

УДК 681.523

ЭНЕРГО-СИЛОВОЙ АНАЛИЗ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЕМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖИДКИХ СРЕД

Ю.М. Знамцев, О.В. Виштак, М.В. Рогова, С.Н. Грицюк

Рассмотрена актуальная проблема по управлению течением рабочих сред – энергоносителей и технологических сред в технических системах энергетических предприятий, так как именно диэлектрические либо слабопроводящие среды используются в ЭГД-элементах систем управления, в устройствах на основе электрореологических сред. Проведен анализ использования устройств, функционирующих на основе использования магнитных жидкостей, для автоматического контроля и управления параметрами технических систем. Проведен обобщенный кинематический и энергосиловой анализ, который может быть использован для формирования системы требований для инженерной разработки конкретных вариантов технических систем управления потоками жидких сред.

Ключевые слова: технические жидкости; магнитные жидкости; обобщенный кинематический и энергосиловой анализ; способы управления расходом; технические системы энергетических предприятий.

СУЮК ТЕХНИКАЛЫК ЧӨЙРӨНҮН АГЫМЫН БАШКАРУУГА ЭНЕРГИЯ КҮЧҮ БОЮНЧА ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ

Ю.М. Знамцев, О.В. Виштак, М.В. Рогова, С.Н. Грицюк

Бул макалада жумушчу чөйрөнүн – энергия алып жүрүүчүлөрдүн жана энергетикалык ишканалардын техникалык системаларында технологиялык чөйрөнүн агымын башкаруу боюнча актуалдуу маселе каралды, анткени дал ушул диэлектрик же начар өткөргүч чөйрөлөр башкаруу системасынын ЭГД-элементтеринде, электрореологиялык чөйрөнүн негизиндеги жабдууларда пайдаланылат. Автоматтык түрдө контролдоо жана техникалык системалардын параметрлерин башкаруу үчүн, магниттик суюктуктарды пайдалануунун негизинде иштеген жабдуулардын пайдаланылышына талдоо жүргүзүлдү. Кеңири кинематикалык жана энергия күчү боюнча талдоо жүргүзүлдү, мындай талдоо суюк чөйрөнүн агымын башкаруунун техникалык системасынын конкреттүү варианттарын инженердик иштеп чыгуу үчүн талаптар системасын түзүү үчүн пайдаланылышы мүмкүн.

Түйүндүү сөздөр: техникалык суюктуктар; магниттик суюктуктар; кеңири кинематикалык жана энергия күчү боюнча талдоо жүргүзүү; чыгашаларды башкаруу ыкмалары; энергетикалык ишканалардын техникалык системалары.

ENERGY-POWER ANALYSIS OF MANAGEMENT OF THE FLOW OF TECHNICAL LIQUID ENVIRONMENTS

Y.M. Znamtsev, O.V. Vishtak, M.V. Rogova, S.N. Gritsyuk

The article deals with the actual problem of controlling the flow of working media – energy carriers and technological media in the technical systems of energy enterprises, as it is dielectric or weakly conductive media used in the EHD elements of control systems, in devices based on electro-rheological media. Also, with the development of intelligent systems based on IT-technologies to provide an interface between electrical and hydraulic components, the use of electromagnetic fields in hydrodynamic systems remains relevant. The analysis of the use of devices operating on the basis of the use of magnetic fluids for automatic control and management of parameters of technical systems. A generalized kinematic and energy-power analysis, which can be used to form a system of requirements for the engineering development of specific options for technical control systems of fluid flows.

Keywords: technical fluids; magnetic fluids; generalized kinematic and energy-force analysis; flow control methods; technical systems of energy enterprises.

Применение электрических (электростатических) полей для управления течением рабочих сред – энергоносителей (РТЖ) и технологических сред (ТТЖ) в технических системах энергетических предприятий наиболее целесообразно в случае диэлектрических, либо слабопроводящих сред, что находит применение при разработке ЭГД-элементов систем управления [1, 2], а также в устройствах на основе электрореологических сред. Использование электромагнитных полей в гидродинамических системах стало особенно актуальным по мере развития интеллектуальных систем на основе IT-технологий для обеспечения интерфейса между электрическими и гидравлическими компонентами [3, 4].

