



УДК 621.6

МАССОВЫЙ РАСХОДОМЕР ЖИДКОСТЕЙ

И.В. Наумчик^a, И.Ю. Кинжагулов^b, А.П. Крень^c, К.А. Степанова^b^a ВКА им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^c Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, 220072, Республика Беларусь

Адрес для переписки: kinzhiki@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.05.15, принята к печати 18.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-900-906

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Наумчик И.В., Кинжагулов И.Ю., Крень А.П., Степанова К.А. Массовый расходомер жидкостей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 900–906.

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены вопросы определения массового расхода агрессивных и нестабильных жидкостей с учетом их фактической плотности. **Методы.** Предложен экспериментально-теоретический метод исследования для обоснования облика массового расходомера жидкостей с помощью сужающего устройства на основе трубы Вентури. **Основные результаты.** Разработана новая конструкция массового расходомера с применением сужающего устройства на основе трубы Вентури, которая отличается использованием устройства для измерения плотности жидкости, что позволяет определить ее массовый расход. Массовый расходомер жидкостей обладает универсальностью благодаря комбинированному составу, в конструкции которого меняется только сужающее устройство, рассчитанное для заданного состава жидкости. Полученные зависимости скорости звука от концентрации контролируемой жидкости позволили определить ее фактическую плотность и перейти к расчету массового расхода. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы при проектировании массовых расходомеров жидкостей, особенно агрессивных и нестабильных.

Ключевые слова

массовый расходомер, труба Вентури, агрессивные жидкости, сужающее устройство.

MASS FLOW METER FOR LIQUIDS

I.V. Naumchik^a, I.Yu. Kinzhagulov^b, A.P. Kren^c, K.A. Stepanova^b^a Mozhayskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^c Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072, Republic of Belarus

Corresponding author: kinzhiki@mail.ru

Article info

Received 18.05.15, accepted 18.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-900-906

Article in Russian

For citation: Naumchik I.V., Kinzhagulov I.Yu., Kren A.P., Stepanova K.A. Mass flow meter for liquids. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 900–906.

Abstract

Subject of Study. The paper deals with problems of determination for the mass flow rate of corrosive and unstable liquids, taking into account their actual density. **Methods.** Experimental and theoretical research method is proposed for the appearance justification of constriction flow meter for liquids based on the Venturi tube. **Main Results.** A new design of constriction flow meter for liquids based on the Venturi tube has been developed, outstanding with a device for measuring the density of liquid that makes it possible to determine its mass flow. Mass flow meter for liquids keeps versatility thanks to the combined composition; only constriction device is changing in its design, being calculated for a given composition of the liquid. Obtained dependencies of sound velocity on the controlled liquid concentration, gave the possibility to determine its actual density and pass on to mass flow calculation. **Practical Relevance.** Research results are usable in the design of mass flow meters for liquids, particularly, for corrosive and unstable ones.

Keywords

mass flow meter, Venturi tube, corrosive liquid, constriction device.

Введение

Нестабильные и агрессивные жидкости находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Например, в космической отрасли длительное время эксплуатируются ракеты космическо-

го назначения, заправка которых производится различными компонентами, некоторые из них являются агрессивными, токсичными и нестабильными. Для контроля количества заправляемого топлива в состав комплексов включены системы измерения объемов и контроля уровня, связанные с сигнализаторами уровней, установленными внутри баков ракет-носителей. Основная часть имеющихся наземных средств контроля расхода не обладает универсальностью, так как создана для конкретного типа носителя [1–10].

Особую актуальность точность дозирования агрессивных и нестабильных жидкостей приобретает в химической и нефтехимической отрасли. Вопрос точности остро стоит при дозировании вышеуказанных жидкостей в постоянно меняющихся условиях (перепады температур, давления и т.д.). Особенностью химических и нефтехимических предприятий является разветвленность технологических устройств от момента производства агрессивных и нестабильных жидкостей до передачи их потребителю. В ходе данного процесса жидкости пребывают в различных условиях, существенно влияющих на их характеристики. В связи с этим необходимо иметь информацию о фактическом состоянии, например, о плотности в определенный момент времени, для ее учета при обеспечении точности дозирования.

Следует отметить, что измерение расхода агрессивных и нестабильных жидкостей сопряжено с определенными трудностями. Непосредственный контакт с такими жидкостями чрезвычайно нежелателен, поскольку он сопряжен с опасностью для здоровья человека, а также с опасностью повреждения или загрязнения средств измерений. Например, перекись водорода (H_2O_2) относится к высокоопасным жидкостям вследствие общетоксического и раздражающего действия, а также ее пожарной опасности [8, 9].

