

С. С. Пригожаев, А. А. Пыхалов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. *Основной задачей подвижного состава сегодня является перевозка грузов. Рост количества и объемов перевозок приводит к потребности изменения таких показателей подвижного состава, как грузоподъемность, сила тяги, геометрические параметры нетягового подвижного состава и т.д. Для реализации данных изменений, необходимо не только разрабатывать инновационный подвижной состав, но и вносить изменения в существующий. Анализ происшествий с участием железнодорожного транспорта показывает, что существующая конструкция подвижного состава привычна и традиционна, но при незначительных отклонениях от нормируемых показателей геометрических характеристик деталей вагонов и локомотивов возникает аварийная ситуация, в лучшем случае выявленная в процессе эксплуатации.*

Сегодня переход от традиционного подвижного состава к инновационному происходит достаточно медленно, виной тому высокая цена подвижного состава «нового поколения». Таким образом, необходимо ставить задачи по упрощению конструкции вагонов и локомотивов путем внедрения более незамысловатых узлов и агрегатов подвижного состава, при этом необходимо создавать все условия для более корректного управления такими узлами и агрегатами. Для этих целей возможно использование различных конструктивных элементов, рабочим телом которых являются управляемые под воздействием магнитного поля жидкости или как их принято называть магнитореологические жидкости.

Ключевые слова: *магнитореологическая жидкость, идеально-вязкое тело, реологические свойства, демпфер гидравлический гаситель.*

S. S. Prigozhaev, A. A. Pykhalov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

SETTING THE TASK OF USING MAGNETOREOLOGICAL LIQUIDS DURING THE OPERATION OF THE ROLLING STOCK OF IRON ROADS

Abstract. *The main task of the rolling stock today is the transportation of goods. The increase in the number and volume of transfers leads to the need to change such indicators of rolling stock as load capacity, traction force, geometric parameters of non-traction rolling stock, etc. To implement these changes, it is necessary not only to develop innovative rolling stock, but also to make changes to the existing one. The analysis of accidents involving railway transport shows that the existing design of the rolling stock is familiar and traditional, but with minor deviations from the normalized indicators of the geometric characteristics of the details of cars and locomotives, an emergency situation occurs, at best identified during operation.*

Today, the transition from traditional rolling stock to innovative is quite slow, but the reason for this is the high price of the "new generation" rolling stock. Thus, it is necessary to set tasks to simplify the design of cars and locomotives by introducing more uncomplicated units and aggregates of rolling stock, while it is necessary to create all conditions for more correct management of such units and aggregates. For these purposes, it is possible to use various structural elements, the working body of which are liquids controlled under the influence of a magnetic field, or as they are commonly called magnetorheological liquids.

Keywords: *magnetorheological fluid, ideally viscous body, rheological properties, hydraulic dampener.*

Введение

Магнитореологические жидкости в настоящее время применяются при создании управляемых по функциональности и надежности механических систем. Они создаются на стыке достижений таких наук, как физика, химия, трибология, электропривод, механика и другие. В результате этой деятельности создан новый класс жидкостей с влиянием на них магнитного поля (магнитоуправляемых [1]) или имеющими магнитореологические свойства [2].

В ранее опубликованной статье «Возможности применения магнитореологических жидкостей в конструкции нетягового подвижного состава» (журнал Молодая наука Сибири №1(11) 2021 г. стр. 21-28) были рассмотрены варианты применения магнитореологических жидкостей в различных конструктивных элементах как пассажирского, так и грузового нетягового подвижного состава. В вышеуказанной статье предлагается возможность замены традиционных гасителей колебаний на более упрощенные инновационные, рабочим телом которых является магнитореологическая жидкость, позволяющая дистанционно управлять жесткостью гасителя за счет изменения собственной вязкости под воздействием магнитного поля.

