

На правах рукописи



**Приходько Александр Александрович**

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ПЛАНЕТАРНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО  
МЕХАНИЗМА ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО  
ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

Специальность 05.02.18 – Теория механизмов и машин

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Краснодар – 2019

Работа выполнена на кафедре «Наземного транспорта и механики» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Смелягин Анатолий Игоревич**

**Официальные оппоненты:** **Яцун Сергей Федорович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Механика,  
мехатроника и робототехника» ФГБОУ ВО  
«Юго-Западный государственный  
университет», г. Курск;

**Несмиянов Иван Алексеевич**  
доктор технических наук, доцент, декан  
Инженерно-технологического факультета  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
аграрный университет», г. Волгоград.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Донской государственный  
технический университет» (г. Ростов-на-Дону).

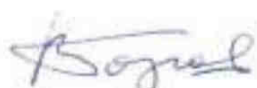
Защита состоится «21» мая 2019 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 002.059.05 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) по адресу: 101000, Москва, М. Харитоньевский пер., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) и на сайте <http://www.imash.ru>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять по указанному адресу в диссертационный совет Д 002.059.05.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Бозров Виктор Маирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Перемешивающие устройства находят широкое применение в химической, нефтеперерабатывающей, машиностроительной, пищевой и многих других отраслях промышленности. Высокое качество получаемых продуктов может быть обеспечено только при необходимом уровне тепломассообмена в реакторе с перемешивающим устройством.

Анализ научной литературы показывает, что традиционные и наиболее распространенные в промышленности аппараты с вращательным движением рабочего органа не позволяют реализовать высокую интенсивность перемешивания. Поэтому одной из актуальных задач является разработка и исследование принципиально новых исполнительных механизмов, обеспечивающих высокий перепад скоростей перемешиваемой среды.

В последнее время для решения данной задачи исследователями были предложены конструктивные схемы рычажных исполнительных механизмов перемешивающих устройств со сложным пространственным движением рабочего органа, а также планетарные смесители, которые позволяют периодически перемешивать среду по всему объему аппарата. Однако исполнительные механизмы таких машин не изолированы от продуктов перемешивания и находятся в зоне реактора, поэтому не могут быть использованы при больших скоростях рабочего органа, при работе под давлением и с агрессивными средами. Данный конструктивный недостаток существенно ограничивает области применения пространственных и планетарных смесителей.

Вибрационный способ перемешивания в последнее время нашел применение как наиболее эффективный, способствующий интенсификации ряда технологических процессов. Для возбуждения колебаний в жидкой среде используются электромагнитные или рычажные механизмы с возвратно-поступательным движением рабочего органа. Однако более перспективным направлением исследований является создание перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочего органа, так как в них отсутствуют вертикальные вибрации и применяются стандартные уплотнения.

**Степень разработанности темы.** Вопросам расчета, проектирования и исследования исполнительных механизмов и приводов перемешивающих устройств посвящены работы отечественных и зарубежных ученых В.М. Барабаша, В.И. Бегачева, Л.Н. Брагинского, Э.А. Васильцова, Р.Ф. Ганиева, Ф.Л. Литвина, А.Г. Мудрова, А.В. Осипова, В.И. Пожбелко, А.И. Смелягина, Ф. Стренка, П. Тауска, В.Г. Ушакова, З. Штербачека, С.Ф. Яцуна, P.J. Cullen, Y. Komoda, S. Masiuk, H. Suzuki, R. Wójtowicz и др.

Следует отметить, что большинство научных исследований по созданию новых исполнительных механизмов перемешивающих устройств посвящено вопросам кинематики, оптимизации параметров процесса перемешивания, экспериментальным исследованиям по оценке эффективности

тепломассообмена, определению потребляемой мощности. При этом схема привода чаще всего выбирается интуитивно, без применения современных методов структурного синтеза, а также практически отсутствуют работы по изучению происходящих в машине динамических процессов, которые могут позволить спроектировать рациональную конструкцию и определить области ее практического применения.

**Объект исследования.** Перемешивающее устройство с планетарным механизмом возвратно-вращательного движения.

**Предмет исследования.** Установление структурных, кинематических, динамических и силовых свойств и характеристик планетарного механизма с эллиптическими зубчатыми колесами в составе возвратно-вращательного перемешивающего устройства.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование перемешивающего устройства с планетарным исполнительным механизмом возвратно-вращательного движения.

**Основные задачи исследования:**

1. Синтез и анализ структурных схем исполнительных механизмов возвратно-вращательных перемешивающих устройств (ВВПУ).

2. Исследование кинематики планетарного исполнительного механизма перемешивающего устройства, обеспечивающего возвратно-вращательное движение рабочего органа.

3. Разработка методики уравнивания двухсателлитного планетарного механизма, определение необходимых соотношений масс звеньев механизма.

4. Построение динамической модели возвратно-вращательного перемешивающего устройства с планетарным исполнительным механизмом и исследование законов движения машины при различных режимах работы.

5. Проведение силового анализа исполнительного механизма, определение реакций в кинематических парах и уравнивающего момента.

6. Экспериментальная проверка полученных результатов на спроектированном и изготовленном лабораторном стенде.

**Методы исследований.** Поставленные задачи решаются методами теории механизмов и машин, теоретической механики, высшей математики:

- при синтезе и анализе схем перемешивающих устройств применены структурные математические модели механизмов и машин;
- кинематический анализ планетарного перемешивающего устройства проведен методом Кутцбаха-Смирнова, усовершенствованным для механизмов с некруглыми зубчатыми колесами;
- решения дифференциальных уравнений динамики получены с помощью аналитических и численных методов;
- обработка результатов экспериментов проведена с использованием статистических методов анализа.

**Обоснованность и достоверность научных результатов** обеспечивается применением фундаментальных положений механики, строгими

математическими выводами, сходимостью аналитических и численных решений, проведенными экспериментальными исследованиями.

**Научная новизна исследований** заключается в том, что:

1. Предложены структурные схемы исполнительных механизмов перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов. Новизна полученных машин подтверждена 7 патентами РФ.

2. Разработана кинематическая модель планетарной передачи с эллиптическими зубчатыми колесами и экспериментально доказана её адекватность реальным механизмам на примере анализа функции положения; изучено влияние эксцентриситета эллиптических колес на угол качания выходного вала и коэффициент асимметрии хода механизма.

3. Проведено исследование динамических процессов в планетарном приводе перемешивающего устройства: определены условия статического и динамического уравнивания исполнительного механизма, получены законы движения звеньев с учетом нелинейностей различной природы, разработана методика проведения силового анализа.

4. Проведенные натурные исследования лабораторного реактора с планетарным приводом подтвердили эффективность использования возвратно-вращательного перемешивающего устройства.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Структурные схемы исполнительных механизмов перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов.

2. Кинематическая модель планетарного механизма с эллиптическими зубчатыми колесами, теоретическое и экспериментальное исследование кинематики оригинального исполнительного механизма.

3. Динамическая модель планетарного возвратно-вращательного перемешивающего устройства и результаты ее исследования при различных режимах работы.

4. Методика уравнивания и проведения силового анализа двухсателлитного планетарного механизма с эллиптическими зубчатыми колесами, аналитические зависимости для нахождения реакций в кинематических парах и уравнивающего момента.

5. Конструкция лабораторного стенда с ВВПУ и результаты экспериментальных исследований.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

- получены структурные схемы возвратно-вращательных перемешивающих устройств;
- разработаны и проанализированы физические и математические модели оригинального планетарного механизма с эллиптическими зубчатыми колесами;
- проведены экспериментальные исследования лабораторного реактора с возвратно-вращательным перемешивающим устройством.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при проектировании и изготовлении новых перемешивающих устройств, а также других машин возвратно-вращательного действия.

#### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Спроектирован и изготовлен планетарный исполнительный механизм возвратно-вращательного перемешивающего устройства, который прошел экспериментальные испытания на базе оборудования ЦКП «Исследовательский центр пищевых и химических технологий» КубГТУ.

