

УДК 664.002.5.001

Оптимальное управление рабочими органами крыльчатого смесителя.**Ананьев В.В.**, д-р техн. наук, проф. **Пеленко В.В.** pelenko@mail.ifmo.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

д-р техн. наук, проф. **Картузов Е.И.**

Санкт-Петербургский морской технический университет

Санкт-Петербург, 190008, ул. Лоцманская, д.3

Работа посвящена обзору и оценке нового подхода к разработке механического устройства для перемешивания в жидких средах. Дальнейшее развитие перемешивающих аппаратов в направлении усложнения традиционных методов, исчерпавших себя, не имеет практических перспектив. Таким образом, актуальной является задача разработки и исследования новых принципов перемешивания и устройств, реализующих эти принципы. Отказ от использования в конструкции классических схем с простым вращательным движением элементов и переход к сложному движению рабочего органа с возможностью изменения управляющего воздействия по двум независимым координатам позволит повысить эффективность перемешивающего оборудования.

Подход состоит в принципиальном изменении конструкции и обеспечении оптимального режима работы смесителя за счёт слежения за определяющим технологическим параметром и соответствующего изменения входного управляющего воздействия на его исполнительные органы. Механизм устройства представляет собой систему, обладающую двумя колебательными степенями свободы - поступательная и вращательная. Определена модель управления и схема движения лопасти перемешивающего устройства, позволяющие максимизировать критерий оптимизации – коэффициент упора.

Ключевые слова: перемешивание, жидкая среда, оптимальное управление, интенсификация, пищевая промышленность.

Optimal control of the working elements blade mixer**Ananьев V.V.**, D.Sc., prof. **Pelenko V.V.**, pelenko@mail.ifmo.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

D.Sc., prof. **Kartuzov E.I.**

St. Petersburg sea technical university

St. Petersburg, 190008, Lotsmanskaya St., 3

Work is devoted to the review and evaluation of the new approach to the development of a mechanical device for mixing fluids. Further development of the mixing apparatus in the direction of complexity of traditional methods have outlived their usefulness, has no practical perspectives.

Thus, the actual problem of development and research of new principles of mixing and devices that implement these principles. Failure to use in the construction of the classical schemes with simple rotational movement of the elements and the transition to a complex movement of the working body with the ability to change the control action on two independent coordinates will increase the efficiency of mixing equipment. Approach is a fundamental change in design and an optimal use of the mixer at the expense of tracking the determining process parameter and the corresponding changes in the input control action on its executive bodies. The mechanism of the device is a system with two vibrational degrees of freedom - the translational and rotational. Defined governance model and scheme of movement of the agitator blades, to maximize the optimization criterion - the coefficient of the stop.

Keywords: mixing, the liquid medium, optimal control, intensification, food industry.

Введение

Сегодня, производитель должен оперативно реагировать на изменение спроса и смену предпочтений своих покупателей, предлагать новые продукты, которые должны соответствовать самым последним тенденциям на рынке. Таким образом, в состав технологических линий должно входить оборудование, которое обеспечивало бы гибкость производственного цикла. При этом такое универсальное оборудование должно быть энергоэффективным, а выпускаемая продукция соответствовать всем стандартам качества. В связи с этим, важное значение приобретает проектирование новых видов оборудования, внедрение современных прогрессивных технологий и оптимизация параметров процессов обработки пищевого сырья [9-13], в том числе перемешивания [1-5].

Перемешивание в жидких средах широко применяется в пищевой и химической промышленности и является одной из важнейших стадий производства. Оно используется для получения “однородных” гомогенных и гетерогенных систем (растворов, суспензий, эмульсий), для интенсификации тепло- и массообменных процессов (приготовление десертов, мороженого, молочных продуктов, майонезов, напитков, соков, кремов и пр.), химических превращений.

Выбор оборудования и технологии получения смеси зависит от цели перемешивания, агрегатного состояния компонентов и их физико-химических свойств. Для перемешивания жидких сред обычно применяют пневматическое, механическое или циркуляционное перемешивание. Наиболее распространёнными являются аппараты с механическими перемешивающими устройствами. В большинстве случаев,

перемешивание в этих аппаратах осуществляется за счёт увлечения перемешиваемой среды вращающимися рабочими органами.