Базовым достоинством МРЖ-амортизаторов является автоматическое управление жесткостью гасителей колебаний при помощи бортового компьютера. Объединение бортового компьютера с датчиками положения кузова (гироскопами) и с магнитореологическими амортизаторами позволяет определять положение объекта в пространстве с частотой более чем 1000 раз в секунду [1] и самостоятельно принимать решение о необходимости изменения характеристик демпфирующих устройств, которые в свою очередь могут изменять жесткость до 50 раз в секунду [1]. Данная характеристика позволяет без вмешательства человека реагировать на внешние факторы и практически мгновенно создавать противодействующие силы, поглощающие удары. При этом стоит помнить, что разработанные образцы магнитореологической жидкости под воздействием магнитного поля могут изменять свою вязкость в 100 раз. Именно это достоинство и дает возможность управлять системой подвески подвижного состава, тем самым изменяя силу амортизации относительно традиционного гасителя как минимум в два раза (как в большую сторону, так и в меньшую).

В связи с вышеописанными особенностями работы возникает проблема расчета гидравлических гасителей колебаний из-за возможности изменения величины вязкости рабочего тела гасителя.

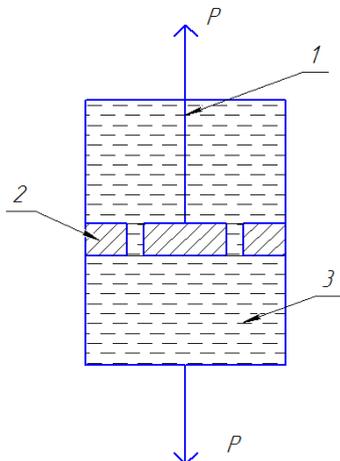
Но при этом стоит обратить внимание на то, что принцип работы любого гидравлического гасителя колебаний заключается в перетекании жидкости из одной полости в другую. При данном процессе происходит деформация рабочего тела (жидкости) под действием внешней, при том нередко ударной нагрузки. Наука реология занимается изучением различных механических свойств по проявлению деформации [3].

Стоит отметить, что деформацию подразделяют на объемную (растяжение и сжатие) и деформацию сдвига [3]. Поскольку мы знаем что у магнитореологических жидкостей значение вязкости не является константой, и может изменяться в зависимости от внешнего воздействия и на основании второй аксиомы реологии, которая звучит как : «любая материальная система обладает всеми реологическими свойствами (вязкость, упругость, пластичность, прочность), которые проявляются при сдвиговой деформации» следует рассматривать деформацию сдвига.

Для построения математической модели с целью исследования различных характеристик жидкостей, применяемых как в классических гидравлических гасителях колебаний, так и в магнитореологических, стоит обратить внимание на модель идеально вязкого тела Ньютона. Схема идеально вязкого тела Ньютона представлена на рисунке 1.

Принцип работы такого гасителя заключается в том, что рабочее тело перемещается в зависимости от направления хода из одной полости в другую [4]. Так, при движении поршня (6) вниз, верхний клапан приподнимается и рабочее тело начинает перемещаться из подпоршневой полости цилиндра (4) в надпоршневую (12) через отверстия (11) в поршне. При этом при движении штока (1) вниз давление под поршнем (6) значительно повышается и часть рабочего тела перемещается из полости (10) через отверстие клапана (8) в резервуар (5), расположенный между цилиндром (4) и корпусом (3), в это время давление в надпоршневой области и подпоршневой выравнивается. Если рассмотреть ход растяжения, т.е. движение поршня вверх, то клапан (7) закрывается под действием давления в надпоршневой области и рабочее тело через отверстия перемещается в подпоршневую область. При этом в полости (10) наступает разрежение (пониженное давление), из-за чего

клапан(8) открывается и пропускает через отверстия жидкость из резервуара (5), тем самым наполняя недостающий объем жидкости, поступающей из надпоршневого пространства. Для снижения выброса жидкости наружу гидравлический гаситель оснащается уплотнением (13). Данная конструкция не позволяет производить регулировку жесткости гасителя в процессе эксплуатации, поскольку жесткость напрямую зависит от используемого рабочего тела. Недостатками такой системы можно считать её конструктивную сложность, а также низкую надежность ввиду большого количества деталей.