Результаты работы были реализованы при выполнении работ по грантам РФФИ № 17-301-50016 «Исследование динамики перемешивающего устройства с возвратно-вращательным движением рабочего органа», № 18-31-00256 «Синтез и анализ оригинальных структурных, кинематических и динамических моделей перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов», научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок по государственному контракту № 8037ГУ/2015 от 23.11.2015 г. в рамках программы «УМНИК» по теме «Разработка и исследование инновационных перемешивающих устройств».

Результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедры Наземного транспорта и механики Кубанского государственного технологического университета, а также приняты к внедрению на ООО НПФ «ФОРТ».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных выставках и конференциях:

- XXV, XXVII, XXVIII, XXIX Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (г. Москва, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, 2013, 2015–2017);
- VI Международная конференция «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, ВСГУТУ, 2015);
- VII Международная научно-практическая конференция «Инновации в машиностроении» (г. Кемерово, КузГТУ, 2015);
- VIII, IX Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 2016);
- III Международная школа-конференция «Нелинейная динамика машин» (г. Москва, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, 2016);
- XIX Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед» (разработка отмечена серебряной медалью, г. Москва, 2016);
- XX Международный салон научных исследований, инноваций и трансфера технологий «INVENTICA 2016» (разработка отмечена золотой медалью, Румыния, г. Яссы, 2016);
- V Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (г. Москва, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, 2017);

– II Всероссийская научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике» (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017).

**Публикации.** Основные результаты проведенных исследований отражены в 30 публикациях, в том числе 6 статьях в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 статьях в зарубежных изданиях, 7 патентах РФ, 12 статьях в сборниках трудов конференций и прочих научных изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 143 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 135 страницах и содержит 71 рисунок и 2 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, дается общая характеристика диссертационной работы, а также содержатся основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор научной и патентной литературы, посвященной вопросам разработки и исследования перемешивающих устройств. Рассмотрены конструкции традиционных вращательных аппаратов, а также нестандартных приводов, исполнительные механизмы которых позволяют реализовать различные виды движения рабочего органа:

- плоскопараллельное движение (планетарные смесители);
- сложное пространственное движение;
- возвратно-поступательное движение;
- вращательное движение с внутрицикловым изменением угловой скорости;
- возвратно-вращательное движение.

Проведенные многими авторами исследования показывают, что применение устройств с нестационарными режимами движения рабочих органов способствует интенсификации теплообмена в реакторе. При этом в результате обзора установлено, что наиболее перспективными для дальнейшего практического применения являются возвратно-вращательные перемешивающие устройства. Они обеспечивают высокий градиент скоростей перемешиваемой среды, а использование стандартных уплотнений позволяет встраиваться в существующее технологическое оборудование, что может существенно снизить стоимость внедрения новых машин в промышленность.

На основании проведенного литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена структурному синтезу схем перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочего органа. Для определения состава звеньев и кинематических пар, из которых будет состоять исполнительный механизм проектируемого устройства, используется

структурная математическая модель механизмов и машин с замкнутыми кинематическими цепями:

$$\begin{cases} p = \frac{1}{2} \left( \sum_{t=T-j}^2 m_t + S \right); \\ n = \sum_{t=T-j}^2 n_t; \\ W = \sum_{i=1}^{\Pi-1} i p_i - k \Pi; \\ k = p - n; \\ p = \sum_{i=1}^{\Pi-1} p_i; \\ T \leq k + 1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $n$  – общее число подвижных звеньев;  $n_t$  – число подвижных звеньев с  $t$  вершинами;  $p$  – общее число кинематических пар;  $p_i$  – число кинематических пар  $i$ -той подвижности;  $T$  – количество вершин базового звена;  $k$  – число независимых замкнутых контуров;  $\Pi$  – подвижность пространства, в котором синтезируется механизм;  $W$  – подвижность (количество степеней свободы) механизма;  $S$  – число присоединений к стойкам;  $i, j$  – целочисленные индексы.

С целью образования простых и компактных структурных схем проведен синтез исполнительных механизмов с одной степенью свободы ( $W=1$ ), существующих в трехподвижном пространстве ( $\Pi=3$ ) и имеющих один или два независимых замкнутых контура ( $k=1,2$ ). После подстановки обозначенных условий синтеза в систему уравнений (1) структурные математические модели механизмов с одним и двумя независимыми замкнутыми контурами имеют вид:

$$\begin{cases} p = \frac{1}{2} (2n_2 + S); \\ n = n_2; \\ 1 = p_1 - 3; \\ 1 = p - n; \\ p = p_1; \\ 2 \leq 2. \end{cases} \quad (2) \quad \begin{cases} p = \frac{1}{2} (3n_3 + 2n_2 + S); \\ n = n_3 + n_2; \\ 1 = 2p_2 + p_1 - 2 \cdot 3; \\ 2 = p - n; \\ p = p_1 + p_2; \\ 3 \leq 3. \end{cases} \quad (3)$$

Для построения схем ВВПУ были выбраны следующие решения систем уравнений (2), (3):

$$p=p_1=4; n=3; S=2; \quad (4)$$

$$p_1=3, p_2=2, p=5, n_3=1, n_2=2, n=3, S=3; \quad (5)$$

В качестве исполнительных механизмов, соответствующих решениям (4), (5) и преобразующих вращательное движение в возвратно-вращательное, предложено использовать шарнирный четырехзвенник (рис. 1) и планетарный механизм с эллиптическими зубчатыми колесами (рис. 2).



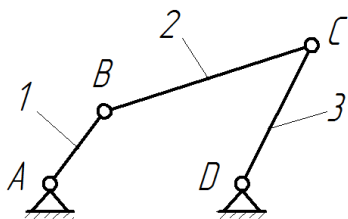


Рис. 1. Шарнирный четырехзвенник

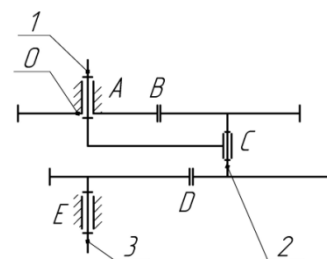


Рис. 2. Планетарный механизм с эллиптическими зубчатыми колесами

Так как при работе односателлитного планетарного механизма (рис. 2) будут возникать неуравновешенные силы инерции, предложено использовать двухсателлитную схему с противовесом на втором сателлите (рис. 3).

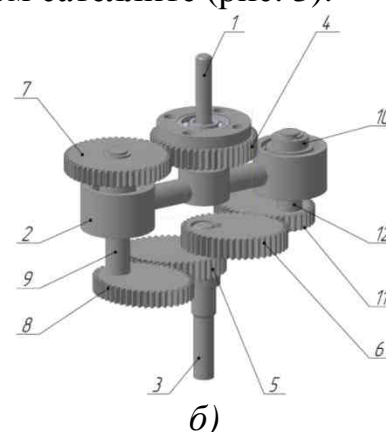
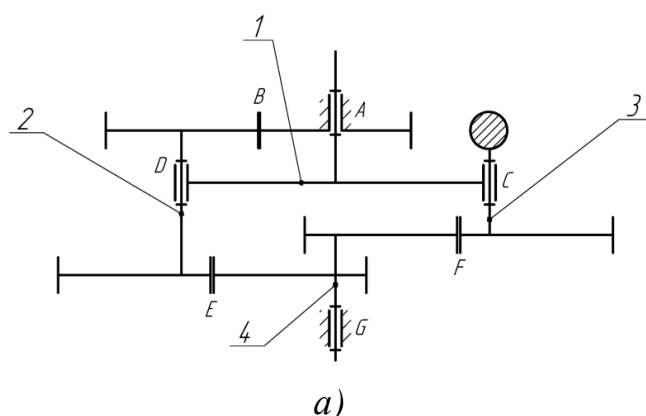


Рис. 3. Двухсателлитный планетарный механизм с противовесом:  
а – структурная схема; б – конструкция механизма

Анализ структурной схемы (рис. 3, а) показывает, что двухсателлитный механизм включает в себя: четыре одноподвижные низшие кинематические пары  $A, D, C, G$  ( $p_1=4$ ), три двухподвижные высшие кинематические пары  $B, E, F$  ( $p_2=3$ ), одно двухвершинное звено 3 ( $n_2=1$ ) и три трехвершинных звена 1, 2 и 4 ( $n_3=3$ ). Исследуемый механизм существует в трехподвижном пространстве ( $\Pi=3$ ) и имеет три присоединения к стойке ( $S=3$ ).

