

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, С.А. Терентьев, П.П. Тertiшников, А.С. Боченков, Р.Н. Голых

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Бийск

В статье рассматривается процесс конвективной сушки тканых материалов и продуктов растительного происхождения. Показано, что длительность процесса может быть уменьшена за счет дополнительного воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности. Для определения ускорения процесса сушки ультразвуковыми колебаниями были разработаны лабораторные установки, позволяющие организовать комбинированное воздействие потока теплого воздуха и ультразвуковых колебаний. Комбинированная сушка ткани проводилась при трех различных температурах сушильного агента. Было установлено, что сокращение времени процесса по сравнению с конвективной сушкой зависит от температуры сушильного агента и составляет от 10% при температуре 40 °С до 20% при температуре 60 °С. В свою очередь, сушка овощей проводилась на резонансных промежутках от излучающего диска, при этом овощи нарезались толщиной 5 мм и располагались тонкими слоями. Комбинированная сушка моркови и картофеля позволила достичь сокращения времени сушки на 45-47%. При этом затраты на электроэнергию для ультразвукового аппарата составляют не более 30% от затрат на конвективную сушку. В результате проведенной работы была показана эффективность применения комбинированной ультразвуковой и конвективной сушки прежде всего для обезвоживания овощей, тогда как для ткани эффект не столь очевиден. Лабораторные исследования проводились при малом объеме высушиваемого материала, из-за слабого проникновения ультразвуковых колебаний на большую глубину, поэтому дальнейшие исследования необходимо направить на разработку полупромышленных и промышленных сушильных аппаратов для ультразвуковой сушки овощей и других термолабильных материалов.

Ключевые слова: сушка, ультразвук, овощи, ткань, интенсификация.

ВВЕДЕНИЕ

Сушка – продолжительный, энергозатратный и в то же время крайне необходимый процесс. До 12% всех вырабатываемых в стране энергоресурсов расходуется на реализацию процессов сушки в различных отраслях промышленного производства. И, согласно приводимым прогнозам, затраты энергетических ресурсов на сушку будут только возрастать. Кроме того, современные тенденции развития таких ключевых отраслей промышленности как фармацевтическая, пищевая, химическая, текстильная предъявляет к процессу сушки ряд специфических требований, связанных с необходимостью проведения процесса без повышения температуры высушиваемого материала с целью сохранения первоначальных свойств (хим. состав, цвет, вкус, запах, летучие биологически активные компоненты) термолабильных и легкоокисляемых продуктов.

В настоящее время для сушки широко используется конвективный способ [1], который характеризуется хорошо известными недостатками, связанными с: высокими энергозатратами, высокой длительностью процесса, возможностью термического повреждения высушиваемых материалов и т.д. [2].

Для повышения эффективности сушки при пониженных температурах можно использовать

акустические колебания. Однако из-за негативного влияния на человека высоких уровней звукового давления и отсутствия эффективных акустических излучателей этот вид сушки не получил широкого промышленного распространения. В этой связи целесообразным является проведение исследований процесса сушки в безопасном для человека ультразвуковом диапазоне частот (более 20 кГц) [3].

Колебания с уровнем звукового давления более 135 дБ могут быть созданы разработанными авторами твердотельными излучателями, выполненными в виде титановых изгибно-колеблющихся дисков (диаметром до 420 мм) с пьезоэлектрическим возбуждением [4]. И поскольку в научной литературе практически отсутствуют экспериментальные данные по эффективности и оптимальных режимах акустической сушки материалов в ультразвуковом диапазоне частот, то возникает необходимость проведения таких исследований.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов сушки были выбраны текстильные материалы (хлопковая ткань плотностью 150 г/м²) и овощные культуры (морковь и картофель). Выбор был обусловлен тем, что в текстильной и сельскохозяйственной промышленности процесс сушки представляется собой наиболее продолжительную и затратную стадию.

Для сушки текстильных материалов был разработан экспериментальный стенд на основе сушильной машины фирмы LG, модель DLE5577W с горизонтальной загрузкой. Машина предназначена для конвективной сушки одежды в домашних условиях. Размеры сушильного барабана составляют: диаметр 700 мм, глубина 650 мм. Для создания внутри барабана ультразвукового поля был использован дисковый акустический излучатель диаметром 320 мм, создающий колебания на частоте 20 кГц. [5]. Излучатель был установлен в тыльную сторону (противоположную загрузочной дверце) сушильного барабана. Измерения акустического поля показали, что установленный излучатель обеспечивает в объеме сушильного барабана уровень звукового не менее 140 дБ, а на акустической оси излучателя не менее 152 дБ. Согласно имеющимся литературным источникам такой уровень звукового давления достаточен для интенсификации процесса сушки [6].

