

**РАЗДЕЛ 5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОМПОНЕНТЫ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

УДК 534 (0.45)

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА  
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АППАРАТА В  
ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ**

В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Г.В. Леонов, Е.В. Ильченко

Существует задача ультразвуковой обработки жидких сред и дисперсных систем в докавитационном режиме. Решение этой задачи с помощью существующего ультразвукового оборудования является перспективным направлением развития ультразвуковой техники. Было проведено исследование, позволившее установить временные характеристики сигналов, необходимых для импульсного возбуждения преобразователей существующего оборудования.

**Ключевые слова:** Ультразвук, докавитационный режим, ультразвуковой аппарат, импульсное возбуждение, скважность, время нарастания.

**Актуальность**

В настоящее время ультразвуковые технологии находят широкое применение в химической, пищевой и других областях промышленности. Большая доля процессов с применением ультразвуковых колебаний реализуется в жидких технологических средах и дисперсных системах с жидкой фазой. При этом, основным интенсифицирующим фактором ультразвукового воздействия является кавитация [1], обеспечивающая изменения структуры и свойств обрабатываемых сред.

Вместе с тем, в ряде случаев возникает необходимость ускорения процессов, не допускающих кавитационного разрушения. К числу таковых относятся процессы разделения эмульсий, коагуляции твердых частиц в жидкостях, пропитки материалов красителями и защитными составами и т.п. В ряде известных исследований [2] доказано, например, что разделение устойчивых эмульсий «вода-масло» очистка виноматериала и разжижение меда возможно только без реализации кавитационного процесса.

Очевидным преимуществом докавитационного воздействия является УЗ обработка больших технологических объемов, поскольку вблизи излучателя не формируется насыщенная парогазовыми пузырьками кавитационная зона и излучение не поглощается [1]. Кроме того, работа ультразвукового оборудования в таком режиме излучения исключает

кавитационное разрушение излучающей поверхности.

Существенным недостатком УЗ обработки в докавитационном режиме является недостаточное энергетическое воздействие, обуславливающее невозможность существенного ускорения реализуемых процессов.

В связи с этим возникает необходимость повышения энергетической эффективности УЗ воздействия без реализации кавитации в жидких средах.

Решением проблемы ввода большой УЗ энергии без возникновения кавитационных явлений может быть применение импульсного режима формирования колебаний в жидких средах.

Такой метод нашел применение в гидролокации, где специальными импульсными генераторами при помощи широкополосных излучателей создаются УЗ импульсы, обеспечивающие максимальную дальность действия активных гидролокаторов. Кавитация при этом не возникает и не происходит потеря акустической мощности на поглощение и рассеяние колебаний в облаке кавитационных пузырьков, искажения характеристик излучателя и эрозии его поверхности [3]. Используемое при этом оборудование на основе импульсных генераторов с применением высоковольтных конденсаторов, требующих длительного времени накопления энергии до разряда и слаборезонансных пьезопреобразователей, позволяет формировать короткие

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АППАРАТА В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

импульсы, но абсолютно непригодно для решения проблем ускорения технологических процессов.

Используемое в практике ускорения технологических процессов ультразвуковое технологическое оборудование, построенное на основе генераторов непрерывных колебаний и высокочастотных пьезоэлектрических колебательных систем не предназначено и не используется для работы в импульсном режиме.

В связи с этим возникает необходимость исследования функциональных возможностей эксплуатации существующего оборудования в импульсном режиме для создания мощного ультразвукового технологического оборудования, способного обеспечивать докавитационный режим интенсификации технологических процессов.

### Оборудование

Для проведения исследований был использован ультразвуковой генератор (УЗГ) технологического аппарата «Булава» [4] с ультразвуковой колебательной системой (УЗКС), предназначенной для воздействия на жидкие среды.

Выбор для проведения исследований аппарата «Булава» был обусловлен наибольшей пригодностью для реализации технологических процессов в промышленных масштабах.