Применение магнитных полей для управления текучими средами сначала было освоено в области МГД-технологий [5–8], затем было распространено и на сферу управления “магнитными” (ферромагнитными) жидкостями (МЖ) [9–12]. Было установлено, что воздействие электрических и магнитных полей на некоторые виды жидких сред существенно влияет на их гидромеханические и электрофизические характеристики, что позволяет управлять их поведением в практических целях. На основе таких жидкостей были разработаны некоторые чувствительные элементы (“сенсоры”) для автоматического контроля и управления технических систем энергетических предприятий [9, 10].

В ряде случаев оказалось целесообразным использовать движение ограниченного объема МЖ, помещенного внутрь эластичной упругой оболочки [13]. Под действием управляющего магнитного поля, действующего на выделенный объем МЖ, осуществляется управление течением среды, окружающей оболочку с МЖ [14, 15]. С другой стороны, взаимодействие внешней среды с оболочкой, заполненной МЖ, дает возможность использовать ее как МЖ-сенсор для измерения параметров контролируемой среды за счет, например, перемещения локализованного объема МЖ в магнитном поле измерительных катушек [15]. Предложены также варианты МЖ-сенсоров на основе движения намагничивающихся частиц МЖ в неоднородном магнитном поле [16]. Подобные эффекты предлагается использовать для сепарации МЖ при очистке жидких сред от загрязнений [7, 16].

Как отмечалось выше, вариация расхода за счет вариации плотности среды имеет ограниченное применение, поскольку большинство ТЖ относится к категории практически несжимаемых ($\rho = const$). Поэтому наиболее распространенными способами управления расходом служат методы на основе вариаций проходного сечения $S = var$ и средней скорости $\langle V \rangle = var$. Вариант $S = var$ может быть реализован либо путем частичного или полного перекрытия потока ТЖ механическими элементами (затворка, золотник), либо путем смещения потока относительно приемного сопла. При этом поток может быть либо канализован (струйная трубка), либо течь свободной струей, способной отклоняться в результате управляющего воздействия. Случай с отклонением струи, фактически относится к варианту с изменением направления вектора средней скорости течения относительно контрольного сечения [1].

Вариант $\langle V \rangle = var$ предполагает модуляцию модуля скорости потока и является наиболее “трудоемким” с точки зрения энергозатрат по каналу управления. Проведем оценку энергетики управления движением ТЖ на основе наиболее общих законов гидромеханики – законов сохранения импульса (количества движения) и энергии [17–19].

Движение рабочих сред сопровождается переносом не только вещества, но и переносом и взаимопревращением различных форм энергии. Для математического описания динамики и энергетики процессов управления движением ТЖ используем уравнения, отражающие второй закон Ньютона (сохранения количества движения), согласно которому изменение импульса вещества ТЖ, заключенного в единицу объема, определяется суммой действующих на этот объем сил [17, 18, 20]:

$$\frac{d}{dt}(\rho \vec{V}) = -\nabla P - [\nabla \tau] + \vec{f}_v. \quad (1)$$

Поскольку каждый вид ТЖ обладает своими “индивидуальными” характеристиками, то энергосиловой анализ целесообразно проводить в наиболее обобщенном виде для выявления наиболее существенных и универсальных аспектов управления течением жидких сред. Соответственно закон сохранения импульса (1) записываем в интегральной форме: изменение количества движения среды, протекающей сквозь

выделенный объем, определяется суммой локальной производной по времени от количества движения среды в некотором замкнутом физическом объеме V потока и количеством движения среды, протекающей в единицу времени сквозь внешнюю поверхность S , ограничивающую объем V . Эта сумма равна сумме всех сил, которые действуют на среду в объеме V :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{V} dV + \int_S \rho \vec{V} V_n dS = \vec{F}_V + \vec{F}_S + \vec{F}_T, \quad (2)$$

где \vec{F}_V – результирующая всех объемных (массовых) сил, действующих на среду в объеме V (включая, в общем случае, силы тяжести, вязкости, электромагнитные силы и динамические эффекты); \vec{F}_S – главный вектор поверхностных сил, действующих на внешнюю поверхность S объема V (например, силы давления и поверхностного натяжения); \vec{F}_T – гидродинамическая реакция непроницаемого тела, обтекаемого потоком внутри объема V .