Эксперименты по сушке ткани проводились при температурах сушильного агента 40 °С, 60 °С и 70 °С. Для каждого случая было проведено 2 типа экспериментов: 1) конвективная сушка без УЗ воздействия; 2) конвективная сушка с УЗ воздействием. Мощность, потребляемая нагревателем из электрической сети, составляла: при температуре 40 °С – 3,4 кВт; при 60 °С – 5,2 кВт; 70 °С – 6,0 кВт. Электрическая мощность, потребляемая ультразвуковым излучателем, равнялась 250 Вт во всех экспериментах. Масса сухой ткани равнялась 1,0 кг.

На рис. 1 показана кинетика сушки ткани при температуре 40 °С.

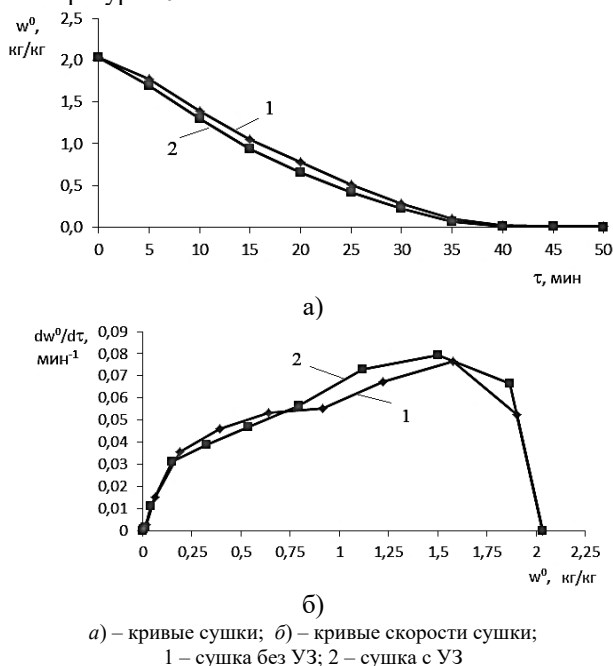


Рис. 1. Кинетика сушки ткани при $t = 40$ °С

Из представленных зависимостей следует, что на начальном этапе процесса ультразвуковое воздействие обеспечивает увеличение скорости сушки на 21 %/мин при влагосодержании 1,8. При влагосодержании 0,75 скорость сушки с УЗ становится меньше, чем без УЗ. Это показывает целесообразность применения УЗ на начальном этапе, когда есть свободная влага в материале.

Кинетика сушки ткани при 60 °С представлена на рис. 2.

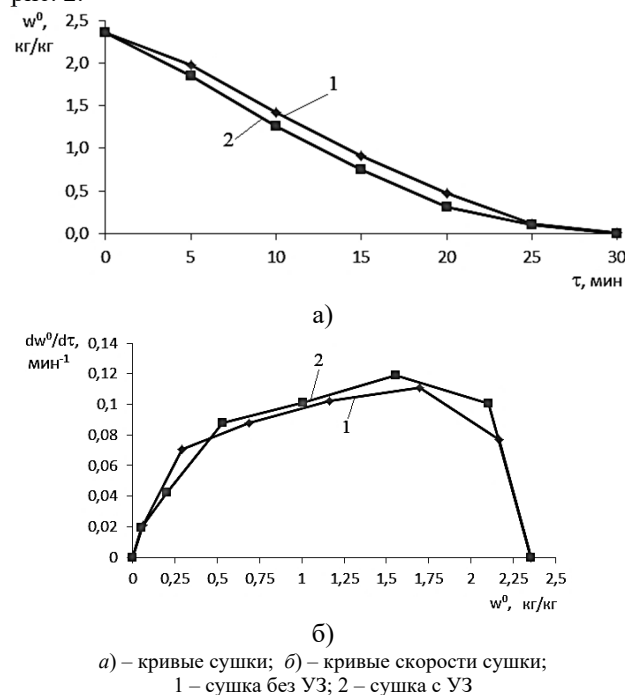
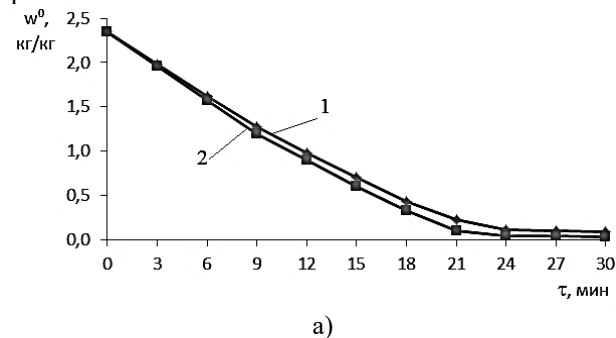
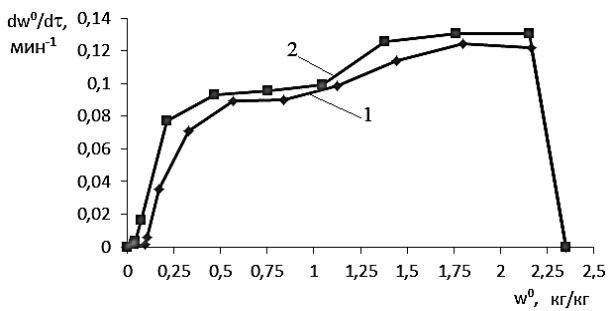


