуара:

$$(V_y)_2 = V_2 \cos \psi \quad (3)$$

При движении резервуара в точке 3 его траектории скорость V_3 достигнет максимальной величины. Одновременно с этим $\bar{V}_1 < \bar{V}_2 < \bar{V}_3$ и $\bar{V}_3 = (\bar{V}_y)_3$.

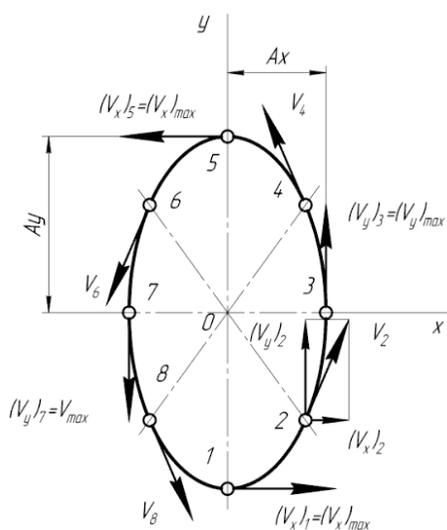


Рисунок 2 – Схема траектории движения резервуара в течение периода колебаний

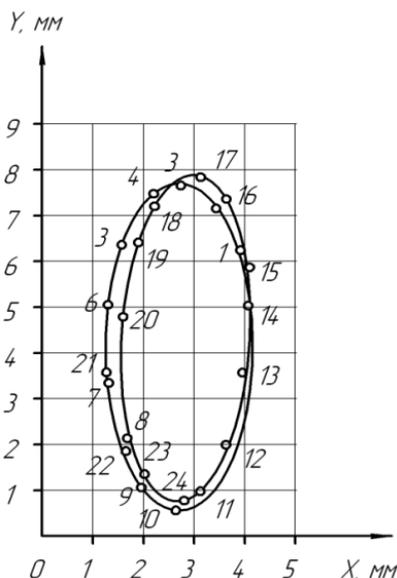


Рисунок 3 – График траектории движения резервуара: 1...24 – точки покадрового измерения фрагментов скоростной видеосъемки

Из условия симметрии эллипсообразной формы траектории движения резервуара, очевидно, что скорость V_3 равна по величине, но противоположна по направлению скорости V_7 . Аналогично скорость V_5 равна по величине и противоположна по направлению скорости V_1 .

При прохождении резервуаром точек 4, 6 и 8 траектории движения, приобретенные им скорости V_4 , V_6 и V_8 по абсолютной величине равны скорости V_2 , достигаемой резервуаром в точке 2 траектории движения. Вместе с тем, вектора скоростей V_4 , V_6 и V_8 имеют различные направления, то есть: вектор \vec{V}_4 противоположен вектору \vec{V}_8 , а вектор \vec{V}_6 - вектору \vec{V}_2 .

Из схемы движения гранул граничного слоя рабочей среды в резервуаре (рис. 4), представленной на примере движения гранул m^I , m^{II} и m^{III} видно, что в каждом периоде колебания происходит петлеобразное смещение гранулы относительно рабочих поверхностей резервуара в сторону, противоположную его движению, и это смещение носит волновой гистерезисный характер. Иллюстрацией петлеобразного движения служит график такой траектории, построенный по точкам покадрового измерения фрагментов скоростной видеосъемки (рис. 5).

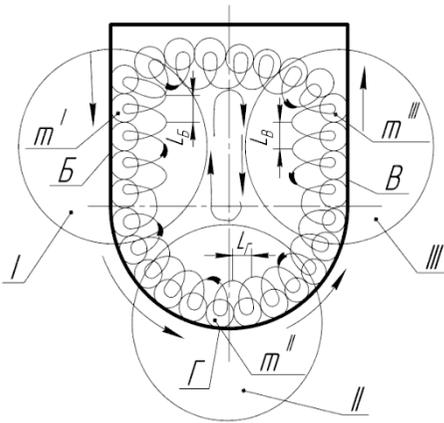


Рисунок 4 – Схема движение гранул граничного слоя среды у рабочих поверхностях резервуара

