

## ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

621.01

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКИХ СРЕД ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ\*

Д-р техн. наук, проф. С.Ф. ЯЦУН, канд. техн. наук, доц. В.Я. МИЩЕНКО,  
асп. С.М. ЯЦУН

*Представлен экспериментальный стенд, состоящий из встроенного в корпус мембранного фильтра, погружного вибрационного активатора и управляемого компрессора, что позволяет экспериментально изучать управляемое движение жидкости в пористом теле. Стенд оснащен системой компьютерного управления. Проведены экспериментальные исследования по перемещению жидкости через трековую мембрану, установлено влияние вибрации на этот процесс. Отдельно исследован процесс перемещения жидкости с твердыми включениями.*

*This paper shows experimental devices for investigation of the filtration process of liquid through porous surface with vibration. This equipment consists membrane filter, vibrating actuator, compressor and control system. Experimental investigation shows that filtration process of liquid through porous surface depend on parameters of vibration and level of solid deposits distributed in liquid.*

Рассмотрим процесс фильтрации сточных вод машиностроительных предприятий, содержащих значительное количество отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Наиболее стойкими компонентами являются минеральные масла и поверхностно-активные вещества (ПАВ). Названные компоненты составляют основу СОЖ, используемых при механической обработке металлов. В связи с высокой стойкостью эмульсий и слабой биологической окисляемостью минеральных масел такие воды плохо поддаются механическим, физико-химическим и биологическим методам очистки. Очевидно, что снижение содержания дисперсных сред, в том числе и эмульсий в сбрасываемых водах, актуальная проблема, решение которой может оказать заметное влияние на улучшение экологической обстановки [1, 2].

При очистке сточных вод получают распространение технологические процессы фильтрации с дополнительным вибрационным воздействием. Привлекательность таких технологий очистки можно объяснить их универсальностью, технологичностью, возможностью управления и автоматизации процесса очистки достаточно простыми средствами. Поэтому вопросы исследования в лабораторных и промышленных условиях процесса фильтрации, а также разработка и внедрение установок очистки весьма актуальны.

Ниже представлены результаты исследований процесса фильтрации жидких сред через пористые поверхности при вибрационных воздействиях.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ — Грант 06-08-00365-а

## 1. Описание пористой поверхности

В качестве пористой поверхности, через которую осуществляется фильтрация, рассматриваются тонкие перфорированные пленки, к которым, при определенных допущениях, относятся трековые мембраны, получаемые путем бомбардировки полимерных пленочных материалов ускоренными на циклотроне тяжелыми ионами и их последующей физико-химической обработкой [3—5]. Тяжелые ионы высокой энергии создают в веществе вдоль своих траекторий области с высокой плотностью ионизации, где происходит деструкция полимера. Размеры пор и их пространственное распределение в трековых мембранах можно регулировать путем выбора режима химической обработки и атомного номера бомбардирующих частиц, а также вариацией их энергии и изменением углов падения ионов на поверхность пленки. Главные отличительные свойства структуры трековых мембран — малая толщина и высокая однородность пор по размерам. Подобная структура определяет основные преимущества трековых мембран: низкое сопротивление течению фильтруемой среды, высокую селективность фильтрации, низкую адсорбцию растворенных веществ, удерживание отделяемых частиц на поверхности мембраны и легкость регенерации, прозрачность и малый собственный вес, высокую прочность и эластичность. На рис. 1. показано поперечное сечение фильтра, выполненного на основе трековой мембраны. На рис. 2. представлен процесс течения материала через пористую поверхность.

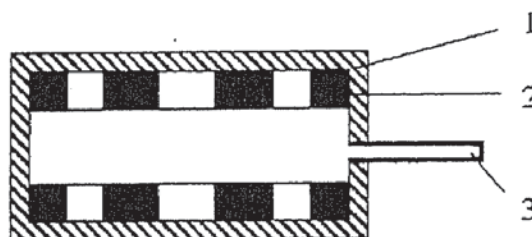


Рис. 1. Схема мембранного двухстороннего фильтра: 1 — перфорированный защитный корпус; 2 — мембрана; 3 — патрубок для отбора жидкости из фильтра