**Рис. 1. Схема модели идеально вязкого тела Ньютона:
1 – шток; 2 – поршень с отверстиями; 3 – жидкость**

Рассмотрим схему классического гидравлического гасителя колебаний наиболее часто используемого в конструкции подвижного состава железных дорог. Схема гидравлического гасителя колебаний представлена на рисунке 2.

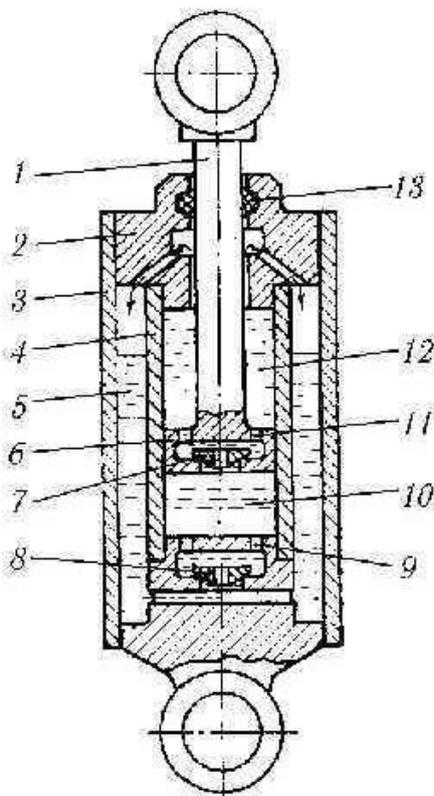


Рис. 2. Поршневой гидравлический гаситель колебаний

Конструктивно поршневой гидравлический гаситель колебаний состоит из цилиндра (4) в котором расположен поршень (6) со штоком (1), неподвижный поршень с отверстием

для перепуска рабочего тела из одной полости в другую, верхнего (7) и нижнего (8) клапанов, корпуса (3) и направляющей втулки (2).

Также стоит отметить, что при производстве необходимо подбирать жидкость с соответствующей вязкостью в зависимости от массы объекта, на который планируется устанавливать гаситель. Еще одним немаловажным фактором выбора жидкости в качестве рабочего тела такого гасителя колебаний является изменение её реологических свойств в процессе эксплуатации при различных температурах её работы. Так, жидкость не должна значительно изменять своих характеристик при пониженных и повышенных температурах.

Стоимость гидравлического гасителя колебаний достаточно высока и не позволяет использовать его в большей части грузового нетягового подвижного состава. Высокая цена объясняется сложностью и высокоточностью производства.

Устройством, ничуть не уступающим по характеристикам классическому гидравлическому гасителю колебаний, можно назвать магнитореологический амортизатор.

Сегодня в конструкции подвижного состава железных дорог не применяются МРЖ-амортизаторы ввиду высокой стоимости, обусловленной малыми объемами производства их в мире. Массовое использование магнитореологических амортизаторов нашлось в автомобильной промышленности. Компания AUDI в начале 2000 годов впервые установила управляемую гидравлическую подвеску состоящую из амортизаторов AUDI MAGNETIC RIDE[1]. На рисунке 3 представлена упрощенная схема магнитореологического амортизатора.

