

## ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, Р.Н. Голых

*В статье представлены результаты исследований направленных на создание дисковых излучателей для акустического воздействия на газовые среды. Были разработаны новые конструкции источников УЗ воздействия, основанных на использовании колебательных систем с пьезоэлектрическими преобразователями, совершающими продольные колебания, преобразуемые в изгибные колебания дисков, обеспечивающие воздействие на различные процессы в газодисперсных системах. Для реализации процесса высокопроизводительного распыления жидкостей с колеблющейся поверхности предложена конструкция УЗ – дискового излучателя с плоской фронтальной поверхностью, обеспечивающая при диаметрах излучателя в 250 и 320 мм интенсивности излучения на расстоянии не менее 140 и 144 дБ, соответственно. Для интенсификации процессов коагуляции и сушки разработана конструкция дискового излучателя с фазовывравнивающей фронтальной поверхностью, обеспечивающая формирование плоской волны с интенсивностью более 146 дБ при диаметре излучателя 360 мм. Для реализации коагуляции в локальной области, бесконтактной сушки, разрушения пены, бесконтактного распыления жидкости в фокусе излучателя предложен и разработан излучатель диаметром 420 мм, обеспечивающий воздействие на частотах более 20 кГц с интенсивностью до 170 дБ.*

*Ключевые слова: ультразвук, дисковый излучатель, газодисперсная среда, упругая деформация, колебания, сушка, распыление, коагуляция, дисперсные частицы, пеногашение.*

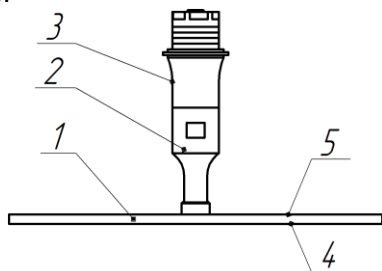
### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ультразвуковые (УЗ) технологии нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Воздействие ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности служит основой для улучшения свойств известных веществ и материалов, интенсификации различных технологических процессов [1-8]. В последние годы УЗ воздействие начинают применять и для интенсификации процессов в газовых средах. Такое воздействие позволяет повысить эффективность улавливания высокодисперсных материалов и очистки газов за счет коагуляции твердых и жидких частиц, удаление пен при производстве и упаковке пенящихся продуктов [1, 4-10]. Кроме того, УЗ воздействие на материалы и объекты в газах, ускоряется процесс сушки легкоокисляемых веществ, обеспечивает распыления при производстве высокодисперсных материалов и нанесении разнообразных покрытий и даже оказывает лечебное воздействие на человека [11]. Однако, несмотря на высокую эффективность и потребность, ультразвуковое интенсифицирующее воздействие практически не используется в газовых средах. Это обусловлено тем, что имеющиеся источники ультразвукового воздействия (газоструйные излучатели,

электроакустические преобразователи) не обеспечивают уровень звукового давления, частоту и направленность излучения, необходимые для интенсификации процессов. Анализ конструкций УЗ излучателей для газовых сред позволяет считать наиболее эффективной и перспективной ультразвуковую колебательную систему (УЗКС) на основе пьезопреобразователя [12], в которой для создания в газовой среде акустических колебаний, используются излучатели, выполненные в виде изгибно-колеблющихся мембран или дисков [13-15]. Поскольку линейные размеры такого излучателя могут быть много больше длины волны УЗ колебаний в материале диска, возникает возможность, за счет создания излучающей поверхности специальной формы, направлять УЗ колебания в определенные зоны воздействия или фокусировать на объектах воздействия. При этом можно повысить эффективность УЗ колебаний, реализуя различные варианты воздействия: контактное воздействие при размещении объектов на излучающей поверхности, бесконтактное, с определенным уровнем звукового давления, фокусирующее излучение высокой интенсивности в малой области.

### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

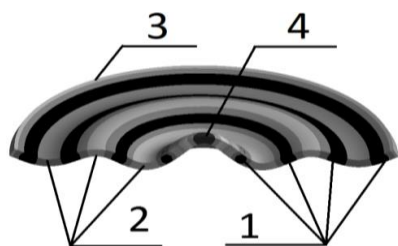
Для реализации перечисленных выше видов воздействия необходимы различные по конструкции излучатели, основой которых может служить плоский диск, соединенный с электроакустическим преобразователем (рисунок 1).