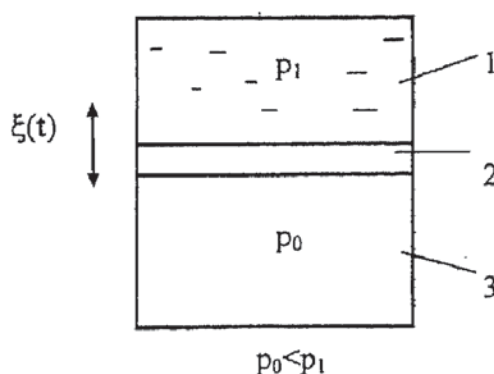
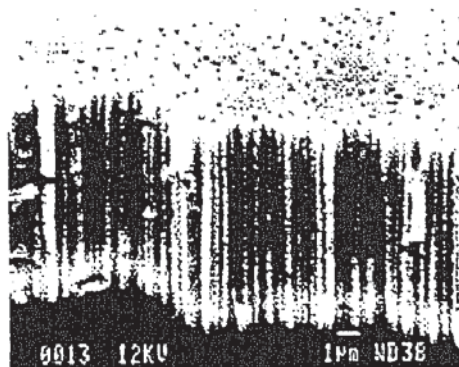


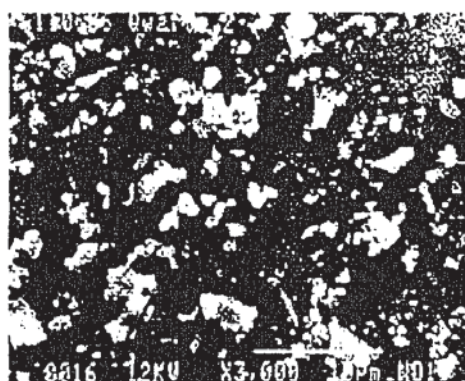
Рис. 2. Схема процесса течения материала через пористую поверхность: 1 — среда с твердыми включениями; 2 — пористая поверхность; 3 — область сбора отфильтрованной жидкости ( $p_1$  — давление над пористой поверхностью,  $p_0$  — давление под пористой поверхностью)

Трековые мембраны на основе полиэтилентерефталатной пленки характеризуются малой толщиной пленки, 10...23 мкм; диаметром пор от 0,05 до 2,0 мкм; плотностью пор от 4 до 8 млн. на  $1 \text{ см}^2$ ; рабочим диапазоном температур до  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ; не гигроскопичностью (набухание в воде менее 0,5 %); пассивностью в биологическом отношении; прочностью, гибкостью, стойкостью к растрескиванию; устойчивостью к большинству кислот,

органических растворителей, разбавленным растворам щелочей; гладкой поверхностью; малым собственным весом и незначительной адсорбцией; высокой экологической чистотой; способностью полного задержания частиц, превосходящих размеры пор. На рис. 3 показана трековая мембрана [3]; хорошо видны твердые отложения, появляющиеся на поверхности в процессе трансмембранного переноса жидкости.



а)



б)

Рис. 3. Фотографии трековой мембраны: а — без твердых включений на поверхности; б — с твердыми включениями на пористой поверхности

## 2. Описание среды, проходящей через пористую поверхность

В общем случае в жидкости, проходящей через пористую поверхность, распределены как газовые включения, так и твердые частицы, а их концентрация может изменяться в процессе фильтрации, поэтому рассматриваемые среды относятся к многофазным [6, 7]. Твердые включения накапливаются на пористой поверхности, закрывая поры и ухудшая перемещение жидкости через мембрану. Поэтому при моделировании среды необходимо учитывать наличие включений переменной концентрации. При малых концентрациях твердых включений (5—15 %) среда ведет себя подобно жидкости. Отложение твердых включений на пористой поверхности приводит к тому, что концентрация их в этой зоне быстро возрастает, достигая значительных величин. При концентрациях порядка 30—50 % происходит структурирование среды и переход ее в состояние, близкое к сыпучим материалам. Это приводит к тому, что свойства системы: жидкость — мембрана изменяются. Поэтому управляющее вибрационное воздействие со стороны активатора должно изменять параметры с учетом изменяющихся условий фильтрации.