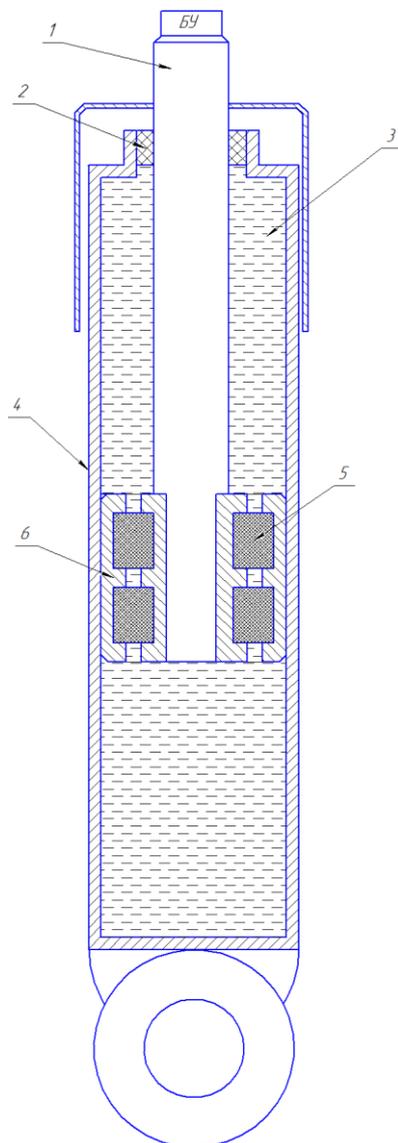


Рис. 3. Упрощенная схема магнитореологического амортизатора

Исходя из схемы (рис. 3) видно отсутствие большого количества клапанов, уменьшение геометрических размеров и отсутствие дополнительных полостей. Так, магнитореологический амортизатор состоит из корпуса (4), являющегося цилиндром и поршня (6) со штоком (1). В поршне имеются калиброванные отверстия и магнитные катушки (5), через шток проходит электрический кабель для управления магнитным полем в амортизаторе. На верхней части штока мы видим коммутационный блок и блок управления (БУ) магнитным полем по сигналу, получаемому от бортового компьютера.

Принцип работы магнитореологического амортизатора заключается в перетекании жидкости (3) из надпоршневой полости в подпоршневую через отверстия, расположенные на поршне. При этом сопротивление перетеканию жидкости возникает исключительно за счет вязкости рабочего тела.

Вязкость магнитореологической жидкости варьируется за счет изменения магнитного поля, т.е. при возникновении магнитного поля в катушках, которые могут быть установлены не только внутри поршня, но и на корпусе амортизатора. Взвешенные магнитные частицы выстраиваются вдоль силовых линий этого поля, тем самым увеличивая вязкость. Схема работы МРЖ амортизатора представлена на рисунке 4

