



УДК. 621.01

Мудров А.Г. – доктор технических наук, профессор

E-mail: Alexmudrov42@rambler.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Оптимизация пространственных устройств

Аннотация

Постановка задачи. Так как пространственные группы аппаратов с мешалкой и группы пространственных смесителей являются новыми разработками техники, необходимо проверить их по критериям развития техники и провести оптимизацию по всем критериям. Особенность этих устройств в том, что они имеют особую структуру-звенья и оси их шарниров расположены пространственно, соединения звеньев только на стандартных подшипниках качения, угловые и линейные параметры взаимосвязаны определенным образом, несоблюдение которых приводит к неработоспособности. В развитии таких устройств наблюдался огромный разрыв между теоретическими исследованиями и практическим использованием в технике, так как ученые не могли изготовить в металле ни модели, ни натурные образцы.

Результаты. Оптимизированы: основные составляющие критерий развития, форма и размер емкости, скольжение и отрыв частиц, давление подвижных звеньев на станину, частота вращения, степень неоднородности смеси, взаимосвязи параметров устройств, режимы работы.

Выводы. Новые группы пространственных аппаратов с мешалкой и смесители созданы от идеи до внедрения в производство. Разработаны и оптимизированы с учетом критериев развития до высокоэффективных, универсальных, малоэнергоёмких, многофункциональных устройств.

Ключевые слова: критерии развития, оптимизация, шарниры вращательные, пространственные смесители, аппараты с мешалкой.

Введение

Оптимизация в жизни людей занимает одно из важнейших задач. Человек сознательно или неосознанно всегда стремится к оптимизации действия. Оптимизация действия, объекта или его отдельной характеристики означает выбор из множества возможностей. Этот выбор осуществляется в соответствии с принятыми критериями.

Мы можем назвать существенное свойство этого действия - отношение к критерию, либо минимизация затрат, либо максимизация эффекта. Оптимизация возможна лишь тогда, когда существуют различные варианты и принятые критерии выбора.

Из истории развития техники известно, что среди ее параметров и показателей всегда имеются один или несколько таковых, которые на протяжении длительного времени имеют тенденцию монотонного изменения или поддержания на определенном уровне при достижении своего предела.

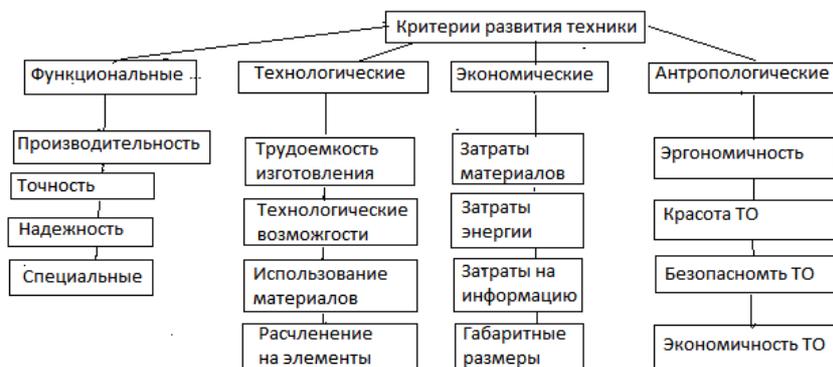


Рис. 1. Систематика критериев развития техники

Для различных классов технических систем, наборы критериев развития которых, в общем, совпадают и включают четыре группы критериев [1], представленных на рис. 1.

Кроме критерия развития есть еще показатель качества системы, к которому в первую очередь относят параметры, изменение которых может приводить к улучшению качества и эффективности системы. Этот перечень может быть дополнен и расширен другими показателями и условиями.

За последние годы нами разработаны новые классификационные группы конструкций пространственных аппаратов с мешалкой [2] и группы пространственных смесителей [3].

Особенность новых устройств в том, что они имеют особую структуру пространственного расположения осей шарниров звеньев и самих звеньев, оси шарниров которых скрещены под разными углами и отстоят на кратчайшем расстоянии, которые у многих звеньев расположены вне тела звеньев. Не зная этих особенностей и не учитывая их, простым комбинированием звеньев и расположением их осей шарниров создать работоспособное устройство практически невозможно, необходимо найти структурные условия и взаимосвязи параметров для каждой из групп устройств. Это требует определенного методического подхода, как к теоретическим выкладкам, так и к практическому изготовлению, как моделей, так и производственных образцов. Этими трудностями объясняется только теоретическое исследование таких механизмов и отсутствие промышленного использования пространственных устройств на их базе, как у нас в стране, так и за рубежом.