Возвратно-вращательное движение в планетарном механизме (рис. 3, б) обеспечивается следующим образом. Вращение входного вала 1 передается водилу 2, благодаря этому цилиндрическое зубчатое колесо 7 обкатывается по солнечному колесу 4. Движение колеса 7 через вал 9 и эллиптическую шестерню 8 передается эллиптическому зубчатому колесу 5 и выходному валу 3, а также жестко закрепленному на выходном валу эллиптическому зубчатому колесу 6. При одинаковых размерах цилиндрических колес 7 и 4 выходной вал 3 через полный оборот входного вала 1 оказывается в том же положении, однако, благодаря переменному передаточному отношению пары эллиптических колес 8 и 5, совершает возвратно-вращательное движение. Второй сателлит, состоящий из груза 10, эллиптического колеса 11 и вала 12, является противовесом и повторяет движение первого сателлита.

Соединив входное звено исполнительного механизма с двигателем, а выходное – с рабочим органом, получим возвратно-вращательное перемешивающее устройство (рис. 4).

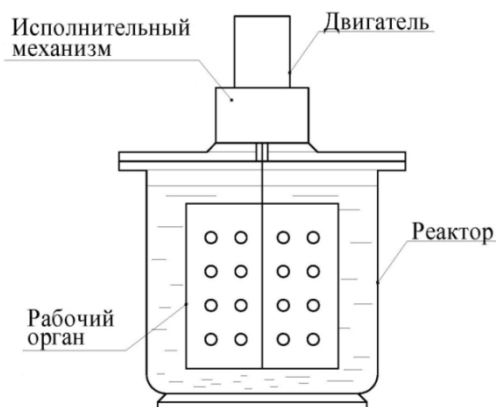


Рис. 4. Возвратно-вращательное перемешивающее устройство

Из рисунка 4 следует, что перемешивающее устройство имеет один рабочий орган и может эффективно применяться в небольших лабораторных установках. С целью повышения эффективности перемешивания в промышленных реакторах большего объема проведен структурный синтез сложных исполнительных механизмов с несколькими рабочими органами, полученных в результате добавления в схему привода зубчатой (пат. 2528843, 2616656) или цепной передачи (пат. 2585637, 2616655).

**В третьей главе** проведены кинематические и динамические исследования ВВПУ с планетарным исполнительным механизмом.

Определение кинематических параметров планетарной передачи проводится с помощью построения плана линейных скоростей (рис. 7). Из точки  $C$  откладывается вектор скорости  $CC'$ . Соединив точку  $C'$  с точкой  $A$ , получаем линию распределения линейных скоростей водила  $C'A$ . Соединив точку  $B$  с точкой  $C'$ , получим линию распределения линейных скоростей сателлита. На этой линии лежит точка  $D'$  – конец вектора  $DD'$ , изображающего скорость точки  $D$ . Соединив точку  $D'$  с точкой  $A$ , получим линию распределения скоростей эллиптического колеса 5 и соответственно выходного вала 3.

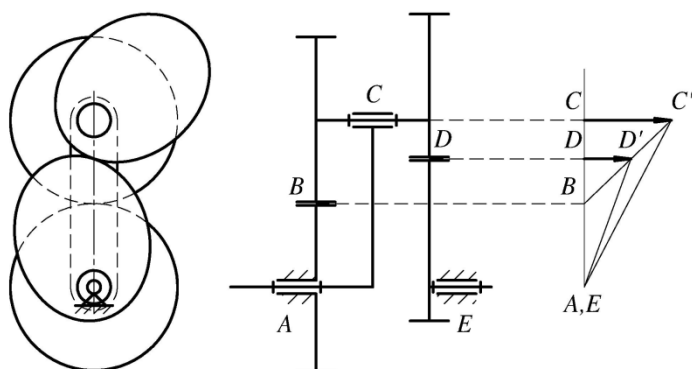


Рис. 7. План линейных скоростей звеньев механизма

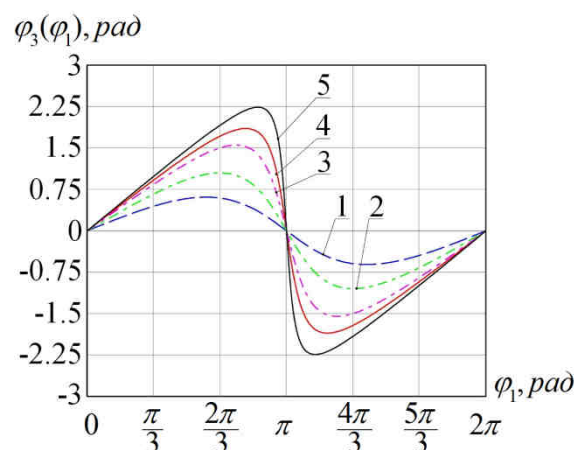


Рис. 8. Графики функций положения:

1 –  $e_1=0.3$ , 2 –  $e_2=0.5$ , 3 –  $e_3=0.7$ ,  
4 –  $e_4=0.8$ , 5 –  $e_5=0.9$

Во время работы механизма точка  $D$  меняет свое положение относительно неподвижной точки  $A$ , что приводит к изменению величины и направления вектора скорости  $DD'$ . Таким образом осуществляется возвратно-вращательное движение выходного вала при вращательном движении входного.

Используя подобие треугольников  $BDD'$  и  $BCC'$ , переходим от соотношения скоростей к соотношению геометрических параметров планетарного механизма:

$$\phi'_3 = \frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{v_D \cdot AC}{v_C \cdot DE} = \frac{BD \cdot AC}{BC \cdot DE}, \quad (7)$$

где  $\phi'_3$  – аналог угловой скорости выходного вала 3 (рис. 6);  $\omega_3, \omega_1$  – угловые скорости выходного и входного валов;  $v_D, v_C$  – линейные скорости точек  $D, C$ .

Длины отрезков  $BD$  и  $DE$  переменны и определяются расстоянием от центра эллиптического колеса до точки зацепления. Используя для нахождения обозначенных отрезков уравнение эллипса в полярных координатах и выполнив преобразования, получим:

$$\phi'_3 = \frac{2e(e - \cos(\varphi_1 + \pi))}{1 - 2e \cos(\varphi_1 + \pi) + e^2}, \quad (8)$$

где  $e$  – эксцентриситет делительного эллипса.

Путем интегрирования и дифференцирования (8) по обобщенной координате были получены уравнения для определения функции положения и аналога углового ускорения выходного вала. Графики функций положения для различных эксцентриситетов пары эллиптических колес показаны на рисунке 8.

Как видно из рисунка 8, кинематические характеристики планетарного механизма определяются геометрией эллиптических зубчатых колес. При увеличении эксцентриситетов увеличивается угол качания выходного звена  $\alpha$  и коэффициент асимметрии хода механизма  $k$ . Графики зависимостей  $\alpha(e)$  и  $k(e)$  представлены на рисунке 9.

