

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, МЕХАНИЗМЫ В ТЕХНИКЕ

УДК 543.08

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

*А. Л. Брякин, А. В. Липов, С. В. Кочкин,
В. В. Кожевников, А. В. Ординарцев*

EQUIPMENT AND METHODS OF MEASUREMENT DENSITY OF LIQUID PETROLEUM PRODUCTS

*A. L. Brjakin, A. V. Lipov, S. V. Kochkin,
V. V. Kozhevnikov, A. V. Ordinartsev*

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для учета количества жидких нефтепродуктов при производстве, транспортировании, хранении и продаже одним из контролируемых параметров является их плотность. Основными требованиями, предъявляемыми к оборудованию и методикам определения плотности, являются высокая точность в измеряемом диапазоне и оперативность проведения измерений при относительно невысокой стоимости. В связи с этим разработка конструкции экспериментального образца датчика и методики определения плотности, позволяющих более точно и оперативно проводить измерения в реальных условиях и при невысокой стоимости, является актуальной задачей. *Материалы и методы.* Поставленная задача была реализована путем анализа существующих способов и оборудования для измерения плотности жидкостей, использования инженерных методов проектирования технологического оборудования и разработки электронных схем измерений и управления. *Результаты.* Разработаны конструкции экспериментального образца датчика и стенда для определения плотности светлых нефтепродуктов, а также методика проведения измерений. Приведены направления совершенствования конструкции датчика и оборудования для повышения качества измерений. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие работоспособность оборудования. *Выводы.* Полученные результаты позволяют разрабатывать конструкции промышленных датчиков, оборудования и соответствующих методик проведения измерений плотности светлых нефтепродуктов, находящихся в реальных условиях.

Ключевые слова: нефтепродукты, датчик, плотность, измерения.

Abstract. *Background.* To track the number of liquid petroleum products during transportation, storage and sale of one of the controlled parameters is density. The basic requirements to the equipment and methods for determining density are the high accuracy in the measured range and speed measurements at relatively low cost. In this regard, the design of the prototype sensor (densimeter) and methods for determining density, to more ac-

curately and quickly carry out the measurement, compared to existing equipment, for the same cost, is an urgent task. *Materials and methods.* Task implementation was carried out by literature analysis and patent search of existing methods and equipment for measuring the density of liquids, the use of engineering methods of designing of technological equipment and development of electronic circuits for measurement and control. *Results.* The developed structure of the sensor (densimeter) and stand to determine density of liquid petroleum products consisting of measuring and electrical parts, and methods of measurement. Given the direction of improving sensor design, electrical and measuring parts of the stand to improve the quality of measurements. Experimental studies demonstrate the efficiency of the equipment. *Conclusions.* The obtained results allow to develop the design of industrial sensors, test benches and relevant methods of measurement of density of liquid petroleum products in the real world.

Key words: petroleum products, sensor, density, measurement.

Введение

Для учета массы жидких нефтепродуктов при их производстве, транспортировании, хранении и продаже существует несколько методов ее измерения [1]. При этом основными требованиями, предъявляемыми к оборудованию и методикам проведения таких измерений, являются высокая точность, универсальность и оперативность при невысокой стоимости по сравнению с существующими аналогами. Одним из методов, обеспечивающих оперативность проведения измерений в реальных условиях в любых емкостях с достаточной точностью, является косвенный метод, основанный на определении плотности и объема нефтепродуктов. Масса определяется как произведение объема на плотность. Значительное влияние на погрешность определения массы оказывает точность измерения плотности.

В настоящее время из способов определения плотности в реальных условиях наибольшее распространение получили способы на основе полностью погруженного поплавка [2–4]. Основным элементом оборудования (плотномер), реализующего этот способ, является датчик. При этом различают компенсационные плотномеры и плотномеры с перемещающимся поплавком. В первом случае на поплавок, кроме сил тяжести и Архимеда, действует усилие от компенсирующего элемента, например, пружины, пневматического преобразователя и др. При этом поплавок при измерениях практически не перемещается, а плотность жидкости определяют по величине усилия от компенсирующего элемента. Относительно невысокую точность измерений такими плотномерами можно объяснить необратимым воздействием компенсирующих элементов (трением, деформацией и т.д.).