Приоритет исследования, изготовление моделей и натуральных образцов, использование их в технике принадлежит казанским ученым.

Поскольку новые группы пространственных аппаратов с мешалкой и группы пространственных смесителей являются новыми разработками техники, необходимо проверить их по критериям развития техники и провести оптимизацию, чему и посвящена статья.

Результаты исследований и их обсуждение

В первую очередь проведем сопоставительный анализ наших устройств по основным критериям.

Критерий развития существующих перемешивающих устройств (аппараты с мешалкой и смесители) практически уже достиг своего предела, развитие их в основном касается мелких изменений и усовершенствований.

По этому критерию вновь созданные устройства находятся еще в начальной стадии развития и уже показали значительно превосходящие показатели в сравнении с существующими устройствами, их свойства и возможности еще полностью не выявлены, как в перемешивании, так и в других процессах и разделах техники.

По функциональному критерию развития существующие конструкции перемешивающих устройств также достигли своего предела. Производительность, например, уже не может быть увеличена большей частотой вращения, так как выше критической частоты технологический процесс нарушается и прекращается. Другие варианты увеличения производительности не решают проблемы.

В предложенных устройствах процесс перемешивания по времени сокращен в несколько раз, здесь нет ограничений на повышение частоты вращения, т.е. здесь производительность устройств значительно выше.

По критерию точности, например, степени однородности смеси, существующие конструкции также не удовлетворяют требованиям однородности многокомпонентных смесей, в то время как пространственные устройства обеспечивают высокую однородность практически любых перемешиваемых компонентов.

По технологическим критериям новые устройства также имеют более высокие показатели, чем таковые у существующих конструкций, например, по трудоемкости, расходу материала, по составу конструкций, по унификации и взаимозаменяемости. Габариты новых устройств значительно меньше, меньше и количество звеньев, например, у пространственного инерционного смесителя только два подвижных звена и емкость.

Высок критерий технологических возможностей у новых устройств, т.к. здесь большая часть стандартных, покупных и унифицированных деталей.

По экономическим критериям новые устройства имеют более высокие показатели, здесь можно выделить критерий расхода материалов, расхода энергии и критерий габаритных размеров.

С учетом вышеперечисленных критериев, нами разработана рабочая конструкторская документация на ряд конструкций аппаратов с мешалкой и смесителей, по которым изготовлены лабораторные и производственные образцы.

Таким образом, новые разработки аппаратов с мешалкой и смесителей должны соответствовать более двадцати критериям развития и пройти оптимизацию устройств.

Проводить оптимизацию при соблюдении всех критериев развития сложно, по этой причине проводят частичную оптимизацию, т.е. оптимизируемым объектом может быть не изделие в целом, а лишь та или иная его характеристика.

Потребность частичной оптимизации возникает в связи с тем, что процесс создания устройств проходит ряд стадий [4, 5]. Частичная оптимизация – это путь к общей оптимизации. Частичная оптимизация начинается на этапе проектирования и конструирования – это начало общей оптимизации [6].

На стадии проектирования закладываются и определяются основные свойства и параметры устройства, поэтому этот этап очень важный и ответственный во всех отношениях. Именно на этой стадии необходимо через оптимизацию «пропустить» каждый из параметров, участвующих в формировании (построении) устройства.

Поскольку новые устройства относятся к пространственным с особой структурой, то первым условием проектирования является нахождение условий существования устройства, т.е. подбор углов скрещивания и кратчайших расстояний между осями шарниров и их взаимосвязи. Без согласованного соблюдения этих условий устройство будет неработоспособно, поэтому параметры и соотношения между ними должны быть объектом оптимизации.

Так как основу конструкций всех аппаратов с мешалкой и групп смесителей составляет базовый модуль, состоящий из двух кривошипов, шатуна и стойки (станины, рамы), то в нем необходимо соблюсти углы скрещивания α, α_1 , кратчайшие расстояния ℓ, ℓ_1 и их взаимосвязь $\ell/\ell_1 = \sin \alpha / \sin \alpha_1$ [7]. Кривошипы модуля вращаются в плоскостях, скрещенных под углом α , емкость совершает сложное пространственное движение, а ведомый кривошип с переменной угловой скоростью:

$$\omega_3 = c \cdot \omega / (a - b \cdot \cos \varphi), \quad (1)$$

где $a = a_1 - \cos \alpha_1 \cos \alpha$, $b = \sin \alpha_1 \sin \alpha$, $c = \cos \alpha - \cos \alpha_1$.