Рис. 2. Кинетика сушки ткани при $t = 60$ °С

В целом кривые сушки имеют характер подобный сушке при температуре 40 °С. Скорость сушки с УЗ на начальном этапе больше на 25 %/мин, чем без УЗ при влагосодержании 2,1. Превышение скорости с УЗ по сравнению с сушкой без УЗ наблюдается до влагосодержания 0,45, т.е. наблюдается более длительный этап превышения скорости сушки с УЗ над скоростью сушки без УЗ по сравнению с сушкой при температуре 40 °С.

Кинетика сушки ткани при 70 °С представлена на рис. 3.





б) – кривые скорости сушки;
1 – сушка без УЗ; 2 – сушка с УЗ

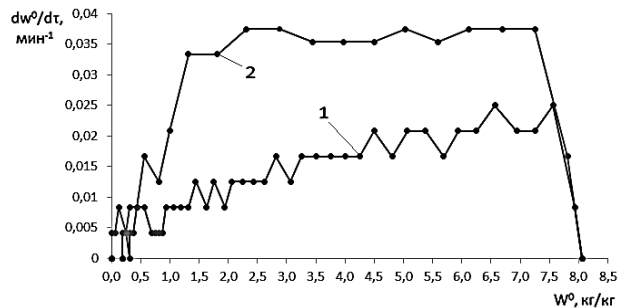
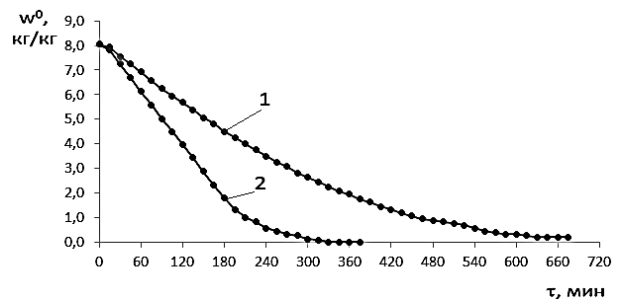
Рис. 3. Кинетика сушки ткани при $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$

При температуре $70 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается более высокая (по сравнению с конвективной) скорость сушки с УЗ в течение всего времени опыта (рис. 3, б). Однако максимальное превышение скорости сушки составляет всего 13 %/мин. Анализ графиков при трех различных температурах показывает эффективность сушки х/б ткани на начальных этапах с применением УЗ, на завершающих этапах сушки эффективность УЗ не очевидна или отсутствует. Наибольшая эффективность по скорости сушки от применения УЗ воздействия наблюдается при температуре сушильного агента $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому можно сделать вывод о том, что оптимальной температурой для УЗ сушки ткани является температура $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Экспериментальный стенд для сушки овощных культур был построен на основе бытовой сушилки овощей Rix-RXD125. Диаметр сушильной камеры 330 мм; высота – 320 мм. Конвекция сушильного агента – естественная. Мощность нагревателя 350 Вт. В качестве УЗ излучателя использовался диск диаметром 110 мм, установленный в верхней крышке сушильной камеры. Мощность, потребляемая УЗ излучателем, равнялась 100 Вт, рабочая частота – 20 кГц.

Особенность проводимых экспериментов заключалась в осуществлении процесса в резонансном режиме. Для этого овощи размещались на 3-х горизонтально расположенных противнях размещенных по вертикали на резонансном расстоянии (2 длины волны) от излучателя и друг от друга. В результате создавались условия для реализации режима стоячей волны и, следовательно, более эффективное взаимодействие УЗ колебаний с высушиваемым материалом.