1 – дисковый излучатель; 2 – концентратор;  
3 – электроакустический преобразователь;  
4 – фронтальная сторона;  
5 – тыльная сторона

Рисунок 1 – УЗКС с плоским излучателем

Колебания дискового излучателя на определенной моде характеризуется пространственной конфигурацией колеблющегося диска, определяемой положением узловых точек (линий или поверхностей в которых амплитуда колебаний равна нулю), а также собственной частотой. При работе УЗ дискового излучателя (УЗДИ) на изгибной моде различные области диска излучают колебания в противоположенных фазах. Таким образом, некоторые области колеблются синфазно колебательной системе, а другие – противофазно. Соответственно между областями, колеблющимися противофазно, находятся области, амплитуда которых равна нулю (области, называемые «нулями колебаний») (рисунок 2).



1 – Узловые окружности («нули колебаний»);  
2 – кольцевые области; 3 – крайняя кольцевая область; 4 – центральная область

Рисунок 2 – Форма колебаний плоского УЗДИ (4-я мода)

«Нули колебаний» на поверхности также называют узловыми окружностями, а номер кольцевой моды соответствует количеству узловых окружностей. Соответственно, колеблющиеся зоны, расположенные между узловыми окружностями называются кольцевыми областями, которые излучают УЗ колебания в газовую среду [13-15]. Такой тип распределения для излучателя в форме диска является идеальным и позволяет рассчитать его конструкцию, обеспечивающую максимальную эффективность излучения. Однако, подобная конструкция излучателя практического применения не имеет, поскольку обладает рядом существенных недостатков:

- наличием вырожденных мод колебаний и большого количества второстепенных мод, частоты которых отличаются от частоты рассчитываемой кольцевой моды менее чем на 500 Гц [16]. Это приводит к локальным механическим напряжениям, приводящим к разрушению УЗДИ;

- существенным уменьшением амплитуды колебаний кольцевых областей по мере удаления от центра диска (рисунок 2), что снижает эффективность излучения периферийных кольцевых областей.

Распределения амплитуд колебаний плоского УЗДИ диаметром 300 мм, работающего на кольцевых модах, представлены на рисунке 3

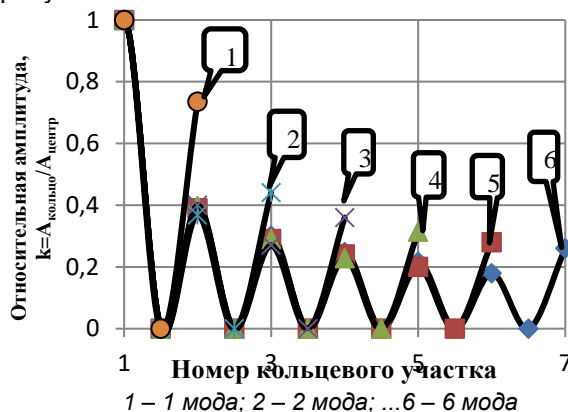
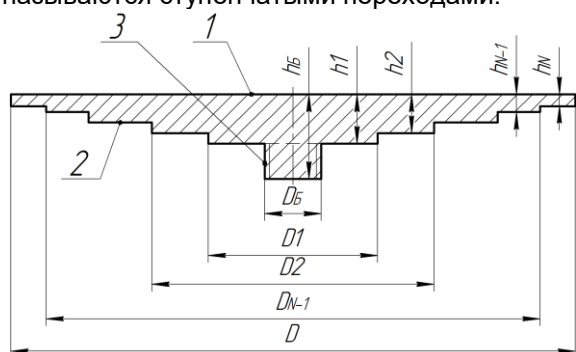


Рисунок 3 – Распределения амплитуд колебаний по диаметральной линии плоского УЗДИ

Как видно из представленных зависимостей, амплитуда в центре излучателя (первая центральная область в виде диска) существенно выше, чем амплитуда колебаний следующих кольцевых областей. Для УЗДИ, работающих на 2–6 модах максимальная амплитуда в первой центральной области в 2.5 раза выше, чем максимальная амплитуда второй кольцевой области.

## ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Для устранения указанных недостатков необходимо ступенчато изменять толщину диска ( $h_1 - h_N$ ) (рисунок 4), что позволяет обеспечивать равномерность амплитуд колебаний различных кольцевых участков излучателя [16-17]. А так как кольцевые области расположены между узловыми окружностями, то, изменения толщин кольцевых областей выполняются в зонах, соответствующих узловым окружностям («нулям колебаний») на диаметрах  $D_1 - D_{N-1}$  (рис. 4). При этом данные зоны называются ступенчатыми переходами.