Оптимизация этих значений проводится с учетом вместимости емкости, если это смеситель, или с учетом объема корпуса, если это аппарат с мешалкой. Исходя из длины емкости, принимают кратчайшее расстояние ℓ между осями шарниров станины по конструктивным соображениям. Затем назначают радиус вращения кривошипов емкости (кратчайшее расстояние ℓ_1), который берется в пределах $(0,2-0,8)\ell$. Назначают угол α скрещивания осей шарниров станины исходя из удобств расположения источника привода и технологии изготовления. Наиболее приемлемые значения угла α – 30, 45, 60, 90°. Тогда оптимальный угол α_1 с учетом остальных параметров определится:

$$\alpha_1 = \arcsin(\ell_1 \sin \alpha / \ell). \quad (2)$$

Можно оптимизировать параметры по закону изменения переменной угловой скорости ведомого кривошипа (обычно характеризуется степенью неравномерности δ вращения).

Также как и в первом случае, назначают ℓ, ℓ_1 α и угол α_1 определяется с учетом принятых конструктивно параметров и значения степени неравномерности δ вращения по формуле:

$$\alpha_1 = \arccos \frac{d^2 \cos \alpha \pm 2 \sin^2 \alpha \sqrt{4 + d^2}}{d^2 + 4 \sin^2 \alpha}. \quad (3)$$

В такой же последовательности поступают при оптимизации взаимосвязанных параметров смесителей или мешалок, входящих в классификационные пространственные группы. Необходимые аналитические выражения параметров всех устройств групп приведены в разделах кинематики аппаратов с мешалкой и кинематики смесителей [7].

Оптимизация **формы**. На стадии проектирования необходимо обосновать и оптимизировать форму элементов устройств.

В тех случаях, когда тип формы не принимает непосредственное участие в технологическом процессе, как например, кривошип, станина, то необходимо позаботиться об эстетике и красоте, как составных частей, так и изделия в целом. При этом следует помнить, что человек – оператор не должен чувствовать дискомфорт на рабочем месте при контакте с устройством [8].

Форма же емкости, где происходит технологический процесс, в первую очередь должна максимальным образом интенсифицировать этот процесс, будь то перемешивание, обработка деталей, шлифовка и т.п., во вторую очередь надо учитывать эстетические требования.

Для оптимизации формы емкости конструкция спроектирована таким образом, что ее в процессе работы можно изменять в различных вариантах геометрических форм и одновременно регулировать процесс турбулентного движения частиц в ней посредством двух видов регулирующих устройств. Здесь, уже на стадии проектирования удалось создать формы емкостей, защищенных авторскими свидетельствами на изобретения (А.с. № 1476338. Устройство для определения оптимальной геометрической формы смесителя. Б.И. № 16, 1989).

Рабочая емкость содержит обечайку, снабженную средством для регистрации динамического воздействия рабочей среды, например, в виде размещенных на внутренней поверхности емкости пьезодатчиков, связанных с усилителем, а также представляющих собой развертку рабочей емкости световым экраном. Каждому пьезодатчику соответствует электролампочка на световом экране (А.с. № 1650397. Рабочая емкость устройства для объемной обработки деталей. Б.И. № 19, 1991).

В качестве простейшего регистрирующего устройства можно использовать листы писчей и копировальной бумаги, размещенные внутри емкости. Загружают в емкость частицы материала, например, шарики от подшипников, гайки и т.п., запускают смеситель на тех частотах вращения, какие определены по формуле. После нескольких секунд работы смеситель останавливают и вынимают листы. На чистой бумаге будут обозначены следы от движения частиц. При нормальном скольжении частиц, следы будут по всей площади нижней части листа, при отрыве частиц, следы будут точечными в различных зонах емкости. Если частота вращения была ниже расчетной или недостаточной для скольжения, то на бумаге будут незначительные следы в небольшой зоне емкости.

Обечайка и стенки рабочей емкости выполнены из легкодеформируемого материала, армированного упругими элементами в виде пластин или проволоки. Такое выполнение емкости позволяет легко изменять геометрическую форму ее в самом разнообразном виде и сочетании. Упругие элементы необходимы для того, чтобы принятая геометрическая форма емкости сохраняла заданное фиксированное положение и не изменяла ее при движении.