В этой связи разработка массового расходомера жидкостей, особенно агрессивных и нестабильных, является назревшей научной проблемой, решению которой посвящена настоящая работа.

Для решения проблемы измерения массового расхода предложен расходомер жидкостей, который включает трубу Вентури, дифманометр, измерительный трубопровод, оборудованный запорно-регулирующей арматурой на входе и выходе из него, пьезоэлектрический преобразователь, установленный на измерительном трубопроводе, генератор ультразвуковых импульсов и обрабатывающее устройство электрических сигналов принимаемых отраженных импульсов, связанных с пьезоэлектрическим преобразователем. В схему также включен датчик отметки времени и микроконтроллер, обрабатывающий полученные данные, определяя по скорости прохождения ультразвуковой волны плотность жидкости и величину ее массового расхода путем вычисления произведения объемного расхода на плотность.

Выполненные исследования показали, что предлагаемый массовый расходомер жидкостей, использующий сужающее устройство на основе трубы Вентури, обладает повышенной точностью дозирования жидкости за счет учета ее плотности и универсальностью благодаря комбинированному составу расходомера, который можно подбирать под заданный состав жидкости.

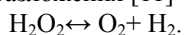
Преимущества трубки Вентури по сравнению с другими сужающими устройствами

В настоящее время существует широкая номенклатура расходомеров, основанных на различных физических принципах [11–13]. Проведенный анализ показал, что для измерения расхода жидкостей, особенно агрессивных и нестабильных, наиболее приемлемыми являются расходомеры с сужающими устройствами (СУ). Данные расходомеры нашли широкое применение в промышленности в качестве основных приборов для измерения расхода. Их главное преимущество – конструктивная простота, отсутствие движущихся частей и высокая надежность.

Основные преимущества и недостатки различных СУ представлены в табл. 1.

Следует отметить, что за диафрагмой образуются завихрения, в которых величина статического давления может стать ниже давления насыщенного пара. В результате имеет место наличие кавитационных пузырьков газа, которые при схлопывании вызывают разрушение конструкционного материала. Образование микроповреждений способствует зарождению межкристаллитной коррозии материалов, которые в обычных условиях показывают высокую коррозионную стойкость по отношению к агрессивным жидкостям.

Кавитация в нестабильных жидкостях (таких как H_2O_2) является фактором начала их разложения, так как из-за снижения статического давления в зоне турбулентности система нестабильной жидкости может отреагировать в направлении поддержания прежнего давления за счет вбрасывания в среду кислорода разложения [11]



Применение СУ на основе трубы Вентури исключает появление условий для кавитации.

Таким образом, СУ на основе трубы Вентури является расходомером, в котором отсутствуют застойные зоны и зоны кавитации, поэтому наиболее предпочтителен для применения в качестве СУ именно этот тип, особенно для агрессивных и нестабильных жидкостей.

В соответствии с ГОСТ¹ труба Вентури – тип стандартного сужающего устройства, которое состоит из входного цилиндрического участка, сходящейся конической части (конфузора), горловины и расширяющейся конической части (диффузора).

Выбор геометрических параметров сужающего устройства производился согласно действующей нормативной документации и опыту гидравлических расчетов. Геометрические параметры выбирались из соображений обеспечения необходимой точности измерений параметров потока жидкости.