Данный принцип перемешивания имеет множество существенных недостатков, связанных с образованием застойных областей в рабочем объёме, которые появляются по причине движения рабочих органов по замкнутой траектории и в связи с наличием тупиковых зон. Такое движение может приводить к образованию внутри перемешиваемой среды локальных участков с замкнутыми линиями тока и ограниченным массообменом с общим объёмом смесителя. Решение этой проблемы можно условно разделить на два подхода:

1. Расчёт и оптимизация параметров рабочих органов перемешивающего устройства таких как: траектория движения, геометрия лопастей, скорость вращения. Однако, многообразие технологических особенностей (температура, давление, свойства перемешиваемой среды и пр.) затрудняет задачу расчёта рабочего органа устройства, в особенности выбор оптимальной геометрии лопастей. Кроме того, изготовление поверхностей сложной формы с требуемыми параметрами точности и шероховатости на порядок увеличивает стоимость оборудования, негативно сказывается на себестоимости продукции и, как следствие, нивелирует все плюсы такой оптимизации.
2. Наложение вибраций и акустических полей, введение в объём жидкости всевозможных отражательных перегородок. К сожалению, данные решения имеют ряд недостатков, таких как: чрезмерное усложнение конструкций смесителей, увеличение металлоёмкости и рост их стоимости, а главное, значительно усложняет их применение в производственных условиях.

Очевидно, что дальнейшее развитие перемешивающих аппаратов в направлении усложнения традиционных методов, исчерпавших себя, не имеет практических перспектив. Таким образом, актуальной является задача разработки и исследования новых принципов перемешивания и устройств, реализующих эти принципы. Отказ от использования в конструкции классических схем с простым вращательным движением и переход к сложному движению рабочего органа с возможностью изменения управляющего воздействия по двум независимым координатам позволит повысить эффективность перемешивающего оборудования.

Несмотря на огромную трудоемкость решения конкретных инженерных задач, получаемый результат, как правило, полностью оправдывает интеллектуальные затраты, связанные с разработкой методов расчета и их дальнейшим использованием при проектировании [14-18].

Формирование новой модели смесителя жидких сред

Как известно, наличие в работе перемешивающего устройства турбулентного режима течения является одним из основных факторов, способствующих интенсивному

перемешиванию компонентов жидкой среды. Традиционно, такой вид течения в аппаратах с вращающимися мешалками обеспечивается за счёт формирования сложных поверхностей рабочих органов, увеличения частот вращения, установки в корпусе смесителя отражающих перегородок и иных решений.

Таким образом, нам требовалось реализовать такую модель смесителя, чтобы обеспечивать в жидкости значения числа Рейнольдса, необходимые для турбулентного течения в широком диапазоне реологических характеристик смешиваемых продуктов. Это весьма затруднительно, учитывая различную вязкость перемешиваемых материалов, которая оказывает существенное влияние на критерий Рейнольдса и протекание процесса перемешивания. При этом важно избежать усложнения конструкции и увеличения стоимости её изготовления и эксплуатации.

Проанализировав существующие методы перемешивания жидкостей и конструкции применяемых перемешивающих устройств, была предложена новая модель крыльчатого смесителя жидких сред. основополагающим моментом системного анализа проблемы стал отказ от использования в конструкции классических схем с вращательным движением и переход к сложному движению рабочего органа с возможностью изменения управляющего воздействия по двум независимым координатам – линейной и угловой.

Как и в судостроении при разработке различных типов движителей, для обеспечения эффективного процесса перемешивания необходимо максимизировать силу тяги для формирования мощного направленного потока жидкости. Это может быть наглядно представлено на примере пропеллерных мешалок типа корабельного винта, которые часто используют для перемешивания жидких сред. Таким образом, решаемая нами задача является схожей с той, которую реализуют в судостроении.

В нашем случае, аналогичная постановка задачи позволила применить уже существующие модели. За основу были выбраны модель управления и расчётная схема абсолютно жесткого упруго закреплённого плавника (лопасти) конечной массы, представленные в работах Е.И. Каргузова и Д.М. Ростовцева [6-8]. Схема представлена на рисунке 1.