В плотномерах с перемещающимся поплавком, на который при измерениях, кроме сил тяжести и Архимеда, действуют и другие усилия (например, от нескольких симметрично прикрепленных к нему цепочек, другие концы которых прикреплены к неподвижному элементу), удастся несколько избежать необратимых воздействий, что повышает точность измерений [5].

Предложено для исключения указанного недостатка воздействовать на поплавок, кроме сил тяжести и Архимеда, электромагнитной силой, приложенной бесконтактно.

Разработка конструкции датчика

Разработка конструкции датчика проводилась исходя из следующих соображений. Датчик должен быть цилиндрической формы (форма и размер датчика должны обеспечивать возможность его установки в технологические отверстия стандартных резервуаров для хранения и транспортирования нефтепродуктов) и состоять из верхней и нижней частей. Верхняя часть должна быть герметичной, а нижняя – представлять негерметичный контейнер с расположенным в нем поплавком. В верхней части следует располагать электромагнит и разъем для подключения к электронной схеме, которые для электробезопасности должны быть залиты компаундом.

Параметры поплавка необходимо подбирать таким образом, чтобы он оставался затопленным в жидкости с минимальной плотностью. Центр масс поплавка не должен совпадать с его геометрическим центром, поскольку он должен быть ориентирован определенной стороной вверх. На этой стороне поплавка следует закреплять якорь из магнитомягкого материала с несколькими выступами для фиксации величины магнитного зазора между поплавком и сердечником электромагнита. При проведении измерений затопленный поплавок будет притягиваться электромагнитом вверх. Для автоматического центрирования поплавка относительно вертикальной оси электромагнита его якорь должен иметь поверхность, взаимнообратную по форме ответной части сердечника электромагнита. При плавном увеличении напряжения в электромагните после погружения датчика в жидкость следует добиваться начала перемещения поплавка. В этот момент величина силы тяжести $F_{\text{тяж}}$, действующая на поплавок, равна сумме величин сил Архимеда $F_{\text{арх}}$ и притяжения электромагнита $F_{\text{эм}}$, т.е. $F_{\text{тяж}} = F_{\text{арх}} + F_{\text{эм}}$.

Из этого соотношения определяется величина плотности исследуемого нефтепродукта:

$$\rho = \frac{m}{V} - \frac{BIS}{2\mu Vg},$$

где m , V – масса и объем поплавка; g – ускорение свободного падения; B – индуктивность электромагнита; S – площадь сердечника электромагнита; μ – магнитная проницаемость нефтепродукта; I – сила тока, соответствующая поданному на электромагнит напряжению.

Из приведенной зависимости видно, что определяемая плотность пропорциональна силе тока.

В конструкции датчика необходимо предусмотреть ограничитель перемещения поплавка, обеспечивающий такую ее максимальную величину, которая позволяла бы притягивать поплавок электромагнитом при измерении плотности требуемых нефтепродуктов. В верхней части датчика должно быть предусмотрено устройство для его крепления.

Разработка конструкции экспериментального образца датчика проводилась для определения плотности светлых нефтепродуктов, к которым относятся бензин и дизельное топливо различных марок.

На рис. 1 приведена разработанная конструкция датчика, состоящего из элементов корпуса 2, 5, и 9, соединенных между собой посредством шпилек 3 и гаек 10. На поплавке 8 через опорную пластину 7 закреплен якорь 6. Между элементами корпуса 2 и 5 установлен электромагнит 4. Крепление датчика к тросу обеспечивается крюком 1.