### 3. Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных исследований процесса переноса жидких сред в условиях вибрационного воздействия разработан лабораторный стенд, общий вид которого приведен на рис.4. При проектировании стенда использованы методики, описанные в [8—11]. Очищаемая жидкость находится вместе с мембранным модулем в неподвижном сосуде. Вибрационное воздействие на жидкость осуществляется с помощью погружного вибрирующего перфорированного диска, который располагается над фильтрующим элементом.

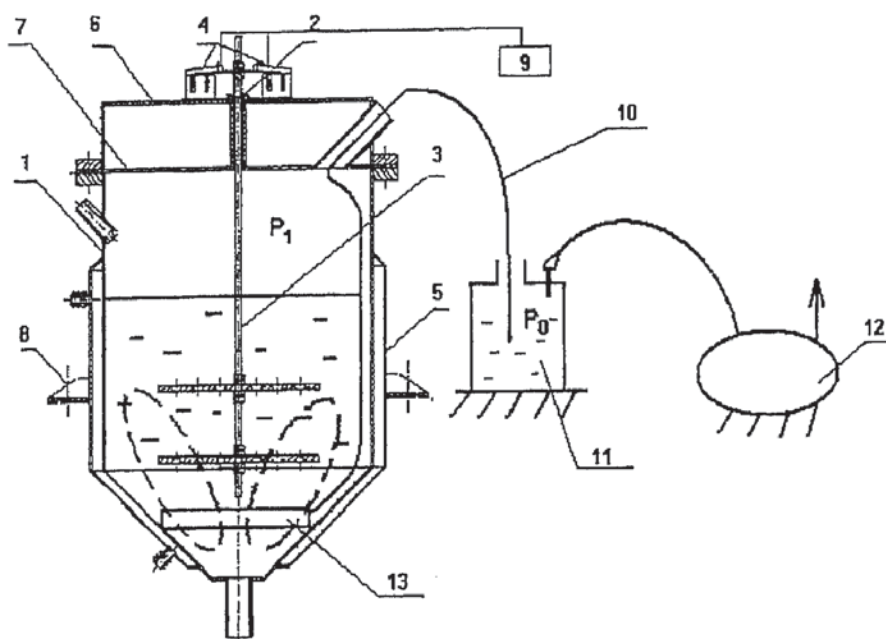


Рис. 4. Схема экспериментального стенда для изучения влияния погружного вибрационного активатора на процесс переноса жидкости через пористую поверхность

Экспериментальная установка состоит из рабочей камеры 1, электромагнитного привода (который связан со стержнем,двигающимся во втулке 2), на котором установлены перфорированные диски (рабочий орган 3) вибрационного активатора 4, рубашки охлаждения или нагрева 5, крышек 6 и 7, виброизоляционных опор 8, системы управления 9, патрубка для отбора жидкости 10, сосуда для сбора очищенной жидкости 11, компрессора 12, мембранного фильтра 13. На рис. 5 показана схема системы управления стендом.

Система управления состоит из генератора прямоугольных импульсов, мультивибратора и выходного каскада и позволяет управлять частотой колебаний якорей электромагнитов, а следовательно, частотой колебаний рабочего органа.

Устройство работает следующим образом. С помощью системы управления задается частота колебаний якорей электромагнитов. Генератор прямоугольных импульсов формирует переменный сигнал с заданной частотой колебаний амплитудой 5В. С помощью мультивибратора, независимо от изменения частоты (периода) колебаний, длительность положительного импульса сохраняется постоянной. В выходном каскаде сигнал усиливается до необходимого значения напряжения. При подаче напряжения на катушки электромагнитов якоря притягиваются к ним, упругий элемент деформируется и стремится вернуть якоря в исходное положение. В результате перфорированные диски совершают возвратно-поступательное движение и происходит процесс перемешивания жидкости.