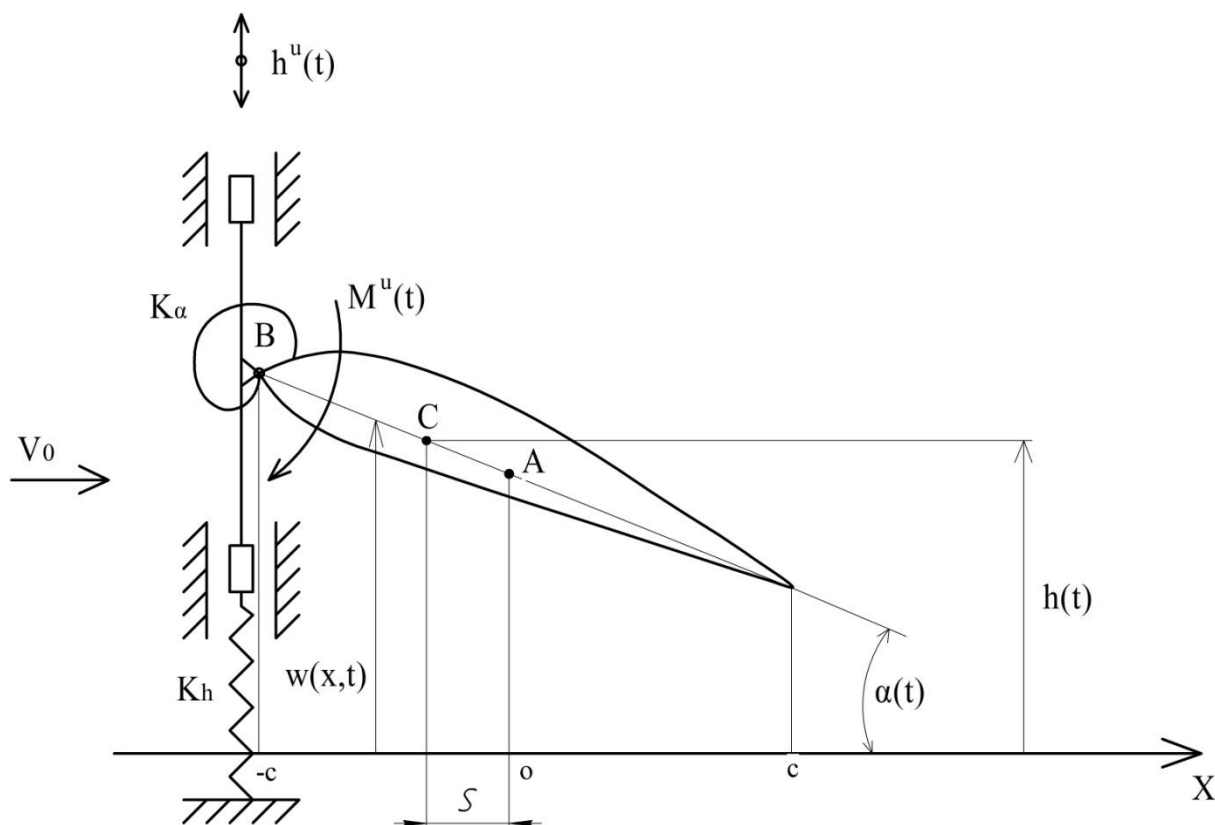


Рис. 1. Расчётная схема лопасти перемешивающего устройства.

Данный механизм представляет собой открытую колебательную систему с двумя степенями свободы. Рабочий орган системы (плавник) считается абсолютно твёрдым телом и имеет форму тонкого профиля с погонной массой $m(x)$. Центр масс тела смещен по отношению к геометрическому центру (центру инерции) профиля на расстояние S . Механизм имеет два упругих элемента: спиральный и вертикальный с жесткостями K_α и K_h соответственно, что позволяет совершать поперечные и вращательные колебательные движения. С точки зрения механики этот механизм представляет собой систему, обладающую двумя колебательными степенями свободы.

Плавник совершает малые гармонические вертикальные $h(t)$ и угловые $\alpha(t)$ колебания под действием смещения верхнего конца вертикальной пружины и управляющего момента. На поверхность профиля со стороны жидкости действуют гидродинамические силы, которые определяются в рамках линейной нестационарной гидродинамической теории.

Для описания кинематики движения крыльевого элемента плавникового движителя введем следующие обобщенные координаты:

$$h(t) = c \cdot \operatorname{Re}\{h_0 e^{i\omega t}\};$$

$$\alpha(t) = \operatorname{Re}\{\alpha_0 e^{i\omega t}\},$$

где $h(t)$ - координата, определяющая движение центра масс «С» профиля, $\alpha(t)$ - координата, определяющая поворот профиля вокруг центра масс, Re - реальная часть комплексной функции.