1 – фронтальная сторона; 2 – тыльная сторона; 3 – присоединительный хвостовик

Рисунок 4 – Эскиз УЗДИ с плоской фронтальной поверхностью и ступенчатым профилем тыльной стороны

На рисунке 5 представлено фото разработанного излучателя.

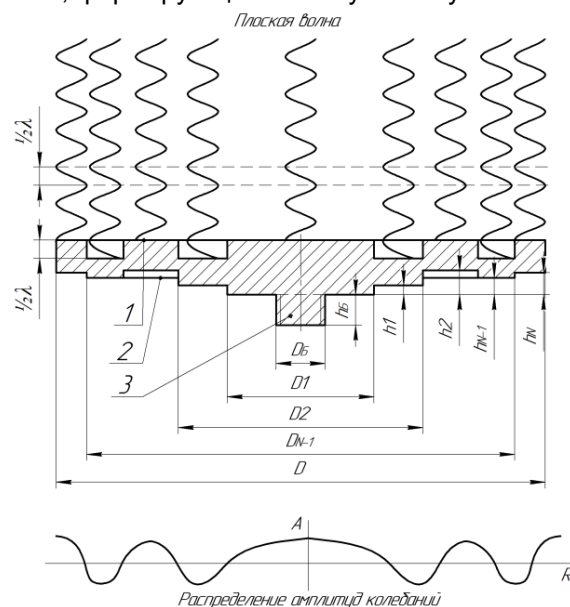


Рисунок 5 – УЗДИ с плоской фронтальной поверхностью и ступенчатым профилем тыльной стороны

Предложенная конструкция может быть использована при реализации процесса распыления пленки жидкости с поверхности излучателя [1, 18]. Однако, различные участки поверхности такого диска создают колебания в противоположенных фазах. Поэтому, на некотором расстоянии от диска происходит взаимная компенсация излучения различных участков и происходит снижение общего уровня звукового давления. Для устранения этого недостатка этого было предложено на фронтальной поверхности выполнить фазовыравнивающие кольцевые области. Схема излучателя показана на рисунке 6.

При этом ступенчатые переходы выполняются в зонах узловых окружностей на диаметрах  $D_1 - D_{N-1}$  с высотой равной половине длины волны УЗ колебаний в газовой среде ( $1/2\lambda$ ). Таким образом, излучение со всех кольцевых областей будет уже не компенсироваться между собой, а складываться. Таким образом, фаза излучения всех точек поверхности выравнивается и формируется плоская волна. В этой конструкции, также как в случае с излучателем с плоской фронтальной поверхностью, выравнивание амплитуды колебаний обеспечивается за счет геометрии тыльной стороны (высоты  $h_1 - h_N$ ).

На рисунке 7 представлено фото УЗДИ с фазовыравнивающей фронтальной поверхностью, формирующей плоскую волну.



1 – фронтальная сторона; 2 – тыльная сторона; 3 – присоединительный хвостовик

Рисунок 6 – Эскиз УЗ-дискового излучателя с фазовыравнивающей фронтальной поверхностью



Рисунок 7 – УЗДИ с фазовыравнивающей фронтальной поверхностью

Рассматриваемая конструкция УЗ излучателя может быть использована при реализации коагуляции, сушки и распыления. При

установке отражающей поверхности на небольшом расстоянии от излучателя возможно формирование стоячей волны, вследствие чего в пространстве между излучателем и отражателем может быть реализован процесс коагуляции высокодисперсных частиц [1, 9-11]. В ряде случаев уровень звукового давления может быть недостаточен для интенсификации технологического процесса (например, процесса коагуляции частиц при высоких скоростях газовых потоков, разрушения пены) при использовании УЗДИ, формирующего плоскую волну [1, 4-5, 9-11], а повышении амплитуды колебаний невозможно из-за вероятного механического разрушения диска. Поэтому, для формирования локальных воздействий с повышенной интенсивностью применяется концентрирование - фокусировка колебаний. Для формирования задаваемой направленности излучения используются фазированные системы, которые представляют собой диски с кольцевыми фазосдвигающими областями на фронтальной поверхности. Фазосдвигающие кольцевые выступы на фронтальной поверхности позволяют излучать колебания в газовую среду синфазно и фокусировать в определенных зонах, тем самым увеличивая интенсивность излучения. Пример профиля фронтальной поверхности фокусирующего УЗДИ показан на рисунке 8.