Обечайка рабочей емкости может быть выполнена телескопической, в виде изогнутой по спирали упругой ленты. Торцовые части наружного и внутреннего витков ленты снабжены стенками из эластичного материала, армированного упругими элементами, придающими стенкам в свободном состоянии сферическую форму. Такая конструкция емкости позволяет изменять ее объем путем изменения длины, поперечного сечения и геометрической формы.

Вместимость емкости меняется разведением витков ленты вдоль продольной оси, а также увеличением или уменьшением поперечного параметра емкости. Для изменения длины емкости необходимо потянуть за внутренний виток ленты вдоль продольной оси и выдвинуть его на требуемую длину, которую можно увеличить в 2-4 раза от первоначальной. Для изменения поперечного параметра емкости и ее формы служат сменные стяжные пояса разной формы и длины, можно придать форму эллипса, квадрата и комбинацию из их частей, другую геометрическую фигуру.

С помощью регистрирующего устройства можно наблюдать воздействие обрабатываемого материала на внутренние стенки и добиваться исключения зон, не взаимодействующих с частицами, что позволяет подбирать оптимальную геометрическую форму рабочей емкости для конкретного случая обработки.

Оптимизация **нагрузки**. Нагружение непосредственно влияет на элементы конструкции, динамические показатели, прочностные расчеты, энергетические затраты.

Оптимизация нагружения в устройствах на стадии проектирования достигалась несколькими вариантами. Равномерным распределением нагрузок или напряжений по всем звеньям. В смесителях это достигается статическим и динамическим уравновешиванием масс емкости маховиками на валах ведущего и ведомого кривошипов, введением упругой муфты между емкостью и источником привода, устранением ведомого кривошипа и заменой его упругим звеном. Изготовлением подвижных звеньев (емкость, подвижные звенья) из легких материалов, например, дуралюмин и т.п.

Оптимизация нагружения проверяется через давления подвижных звеньев смесителя на станину посредством разработанного нами стенда (А.с. № 1654694. Стенд для исследования давления смесителя на фундамент. Б.И № 21, 1991). Стенд состоит из плиты, которая установлена на упругих кольцах с прорезью, причем кольца установлены по боковым сторонам в углах и между основанием и подвижной плитой. Положение колец фиксируется магнитами. На наружной поверхности колец наклеены тензометрические датчики, которые соединены с усилителем сигналов, выход которого связан со входом осциллографа.

Исследуемый смеситель закрепляют на плите и включают в работу, при этом его подвижные звенья оказывают давление на плиту, и, соответственно на упругие кольца с тензодатчиками, расположенными в разных плоскостях и мест закреплений. Соппротивление датчиков изменяется от величины деформации колец. Сигнал от каждого датчика через усилитель поступает на осциллограф и записывается, далее записи сигналов от каждого кольца анализируются и сопоставляются с тарировочными графиками, Зная величину давления в разных частях плиты, изменяют ее при необходимости предложенными способами до положения, когда давление смесителя на основание (фундамент) будет постоянным или минимальным.

Анализ уравнений кинематики позволил оптимизировать по максимальным изменениям скоростей и ускорений и выбрать те звенья, которые в наибольшей степени подходят для использования их в качестве рабочих органов или несущих рабочие органы (лопасти или емкости) [9].

Так, в инерционном смесителе оптимизация рассматривалась уже при теоретическом исследовании условий движения частиц в емкости. Здесь определялась минимальная угловая скорость вращения емкости, при которой начинается активное скольжения и отрыв частиц относительно внутренней поверхности емкости. Например, скольжение частиц в центральной части емкости определится таким значением угловой скорости:

$$w = \sqrt{\frac{fg}{k^2 I^2 \sin^2 a_1 \sin^2 f \frac{\dot{e}cb^2 - acb \cos f - c^3 \ddot{u}}{\dot{e}} + I_1^2 \frac{\dot{e}akc^2 \cos f - kbc^2 - bc^2 \sin^2 f}{\dot{e}} - (1+k) \cos f \ddot{u}}}. \quad (4)$$