Внешнее управляющее воздействие, поддерживающее колебательный процесс, рассматриваемой системы, в данной задаче является комбинированным. Одно из воздействий является кинематическим и определяется величиной $h''(t)$ вертикального смещения верхнего конца цилиндрической пружины, а другое представляет собой управляющий момент $M''(t)$, приложенный к оси вращения профиля, расположенной в носовой оконечности. В рассматриваемом случае эти величины представляют собой гармонические функции времени

$$h''(t) = ch_0'' \cdot e^{i\omega t};$$

$$M''(t) = M_0'' \cdot e^{i\omega t},$$

где c - полухорда профиля; h_0'' - комплексная амплитуда смещения верхнего конца пружины; M_0'' - комплексная амплитуда момента внешних управляющих сил; ω - круговая частота колебаний.

Закон движения жесткого плавника, определяемый значениями обобщенных координат $h(t)$, $\alpha(t)$ ввиду малости их относительных величин $h(t) \ll c$, $\alpha(t) \ll 1$, может быть записан в виде

$$w(x, t) = h(t) - (S + x) \cdot \alpha(t) = c \cdot \operatorname{Re} \{ [h_0 - (s + \xi) \cdot \alpha_0] e^{i\omega t} \}$$

Под величинами h_0 и α_0 подразумеваются комплексные амплитуды вертикальных и угловых колебаний соответственно, $\xi = x/c$ - безразмерная независимая координата, $s = S/c$ - безразмерная величина смещения центра масс от геометрического центра профиля.

Выбор функции цели процесса перемешивания

При формулировке задачи использовано понятие «функции цели», которое определяет необходимый нам функционал системы. Только при нахождении точки экстремума данного функционала и коррелирующего управляющего воздействия мы можем говорить об оптимизации процесса в соответствии с заданной функцией цели. Например, задавая функцию цели в виде качества процесса перемешивания, мы сможем получить более интенсивный массообмен и мелкозернистую структуру. Или выразить её в виде КПД системы, тогда мы получим минимальное энергопотребление перемешивающего устройства. В нашем случае, характеристикой качества процесса перемешивания может служить так называемый коэффициент упора

$$J(h, \alpha) = \frac{1}{\rho V_0^2 c} (J_B + J_P).$$

Введенный коэффициент упора полностью характеризует силу тяги, развиваемую профилем. Первое слагаемое в круглых скобках есть не что иное, как сила тяги, возникающая в результате образования за профилем вихревого следа. Второе слагаемое, стоящее в круглых скобках выражения, представляет собой подсасывающую силу, которая возникает в результате разряжения у передней кромки профиля.

Основная гипотеза исследования заключается в том, что наибольшая эффективность процесса перемешивания будет обеспечиваться при достижении величины коэффициента упора близкой к 1. Конечно, в процессе циклического перемещения рабочего органа коэффициент упора принимает различные значения в диапазоне от 0 до 1. Поэтому в качестве функции цели следует выбирать средний за период колебаний коэффициент упора, развиваемой силы тяги.

Заключение

На основе представленной схемы ведется разработка крыльчатого устройства для перемешивания жидких сред. Формирование подходов к решению задачи по обеспечению оптимального процесса перемешивания и методов решения основываются на базе приведенных выше работ. Однако в нашем случае имеются следующие отличия:

- 1) мы рассматриваем движение жидкости относительно движителя, который находится в состоянии покоя;
- 2) наличие пространственного ограничения движения жидкости в объёме смесителя;
- 3) изменения содержательной части математической модели из-за наличия неподвижных стенок сосуда и, как следствие, иная форма записи уравнения об изменении количества движения и краевых условий.

За счёт изменения входного управляющего воздействия на лопасть мы сможем получать оптимальные режимы работы, обеспечивающие требуемое качество перемешивания смеси, минимизировать продолжительность процесса и энергопотребление. Таким образом, исследование сводится к корректной постановке и решению задачи оптимального управления движением лопасти по двум независимым координатам - поступательной и вращательной.