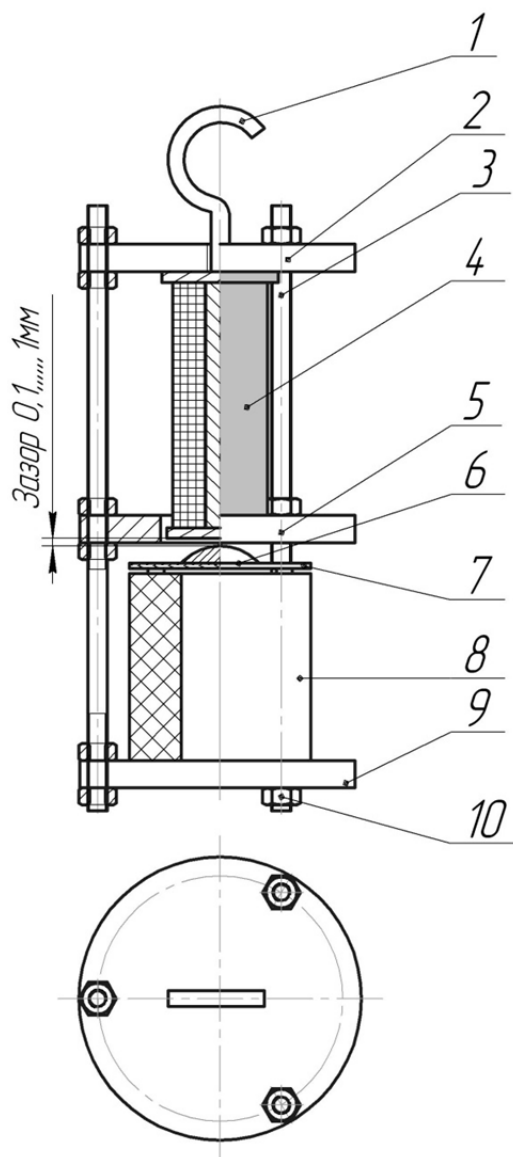


Рис. 1. Конструкция экспериментального образца датчика

Для определения плотности светлых нефтепродуктов в вышеуказанном диапазоне поплавков был выполнен из пенополиуретана. Для возможности изменения веса поплавок без смещения центра тяжести от его вертикальной оси он был выполнен полым с возможностью установки в нем на оси стальных шайб.

Внешний вид датчика приведен на рис. 2; его диаметр – 50 мм, длина – 250 мм. Для контроля положения поплавка в момент начала его движения в конструкции экспериментального образца предусмотрено использование оптического датчика.



Рис. 2. Внешний вид экспериментального образца датчика

Внешний вид стенда для измерения плотности нефтепродуктов на основе экспериментального образца датчика приведен на рис. 3. Он состоит из датчика, электронной части, компьютера ASUS EeePC и вспомогательных приспособлений. При измерениях плотности проводится видеосъемка поведения поплавка в жидкости.

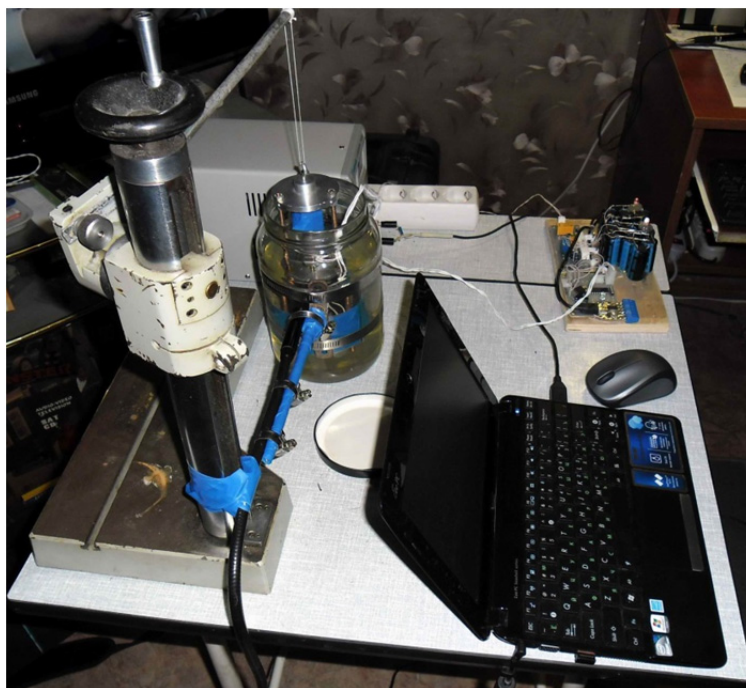


Рис. 3. Общий вид стенда для определения плотности нефтепродуктов

Стенд, методика проведения и результаты экспериментальных исследований

Поскольку плотность нефтепродукта пропорциональна силе тока в катушке, то при увеличении напряжения, подаваемого на электромагнит, фиксировали соответствующую величину силы тока. При этом по сигналу с оптического датчика определяли момент начала движения поплавка.