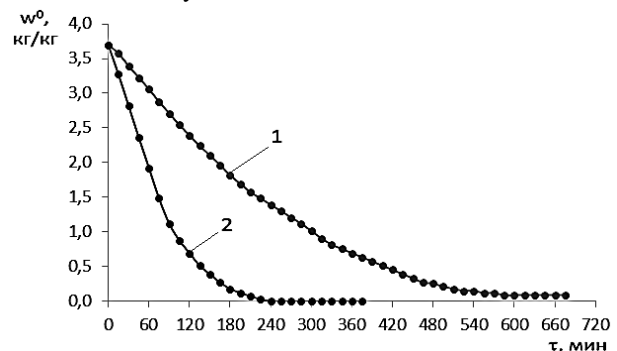
Морковь и картофель нарезались дисками толщиной 5 мм. Начальная масса овощей в каждом эксперименте равнялась 1 кг. Полученные зависимости представлены на рис. 4 для моркови на рис. 5 для картофеля.



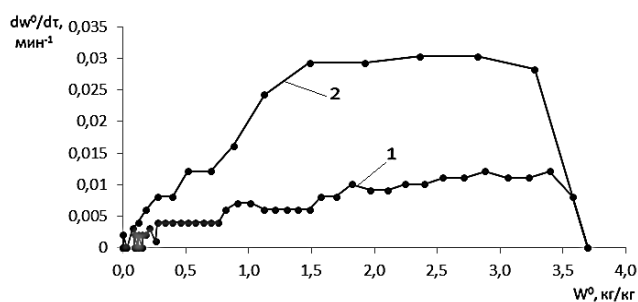
а) – кривые сушки; б) – кривые скорости сушки;
1 – сушка без УЗ; 2 – сушка с УЗ

Рис. 4. Кинетика сушки моркови

Из представленных зависимостей следует, что ультразвуковое воздействие в резонансном режиме обеспечивает сокращение времени сушки моркови на 300 мин (на 47%). Как следует из рис. 4, б УЗ воздействие обеспечивает увеличение скорости сушки в 3 раза. При этом, в отличие от конвективного воздействия, скорость сушки остается практически неизменной до значений влагосодержания 1,4 кг/кг. После этого, скорость сушки с УЗ воздействием резко снижает до значений приблизительно равных конвективной сушке.



а)



а) – кривые сушки; б) – кривые скорости сушки;
1 – сушка без УЗ; 2 – сушка с УЗ

Рис. 5. Кинетика сушки картофеля

По кривым сушки картофеля видно, что совместная конвективная сушка и ультразвуковое воздействие позволяет сократить время сушки на 300 мин, это на 45% быстрее чем при конвективной сушке. Скорость совместной сушки более чем в 3 раза выше, чем при сушке без УЗ воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности акустического способа сушки в ультразвуковых полях. Также целесообразно создание специальных условий сушки (сушка в резонансных режимах), обеспечивающих практически двукратное ускорение процесса, недостижимое другими способам УЗ воздействия.

Для тканых материалов установлено сокращение времени сушки по сравнению с конвективной сушкой от 10% до 20%. При комбинированной сушке моркови и картофеля сокращение времени сушки составило 45-47%. При этом затраты на электроэнергию для ультразвукового аппарата составляют не более 30% от затрат на конвективную сушку.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 21-79-10359,
<https://rscf.ru/project/21-79-10359/>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 3-е. В 2-х кн.: Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. [Текст] / Ю.И. Дыгнерский // М.: Химия, 2002. – 400 с.: ил.
2. Сажин, Б.С. Процессы сушки и промывки текстильных материалов / Б.С. Сажин М.К. Кошелева М.Б. Сажина // М.: МГУДТ. – 2013. – 301 с.
3. Research the Acoustic Cloth Drying Process in Mock-Up of Drum-Type Washing Machine / V.N. Khmelev [et al] // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, – 2006. – P. 223-228.
4. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures / V.N. Khmelev [et al] // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015. – Novosibirsk, NSTU, – 2015. – P. 224-228.

5. Efficiency increase of wet gas cleaning from dispersed admixtures by the application of ultrasonic fields / V.N. Khmelev [et al] // Archives of Acoustics. – 2016. – Vol. 41, No. 4. – P. 757-771.

6. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности [Текст] / В.Н. Хмелев [и др.] // Алт. гос. техн. Ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. Гос. техн. ун-та, 2010.