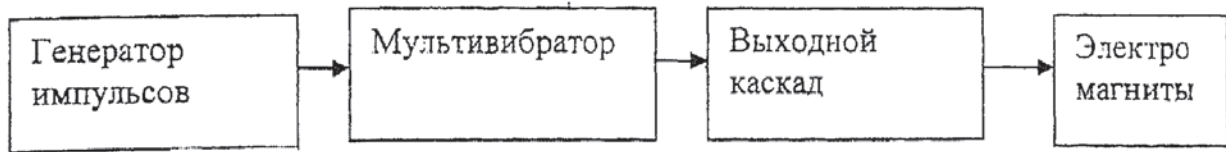


Рис. 5. Функциональная схема системы управления

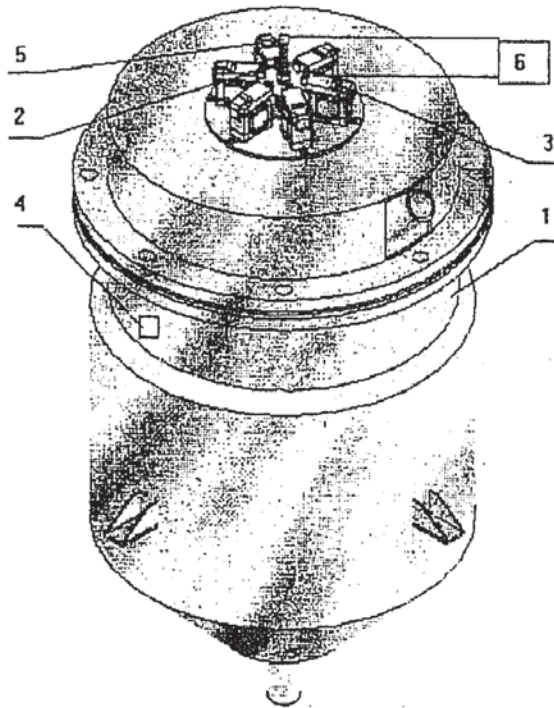


Рис. 6. Общий вид лабораторного сосуда с приводами: 1 — патрубок для подачи отфильтрованной жидкости, 2 и 3 — электромагнитный привод, 4 — корпус сосуда, 5 — датчик измерения ускорения, 6 — система управления

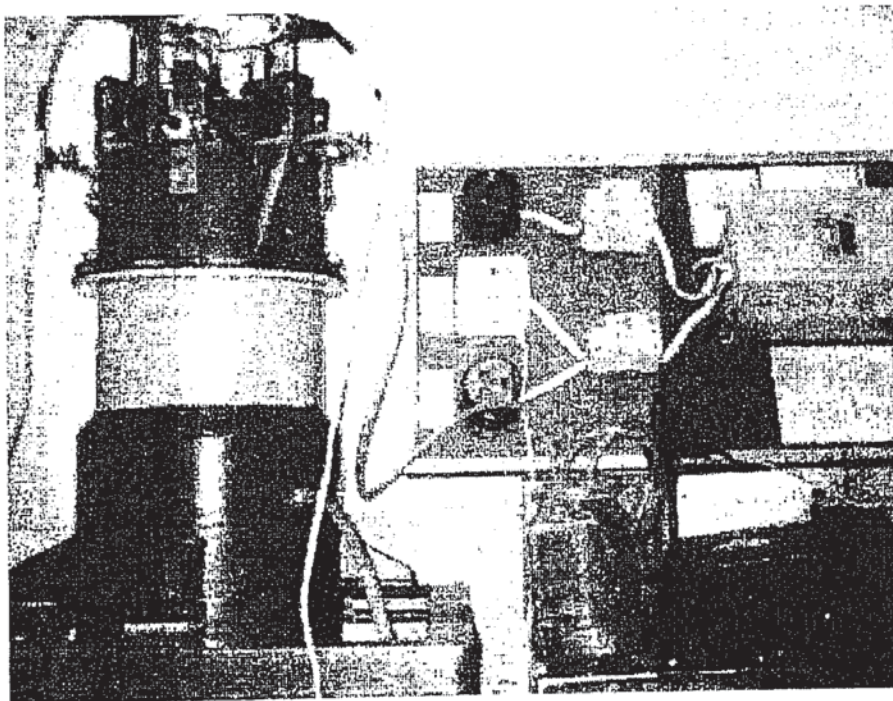


Рис. 7. Общий вид лабораторной установки

Внутри корпуса реактора установлен мембранный модуль (рис. 8), представляющий собой многослойную фильтрационную систему, в качестве которой использовалась трековая мембрана (размер пор  $0,2 \dots 0,4$  мкм).