Уравнением, отражающим закон сохранения механической энергии, является уравнение, описывающее изменение кинетической энергии элемента объема среды, которое определяется суммарной мощностью (скоростью совершения работы) силами, действующими на выделенный элемент объема среды. С учетом (1) это уравнение записываем в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\rho \frac{V^2}{2} \right) = \vec{V} \cdot (-\nabla P - [\nabla \tau] + \vec{f}_v). \quad (3)$$

В более общем случае каждый элемент среды, кроме кинетической, обладает также потенциальной и внутренней энергией. Основы учения о переносе энергии сплошными средами были разработаны Н.А. Умовым [22]. В случае нестационарного движения жидкой среды любая ее единица объема обладает энергией (плотностью энергии), равной сумме кинетической, потенциальной и внутренней энергий [21, 22]:

$$E = \frac{\rho V^2}{2} + \rho u + \rho e = \rho \left(\frac{V^2}{2} + u + e \right). \quad (4)$$

Если вместо внутренней энергии e использовать энтальпию $w = e + \frac{P}{\rho}$, так как кроме простого переноса энергии движущаяся среда может производить внутри выделенного объема dV некоторую работу, определяющую дополнительный поток энергии $P\vec{V}$. Тогда общий поток

энергии может быть охарактеризован вектором плотности потока энергии (вектор Н.А. Умова):

$$\vec{Y} = \rho \vec{V} \left(\frac{V^2}{2} + u + w \right). \quad (5)$$

Для произвольного фиксированного объема V с учетом теоремы Остроградского–Гаусса закон сохранения энергии представим, как [22]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V E dV &\equiv \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \left(\frac{V^2}{2} + u + w \right) dV = \\ &= - \int_S \rho \left(\frac{V^2}{2} + u + w \right) V_n dS. \end{aligned} \quad (6)$$

Или с учетом (5):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V E dV = - \int_S Y_n dS. \quad (7)$$

То есть, изменение энергии в объеме V определяется потоком энергии через граничную поверхность S (потоком вектора Умова). Применительно к электромагнитным процессам понятие вектора плотности энергии было использовано Дж. Пойнтингом [18]. Поэтому для электро- и магнитореологических сред под общим потоком энергии (5), в ряде случаев следует понимать вектор Умова–Пойнтинга. Исходя из дифференциальной (1), (3) либо интегральной (2), (6) форм законов сохранения импульса и энергии, можно дать оценку энергосиловых способов управления потоками текучих сред.

Согласно (1), (2) управление движением среды может осуществляться как посредством объемных сил различной физической природы, так и за счет поверхностных сил, а также путем изменения сил внутреннего трения (вязкости). В каждом конкретном случае выбор способа управления течением зависит как от физических свойств среды, так и от конструктивных особенностей гидромеханического оборудования [3]. Энергозатраты на перенос объемов жидкой среды могут быть оценены на основании соотношений (3), (7). При этом из (3) на основании теоремы об изменении кинетической энергии следует, что, если силы, действующие на элемент объема среды, направлены ортогонально местной скорости среды, то мощность (работа) этих сил будет равна нулю. Такие системы в теоретической механике называют гироскопическими [20].

Таким образом, способ ортогонального воздействия на течение среды является наименее энергозатратным (без учета сжимаемости жидкости, что справедливо для большинства ТЖ).

Вместе с тем, согласно (1) даже в этом случае может происходить изменение скорости элементов объема среды. Причем будет меняться не модуль, а направление местной скорости среды. Такой способ управления течением наиболее пригоден для струйных элементов гидросистем [1, 2]. Изменение модуля скорости потока согласно (1), (3) наиболее выражено при продольном относительно скорости потока направлении сил, действующих на среду. При этом, однако и затраты мощности в канале управления будут максимальными. Исходя из энергетических соображений, имеет смысл рассматривать вариант с ортогональным (поперечным) управляющим воздействием как квазигироскопический, а вариант с продольным – как квазидиссипативный, поскольку в этом случае происходит максимальный расход (диссипация) энергии в канале управления.

Таким образом, можно сделать вывод, что на основании вариационно-параметрического принципа классификации способов управления течением жидких сред наиболее пригодными для решения инженерно-технических задач, связанных с управлением потоками жидких сред, являются способы $\vec{V} = \text{var}$ и $S = \text{var}$. Этот факт формально следует из (8), но в явном виде в нем не содержится, соответственно представленный здесь обобщенный кинематический и энергосиловой анализ может быть использован для формирования системы требований для инженерной разработки конкретных вариантов систем управления потоками жидких сред в технических системах.