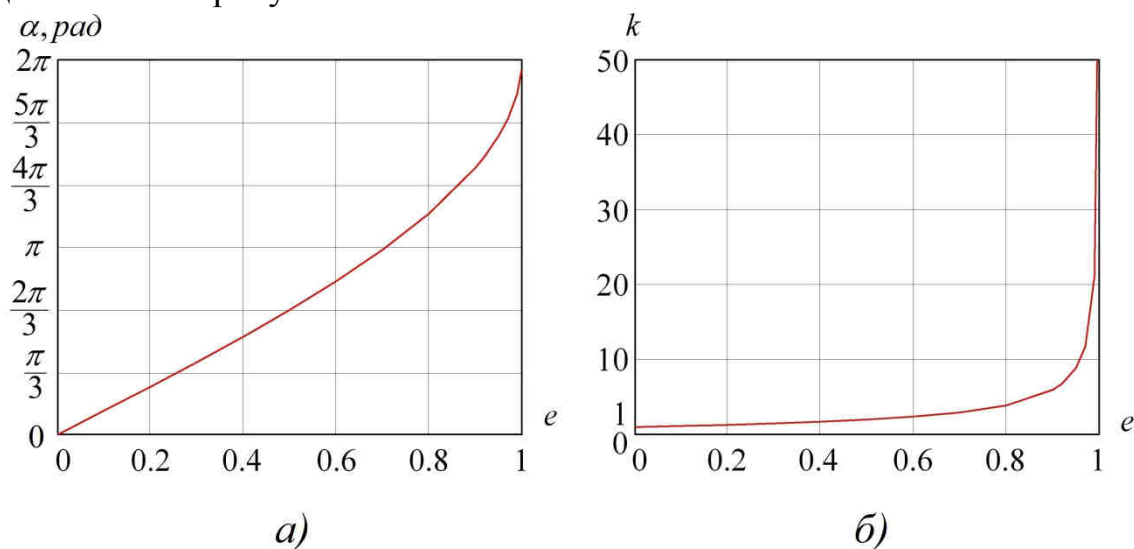


Рис. 9. Графики зависимостей  $\alpha(e)$  (а) и  $k(e)$  (б)

С целью устранения нежелательных вибраций и шума при работе привода ВВПУ, а также снижения реакций в кинематических парах проведено уравнивание планетарного исполнительного механизма с эллиптическими зубчатыми колесами (рис. 10).

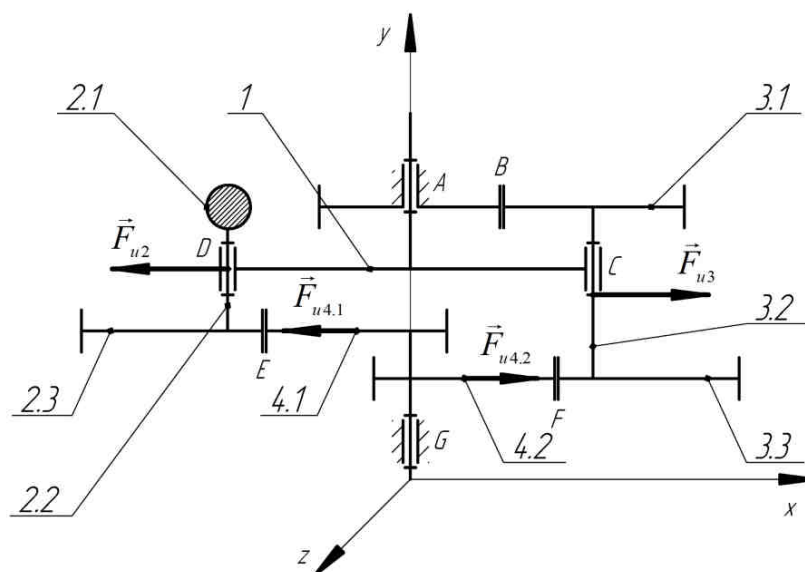


Рис. 10. Расчетная схема уравнивания планетарного механизма

Для проведения статического уравнивания необходимо соблюдение условия расположения центра масс механизма на оси вращения:

$$\begin{cases} m_1 x_1 + m_{2.1} x_{2.1} + m_{2.2} x_{2.2} + m_{2.3} x_{2.3} + m_{3.1} x_{3.1} + m_{3.2} x_{3.2} + m_{3.3} x_{3.3} + m_{4.1} x_{4.1} + m_{4.2} x_{4.2} = 0; \\ m_1 z_1 + m_{2.1} z_{2.1} + m_{2.2} z_{2.2} + m_{2.3} z_{2.3} + m_{3.1} z_{3.1} + m_{3.2} z_{3.2} + m_{3.3} z_{3.3} + m_{4.1} z_{4.1} + m_{4.2} z_{4.2} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Для проведения динамического уравнивания необходимо устранить моменты от пар сил  $\vec{F}_{u2}, \vec{F}_{u3}$  и  $\vec{F}_{u4.1}, \vec{F}_{u4.2}$ . Пара сил инерции  $\vec{F}_{u2}$  и  $\vec{F}_{u3}$  создает момент, который будет приводить к перекосу водила и передаваться на входной вал и опору A. Для его устранения необходимо, чтобы координаты у центров масс сателлитов совпадали, то есть соблюдение условия  $y_{c2} = y_{c3}$ . Согласно рисунку 10, получим:

$$\frac{m_{2.1} y_{2.1} + m_{2.2} y_{2.2} + m_{2.3} y_{2.3}}{m_{2.1} + m_{2.2} + m_{2.3}} = \frac{m_{3.1} y_{3.1} + m_{3.2} y_{3.2} + m_{3.3} y_{3.3}}{m_{3.1} + m_{3.2} + m_{3.3}}. \quad (10)$$

Анализ схемы механизма показывает, что пара сил инерции  $\vec{F}_{u4.1}$  и  $\vec{F}_{u4.2}$ , действующих на эллиптические колеса, будет создавать изгибающий момент на выходном валу (звено 4). На одну линию поместить эти силы инерции нельзя, поэтому данные неуравновешенные силы следует учитывать при проектировании выходного вала исполнительного механизма.

Уравнения (9), (10) позволили найти выражения для расчета масс звеньев, максимально удовлетворяющих условиям статического и динамического равновесия. Предложенная методика уравнивания использована при разработке экспериментального стенда.

Для исследования динамики определяется сопротивление среды, действующее на рабочий орган перемешивающего устройства (рис. 11).

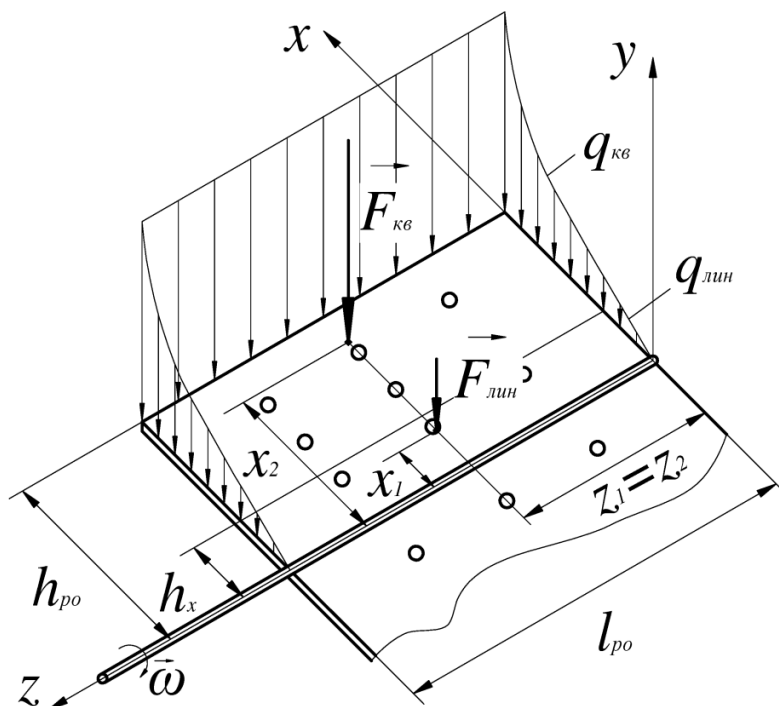


Рис. 11. Расчетная схема к определению момента сопротивления

При малых числах Рейнольдса ( $Re \leq 100$ ) сопротивление жидкости прямо пропорционально скорости, а при больших ( $Re > 100$ ) – квадрату скорости. Так как число  $Re$  неодинаково для различных участков рабочего органа, то на него могут одновременно действовать два вида сопротивления – линейное и квадратичное (рис. 11). В таком случае определяется граница  $h_x$ , на которой изменяется закон сопротивления среды.