Наименование типа СУ	Характеристика СУ	
	Достоинства	Недостатки
Диафрагма	<ul style="list-style-type: none"> – Проста в изготовлении и монтаже, может применяться в широком диапазоне чисел Рейнольдса (Re) – Применима на трубопроводе с внутренним диаметром от 50 до 1000 мм – Неопределенность коэффициента истечения диафрагм меньше, чем у других СУ 	<ul style="list-style-type: none"> – В процессе эксплуатации неизбежно притупление входной кромки диафрагмы, что приводит к дополнительной прогрессирующей неопределенности коэффициента истечения, которая может быть существенной для диафрагм, устанавливаемых в трубопроводах диаметром менее 100 мм – Потери давления на диафрагмах выше, чем на других СУ
Эллипсное сопло	<ul style="list-style-type: none"> – Обладает стабильными характеристиками при длительной эксплуатации – Потери давления на нем меньше, чем на диафрагме – Может иметь относительный диаметр отверстия до 0,8 	<ul style="list-style-type: none"> – Является сложным в изготовлении – Применяют только на трубопроводе внутренним диаметром не более 630 мм – Отсутствуют экспериментальные данные по их исследованию при $Re > 10^7$ – Неопределенность коэффициента истечения достигает 2%
Сопло Вентури	<ul style="list-style-type: none"> – Обладает стабильными характеристиками при длительной эксплуатации расходомера – Потери давления на нем значительно меньше, чем на диафрагме и эллипсном сопле – Коэффициент истечения не зависит от Re 	<ul style="list-style-type: none"> – Является сложным в изготовлении – Имеет узкий диапазон применения по Re – Имеет большую неопределенность коэффициента истечения
Труба Вентури	<ul style="list-style-type: none"> – Обладает стабильными характеристиками при длительной эксплуатации – Потери давления на ней значительно меньше, чем на диафрагме и сопле, а в некоторых случаях меньше, чем в сопле Вентури. Требуется короткие прямолинейные участки трубопровода – В проточной части отсутствуют застойные зоны, где могут скапливаться осадки – Допускается к применению в трубопроводах с внутренним диаметром до 1200 мм 	<ul style="list-style-type: none"> – Является сложным в изготовлении и имеет большие размеры

Таблица 1. Сравнительная характеристика основных видов сужающих устройств для измерения расхода

Анализ показал, что сужающее устройство (труба Вентури) может использоваться в составе массового расходомера, включающего в себя следующие элементы: измерительный трубопровод, сужающее устройство, дифманометр с электрическим выходным унифицированным сигналом. Такой состав позволит при принятии соответствующих допущений по перепаду давления измерять расход проходящей через сужающее устройство жидкости.

¹ ГОСТ 8.586.1-2005 (ИСО 5167-1:2003). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Введ. 01.01.07. М: Стандартинформ, 2007. 72 с.

Массовый расходомер жидкостей на основе трубы Вентури

Для измерения массового расхода разработан расходомер жидкостей, который включает трубу Вентури 1, дифманометр 2, по величине показаний которого определяется объемный расход жидкости, измерительный трубопровод 13, оборудованный запорно-регулирующей арматурой на входе и выходе из него, пьезоэлектрический преобразователь 9, установленный на измерительном трубопроводе, генератор ультразвуковых импульсов 8 и обрабатывающее устройство 6 электрических сигналов принимаемых отраженных импульсов, связанных с пьезоэлектрическим преобразователем. В схему также включен датчик отметки времени 5 и микроконтроллер 4, обрабатывающий полученные данные, определяя по скорости прохождения ультразвуковой волны плотность жидкости и величину ее массового расхода путем вычисления произведения объемного расхода на плотность.

Принципиальная схема массового расходомера жидкостей представлена на рисунке.

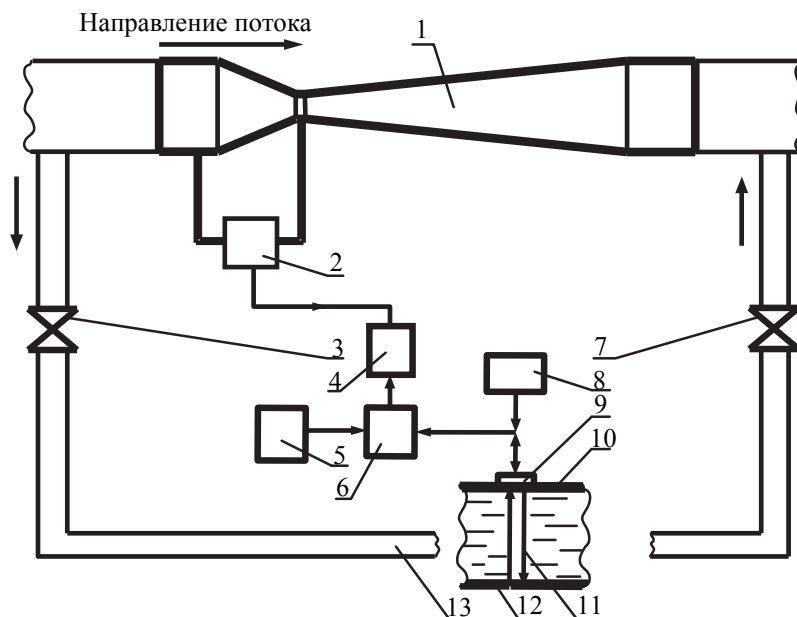


Рисунок. Принципиальная схема массового расходомера жидкостей

При измерении массового расхода жидкости с помощью трубы Вентури 1 создается местное сужение потока, часть потенциальной энергии которого переходит в кинетическую энергию. Средняя скорость потока в месте его сужения повышается, а статическое давление становится меньше статического давления до трубы Вентури 1. Разность давления (перепад давления) измеряется дифманометром 2, по величине показаний которого определяется объемный расход жидкости. Данные с дифманометра поступают в микроконтроллер 4.