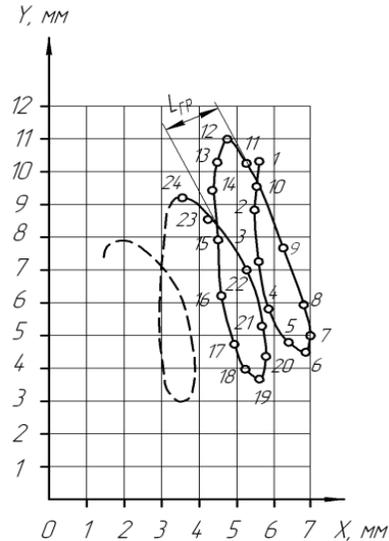


Рисунок 5 – График траектории движения гранулы рабочей среды: 1...24 – точки покадрового измерения фрагментов скоростной киносъемки

Движение граничного слоя неодинаково в зонах у различных рабочих поверхностях резервуара. Об этом свидетельствуют различные длины волн L_A , L_B и L_C , соответственно, у стенок A , B (зона I , III) и дна C (зона II). Так у стенки A длина волны L_A минимальна, так как в восходящих

слоях среды возникают наибольшие сопротивления движению. У стенки B длина волны L_B максимальна, так как векторы свободного падения и силы тяжести гранул совпадают. На днище C – $L_A < L_C < L_B$.

Анализ движения гранул граничного слоя среды дает основание сделать вывод о том, что граничный слой в своем движении увлекает за собой слои среды, расположенные в глубине резервуара, движение которых подчиняется той же закономерности, но происходит с меньшими скоростями, перемещениями и при меньших давлениях, так как сказывается существенная потеря энергии при проскальзывании и внутреннем трении между гранулами.

Наблюдения за характером движения гранулы-образца, имеющей форму куба с одной зеркальной гранью, проводимые, как визуально, так и с помощью видео съемки через прозрачную, торцевую стенку резервуара, подтвердили теоретические предположения о характере движения гранул граничных слоев среды, контактирующих с различными рабочими поверхностями резервуара.

Установлено, что гранулы граничных слоев рабочей среды в общем циркуляционном движении содержимого резервуара перемещаются согласно волновому характеру по петлеобразным траекториям в направлении, противоположном колебательному движению рабочих поверхностей резервуара, что экспериментально подтверждается фотоотпечатками кадров видеосъемки характера движения среды в колеблющемся резервуаре (рис. 6, 7, 8).

По мере удаления гранул от рабочих поверхностей к центральной части резервуара, а также в зависимости от амплитуды и частоты его колебаний форма петель траектории расстояние между которыми характеризует скорость циркуляционного движения среды, может изменяться от эллипса до окружности. Так, в центральной части резервуара форма элементов траектории приближается к окружности, а расстояния между ними принимают минимальные значения. Такой характер колебательного процесса объясняется уменьшением скорости циркуляционного движения среды, вызванным затуханием силового импульса, передаваемого среде рабочими поверхностями резервуара.

В граничных слоях рабочей среды, расположенных в ее восходящих потоках у рабочей поверхности стенки A , длина волны L_A минимальна, петли траектории движения расположены близко друг к другу и активность перемещения гранул у этой поверхности резервуара невысока (см. рис. 6).

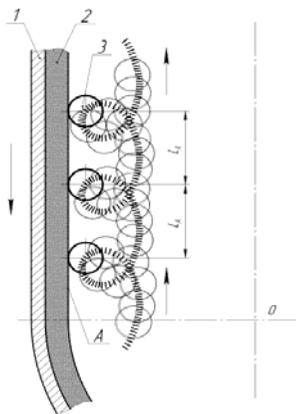


Рисунок 6 – Характер движения гранул среды в граничном слое восходящих потоков у рабочей поверхности стенки *A* резервуара: 1 – стенка резервуара; 2 – футеровка; 3 – гранула среды

В граничных слоях рабочей среды, расположенных в ее нисходящих потоках у рабочей поверхности стенки *B*, длина волны L_B максимальна, то есть $L_B > L_A$, что объясняет высокую активность перемещения гранул у этой поверхности резервуара (см. рис. 7).