Важным вопросом, требующим своего разрешения не только для данного конкретного случая, но и в целом для подобного рода задач, является разработка программного и аппаратного обеспечения управляющего воздействия, а также автоматизация процесса слежения за контролируемыми параметрами. Эта задача по своей сложности приближается к области разработки искусственного интеллекта и поэтому требует привлечения для своей реализации специалистов смежных отраслей [19-23].

Список литературы:

1. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Польша, 1971. Пер. с польс. под редакцией Щупляка И.А. Л., Химия, 1975. – 384с.
2. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. – Л.: Химия, 1984. – 336с.
3. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. – Пер. с чешского. – Павлушенко И.С., Л.: Химия, 1963. – С. 183-198.
4. ГОСТ 20680-2002. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами. Общие технические условия. – Минск: ИПК издательство стандартов, 2002 – 18с.
5. Альперт Л.З. Основы проектирования химических установок. Изд. 4, перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1989. - 304 с.
6. Картузов Е.И., Ростовцев Д.М. Основы теории управления гидроупругими колебаниями. Санкт-Петербург СПбГМТУ 1999г. 176 с.
7. Картузов Е.И., Пеленко В.В., Плотников А.М. Оптимальное управление внешней нагрузкой упругого плавникового движителя. [Текст] / Проблемы процессов и оборудования пищевой технологии: межвуз. сб. науч. тр./СПбГУНиПТ. – Санкт-Петербург, 2000. – С. 163-175.
8. Смольников А.В., Картузов Е.И. Специальные разделы теории автоматического управления [Текст]: учеб. пособие - СПб. : [б. и.], 2010 (СПб.). - 161 с.
9. Пеленко В.В., Арет В.А., Верболоз Е.И., Мякишева А.А. Об устойчивости движения клубня в зоне оптической дефектации. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 1. С. 33.
10. Пеленко В.В., Арет В.А., Васильев Д.А., Морозов Е.А., Пеленко Ф.В. Течение продуктов обработки растительного сырья в перерабатывающих аппаратах. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2008. № 5-6. с. 77.
11. Вороненко Б.А., Пеленко В.В., Поляков С.В., Марков В.Н. Постановка и решение задачи механической очистки пищевых сред. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. № 1. С. 78-80.
12. Пеленко В.В., Ширшиков А.М., Крысин А.Г. Критериальный подход к динамическому совершенствованию машин. М.: Машиностроитель. 2000. №3. С.39.
13. Иваненко В.П., Пеленко В.В., Зуев Н.А., Дмитриченко М.И., Азаев Р.А., Ольшевский Р.Г., Краснов И.Б. Разработка системы измерения динамических характеристик измельчительно-режущего оборудования. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2006. № 2. С. 8-10.
14. Gortler H. und Tollmien W., Fufzig Jahre Grenzschichtforschung. Braunschweig, 1955.
15. Lin C.C., The Theory of hydrodynamic stability. Cambridge University Press, Cambridge, 1955.
16. Pai S.I., Viscous Flow Theory, 1956.

17. Prandtl L., Führer durch die Stromungslehre. Braunschweig, 1957.
18. Suer H.S., Harris L.A., Skene W.T., Benjamin R.J. The bending stability of thin-walled unstiffened circular cylinders including the effects of internal pressure. J. Aeronaut. Sci., 1958, 25, № 5.
19. Smirnov A. Artificial intelligence: Concepts and Applicable Uses. Lambert Academic Publishing. -2013.
20. Smirnov A. Describing how the data obtained from DEA services is being used nowadays// Электронный научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент», 2014 - №1. [Электронный ресурс]: <http://www.economics.ihbt.ifmo.ru>.
21. Smirnov A. Modeling improved POS tagger using HMM. – 2013.
22. Smirnov A., Vorobiev S., Abraham A. The Potential Effectiveness of the Detection of Pulsed Signals in the Non-Uniform Sampling. ISDA 2013 Proceedings. IEEE, 2013.
23. Smirnov A. Creating utility – based agent using POMDP and MDP //Ledentsov Readings. – 2013. – С. 697.