Отрыв частиц происходит по условию:

$$w = \sqrt{\frac{g}{I_1 \sin j \frac{\dot{e}}{\dot{e}} (1+k) + k \cos a \frac{\dot{e}cb^2 - acb \cos j - c^3 \ddot{u}}{\dot{e}}}}. \quad (5)$$

где f – коэффициент трения скольжения материала о поверхность емкости;

g – ускорение свободного падения;

k – коэффициент ($k=0,1-1,0$) соотношения положения частицы относительно ℓ ;

φ – угол поворота ведущего кривошипа;

a, b, c – значения символов:

$$\begin{aligned} c &= \cos a - \cos a_1, \ddot{u} \\ a &= 1 - \cos a_1 \cos a, \dot{y} \\ b &= \sin a_1 \sin a. \quad \dot{b} \end{aligned}$$

Выявлено, что гарантированное скольжение частиц по дну емкости в разных типоразмерах пространственных смесителей происходит на полном обороте ведущего кривошипа при частоте вращения емкости 65-100 мин⁻¹, отрыв частиц от поверхности – при частоте 100-150 мин⁻¹ на неполном обороте кривошипов (для разных зон от 0 до 180⁰ или от 180 до 360⁰).

Установлено влияние структурных параметров базового модуля на режим работы смесителей исходя из условий скольжения и отрыва частиц. Так, при увеличении угла α_1 от 15 до 30° снижается частота вращения емкости 20-70 мин⁻¹. Увеличение угла α от 45 до 90° лишь незначительно (на 3-10 мин⁻¹) уменьшает частоту ее вращения [10].

Определено, что расположение углов скрещивания осей шарниров модуля в одном или разных квадрантах влияет на характер движения частиц. Так, для смесителей с углами α_1 и α , лежащих в одном квадранте, скольжение частиц происходит при частоте вращения 105-175 мин⁻¹, отрыв – при 150-200 мин⁻¹. При углах, лежащих в разных квадрантах, скольжение – при частоте 65-100 мин⁻¹, а отрыв – при 100-175 мин⁻¹.

Все вопросы оптимизации, которые рассмотрены в смесителях с периодическим режимом работы полностью относятся и к смесителям с непрерывным режимом работы, поскольку они отличаются только подающим и отводящим устройствами.

Непрерывный процесс в пространственных смесителях можно осуществить двумя способами: через гибкие шланги, соединяющие емкость с приемным и подающим бункерами или через полые кривошипы и звенья, связанные шарнирно со станиной, емкостью и бункерами [11].

Здесь оптимизируются параметры шлангов (диаметр и длина) и диаметр полых звеньев с учетом производительности смесителя и степени однородности готовой смеси.

При лабораторно – производственных исследованиях были окончательно скорректированы основные структурные параметры устройств, режимы их работы и практически обеспечилась полная их оптимизация.

Зарубежные ученые исследуют пространственные механизмы с вращательными шарнирами только теоретически [12, 13], сведений по изготовлению ни действующих моделей, ни производственных образцов не обнаружено.

Выводы

1. Определено, что при разработке новых устройств необходимо учитывать требования комплекса критериев: функциональных, технологических, экономических, антропологических; оптимизировать которые в целом сложная задача, тем более что все устройства пространственные с особой структурой звеньев, еще малоизвестные и мало изученные.

2. В виду сложности создания таких устройств от идеи до внедрения в производство, предложено проводить так называемую частичную оптимизацию на стадиях проектирования, теоретических, лабораторных и производственных исследований, которые приводят к общей оптимизации устройств.

3. Оценка и оптимизация по критериям развития новых устройств аппаратов с мешалкой и смесителей показала лучшие результаты в сравнении с существующими устройствами: хотя возможности их использования в технике еще полностью не раскрыты и не выявлены.

4. Оптимизированные пространственные перемешивающие устройства только с вращательными шарнирами обеспечивают без ограничений смешение различных материалов, а также другие технологические процессы: поверхностную обработку изделий, мойку, дробление и измельчение, шлифование, без переделок конструкции, т.е. обладают многофункциональностью.

Список библиографических ссылок

1. Лесин В. В., Лисовец Ю. П. Основы методов оптимизации. СПб. : Лань, 2016. 344 с.
2. Мудров А. Г. О новой группе пространственных аппаратов с мешалкой // Вестник Казанского аграрного университета, № 2, 2016. С. 77–82.
3. Мудров А. Г. О новых классификационных группах пространственных смесителей. // Известия КГАСУ. 2017. № 2 (40). С. 273–280.
4. Колбин В. В. Специальные методы оптимизации. СПб. : Лань, 2014. 384 с.
5. Тарабарин О. И., Абызов А. П., Ступко Б. Б. Проектирование технологической оснастки в машиностроении. СПб. : Лань, 2013. 304 с.