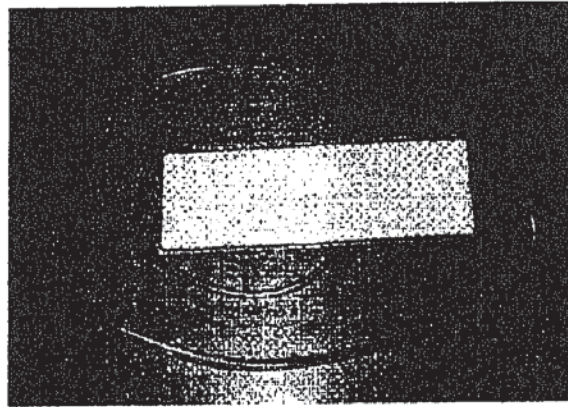


Рис. 8. Общий вид мембранного модуля

Размеры мембранного модуля —  $60 \times 180$  мм. Жидкость, находящаяся в реакторе, активно перемешивается и перемещается через пористую поверхность мембраны в сосуд, где собирается очищенная жидкость. Для обеспечения эффективной фильтрации в сосуде создан вакуум.

Управлять параметрами вибрации можно по заданной программе, при этом для регулировки частоты и амплитуды колебаний используется отрицательная обратная связь и ПИД-регулятор, который выполнен на базе микроконтроллера, датчика ускорения. Это обеспечивает рабочий режим движения перфорированного диска с минимальными отклонениями от заданных параметров при действии различных дестабилизирующих факторов (износа, температурных воздействий, изменения рабочей нагрузки и других).

Обработанный сигнал с акселерометра поступает на один из входов микроконтроллера, входящего в систему управления. Рассчитывается реальная частота колебаний вала рабочего органа, а также определяется рассогласование заданной и реальной частоты вала рабочего органа. Таким образом, осуществляется обратная связь по частоте, что позволяет вести управление по ошибке,  $\Delta f \rightarrow \min$ .

На рис. 9 показана структурная схема системы автоматического управления вибрационного фильтра.

Данная САУ обеспечивает подачу на электромагниты напряжения разной частоты с амплитудой  $100\text{—}220$  В. Обозначенные на структурной схеме логическое устройство (ЛУ), микроконтроллер (МК1, МК2) являются подпрограммами основной программы, зашитой в ППЗУ контроллера.

В память контроллера вводится значение частоты в Герцах, и начинается работа основной цикл программы. На выходе микроконтроллера (МК1) вырабатывается меандр амплитудой 5В заданной частоты. Этот сигнал повышается усилительным каскадом (УК) до необходимого уровня ( $220\text{—}300$  В) и подается на электромагниты (ЭМ).

Датчик ускорения акселерометр (А) закреплен на валу. В данном случае рассматривается пьезоэлектрический аналоговый датчик, на выходе которого пропорционально ускорению рабочего органа вырабатывается напряжение.

Для устранения помех сигнал с акселерометра дважды интегрируется, в результате чего приобретает форму синусоиды. Можно применить аналоговые интеграторы, построенные на основе операционных усилителей.

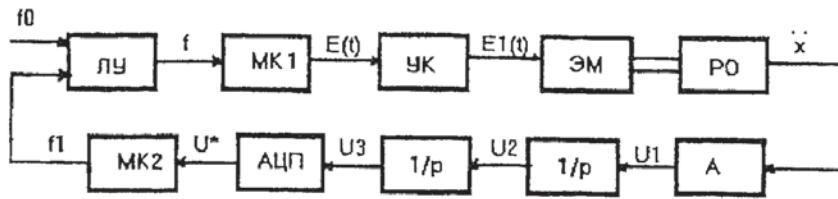


Рис. 9. Структурная схема САУ частоты колебаний электромагнитного привода вибростенда: ЛУ — логическое устройство; МК1, МК2 — микроконтроллер; УК — усилительный каскад; ЭМ — электромагниты; РО — рабочий орган (вал с закрепленными на нем дисками); А — акселерометр; 1/p — интегратор; АЦП — аналого-цифровой преобразователь

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) позволяет преобразовать аналоговый сигнал в цифровой, который можно завести на один из входов микроконтроллера.