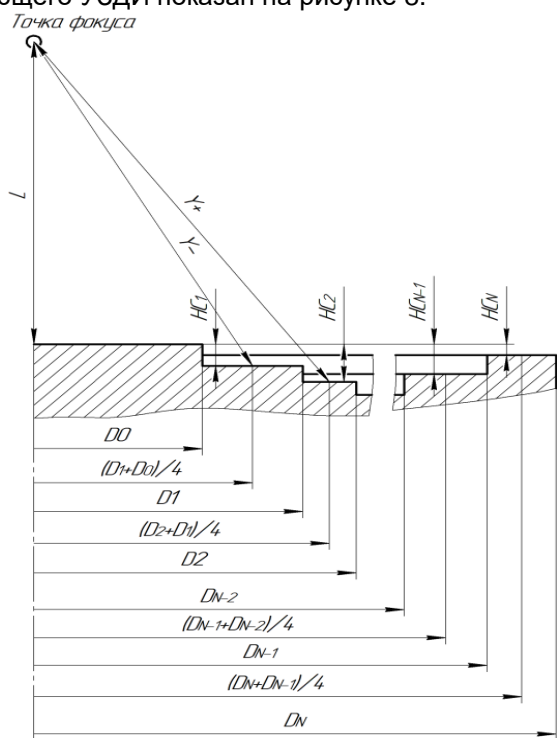


Рисунок 8 – Эскиз фокусирующего УЗДИ

Уровень звукового давления в фокусе в таком случае достигает значений 160 дБ и

выше, а вокруг фокуса образуются поверхности равных фаз, где уровень звукового давления достигает значений 130-150 дБ [12].



Рисунок 9 – Фокусирующий УЗ излучатель

Так же, как и в случае с излучателем, формирующим плоскую волну, выравнивание амплитуд колебаний различных кольцевых областей между собой обеспечивается за счет геометрии тыльной стороны. На рисунке 9 представлено фото дискового излучателя.

Такая конструкция УЗДИ может быть использована для коагуляции в локальной области, бесконтактной сушки, разрушения пены и бесконтактного распыления жидкости, подаваемой в фокус излучателя.

Технические характеристики разработанных УЗДИ представлены в таблице 3

Таблица 3 – Технические характеристики ультразвуковых излучателей

Наименование параметра	Размер излучателя		
	Ø320	Ø 360	Ø 420
Размер излучателя, мм	Ø320	Ø 360	Ø 420
Форма фронтальной поверхности	Плоская	Фазовыравнивающая	Фокусирующая
Потребляемая мощность, ВА	350	450	600
Уровень звукового давления (1 м), дБ,	144	146	150
Уровень звукового давления в фокусе, дБ	159	164,3	166
Частота колебаний, кГц	32±0,5	25±0,5	22±0,5

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны новые конструкции источников УЗ воздействия, основанные на использовании колебательных систем с пьезоэлектрическими преобразователями, совершающими продольные колебания, преобразуемые в из-

## ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

гибные колебания дисков (до 420 мм), и обеспечивающие воздействие на различные технологические процессы в газодисперсных системах на частотах более 20 кГц с интенсивностями более 140 дБ.

1. Для реализации процесса высокопроизводительного распыления жидкостей с колеблющейся поверхностью предложена конструкция УЗДИ с плоской фронтальной поверхностью, обеспечивающая при диаметрах излучателя в 250 и 320 мм интенсивности излучения на расстоянии не менее 140 и 144 дБ, соответственно.

2. Для интенсификации процессов коагуляции и сушки разработана конструкция УЗДИ с фазовыравнивающей фронтальной поверхностью, обеспечивающая формирование плоской волны с интенсивностью более 146 дБ при диаметре излучателя 360 мм.

3. Для реализации коагуляции в локальной области, бесконтактной сушки, разрушения пены, бесконтактного распыления жидкости в фокусе излучателя предложен и разработан излучатель диаметром 420 мм, обеспечивающий воздействие на частотах более 20 кГц с интенсивностью до 170 дБ.

*Исследование проведено при поддержке гранта Президента РФ МД-4753.2016.8.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хмелев, В.Н.** Ультразвук. Аппараты и технологии: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. – 687 с.