На рис. 4. приведен сигнал с оптического датчика, позволяющий определять величину силы тока в катушке в момент начала движения поплавка. По оси Y откладывается шкала расстояний между якорем и сердечником в условных единицах, по оси X – шкала отсчетов. По номеру отсчета уточняется значение силы тока в момент начала движения поплавка, которое определяет плотность измеряемого нефтепродукта.

Управление процессами измерений и обработкой полученной информации в стенде производится электронной схемой, основой которой является контроллер.

Для подключения измерительной платы к компьютеру используется специальный преобразователь, подключенный к USB-порту компьютера. Питание платы осуществляется от внешнего блока питания постоянным напряжением 25 В. Информация в контроллер поступает по двум каналам: от оптического датчика положения поплавка и измеренного значения силы тока на катушке электромагнита. Измерительная система стенда позволяет настраивать задержку по времени между подачами тока на катушку, а также смену полярности электромагнита (для минимизации остаточной намагниченности сердечника катушки).

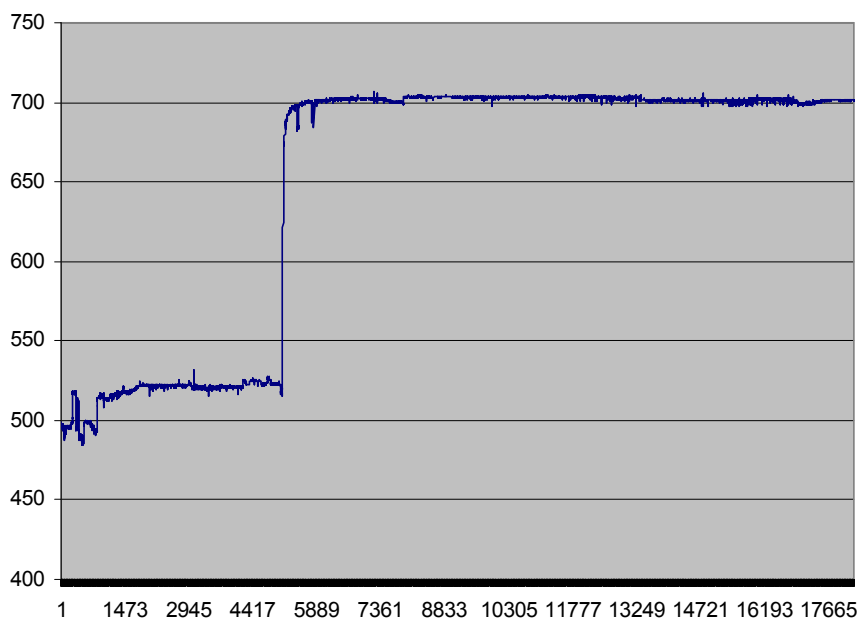


Рис. 4. Вид сигнала с оптического датчика

Для определения абсолютной погрешности измерений с учетом масштабного коэффициента необходимо узнать плотность двух нефтепродуктов. В связи с этим экспериментальные исследования проводились с использованием бензина марки А92 (ГОСТ 31072–2002) и дизельного топлива (ГОСТ Р 52368–2005) с соответствующими значениями плотности 724,37 и 822,5 кг/м³, определенными отборными способами [6].

Для проведения исследований использовался датчик со стальным якорем сферической формы с величиной зазора от 0,1 до 1 мм. Температура исследуемых жидкостей составляла 20 °С. На катушку электромагнита первоначально подавалось рабочее напряжение 15 В. Время между выдачей предыдущих результатов и началом нового измерения составляло 300 с. Исследования проводились парами при прямой и обратной полярности подключения электромагнита сериями по 20 измерений в каждой.

Расчет абсолютной погрешности измерений проводился в следующей последовательности:

1. Определялось математическое ожидание значения силы тока в момент начала перемещения поплавка:

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n},$$

где I_i – величина силы тока при i -ом измерении; $n = 20$ – количество измерений.