При измерении массового расхода жидкостей, особенно агрессивных и нестабильных, необходимо измерять ее плотность, для этого предлагается использовать ультразвуковой метод измерения [14, 15]. С этой целью для измерения плотности жидкости измерительный трубопровод 13 заполняется путем отвлечения части общего потока. Для регулирования подачи жидкости измерительный трубопровод 13 оборудован запорно-регулирующей арматурой на входе (клапан 3) и выходе (клапан 7) из него. С этой целью клапан 7 открывается, а клапан 3 закрывается. Затем клапан 3 открывается, и после заполнения жидкостью измерительного трубопровода 13 последовательно закрываются клапаны 7 и 3. Производится измерение плотности жидкости.

Снаружи стенки 10 измерительного трубопровода 13 установлен пьезоэлектрический преобразователь 9, работающий в импульсном режиме по совмещенной схеме. При обеспечении акустического контакта между преобразователем 9 и стенкой 10 испускаемый импульс ультразвуковой продольной волны, движущийся по направлению 11, пересекает стенку 10, слой жидкости, стенку 12. После отражения от границы раздела «стенка 12–воздух» ультразвуковой импульс пересекает в обратном направлении стенку 12, слой жидкости, стенку 10 и принимается пьезоэлектрическим преобразователем 9.

С обрабатывающего устройства 6 электрических сигналов принимаемых отраженных импульсов и дифманометра 2 данные поступают в микроконтроллер 4, определяющий по скорости прохождения ультразвуковой волны плотность жидкости и величину массового расхода жидкости путем вычисления произведения объемного расхода на плотность.

Затем клапаны 7 открываются. Цикл измерений повторяется.

Математическая модель и эксперимент

Массовый расход среды для сужающих устройств можно определить по формуле [3]

$$q_m = (\pi d^2/4) K_{ш} K_{п} C E (2\rho\Delta p)^{0,5},$$

где $K_{ш}$ – поправочный коэффициент, учитывающий шероховатость внутренней поверхности измерительного трубопровода; $K_{п}$ – поправочный коэффициент, учитывающий притупление входной кромки диафрагмы (равен 1 для труб Вентури); C – коэффициент истечения (равен 1 для труб Вентури); E – коэффициент скорости входа; ρ – плотность среды; Δp – перепад давления в сужающем устройстве.

При измерении массового расхода среды дополнительно необходимо знать значение ее плотности. С этой целью предложен ультразвуковой способ определения скорости звука в жидкой среде, который и позволяет определить ее плотность.

Ультразвуковой способ определения скорости звука в жидких средах включает излучение (прием) ультразвуковых колебаний в измеряемую жидкость с последующим преобразованием в электрические сигналы, анализ вышеуказанных электрических сигналов для определения скорости звука в жидкости; при этом используют один обратимый электрический преобразователь, который обеспечивает излучение (прием) ультразвуковых волн в жидкость. В поток излучается ультразвуковая волна, в свою очередь, регистрируется отраженная волна с одновременным измерением ее частоты, по которой вычисляют скорость звука с помощью соотношения

$$c = \frac{\delta}{\frac{t_{\Sigma}}{2} - \frac{\delta_{ст1}}{c_{ст1}} - \frac{\delta_{ст2}}{c_{ст2}}},$$

где δ – толщина слоя исследуемой жидкости; t_{Σ} – суммарное время прохождения прямого и отраженного импульсов; $\delta_{ст1}$, $\delta_{ст2}$ – толщина стенок; $c_{ст1}$, $c_{ст2}$ – скорость звука в материале стенок.

Для определения значения плотности ρ и скорости звука C в зависимости от концентрации K контролируемой жидкости были проведены экспериментальные исследования [16]. В качестве примера была рассмотрена перекись водорода в виде водных растворов различной концентрации как одна из наиболее агрессивных жидкостей, используемых в промышленности.