Хмелев Владимир Николаевич – заместитель директора по науке, д.т.н., профессор, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Шалунев Андрей Викторович – заведующий кафедрой МСИА БТИ АлтГТУ, профессор, д.т.н., Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», тел. (3854)432581, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Нестеров Виктор Александрович – доцент кафедры МСИА БТИ АлтГТУ, к.т.н., Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова», тел. (3854)432581, e-mail: nva@bti.secna.ru.

Терентьев Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432581, e-mail: terser@list.ru.

Боченков Александр Сергеевич – аспирант, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432581, e-mail: sanya.bochankov@mail.ru.

Тертишников Павел Павлович – студент группы ПС-81, кафедра МСИА Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», тел.: +79237558922, e-mail: tertishnikov.paw@yandex.ru

Гольх Роман Николаевич – доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

RESEARCH OF THE ULTRASONIC DRYING PROCESS OF VARIOUS MATERIALS

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, S.A. Terentiev, P.P. Tertishnikov, A.S. Bochenkov, R.N. Golykh

Biysk Technological Institute (branch) of Altay State Technical University named after I.I. Polzunov, Biysk, Russia

Abstract – The article deals with the process of convective drying of fabrics and vegetables. The duration of the process can be reduced by additional exposure to high-intensity ultrasonic vibrations. To carry out drying, laboratory installations were developed that allow organizing the combined effect of a stream of warm air and ultrasonic vibrations. The combined drying of the fabric was carried out at three different temperatures of the drying agent and it was noted that the greatest reduction in drying time compared to convective drying was achieved at a temperature of 60 ° C. Although the overall reduction in drying time ranged from 10% to 20% depending on the temperature of the air flow. Drying of vegetables was carried out at resonance intervals from the emitting disk, while vegetables were cut 5 mm thick and placed in thin layers. Combined drying of carrots and potatoes made it possible to achieve a reduction in drying time of 45-47%. In this case, the cost of electricity for the ultrasonic apparatus is a small part of the cost of convective drying. As a result of the work carried out, it is possible to draw conclusions about the effectiveness of the use of combined ultrasonic and convective drying for dehydration of vegetables, while the effect is not so obvious for tissue. Laboratory studies were carried out with a small volume of dried material, due to the weak penetration of ultrasonic vibrations to a great depth, therefore, further research should be directed to the development of semi-industrial and industrial dryers for ultrasonic drying of vegetables and other heat-sensitive materials.

Index terms: drying, ultrasound, vegetables, tissue, intensification.

REFERENCES

1. Dytnerky, Yu.I., Processes and devices of chemical technology: Textbook for universities. Ed. 3rd. In 2 books: Part 2. Mass transfer processes and devices, M.: Chemistry, 2002, 400 p.
2. Sazhin, B.S. Processes of drying and washing of textile materials, M.: MGUDT. – 2013, 301 p.
3. Khmelev, V.N., et al, «Research the Acoustic Cloth Drying Process in Mock-Up of Drum-Type Washing Machine», International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2006. P. 223-228.
4. Khmelev, V.N., et al, «Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures», 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015. – Novosibirsk, NSTU, 2015, P. 224–228.
5. Khmelev, V.N., et al, «Efficiency increase of wet gas cleaning from dispersed admixtures by the application of ultrasonic fields», Archives of Acoustics. 2016, Vol. 41, No. 4. P. 757-771.
6. Khmelev, V.N., The use of high-intensity ultrasound in industry Alt. state tech. University, BTI. Biysk: Publishing house Alt. State tech. University, 2010.

Khmelev Vladimir Nikolaevich – Doctor of Engineering, professor, Deputy Director for Research, Biysk Technological Institute, tel. (3854)43-22-55, e-mail vnh@bti.secna.ru.

Shalunov Andrey Viktorovich – Head of the Department methods and means of measurement and automation, professor, Biysk Technological Institute, tel. (3854)43-22-55, e-mail shalunov@bti.secna.ru.

Nesterov Viktor Alexandrovich – associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: nva@bti.secna.ru.

Terentiev Sergey Alexandrovich - Senior Lecturer, Biysk Technological Institute, tel. (3854)43-22-55, e-mail: terser@list.ru.

Tertishnikov Pavel Pavlovich – student of group PS-81 Department of MSIA of Biysk technological Institute (branch) of Altay state technical University. I.I. Polzunova, mel.: +79237558922, e-mail: tertishnikov.paw@yandex.ru.

Bochenkov Alexander Sergeevich – graduate student, Biysk Technological Institute, tel. (3854)43-22-55, e-mail: sanya.bochankov@mail.ru.

Golykh Roman Nikolaevich – associate professor at the char of methods and means of measurement and automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.