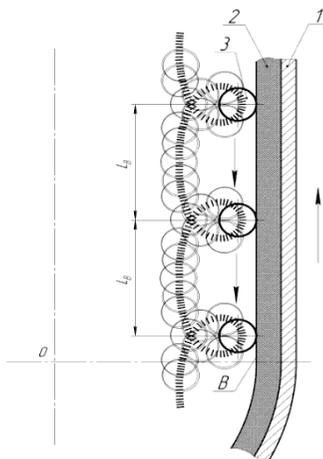
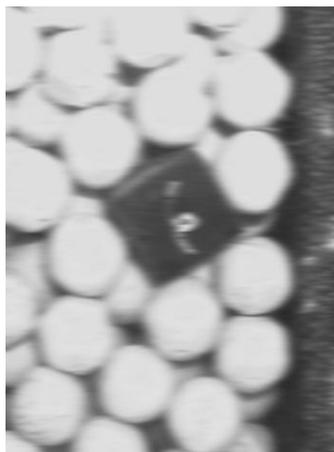


Рисунок 7 – Характер движения гранул среды в граничном слое нисходящих потоков у рабочей поверхности стенки *B* резервуара: 1 – стенка резервуара; 2 – футеровка; 3 – гранула среды

В граничных слоях рабочей среды, расположенных в потоках у рабочей поверхности днища C , длина волны L_C имеет промежуточное значение между L_A и L_B , то есть $L_A < L_C < L_B$ (см. рис. 8).

Принимая во внимание наблюдения за характером движения рабочей среды в колеблющемся резервуаре, можно выделить четкую взаимосвязь между способом размещения обрабатываемых деталей в резервуаре, то есть «внавал» или «с закреплением», кинематикой и динамикой рабочей среды в ее послонном движении, интенсивностью выполнения различных операций виброобработки, а также аппаратурным оформлением процесса при их реализации.

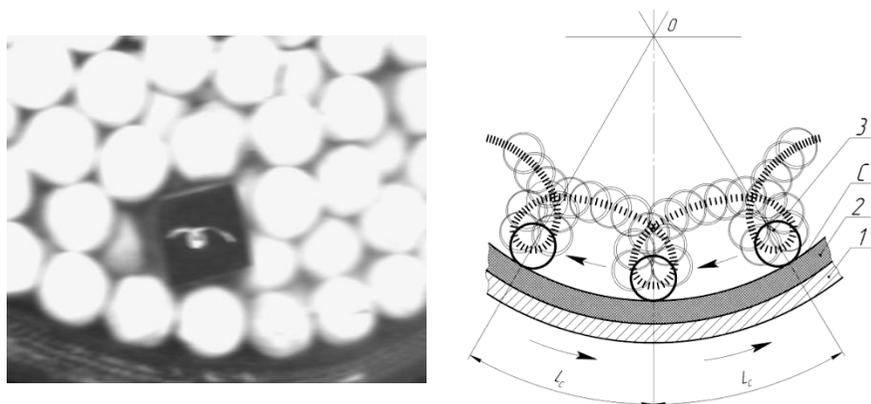


Рисунок 8 – Характер движения гранул среды в граничном слое потоков у рабочей поверхности днища C резервуара: 1 – стенка резервуара; 2 – футеровка; 3 – гранула среды

Далее прокомментируем выделенные нами взаимосвязи. В случае работы вибростанка в ненагруженном состоянии или при загрузке обрабатываемых деталей «внавал» по мере удаления от рабочих поверхностей резервуара к его центральной части, петлеобразный характер волнового движения гранул не меняется, однако длины волн и размеры петель уменьшаются, что является результатом гашения силового импульса, передаваемого от рабочих поверхностей в глубь слоев демпфирующей рабочей среды. По мере приближения к центральной части резервуара, степень гашения импульса возрастает, что приводит к формированию зоны с пониженной скоростью перемещения и величиной взаимного давления гранул. Процесс виброобработки в этой зоне отсутствует.

При работе вибростанка под нагрузкой, то есть когда в резервуаре производится операция виброобработки партии сложнопрофильных корпусных деталей, установленных пакетами в приспособлении, совершающем автономные, независимые от резервуара, движения, что позволяет деталям выполнять

двойную функцию, то есть одновременно с их обработкой свободной рабочей средой оказывать на эту же рабочую среду, изначально получающую энергетическое воздействие от рабочих поверхностей колеблющегося резервуара, еще и дополнительное энергетическое воздействие, формируемое в различных случаях вибрационными, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, силами, вибрационными и центробежными силами при их комбинировании, а также силами струйного движения потоков жидкости.

Следует отметить, что в данном случае пакеты обрабатываемых деталей, установленные с помощью подвижного приспособления в резервуаре вибростанка, конструктивно имитируют дефлекторы рабочей среды и в своем поведении повторяют характер динамического воздействия рабочих поверхностей резервуара, являясь их физическими аналогами, увеличивающими площадь силового контакта с рабочей средой и активизирующими ее циркуляционное движение.