МК2 представляет собой подпрограмму определения реальной частоты колебаний электромагнитов. Для этого необходимо найти два ближайших экстремума функции  $U^*(t)$ , определить период и рассчитать реальную частоту.

Для улучшения характеристик системы ( $\Delta f$ , быстродействия  $T$ , перерегулирования) использован ПИД-регулятор в микроконтроллере.

#### 4. Результаты экспериментальных исследований

Исследования проведены в частотном диапазоне от 10 до 50 Гц и амплитудой колебаний от 1 до 5 мм. Объем загружаемой жидкости — 8 л. Изучалось влияние разности давлений (вакуум) и вибрации на процесс фильтрации. Давление в сосуде для сборки жидкости определяется величиной вакуума, создаваемого компрессором (максимальный вакуум 3 МПа) и за счет перепада высот на входе в мембрану и на выходе.

Таблица 1

Зависимость производительности мембраны от величины разрежения в сосуде для сборки отфильтрованной жидкости

Вакуум, МПа	1	2	3
Производительность, мл/мин	48	58	65

Результаты экспериментов показали, что разность давлений оказывает значительное воздействие на процесс фильтрации (табл. 1). Также установлено, что при отсутствии твердых отложений на мембране вибрационное воздействие в заданном диапазоне не оказывает влияния на ее производительность.

При твердых включениях в жидкости на мембране появляются отложения, что приводит к снижению ее производительности, вплоть до полной остановки процесса переноса жидкости через фильтр. В этом случае вибрационное воздействие со стороны активатора позволяет очистить мембрану от твердых включений и улучшить процесс переноса жидкости. Некоторые результаты, иллюстрирующие это, приведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Чистая вода

##### 1. Без вибрации

Время, мин.	1	2	3	4
Количество воды, мл	57	114	170	231

## 2. Вибрация

Частота — 20 Гц, амплитуда — 2 мм

Время, мин.	1	2	3	4
Количество воды, мл	55	113	169	230

Вода с примесью твердых включений (концентрация — 12,5 г/л)

## 1. Без вибрации

Время, мин.	1	2	3
Количество воды, мл	38	76	113

## 2. Вибрация

Частота — 20 Гц, амплитуда — 2 мм

Время, мин.	1	2	3
Количество воды, мл	40	80	119

## Выводы

1. Разработано экспериментальное оборудование, позволяющее изучить процесс фильтрации жидкости через мембранный фильтр при наличии управляемых вибрационных воздействий и регулируемой разности давлений.

2. Выявлена зависимость скорости фильтрации от разности давлений на входе и выходе мембранного фильтра.

3. Установлено, что управляемое вибровоздействие повышает производительность процесса фильтрации при наличии твердых отложений на мембране.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод: флотация и сгущение осадков [Текст] / Б. С. Ксенофонтов. — М.: Химия, 1992. — 144 с.
2. Ксенофонтов Б. С. Флотационная очистка сточных вод. [Текст] / Б. С. Ксенофонтов. — М.: Новые технологии, 2003. — 60 с.
3. [www.trackpore.ru](http://www.trackpore.ru)
4. [www.voda.spectr-21.ru](http://www.voda.spectr-21.ru)
5. [www.sciam.ru](http://www.sciam.ru)
6. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. [Текст] / Р. И. Нигматулин. — М.: Наука, 1987. — 326 с.
7. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. [Текст] / Р. И. Нигматулин. — М.: Наука, 1978. — 226 с.
8. Гончаревич И. Ф. Теория вибрационной техники и технологии. [Текст] / И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. — М.: Наука, 1981. — 319 с.
9. Фролов К. В. Колебания машин с ограниченной мощностью источника энергии и переменными параметрами [Текст] / К. В. Фролов // Нелинейные колебания и переходные процессы в машинах. — М.: Наука, 1972. — С. 5—17.
10. Фролов К. В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. [Текст] / К. В. Фролов. — М.: Машиностроение, 1984. — 223 с.
11. Яцун С. Ф. Вибрационные машины и технологии. [Текст] / С. Ф. Яцун, Д. И. Сафаров, В. Я. Мищенко, О. Г. Локтионова. — Баку: «Элм», 2004. — 408 с.