После замены распределенных нагрузок сосредоточенными силами и выполнения необходимых преобразований, получена следующая формула для расчета момента сопротивления на рабочем органе:

$$M_c = \frac{n}{3} B_{лин} \cdot \omega_{po} \cdot l_{po} \cdot h_x^3 + \frac{n}{4} B_{кв} \cdot \omega_{po}^2 \cdot l_{po} (h_{po}^4 - h_x^4), \quad (11)$$

где  $B_{лин}$ ,  $\frac{H}{M^3 \cdot c}$  и  $B_{кв}$ ,  $\frac{H}{M^4 \cdot c^2}$  – коэффициенты линейного и квадратичного сопротивления;  $\omega_{po}$ ,  $\frac{рад}{c}$  – угловая скорость рабочего органа;  $n$  – количество лопастей на рабочем органе;  $h_{po}$ ,  $l_{po}$ ,  $M$  – ширина и длина лопасти.

Выражение (11) позволяет найти момент сопротивления перемешиваемой среды при возвратно-вращательном движении рабочего органа, когда наблюдается одновременно ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. Если граница  $h_x$  уходит за пределы рабочего органа (ламинарный режим) или находится слишком близко к оси вращения (турбулентный режим), то для расчета момента сопротивления по формуле (11) используется одно из слагаемых.

Геометрия эллиптических зубчатых колес планетарного механизма и нелинейность приложенной нагрузки будут приводить к неравномерности вращения вала двигателя. Для установления и исследования закона движения

начального звена по заданным кинематическим и силовым характеристикам использовались уравнения движения в форме интеграла энергии и в форме дифференциального уравнения второго порядка. Для рассматриваемого привода ВВПУ дифференциальное уравнение движения имеет вид:

$$\frac{\omega_1^2}{2} \cdot \frac{dI_{np}}{d\varphi_1} + \varepsilon_1 \cdot I_{np} = M_{nd} - M_{nc} \quad (12)$$

где:  $\varphi_1$ ,  $\omega_1$ ,  $\varepsilon_1$  – угол поворота, угловая скорость и угловое ускорение начального звена;  $I_{np} = \sum_{i=1}^n m_i S_i'^2 + \sum_{i=1}^n I_{s_i} \varphi_i'^2$  – приведенный к начальному звену момент инерции;  $M_{nc} = M_c \cdot \varphi_3'$  – приведенный момент сопротивления;  $M_{nd}$  – приведенный момент двигателя.

Исследование динамической модели (10) проводилось при различных углах ( $30^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ) и частотах ( $5 \leq f \leq 30$  Гц) колебаний рабочего органа. При увеличении частоты и угла колебаний увеличивается нагрузка на рабочем органе, что приводит к увеличению требуемого движущего момента (рис. 12).

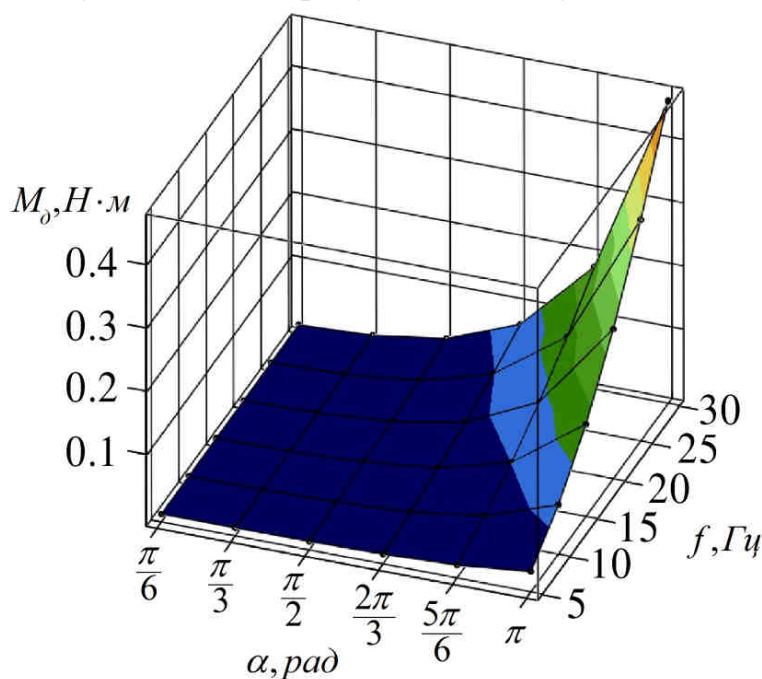


Рис. 12. График зависимости  $M_d(\alpha, f)$

В результате решения уравнения (10) определены зависимости  $\omega_1(\varphi_1)$  для различных режимов (рис. 13, а). Как видно из графиков, угловая скорость звена приведения не является постоянной величиной и колеблется вокруг среднего значения. Исследования показали, что во всех рассмотренных режимах коэффициент неравномерности вращения превышает допустимое значение  $[\delta] = 0.05$ . Для снижения колебаний скорости начального звена проведен расчет маховика. Зависимости  $\omega_1(\varphi_1)$  с учетом установки маховика показаны на рис. 13, б.

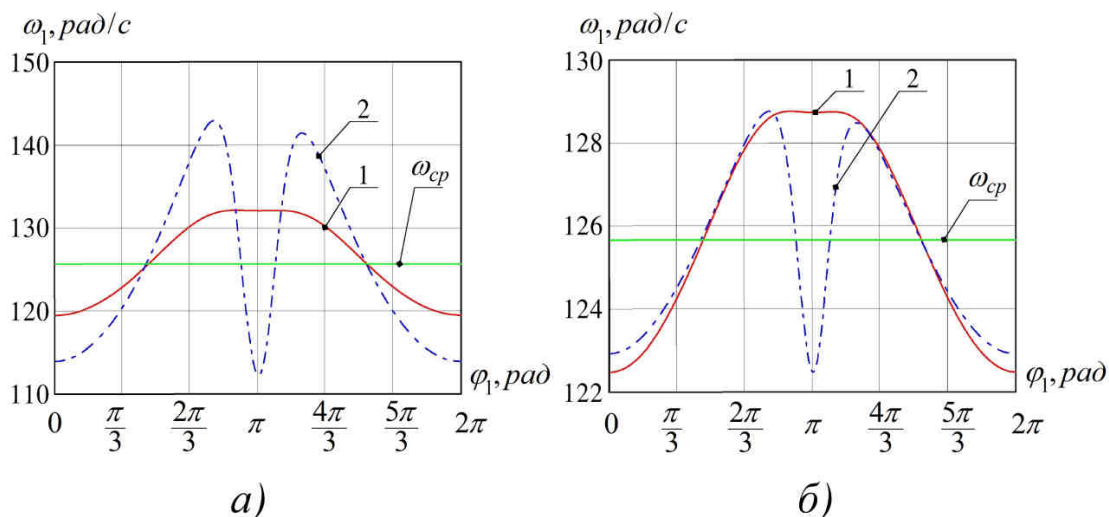


Рис. 13. Графики функций  $\omega_1(\varphi_1)$  без маховика (а) и с учетом маховика (б) при различных режимах:

$$1 - f=20 \text{ Гц}, \alpha = 60^\circ, \quad 2 - f=20 \text{ Гц}, \alpha = 150^\circ$$

Силовой анализ проведен путем построения расчетных схем и составления систем уравнений кинестатики для каждого звена. В результате решения данных уравнений определены реакции в кинематических парах для дальнейшего расчета деталей машины на прочность (рис. 14). Исследования показали, что наиболее нагруженными являются зубчатые зацепления (кинематические пары)  $B$  и  $F$ , и вращательная пара  $G$ .