Литература

1. Нагорный В.С. Устройства автоматики гидро- и пневмосистем / В.С. Нагорный, А.А. Денисов. М.: Высшая школа, 1991. 367 с.
2. Знамцев Ю.М. Автоматизация процессов управления расходом технических жидкостей в гидрофицированном технологическом оборудовании на основе электрогидродинамических усилителей-преобразователей мощности с минимальной энергетической избыточностью управления: автореф. дис... канд. техн. наук / Ю.М. Знамцев. Саратов: СГТУ, 2004. 16 с.
3. Знамцев Ю.М. Разработка ЭГД-устройств точного дозирования жидких топлив и масел и вопросы автоматизации систем с ДВС / Ю.М. Знамцев, В.В. Власов // Проблемы экономичности и эксплуатации ДВС в АПКСНГ. Вып. 7. Саратов: СГУ, 1996. С. 11–12.
4. Знамцев Ю.М. Анализ возможностей синтеза мехатронных систем с ЭГД и МГД устройствами автоматики. Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании / Ю.М. Знамцев, М.В. Рогова, С.Н. Грицюк // Сб. тр. I межд. научн-практ. конф. М.: НИЯУ МИФИ; БИТИ НИЯУ МИФИ, 2019. С. 60–64.
5. Гогосов В.В. Гидродинамика намагничивающихся жидкостей / В.В. Гогосов, В.А. Налетова, Г.А. Шапошникова // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М., 1981. С. 76–209.
6. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: справочное пос. / В.Е. Фертман. Минск: Высшая школа, 1988. 184с.
7. Блум Э.Я. Магнитные жидкости / Э.Я. Блум, М.М. Майоров, А.О. Цеберс. Рига: Зинанте, 1989. 356 с.
8. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика / Р. Розенцвейг. М.: Мир, 1989. 351 с.
9. Виштак О.В. К вопросу использования магнитоидкостного плотномера в ЭГД-системах / О.В. Виштак, В.В. Власов, М.В. Рогова // Сб. тр. VII межд. научн. конф. “Современные проблемы электрофизики и электродинамики жидкостей”. СПб.: СПбГТУ, 2000. С. 243–244.
10. Виштак О.В. Магнитные жидкости в расходомерии и регулирующих устройствах систем управления / О.В. Виштак, В.В. Власов, С.Н. Грицюк // Докл. 4-й рос. конф. “Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах”. Балаково: СООО “АН ВЭ”, 2011. С. 54–61.
11. Герасименко Т.Н. Градиентное магнитное поле для управления магнитными микро- и наногранулами в вязкой среде / Т.Н. Герасименко, П.А. Поляков, С.И. Касаткин // Датчики и системы. 2001. № 1. С. 15–19.
12. Ватажин А.Б. Магнитогидродинамика течения в каналах / А.Б. Ватажин, Г.А. Любимов, С.А. Регирер. М.: Наука, 1970.
13. Меркулов В.И. Управление движением жидкости / В.И. Меркулов. Новосибирск: Наука, 1981.
14. Виштак О.В. Конструктивное исполнение магнитоидкостного расходомера / О.В. Виштак, В.В. Власов, С.Н. Грицюк // Докл. 2-й Всерос. конф. “Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах”. Балаково: СООО “АН ВЭ”, 1999. С. 40–42.

15. Виштак О.В. К вопросу конструктивного исполнения магнитожидкостного плотномера / О.В. Виштак, В.В. Власов, М.В. Рогова // Докл. 2-й Всеросс. конф. “Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах”. Балаково: СООО “АН ВЭ”, 1999. С. 42–43.
16. Агеев В.А. Сбор магнитной жидкости неоднородным магнитным полем / В.А. Агеев, В.В. Балыбердин, И.И. Иевлев, В.И. Легенда // Магнитная гидродинамика. 1989. № 3. С. 118–121.
17. Гуло Д.Д. Н.А. Умов. Пособие для учащихся. М.: Просвещение, 1977. 128 с.
18. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский. М.: Наука, 1978. 544 с.
19. Емцов Б.Т. Техническая гидромеханика / Б.Т. Емцов. М.: Машиностроение, 1978. 463 с.
20. Ольховский И.И. Курс теоретической механики для физиков / И.И. Ольховский. М.: Наука, 1970. 448 с.
21. Ландау Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. М., 1986. 736 с.
22. Бреховских Л.М. Введение в механику сплошных сред / Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1982.