2. Голых, Р.Н. Выявление режимов ультразвукового воздействия, обеспечивающих формирование кавитационной области в высоковязких и неньютоновских жидкостях / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, А.В. Шалунова // ТОХБПП: Материалы VII всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 12-16.

3. Хмелёв, В.Н. Исследование процесса взаимодействия кавитационных пузырьков с границей раздела «жидкость-газ» для выявления режимов, обеспечивающих максимальное увеличение поверхности контакта фаз / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, А.В. Шалунова, Е.В. Ильченко // Научно-технический вестник Поволжья – Казань. -2014. -№6. – С. 362-364.

4. Khmelev V.N. Development of high efficiency gas-cleaning equipment for industrial production using high-intensity ultrasonic vibrations/ V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh, V.A. Nesterov // American Journal of Engineering Research. – Stamford (USA): Natural State Research, Inc., 2015. – Vol. 4, Issue 8. – p. 108–119.

5. Хмелёв В.Н. Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 2. – С. 48-52.

6. Khmelev V.N. Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gasdispersed Systems/V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golyh, K.V. Shalunova//11th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2010: Conference Proceedings. -Novosibirsk, NSTU, 2010. -p. 328-333.

7. Khmelev, V.N. Increase of separation efficiency in the inertial gas-purifying equipment by high-intensity ultrasonic vibrations / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, R.S. Dorovskikh // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2014: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. 233–239.

8. Khmelev V.N. The Acoustical Coagulation of Aerosols/V.N. 9th Khmelev, A.V. Shalunov, K. V. Shalunova//International workshop and tutorials on electron devices and materials, EDM'2008: Workshop proceedings. -Novosibirsk: NSTU, 2008. -p. 289-294.

9. Khmelev, V.N. Development and Investigation of the Ultrasonic Coagulation Camera / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, K.V. Shalunova // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P. 274–276.

10. Khmelev V.N. The Control of the Ultrasonic Coagulation of Dispersed Nanoscale Particles/V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.N. Galakhov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, M.V. Khmelev//14th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM'2013: Novosibirsk, NSTU, 2013. -p. 166 170.

11. Хмелев, В.Н. Дистанционная обработка биотканей ультразвуком с одновременным напылением лекарственных растворов / В.Н. Хмелев, В.В. Педдер, А.В. Педдер, А.В. Шалунов, В.К. Косёнок, А.Н. Галахов, Е.В. Надей, В.А. Нестеров, Р.Н. Голых //Электронный журнал «Техническая акустика». - 2013. -№ 3. -14 С. -Режим доступа: <http://ejta.org/en/khmelev13>

12. Хмелев, В.Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев, А.Н. Галахов // Известия Тульского Государственного университета, серия: технические науки.–2010. – Вып.1 – С.148 – 153.

13. Ультразвуковая колебательная система для газовых сред: пат. № 132000 Российская Федерация МПК В06В 1/00 (2006.01) / Хмелёв В.Н., Галахов А.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Голых Р.Н.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ». 2013123940/28; заявл. 24.05.2013; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. – 5 с.

14. Хмелев В.Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газодисперсных системах / В.Н. Хмелев, А.Н. Галахов, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев, // Известия Тульского Государственного университета. Серия «Технические науки». – 2010. – Вып.1. – С.148–153.

15. Gallego-Juarez J. A. High-power ultrasonic processing: recent developments and prospective advances [Текст] // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 3, Issue 1. – p. 35–47.

16. Гринченко В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / Гринченко В. Т., Мелешко В. В. // – К.: Наукова думка, 1981. – 284 с.

17. Розенберг, Л.Д. Источники мощного ультразвука [Текст] / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 380 с.

18. Khmelev, V.N. Study of the process of liquid atomization from the ultrasonic disk radiator / V.N. Khmelev, A.N. Galakhov, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, A.V. Shalunova //International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2013: Conference Proceedings, 2013. pp. 119-122.

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

**Шалунов Андрей Викторович** – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, e-mail: [shalunov@bti.secna.ru](mailto:shalunov@bti.secna.ru), тел. (3854)432570

**Нестеров Виктор Александрович** – к.т.н., доцент кафедры МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, e-mail: [nva@bti.secna.ru](mailto:nva@bti.secna.ru), тел. (3854)432570

**Голых Роман Николаевич** – к.т.н., доцент кафедры МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, e-mail: [grn@bti.secna.ru](mailto:grn@bti.secna.ru), тел. (3854)432570