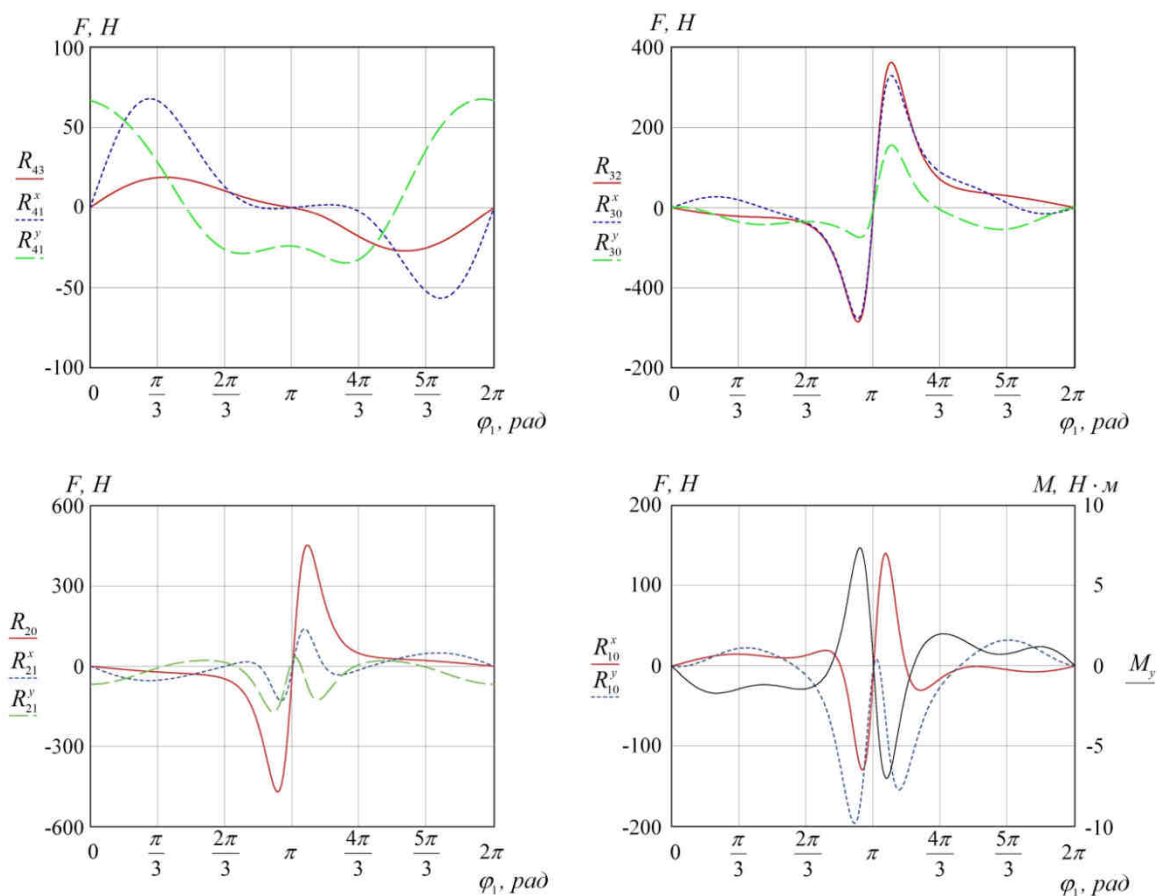


Рисунок 14 – Реакции в кинематических парах исполнительного механизма

Максимальные значения усилий наблюдаются во время изменения направления вращения рабочего органа. Предложенная методика силового анализа может быть реализована для различных режимов работы исполнительного механизма, что позволяет проводить широкие исследования кинестатики и выбирать наиболее рациональные режимы работы перемешивающего устройства.

В четвертой главе представлена конструкция ВВПУ для лабораторного стенда «Ika Magic Lab» (рис. 15) и приводятся результаты экспериментальных исследований.

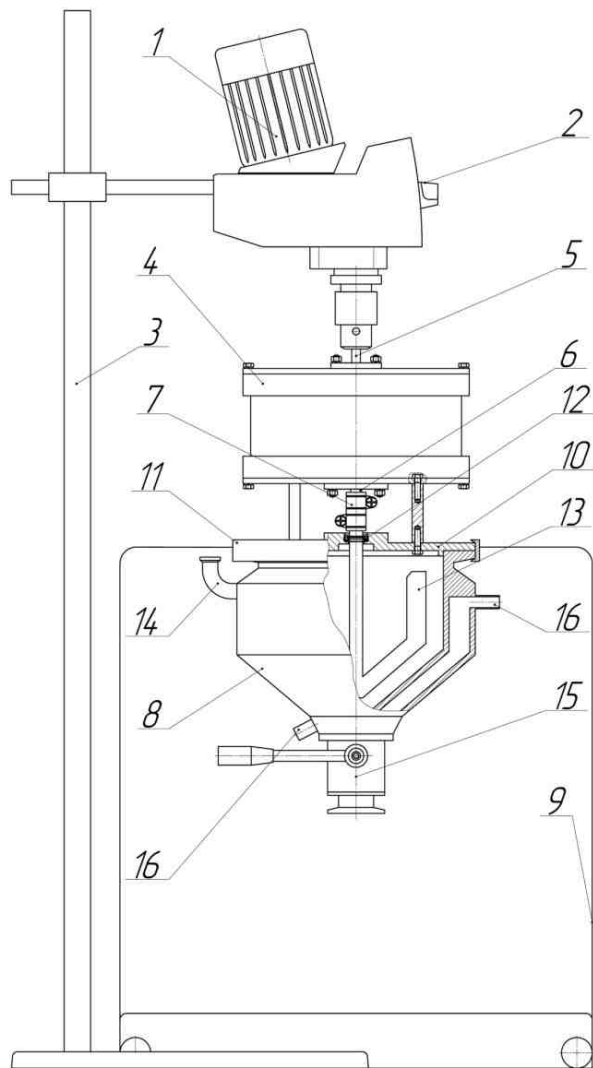


Рис. 15. Общий вид экспериментальной установки

Конструкция опытной установки состоит из следующих элементов: 1 – электродвигатель, 2 – блок управления двигателем, 3 – штатив, на котором закреплен двигатель, 4 – исполнительный механизм (ИМ) перемешивающего устройства, 5 – входной вал ИМ, 6 – выходной вал ИМ, 7 – соединительная муфта, 8 – реактор, 9 – рама, на которой закреплен реактор с ИМ, 10 – крышка реактора, 11 – уплотнительный зажим, 12 – уплотнение рабочего органа, 13 – рабочий орган, 14 – штуцер для загрузки продукта, 15 – выпускной клапан, 16 – штуцеры для подвода теплоносителя.

Перемешивающее устройство работает следующим образом. При включении электродвигателя 1 приводится в движение входной вал 5. Вращательное движение входного вала 5 с помощью исполнительного механизма 4 преобразуется в возвратно-вращательное движение выходного вала 6, которое посредством соединительной муфты 7 передается на рабочий орган 13, что

приводит к перемешиванию жидкой среды в реакторе 8.

Планетарный исполнительный механизм (рис. 16) состоит из корпуса 1, входного вала 2, водила 3, выходного вала 4, солнечного колеса 5, эллиптических зубчатых колес 6 и 7 на выходном валу, расположенных под углом  $180^\circ$ , первого сателлита, состоящего из цилиндрического зубчатого колеса 8, эллиптического колеса 9 и вала 10, второго сателлита, состоящего из противовеса 11, эллиптического колеса 12 и вала 13.



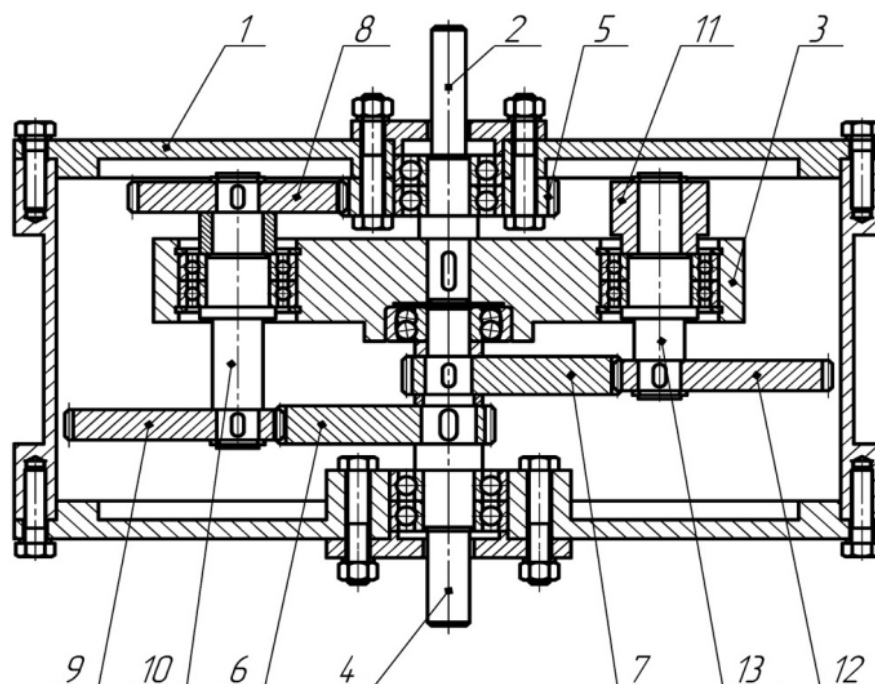


Рис. 16. Общий вид планетарного исполнительного механизма

Угол колебаний рабочего органа  $\alpha$  определяется эксцентриситетом эллиптических зубчатых колес. Поэтому экспериментальный стенд включает в себя набор из 5 комплектов сменных эллиптических колес с различными эксцентриситетами, при установке которых обеспечиваются следующие углы колебаний: 1 –  $\alpha = 147^\circ$ , 2 –  $\alpha = 131^\circ$ , 3 –  $\alpha = 113^\circ$ , 4 –  $\alpha = 92^\circ$ , 5 –  $\alpha = 65^\circ$ .