6. Хорошев А. Н. Основы системного проектирования технических объектов. М. : Машиностроение, 2011. 125 с.
7. Мудров А. Г., Пространственные механизмы с особой структурой. Казань : РИЦ «Школа», 2003. 300 с.
8. Зорин В. А. Основы работоспособности технических систем. М. : Машиностроение, 2009. 528 с.
9. Курейчик В. М., Лебедев Б. К., Лебедев О. Б. Поисковая адаптация: теория и практика. М. : Физмашлит, 2006. 272 с.
10. Пантелеев А. В., Летова Т. А. Методы оптимизации в примерах и задачах. СПб. : Лань, 2015. 512 с.
11. Мудров А. Г. Инерционные пространственные смесители непрерывного действия // Известия КГАСУ. 2017. № 1 (39). С. 264–270.
12. Chen Y., Baker E.J. Using a Bennett linkage as a connector between other Bennett loops, Proc. IMechE. Vol. 219. 2004. P. 177–185.
13. Perez A., McCarthy J. M. Dimensional Synthesis of Bennett Linkages, Transactions of the ASME. Vol. 125, 2003. P. 98–104.

Mudrov A.G. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: Alexmudrov42@rambler.ru

Kazan State University of Architecture and Construction

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Optimization of spatial devices

Abstract

Problem statement. Since the space group of the apparatus with stirrer and group spatial faucets are new developments of technology, it is necessary to check them according to the criteria of the development of technology and to optimize all the criteria. The peculiarity of these devices is that they have a special structure - the links and the axes of their hinges located spatial, connection links just for standard rolling bearings, linear and angular parameters are interrelated in a certain way, the violation of which leads to malfunction. In the development of such devices was a huge gap between theoretical research and practical use in engineering, as scientists could not produce the metal no model or full-scale specimens.

Results. Optimized: the main criterion of development, shape and size of the container, the sliding and separation of particles, the pressure of the moving parts on the base frame, the rotational speed, the degree of heterogeneity of the mixture, the relationship of device parameters, operation modes.

Conclusions. A new group of spatial units with a stirrer and mixers are created from idea to implementation in production. Designed and optimized taking into account the criteria of development to a highly effective, versatile, low-power, multifunctional devices.

Keywords: criteria for the development, optimization, rotational joints, spatial mixers, machines with an agitator.

References

1. Lesin V. V., Lisovets J. P. The basics of optimization methods. SPb. : LAN, 2016. 344 p.
2. Mudrov A. G. About a new group of spatial units with a stirrer // Vestnik Kazanskogo agrarnogo universiteta. 2016. № 2. P. 77–82.
3. Mudrov A. G. About new bands spatial classification of mixers // Izvestiya KGASU. 2017. № 2 (40). P. 273–280.
4. Kolbin V. V. Special optimization methods. SPb. : LAN, 2014. 384 p.
5. Tarabarin S. I., Abyzov A. P., Stupka B. B. Tooling design in engineering. SPb. : LAN, 2013. 304 p.
6. Khoroshev A. N. Fundamentals of systems engineering technical objects. М. : Mechanical Engineering, 2011. 125 p.

7. Mudrov A. G. Spatial mechanisms with a special structure. Kazan : RIC «School», 2003. 300 p.
8. Zorin V. A. Fundamentals of health technology systems. M. : Mechanical Engineering, 2009. 528 p.
9. Kureichik V. M., Lebedev B. K., Lebedev O. B. Search adaptation: theory and practice. Fizmashlit, 2006. 272 p.
10. Panteleev A. V., Letova T. A. Methods optimization in examples and problems. SPb. : LAN, 2015. 512 p.
11. Mudrov A. G. Spatial Inertia continuous mixers // Izvestiya KGASU. 2017. № 1 (39). P. 264–270.
12. Chen Y., Baker E. J. Using a Bennett linkage as a connector between other Bennett loops, Proc. IMechE. Vol. 219. 2004. P. 177–185.
13. Perez A., McCarthy J. M. Dimensional Synthesis of Bennett Linkages, Transactions of the ASME. Vol. 125, 2003. P. 98–104.