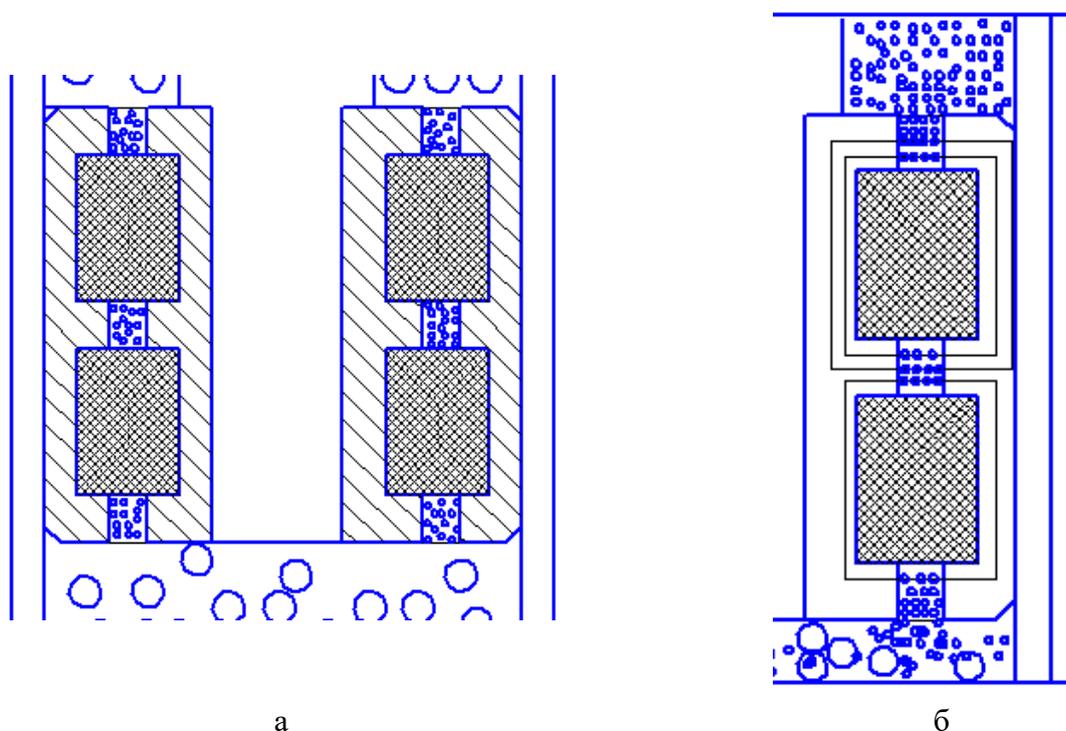


Рис. 4. Принцип действия магнитореологического амортизатора:

а – магнитореологическая жидкость вне магнитного поля; б – под действием магнитного поля частицы жидкости выстраиваются вдоль его силовых линий

Изменяя магнитное поле, мы сможем реализовать варьирование сопротивления перетекания жидкости (рабочего тела) из одной полости в другую, тем самым учитывая вес тары, груза и загруженности вагона, изменять силу амортизации, что приведет к сокращению ударов от пути на элементы подвижного состава, а равно и снизит их износ.

Стоимость таких амортизаторов сегодня достаточно велика ввиду отсутствия спроса и небольшого количества единиц техники, использующей их в своей конструкции. Снижение стоимости возможно путем повсеместного внедрения таких амортизаторов, что в свою очередь заставит производителей наладить массовое производство их элементов. Также снижению стоимости может поспособствовать тот факт, что в МРЖ- амортизаторе точность геометрических размеров отверстий не столь важна, поскольку при испытании на заводе возможно запрограммировать блок управления таким образом, что характеристики у всей партии амортизаторов будут одинаковы.

Рассмотрев конструкцию классического и магнитореологического амортизатора, можно увидеть сходство с моделью идеально вязкого тела Ньютона. Схема магнитореологического амортизатора достаточно проста и практически полностью повторяет модель Ньютона, а схема гидравлического гасителя колебаний после упрощений также можно рассматривать, как вышеописанную модель.

Таким образом, целесообразно производить расчеты, применяя закон Ньютона: при ламинарном течении жидкости с вязкостью η через сечение площадью S сила вязкостного сопротивления F пропорциональна градиенту скорости течения [3] dU/dx :

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{dU}{dx}$$

где, dU/dx – производная скорости течения U по координате x , Нормальной к потоку

η - динамическая вязкость;

S - площадь сечения.

Скорость течения системы определим соотношением: $u = \gamma/\tau$

где: - относительный сдвиг;

τ - время.

Тогда закон Ньютона примет немного другой вид:

$$P = \eta \frac{d\gamma}{d\tau}$$

Динамическая вязкость определяется как котангенс угла наклона графика $P = f\left(\frac{d\gamma}{d\tau}\right)$ к оси напряжения[3].

Из всего вышесказанного и с учетом уравнения Ньютона: $\frac{d\gamma}{d\tau} = \frac{P}{\eta}$ можно вывести формулу деформации при постоянном напряжении[3]:

$$\gamma = \frac{P}{\eta} \tau$$

На основании вышеописанных формул можно произвести расчеты деформации рабочего тела. Для классического гидравлического гасителя колебаний подойдет расчет по паспортным данным подвижного состава. Расчет магнитореологического гасителя колебаний также возможно произвести на основании данных формул. Исходя из основного свойства МРЖ-амортизатора, вычисления необходимо производить во всем диапазоне не только нагрузок, но и вязкости рабочего тела, что достаточно затруднительно.