Физические свойства раствора перекиси водорода существенно зависят от концентрации. В частности, в диапазоне концентрации от 0 до 100% плотность раствора изменяется в пределах от 0,998 до 1,450 г/см³.

ρ , г/см ³	K , %	C , м/с
0,998 (дистиллированная вода)	0,0	1487,4
1,045	13,0	1516,1
1,080	22,0	1526,4
1,095	26,0	1545,9
1,108	29,5	1556,1
1,115	31,0	1565,4
1,140	37,0	1587,7
1,315	75,5	1715,7

Таблица 2. Экспериментальные значения плотности ρ и скорости звука C в зависимости от концентрации K перекиси водорода

Для определения величины t_{Σ} в образцах использовали ультразвуковые импульсы длительностью порядка 2 мкс с заполняющей частотой 10 МГц. Ультразвуковые импульсы генерировались с помощью прямого раздельно-совмещенного преобразователя П112-10-УММ с эффективной площадью пьезоэлемента 4,25 мм². В качестве блока регистрации использовался ультразвуковой дефектоскоп USN 60 (Krautkramer) с частотным диапазоном от 0,25 до 25 МГц. Преобразователь размещался на внешней поверхности стенки сосуда, который представлял собой полый параллелепипед, выполненный из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. Для обеспечения постоянства акустического контакта и компенсации влияния конвективного теплообмена использовался термостабильный акустический гель. Перед началом исследований экспериментально была получена величина временной задержки при распространении ультразвуковой волны в тракте призма генератора – слой контактного геля – стенка сосуда. Полученная задержка учитывалась в дальнейшем при определении значений скорости распространения ультразвуковых импульсов.

Исследования показали наличие ярко выраженной зависимости между скоростью звука и концентрацией перекиси водорода. Полученные экспериментальные данные аппроксимировали квадратичной зависимостью [16]

$$C = 0,0116 K^2 + 2,2331 K + 1482 \text{ [м/с]}.$$

Экспериментальные значения плотности ρ и скорости звука C в зависимости от концентрации K перекиси водорода показаны в табл. 2.

Обсуждение результатов

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали наличие ярко выраженной зависимости между скоростью звука и концентрацией контролируемой жидкости (в данном случае перекиси водорода).

Полученная зависимость позволила перейти к разработке устройства для измерения плотности жидкости, что позволяет определить ее массовый расход. Предложенный состав устройства позволяет получать информацию о текущей плотности жидкости по скорости прохождения ультразвуковой волны, но, как показали экспериментальные исследования, в процессе измерения следует учитывать временные задержки на границах раздела сред по всему акустическому тракту.

Стоит также отметить негативное влияние конвективного теплообмена в точке контакта преобразователя с поверхностью сосуда при измерении скорости распространения ультразвуковых импульсов. Это влияние можно компенсировать за счет применения специализированных термостабильных гелей.

Для измерения объемного расхода жидкости было выбрано сужающее устройство на основе трубы Вентури, а также разработана его модель [12, 16].

Предложенная конструкция массового расходомера обеспечивает измерение объемного расхода и плотности перекачиваемой жидкости с пересчетом на массовый расход при использовании специального вычислительного устройства. При известной конструкции представляется возможным проведение расчетов, с использованием программного продукта ANSYS, что позволяет определить диапазон измерений расхода q_{\max} / q_{\min} .

Заключение

Проведено экспериментально-теоретическое обоснование облика массового расходомера переменного перепада давления с помощью сужающего устройства на основе трубы Вентури. Проведенные исследования подтвердили возможность использования зависимости изменения скорости звука от концентрации контролируемой среды при определении текущей плотности нестабильных и агрессивных жидкостей. Внедрение предложенного массового расходомера в различные отрасли промышленности позволит учитывать плотность жидкости в определенный момент времени, что существенно повысит показатели точности дозирования.

Результаты выполненной работы показали, что перспективными направлениями дальнейших исследований следует считать:

- расчетно-экспериментальное уточнение характеристик массового расходомера, обеспечивающего повышенную точность измерения за счет учета фактической текущей плотности жидкости путем включения в схему измерения измерителя плотности;
- проведение экспериментальных исследований на широком спектре жидкостей различного состава с целью получения калибровочных зависимостей.