С целью проверки адекватности разработанной кинематической модели реальному механизму исследованы функции положения. Эксперимент проводился для всех комплектов сменных колес путем измерения углов поворота  $\varphi_{\text{вх}}$  и  $\varphi_{\text{вых}}$  входного и выходного валов с интервалом  $10^\circ$ , в каждом положении по 3 измерения (рис. 17).

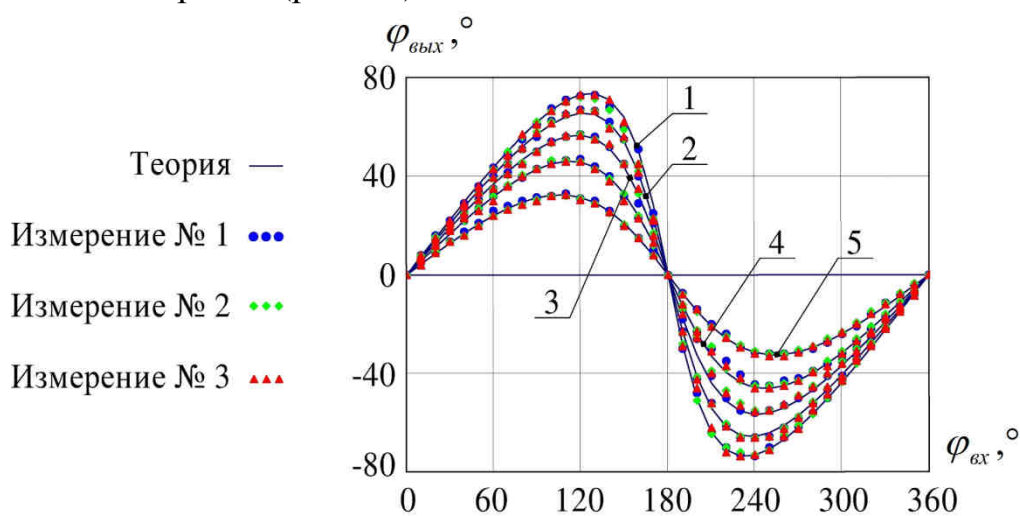


Рис. 17. Результаты измерения углов функций положения:

1 –  $\alpha = 147^\circ$ , 2 –  $\alpha = 131^\circ$ , 3 –  $\alpha = 113^\circ$ , 4 –  $\alpha = 92^\circ$ , 5 –  $\alpha = 65^\circ$

Максимальные отклонения результатов эксперимента от расчетных данных не превышают 7%. Из рисунка 17 следует, что принятая кинематическая модель адекватна.

Для сравнения интенсивности теплообмена в классическом реакторе и реакторе с ВВПУ проведен следующий эксперимент. В рубашку реактора подавался теплоноситель температурой  $70 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , которая с помощью циркуляционного термостата поддерживалась постоянной в течение эксперимента. Затем через входной штуцер загружали охлажденную дистиллированную воду, и производили перемешивание при частоте вращения двигателя 50 об/мин. Измерение температуры проводилось от  $43^\circ\text{C}$  до достижения равновесного режима –  $69.5^\circ\text{C}$  (рис. 18, а).

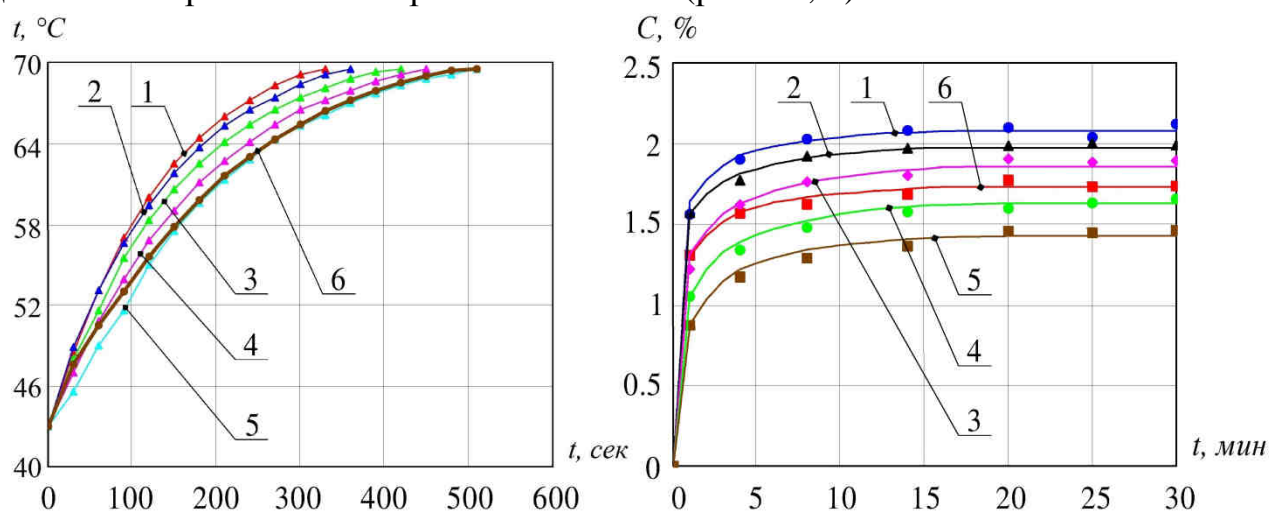


Рис. 18. Результаты исследования эффективности теплообмена (а) и экстракции масла (б):

1 –  $\alpha = 147^\circ$ , 2 –  $\alpha = 131^\circ$ , 3 –  $\alpha = 113^\circ$ , 4 –  $\alpha = 92^\circ$ , 5 –  $\alpha = 65^\circ$ ;  
6 – вращательное перемешивающее устройство

Из графиков видно, что процесс нагрева воды носит экспоненциальный характер, при этом интенсивность подъема температуры зависит от режима перемешивания. Возвратно-вращательное перемешивающее устройство с углом колебаний  $65^\circ$  имеет такую же эффективность, что и традиционное перемешивающее устройство, равновесный режим установился за 8.5 минут. Увеличение угла колебаний рабочего органа приводит к интенсификации теплообмена в реакторе. Так, применение ВВПУ с углом колебаний  $147^\circ$  позволяет сократить время перемешивания по сравнению с классическим реактором на 3 минуты, что составляет 35%.

Также эффективность перемешивания в разработанном ВВПУ оценивалась на примере экстракции масла из подсолнечного жмыха. Зависимости концентрации масла в мисцелле ( $C$ , %) от времени процесса ( $t$ , мин) для различных режимов представлены на рис. 18, б. Исследования показали, что ВВПУ с углами колебаний рабочего органа  $113^\circ$ ,  $131^\circ$  и  $147^\circ$  позволили увеличить интенсивность массообмена и ускорить процесс экстракции по сравнению с классическим вращательным перемешивающим устройством. Выход масла при этом увеличился на 9.17%, 14.65% и 22.2% соответственно.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен аналитический обзор существующих конструкций перемешивающих устройств с различными видами движения рабочего органа, в результате чего доказана актуальность создания новых, высокоэффективных ВВПУ. С помощью методов структурного синтеза разработаны схемы механизмов возвратно-вращательного движения, которые предложено использовать в качестве исполнительных механизмов перемешивающих устройств.