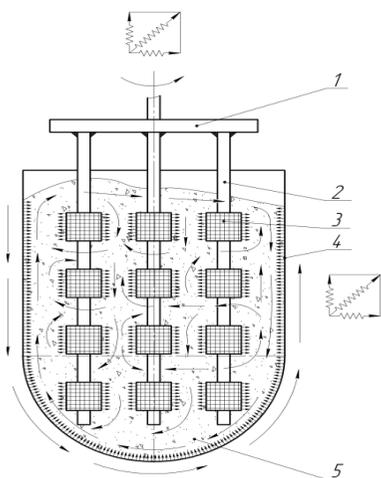


Рисунок 9 – Движение потоков рабочей среды под действием комбинированных схем энергетического воздействия:

- 1 – приспособление; 2 – установочный палец;
- 3 – обрабатываемая деталь; 4 – резервуар;
- 5 – рабочая среда

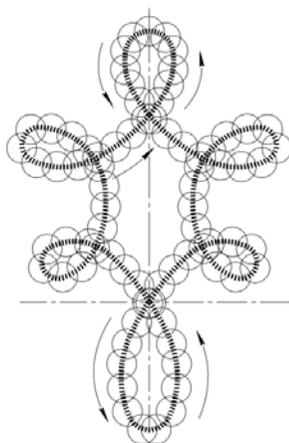


Рисунок 10 – Траектория волнового движения гранул рабочей среды в виде эпициклической кривой

Такое решение процесса виброобработки позволяет обеспечить стабильность и эффективность его протекания, что достигается организацией в резервуаре сложных несимметричных траекторий волнового движения потоков рабочей среды с повышенными динамическими характеристиками гранул

(рис. 9), возникающими за счет значительных вибрационных ускорений, которые достигают 25...30g (g – ускорение силы земного притяжения).

Одновременное независимое движение резервуара и приспособления с обрабатываемыми деталями, формируемое комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду согласно схеме (см. рис. 1) вызывает несимметричную по вертикали сложную траекторию волнового движения среды, гранулы которой в свою очередь перемещаются по петлеобразной траектории в виде эллиптической кривой (рис. 10).

Таким образом, общий характер кинематики и динамики процессов отделочно-зачистной обработки в колеблющемся резервуаре, обуславливающий достижение высоких значений параметров относительного перемещения и взаимного давления гранул рабочей среды, и обрабатываемых деталей, обеспечивает наивыгоднейшие условия для процессов микрорезания и упругопластического деформирования при выполнении различных операций виброобработки, совершенствуя которые можно приблизиться к прогрессивным технологиям и оборудованию отделочно-зачистной обработки, крайне необходимым для производства принципиально нового уровня конкурентоспособных изделий [11].

Список использованных источников: 1. *Бабичев А.П.* Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с. 2. *Мицьок А.В.* Эффективность новых разновидностей способа вибрационной обработки деталей / А.В. Мицьок, В.А. Федорович // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. Донбаської машинобуд. акад. – Вип. 29. – Краматорськ, 2011. – С. 37 – 44. 3. *Мицьок А.В.* Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали / А.В. Мицьок, В.А. Федорович // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2011. – № 6 (83). – С. 26 – 34. 4. *Пат. 69420* Україна, МПК В24В 31/06 Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцьок; Заявл. 31.10.11; Опубл. 25.04.12, Бюл. № 8. 5. *Пат. 69421* Україна, МПК В24В 31/06 Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцьок; Заявл. 31.10.11; Опубл. 25.04.12, Бюл. № 8. 6. *Пат. 69657* Україна, МПК В24В 31/06 Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцьок; Заявл. 07.11.11; Опубл. 10.05.12, Бюл. № 9. 7. *Кулаков, Ю.М.* Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М: Машиностроение, 1979. – 216 с. 8. *Опирский Б.Я.* Новые вибрационные станки /Б.Я. Опирский, П.Д. Денисов. – Львов: Свит, 1991. – 160 с. 9. <http://www.walther-trowal.de/de/produkte/gleitschleiftechnik/trogvibratoren> 10. *Обработка деталей* свободными абразивами в вибрирующих резервуарах: моногр. / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов и др. – К.: Вища школа, 1975. – 188 с. 11. *Мицьок А.В.* Новая разновидность способа вибрационной обработки с использованием струйного движения потоков жидкости / А.В. Мицьок, В.А. Федорович // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип 129. – 2012. Серія Машинобудування та транспорт. – С. 168 – 173.

Поступила в редколлегию 29.06.12