2. Определялось стандартное отклонение (на основе несмещенной оценки дисперсии) значений силы тока для каждой серии

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{\text{ср}} - I_i)^2}.$$

3. Проводился расчет масштабного коэффициента:

$$K = \frac{\rho_{\text{бенз}} - \rho_{\text{дт}}}{I_{\text{ср. бенз}} - I_{\text{ср. дт}}},$$

где $\rho_{\text{бенз}}$ и $\rho_{\text{дт}}$ – соответственно плотности бензина и дизельного топлива; $I_{\text{ср. бенз}}$ и $I_{\text{ср. дт}}$ – соответственно математическое ожидание значений силы тока для бензина и дизельного топлива.

4. Определялась абсолютная погрешность при условии, что ошибки распределяются по нормальному закону

$$\Delta = 3sK.$$

Расчеты абсолютной погрешности измерений плотности бензина марки А92 и дизельного топлива показали, что ее величина не превышает $\pm 0,83$ %. Эти исследования подтвердили работоспособность предлагаемой конструкции датчика. Однако известно, что в некоторых случаях для более точного расчета массы нефтепродукта в резервуаре необходимо определение значения средней плотности нефтепродукта с погрешностью не более $\pm 0,25 \dots \pm 0,35$ % [1]. В связи с этим необходимо проанализировать методику измерения плотности, конструкцию датчика и определить направления их совершенствования.

Анализ конструкции датчика и направления его совершенствования

В некоторых случаях при определении плотности нефтепродукта необходимо изменять диапазон или точность измерений. Для реализации определенных требований к проведению измерений необходимо рассматривать конкретные ситуации. При этом следует учитывать некоторые рассуждения.

Диапазон измерения зависит от параметров поплавка и усилия, создаваемого электромагнитом. При этом нижнее его значение задается усилием электромагнита и, соответственно, полностью определяется конструкцией датчика. Верхнее значение диапазона определяется массой и объемом поплавка, по которым можно рассчитать такую его плотность, которая будет определять максимальную плотность измеряемой жидкости. При большей ее величине поплавки всплывет и проведение измерений будет невозможным.

На погрешность измерения плотности нефтепродуктов в реальных условиях значительное влияние оказывает их температура. Для исключения температурных погрешностей необходимо пользоваться таблицами, приведенными в [6].

Для более точного определения плотности нефтепродуктов в емкостях необходимо знать неравномерность распределения температуры по их высоте. Это происходит при изменении температуры окружающей среды, наступлении дня или ночи, сливе в резервуар железнодорожных цистерн и т.д. Например, во втором случае температура нефтепродукта в верхней и нижней

части емкости может отличаться на 3–8 °С, в третьем – на 10–15 °С. По рекомендациям [1] в таком случае следует измерять плотность и объем слоев нефтепродукта с одинаковой температурой и вычислять его массу как сумму масс всех слоев.

Значительное влияние на погрешность измерения плотности нефтепродукта оказывает термостабильность плотномера.

В предложенной схеме измерения возникающая погрешность определяется тремя ее составляющими: магнитной, механической и электронной.

Величина магнитной составляющей определяется изменением намагниченности и магнитной проницаемости материалов сердечника катушки и якоря в зависимости от температуры. При этом изменение габаритных размеров сердечника и якоря незначительно влияет на точность измерений и им можно пренебречь. Анализ возможных и доступных материалов для изготовления сердечника катушки показал, что наиболее подходящим материалом является феррит. Однако при этом необходимо контролировать уменьшение величины усилия, действующего на якорь.

Величина механической составляющей определяется изменением величины зазора между якорем и сердечником от температуры и погрешностью их позиционирования относительно друг друга, что приводит к изменению усилия притягивания. Оценку изменения размеров якоря и сердечника от температуры ΔL следует проводить по известной зависимости

$$\Delta L = L \Delta t \alpha,$$

где L – соответствующий линейный размер якоря или сердечника; Δt – диапазон изменения температуры; α – температурный коэффициент расширения их материалов.