2. В результате исследований кинематики планетарного механизма перемешивающего устройства получены аналитические зависимости для нахождения положений, аналогов скоростей и ускорений всех звеньев механизма и их центров масс; изучено влияние эксцентриситета эллиптических колес на угол качания выходного вала и коэффициент асимметрии хода механизма.

3. Выведены выражения для нахождения масс звеньев, обеспечивающих статическое и частичное динамическое уравнивание планетарного механизма.

4. Динамический анализ планетарного возвратно-вращательного перемешивающего устройства позволил определить режимы движения перемешиваемой среды, момент сопротивления на рабочем органе, и установить законы движения звеньев механизма.

5. Исследована кинетостатика планетарного исполнительного механизма. Проведен расчет ВВПУ и определены функции изменения реакций в кинематических парах.

6. На основании проведенных теоретических исследований спроектирован, изготовлен и испытан исполнительный механизм возвратно-вращательного перемешивающего устройства. В результате экспериментальных исследований доказано увеличение эффективности процессов теплообмена (до 35%) и экстракции (на 10-20%) в реакторе с ВВПУ.

7. Проведенные натурные исследования функции положения планетарного механизма и статистический анализ результатов подтвердили адекватность кинематической модели реальным механизмам с различными размерами эллиптических колес.

### **Содержание диссертации отражено в следующих работах:**

#### **Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК:**

1. Приходько, А.А. Структурный синтез перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – № 4. – С. 69-75.

2. Смелягин, А.И. Структура и кинематика планетарного преобразователя вращательного движения в возвратно-вращательное / А.И. Смелягин, А.А.

Приходько // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 6. – С. 19-24.

3. Приходько, А.А. Кинематический анализ планетарного зубчатого механизма преобразования вращательного движения в возвратно-вращательное / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 12. – С. 21-27.

4. Приходько, А.А. Уравновешивание планетарного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – № 4. – С. 62-67.

5. Приходько, А.А. Экспериментальное исследование кинематики планетарного возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.А. Приходько, А.И. Смелягин, Н.В. Мевша // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 121-133.

6. Брискин, Е.С. О математическом моделировании динамики планетарного возвратно-вращательного перемешивающего устройства / Е.С. Брискин, А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 14 (209). – С. 11-18.

**Статьи в зарубежных изданиях, индексируемых  
Scopus или Web of Science:**

7. Prikhodko, A.A. Kinematic analysis of mechanism for converting rotational motion into reciprocating rotational motion / A.A. Prikhodko, A.I. Smelyagin // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 87-92.

8. Prikhodko, A.A. Dynamic analysis of rotationally reciprocating stirred tank with multiple impellers / A.A. Prikhodko, A.I. Smelyagin // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – IEEE, 2015. – P. 1-5.

9. Smelyagin, A.I. Structure and kinematics of a planetary converter of the rotational motion into the reciprocating rotary motion / A.I. Smelyagin, A.A. Prikhod'ko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2016. – Vol. 45. – Iss. 6. – P. 500-505.

10. Prikhodko, A.A. Development and research of vibromixing reactor with rotationally reciprocating motion of impeller / A.A. Prikhodko, A.I. Smelyagin // Vibroengineering Procedia. – 2016. – Vol. 8. – P. 102-107.

11. Prikhodko, A.A. Dynamics of rotationally reciprocating stirred tank with planetary actuator / A.A. Prikhodko, A.I. Smelyagin // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 858. – 012026.

**Патенты РФ на изобретения и полезные модели:**

12. Пат. 2528843 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> B01F 7/18. Перемешивающее устройство / Приходько А.А., Смелягин А.И.; заявитель и патентообладатель Кубанский гос. тех. ун-т. – № 2013121535/05; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.09.2014, Бюл. № 26. – 5 с.

13. Пат. 152110 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В01F 7/16. Перемешивающее устройство / Приходько А.А., Смелягин А.И.; заявитель и патентообладатель Кубанский гос. технол. ун-т. – № 2015103695/05; заявл. 04.02.2015; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13. – 2 с.

14. Пат. 157164 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В01F 7/16. Перемешивающее устройство / Приходько А.А., Смелягин А.И.; заявитель и патентообладатель Кубанский гос. технол. ун-т. – № 2015130919/05; заявл. 24.07.2015; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32. – 2 с.

15. Пат. 2585637 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В01F 7/00. Перемешивающее устройство / Приходько А.А., Смелягин А.И.; заявитель и патентообладатель Кубанский гос. тех. ун-т. – № 2014150126/05; заявл. 10.12.2014; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15. – 5 с.

16. Пат. 2616457 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F16H 19/08. Планетарный механизм преобразования вращательного движения в возвратно-вращательное / Приходько А.А., Смелягин А.И.; заявитель и патентообладатель Кубанский гос. тех. ун-т. – № 2016111033; заявл. 24.03.2016; опубл. 17.04.2017, Бюл. № 11. – 10 с.

17. Пат. 2616655 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В01F 7/30. Возвратно-вращательное перемешивающее устройство / Приходько А.А., Смелягин А.И.; заявитель и патентообладатель Кубанский гос. тех. ун-т. – № 2016111032; заявл. 24.03.2016; опубл. 18.04.2017, Бюл. № 11. – 8 с.

18. Пат. 2616656 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В01F 7/30. Возвратно-вращательное перемешивающее устройство / Приходько А.А., Смелягин А.И.; заявитель и патентообладатель Кубанский гос. тех. ун-т. – № 2016111034; заявл. 24.03.2016; опубл. 18.04.2017, Бюл. № 11. – 8 с.

**Научные работы, опубликованные в прочих российских изданиях:**

19. Приходько, А.А. Структурный синтез и кинематический анализ возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Юбилейная XXV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов: Труды конференции. – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2013. – С. 272-275.

20. Приходько, А.А. Структурный синтез исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.А. Приходько // Наука и инновации в технических университетах: Материалы Восьмого всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 27-29.

21. Смелягин, А.И. Кинематический анализ сложного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.И. Смелягин, А.А. Приходько // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). – 2014. – № 4. – С. 79-86.

22. Смелягин, А.И. Построение динамической модели перемешивающего устройства с возвратно-вращательным движением рабочего органа / А.И. Смелягин, А.А. Приходько // Проблемы механики современных машин. Т.2. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015. – С. 101-105.

23. Приходько, А.А. Определение момента сопротивления среды на рабочем органе возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Инновации в машиностроении: Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2015. – С. 516-519.

24. Приходько, А.А. Синтез и исследование приводного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: Сборник докладов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2015. – С. 1002-1006.

25. Приходько, А.А. Уравновешивание планетарного механизма преобразования вращательного движения в возвратно-вращательное / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // XXVII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2015): Труды конференции / М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2015. – С. 345-348.

26. Приходько, А.А. Исследование динамики возвратно-вращательного перемешивающего устройства с рычажным исполнительным механизмом / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // III Международная школа-конференция «Нелинейная динамика машин» – School-NDM 2016 / Под ред. В.К. Асташева, В.Л. Крупенина, Г.Я. Пановко, К.Б. Саламандра / М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2016. – С. 252-260.

27. Приходько, А.А. Динамика возвратно-вращательного перемешивающего устройства с планетарным исполнительным механизмом / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – № 1. – С. 77-80.

28. Приходько, А.А. Кинетостатика планетарного возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // XXVIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2016): Труды конференции / М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2017. – С. 271-274.

29. Приходько, А.А. Силовой анализ двухсателлитного планетарного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.А. Приходько // XXIX Международная конференция «Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов» (МИКМУС - 2017): материалы конференции / М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2018. – С. 319-322.

30. Приходько, А.А. Динамика планетарного привода возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Проблемы механики современных машин: материалы VII Междунар. науч. конф. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. – Т. 1. – С. 86-89.