Для определения основных реологических свойств жидкости необходимо проведение множества расчетов для различных условий, поэтому целесообразней пользоваться специализированным проектировочным комплексом. Таким программным продуктом является AUTODESK CFD. Данный программный комплекс позволяет не только определить характеристики жидкости, но и решить обратную задачу, т.е. определить параметры жидкости при определенных условиях работы изделия. Для наиболее удобного использования, программный комплекс позволяет визуализировать гидродинамические процессы и помогает дополнительно определить теплоотдачу, как между твердыми телами, так и между твердым телом и жидкостью или между жидкостями.

Заключение

В заключение стоит отметить, что имеющаяся сегодня конструкция подвижного состава архаична и практически не изменяется на протяжении многих лет. Модернизация существующих конструкций приводит к незначительному изменению характеристик подвижного состава, система адаптивного управления большинством узлов конструкцией не предусмотрена. Гибкое управление элементами и узлами подвижного состава позволит снизить количество происшествий на железнодорожном транспорте, в том числе и связанных с неко-

торыми неисправностями подвижного состава. Это позволит увеличить скорости перевозки грузов и пассажиров за счет практически полного управления процессами вынужденных колебаний и создания силы, противодействующей возмущающей. Разработка таких устройств требует большого количества расчетов не только внешних (геометрических) характеристик, но и характеристик рабочего тела гасителей колебаний, для чего целесообразно применять программный комплекс AUTODESK CFD. Для полного и успешного использования данного программного продукта необходимо произвести анализ сходимости результатов при решении стандартных задач для определения реологических свойств из раздела коллоидной химии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение: монография / Е.С. Беляев [и др.]; под ред. А.С. Плехова. - Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 94 с.
2. Пригожаев С.С. Возможности применения магнитореологических жидкостей в конструкции нетягового подвижного состава [Электронный ресурс] / С.С. Пригожаев, А.А. Пыхалов // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021. – №1 (11). – Режим доступа: <http://mnv.irkups.ru/toma/111-2021>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.
3. Немцева, М.П. Реологические свойства коллоидных систем: Учебное / Немцева М.П., Филиппов Д.В., Федорова А.А. ; Ивановский гос. хим.-технол. ун-т.- Иваново, 2016. – 61 с.
4. Головин А. Н., Шорин В. II. Гасители колебаний для , гидравлических систем. - Самара: Изд-во Самарского научного Центра РАН, 2005. 168 с.: ил. 80.

REFERENCES

1. Magnetorheological fluids: technologies of creation and application: monograph / E. S. Belyaev [et al.]; edited by A. S. Plakhov. - Nizhny Novgorod State Technical University. R. E. Alekseev Univ., 2017. - 94 p.
2. Prigozhaev S. S. The possibilities of using magnetorheological fluids in the construction of non-traction rolling stock [Electronic resource] / S. S. Prigozhaev, A. A. Pykhalov // Molodaya nauka Sibiri: electron. scientific journal. – 2021. – №1 (11). – Access mode: <http://mnv.irkups.ru/toma/111-2021>, free. - Title from the screen. - Yaz. Rus., Eng.
3. Nemtseva, M. P. Rheological properties of colloidal systems: Educational / Nemtseva M. P., Filippov D. V., Fedorova A. A.; Ivanovo State Chemical-technol. un-T.- Ivanovo, 2016. -61 p.
4. Golovin A. N., Shorin V. II. Vibration dampers for hydraulic systems. - Samara: Publishing House of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2005. 168 p.: il. 80.

Информация об авторах

Пригожаев Степан Сергеевич – аспирант кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Stepri@yandex.ru

Пыхалов Анатолий Александрович – д.т.н., профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pykhalov_aa@mail.ru

Information about the authors

Stepan Sergeevich Prigozhaev – Post-graduate student of the Department of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Stepri@yandex.ru

Anatoly Aleksandrovich. Pykhalov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pykhalov_aa@mail.ru