Погрешность позиционирования якоря и сердечника относительно друг друга зависит от величины зазора между ними. При этом также, как и изменение его величины от температуры, она определяется конструкцией датчика и видом крепления якоря и сердечника.

Величина электронной составляющей определяется точностью преобразования силы тока в напряжение в электромагнитной катушке и точностью преобразования этого напряжения в цифровую форму. Установлено, что величина этой составляющей в основном определяется температурной погрешностью токоизмерительного сопротивления и может быть уменьшена применением индивидуальной термокалибровки измерительной части стенда или использованием сопротивления с более высокими термостабильными характеристиками.

Для оценки погрешности определения плотности предлагаемым оборудованием и методикой измерений с изменением температуры нефтепродуктов необходимо проведение дальнейших исследований. Кроме того, предлагаемая конструкция датчика с некоторыми доработками, связанными с обеспечением взрывозащиты, может быть использована для более точного определения плотности сжиженных углеводородных газов (СУГ). С учетом относительно невысокой стоимости предлагаемых датчиков они могут быть стационарно установлены в различных местах емкости для размещения СУГ,

а разъемы должны быть доступны для подключения оборудования и проведения измерений.

Заключение

Разработаны конструкции экспериментального образца датчика, стенда и методики определения плотности светлых нефтепродуктов, которые могут более точно и оперативно проводить измерения.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предлагаемого оборудования.

Приведены направления совершенствования конструкции датчика и электронной части стенда для повышения качества проводимых измерений.

Полученные результаты с проведением дополнительных экспериментальных исследований позволят разрабатывать конструкции промышленных датчиков, оборудования и соответствующих методик проведения измерений плотности нефтепродуктов, находящихся в реальных условиях.

Библиографический список

1. Терешин, В. И. Сравнительный анализ существующих методов измерений массы светлых нефтепродуктов в резервуарах / В. И. Терешин, А. С. Совлуков // Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов : тр. IV Междунар. метрологич. конф. – Казань : Мир без границ, 2016. – С. 70–75.
2. Гаузнер, С. И. Измерение массы, объема и плотности / С. И. Гаузнер, С. С. Кивилис, А. П. Осокина, А. Н. Павловский. – М. : Издат. стандартов, 1982. – 528 с.
3. Кивилис, С. С. Плотномер / С. С. Кивилис. – М. : Энергия, 1980. – 279 с.
4. Трохан, А. М. Гидроаэрофизические измерения / А. М. Трохан. – М. : Издат. стандартов, 1981.
5. Хансуваров, К. И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара / К. И. Хансуваров, В. Г. Цейтлин. – М. : Издат. стандартов, 1990.
6. ГОСТ 3900–85. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности. – URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294824/4294824357.pdf>

Брякин Алексей Леонидович

кандидат технических наук, ведущий
научный сотрудник,
ООО НПП «Сенсор»
E-mail: alexalb@crowd.ru

Brjakin Aleksey Leonidovich

candidate of technical sciences,
leading researcher,
Scientific and Production Enterprise
«Sensor»

Липов Александр Викторович

кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой компьютерного
проектирования технологического
оборудования,
Пензенский государственный
университет
E-mail: mrs@pnzgu.ru

Lipov Alexander Viktorovich

candidate of technical sciences, professor,
head of sub-department of computer aided
design of technological equipment,
Penza State University

Кочкин Сергей Вячеславович

кандидат технических наук

E-mail: ksvp@rambler.ru

Kochkin Sergey Vyacheslavovich

candidate of technical sciences

Кожевников Вячеслав Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра компьютерного проектирования
технологического оборудования,
Пензенский государственный
университет

E-mail: redans@yandex.ru

Kozhevnikov Vyacheslav Vladimirovich

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of computer aided design
of technological equipment,
Penza State University

Ординарцев Александр Владимирович

студент,

Пензенский государственный
университет

E-mail: 19_alex_94@list.ru

Ordinartsev Alexander Vladimirovich

student,

Penza State University

УДК 543.08

Оборудование и методика определения плотности жидких нефтепродук-
тов / А. Л. Брякин, А. В. Липов, С. В. Кочкин, В. В. Кожевников, А. В. Ординарцев // **Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе.** – 2017. – № 1 (21). – С. 85–95.