References

1. Naumchik I.V., Pen'kov M.M., Shevchenko A.V. *Pribory dlya Izmereniya Neelektricheskikh Velichin i ikh Poverka* [Devices for Measurement of Non-Electrical Quantities and their Verification]. St. Petersburg, VKA im. A.F. Mozhaiskogo Publ., 2007, 491 p.
2. Karmazinov F.V., Dikarev V.I., Zarenkov D.V., Koinash B.V. *Voda, Neft', Gaz i Truby v Nashei Zhizni* [Water, Oil, Gas and Pipes in Our Lives]. St. Petersburg, Nauka i Tekhnika Publ., 2005, 296 p.
3. Shuvalov V.D. *Raskhodometry i Doziruyushchie Ustroistva* [Flowmeters and Dosing Devices]. Moscow, MD USSR, 1968, 95 p.
4. Levin V.M. *Raskhodometry Malykh Raskhodov dlya Skhem Promyshlennoi Avtomatiki* [Flowmeters for Low Flow Circuits of Industrial Automatics]. Moscow, Energiya Publ., 1972, 72 p.
5. Khansuvarov K.I., Tseitlin V.G. *Tekhnika Izmereniya Davleniya, Raskhoda, Kolichestva i Urovnya Zhidkosti, Gaza i Para* [Technique for Measuring the Pressure, Flow, Level and Amount of Liquid, Gas and Steam]. Moscow, Izd. Standartov, 1990, 287 p.
6. Tseitlin V.G. *Tekhnika Izmereniya Raskhoda, Kolichestva Zhidkosti, Gazov i Parov* [Technology Flow Measurement of Fluids, Gases and Vapors]. Moscow, Izd. Standartov, 1968, 192 p.
7. Kisilev P.G. *Gidravlika. Osnovy Mekhaniki Zhidkosti* [Hydraulics. Basics of Fluid Mechanics]. Moscow, Energiya Publ., 1980, 360 p.

8. Kakhonovich V.S. *Izmerenie Raskhoda Veshchestva i Tepla pri Peremennykh Parametrakh* [Measuring the Flow of Matter and Heat at Variable Parameters]. Moscow, Energiya Publ., 1970, 168 p.
9. Il'inskii V.M. *Izmerenie Massovykh Raskhodov* [Measurement of Mass Flow]. Moscow, Energiya Publ., 1973, 144 p.
10. Shamb W., Settergild C., Ventwors R. *Perekis' Vodoroda* [Hydrogen Peroxide]. Moscow, Izdatel'stvo Inostrannoi Literatury, 1958, 579 p. (In Russian)
11. Ponomarenko V.K. *Raketnye Topliva* [Rocket Fuels]. St. Petersburg, VIKKA im. A.F. Mozhaiskogo, 1995, 619 p.
12. Ivanova G.M., Kuznetsov N.D., Chistyakov V.S. *Teplotekhnicheskie Izmereniya i Pribory* [Thermal Measurement and Devices]. Moscow, Energoatomidat Publ., 1984, 232 p.
13. Savenko V.G. *Izmeritel'naya Tekhnika* [Measuring Equipment]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1974, 324 p.
14. Bergmann L. *Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik*. Zurich, 1954.
15. Polupan A.V., Naumchik I.V., Svetlorusov M.A. Sonic velocity definition in nitric tetraoxide and hydrogen peroxide water solutions. *Testing. Diagnostic*, 2011, no. 2, pp. 40–43.
16. Vasil'ev V.V. *Teplotekhnicheskie Pribory i ikh Poverka* [Thermal Devices and their Verification]. Leningrad, VIKI im. A.F. Mozhaiskogo, 1977, 165 p.

- | | |
|-----------------------------------|---|
| Наумчик Игорь Васильевич | – кандидат технических наук, заместитель начальника кафедры, ВКА им. А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Российская Федерация, igornaumchik@yandex.ru |
| Кинжагулов Игорь Юрьевич | – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kinzhiki@mail.ru |
| Крень Александр Петрович | – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, 220072, Республика Беларусь, alekspk@mail.ru |
| Степанова Ксения Андреевна | – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ledy.xs93@yandex.ru |
| Igor V. Naumchik | – PhD, Deputy Head of the Department, Mozhayskiy Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, igornaumchik@yandex.ru |
| Igor Yu. Kinzhagulov | – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kinzhiki@mail.ru |
| Alexander P. Kren | – D.Sc., Head of laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072, Republic of Belarus, alekspk@mail.ru |
| Kseniya A. Stepanova | – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ledy.xs93@yandex.ru |