References

1. Strenk F. Peremeshivanie i apparaty s meshalkami. Pol'sha, 1971. Per. s pol's. pod redaktsiei Shchuplyaka I.A. L., Khimiya, 1975. – 384 p.
2. Braginskii L.N., Begachev V.I., Barabash V.N. Peremeshivanie v zhidkikh sredakh: Fizicheskie osnovy i inzhenernye metody rascheta. – L.: Khimiya, 1984. – 336p.
3. Shterbachek Z., Tausk P. Peremeshivanie v khimicheskoi promyshlennosti. – Per. s cheshskogo. – Pavlushenko I.S., L.: Khimiya, 1963. – P. 183-198.

4. GOST 20680-2002. Apparaty s mekhanicheskimi peremeshivayushchimi ustroystvami. Obshchie tekhnicheskie usloviya. – Minsk: IPK izdatel'stvo standartov, 2002 – 18p.
5. Al'pert L.Z. Osnovy proektirovaniya khimicheskikh ustanovok. Izd. 4, pererab. i dop. - M.: Vysshaya shkola, 1989. - 304 p.
6. Kartuzov E.I., Rostovtsev D.M. Osnovy teorii upravleniya gidrouprugimi kolebaniyami. Sankt-Peterburg SPbGMTU 1999g. 176 p.
7. Kartuzov E.I., Pelenko V.V., Plotnikov A.M. Optimal'noe upravlenie vneshnei nagruzkoj uprugogo plavnikovogo dvizhitelya. [Tekst] / Problemy protsessov i oborudovaniya pishchevoi tekhnologii: mezhvuz. sb. nauch. tr./SPbGUNIPT. – Sankt-Peterburg, 2000. – P. 163-175.
8. Smol'nikov A.V., Kartuzov E.I. Spetsial'nye razdely teorii avtomaticheskogo upravleniya [Tekst]: ucheb. posobie - SPb. : [b. i.], 2010 (SPb.). - 161 p.
9. Pelenko V.V., Aret V.A., Verboloz E.I., Myakisheva A.A. Ob ustoichivosti dvizheniya klubnya v zone opticheskoi defektatsii // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2013. № 1.
10. Pelenko V.V., Aret V.A., Vasil'ev D.A., Morozov E.A., Pelenko F.V. Tehenie produktov obrabotki rastitel'nogo syr'ya v pererabatyvayushchikh apparatakh // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya*. 2008. № 5-6. p. 77.
11. Voronenko B.A., Pelenko V.V., Polyakov S.V., Markov V.N. Postanovka i reshenie zadachi mekhanicheskoi ochistki pishchevykh sred. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii // Pishchevaya tekhnologiya*. 2009. № 1. p. 78-80.
12. Pelenko V.V., Shirshikov A.M., Krysin A.G. Kriterial'nyi podkhod k dinamicheskomu sovershenstvovaniyu mashin // *Mashinostroitel'*. 2000. №3. P.39.
13. Ivanenko V.P., Pelenko V.V., Zuev N.A., Dmitrichenko M.I., Azaev R.A., Ol'shevskii R.G., Krasnov I.B. Razrabotka sistemy izmereniya dinamicheskikh kharakteristik izmel'chitel'no-rezhushchego oborudovaniya // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*. 2006. № 2.
14. Gortler H. und Tollmien W., Fufzig Jahre Grenzschichtforschung. Braunschweig, 1955.
15. Lin C.C., The Theory of hydrodynamic stability. Cambridge University Press, Cambridge, 1955.
16. Pai S.I., Viscous Flow Theory, 1956.
17. Prandtl L., Führer durch die Stromungslehre. Braunschweig, 1957.
18. Suer H.S., Harris L.A., Skene W.T., Benjamin R.J. The bending stability of thin-walled unstiffened circular cylinders including the effects of internal pressure. *J. Aeronaut. Sci.*, 1958, 25. № 5.
19. Smirnov A. Artificial intelligence: Concepts and Applicable Uses. Lambert Academic Publishing. –2013.

20. Smirnov A. Describing how the data obtained from DEA services is being used nowadays // *Elektronnyi nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Ekonomika i ekologicheskii menedzhment»*. 2014 – №1.
21. Smirnov A. Modeling improved POS tagger using HMM. – 2013.
22. Smirnov A., Vorobiev S., Abraham A. The Potential Effectiveness of the Detection of Pulsed Signals in the Non-Uniform Sampling. ISDA 2013 Proceedings. IEEE. 2013.
23. Smirnov A. Creating utility – based agent using POMDP and MDP // *Ledentsov Readings*. – 2013. – P. 697.