Отличительной особенностью аппарата «Булава» является использование многопакетного пьезоэлектрического преобразователя, суммирующего излучение семи пар пьезоэлектрических элементов на один многополуволновой излучатель, площадь излучения которого составляет  $300 \text{ см}^2$  [5].

Поскольку электроды пьезоэлементов соединены параллельно, подача и снятие электрического напряжения осуществляется для каждого из пьезоэлементов одновременно, возникновение колебаний и их затухание происходит на каждом пьезоэлементе неза-

висимо, следует ожидать аналогичных результатов при использовании однопакетных преобразователей. Это позволяет распространить полученные результаты на ультразвуковые аппараты серий Волна, Волна М, Алена, Поток [6,7,8,9].

Исследования проводились при формировании импульсных колебаний в водной среде. Период следования ( $T$ ) серий ультразвуковых импульсов ультразвуковой частоты был выбран равным 3,26 миллисекунд, что на порядок превышает времена формирования серий ультразвуковых колебаний и заведомо достаточно для затухания колебательных процессов в УЗКС.

Время формирования серии импульсов составляет  $T_1$  (см. рисунок 1).

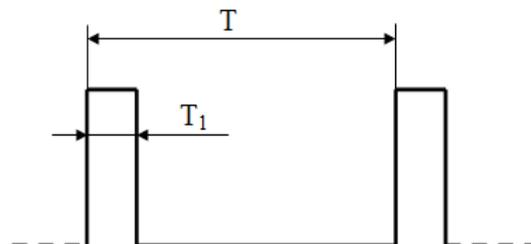


Рисунок 1 – Временная диаграмма включения (выключения) силовых каскадов УЗГ ( $T_1$  – время работы силовых каскадов УЗГ;  $T$  – период следования импульсов)

### Экспериментальная часть

Серия УЗ колебаний излучателя формировалась в течение времени  $T_1$  путем подачи на транзисторные ключи силового выходного каскада ультразвукового генератора управляющих импульсов, частота следования которых была установлена равной резонансной частоте УЗКС (22000 Гц). При этом силовой мост был заведомо «запитан» постоянным напряжением.

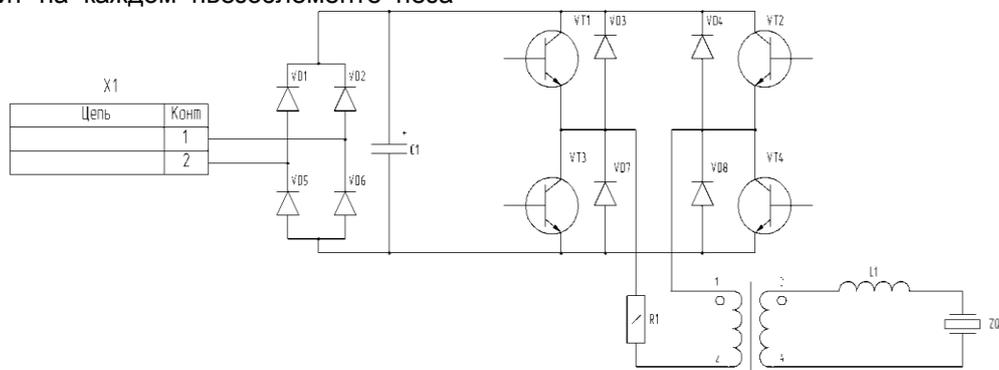


Рисунок 2 – Схема выходной части УЗГ при работе УЗКС в режиме вынужденных колебаний

## РАЗДЕЛ 5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

УЗКС к силовому транзисторному мосту подключена посредством согласующей трансформаторно-дроссельной схемы (Рисунок 2). Контроль колебательного процесса УЗКС осуществлялся путем контроля тока, протекающего в цепи питания УЗКС (сигнал на элементе R1, Рисунок 2).

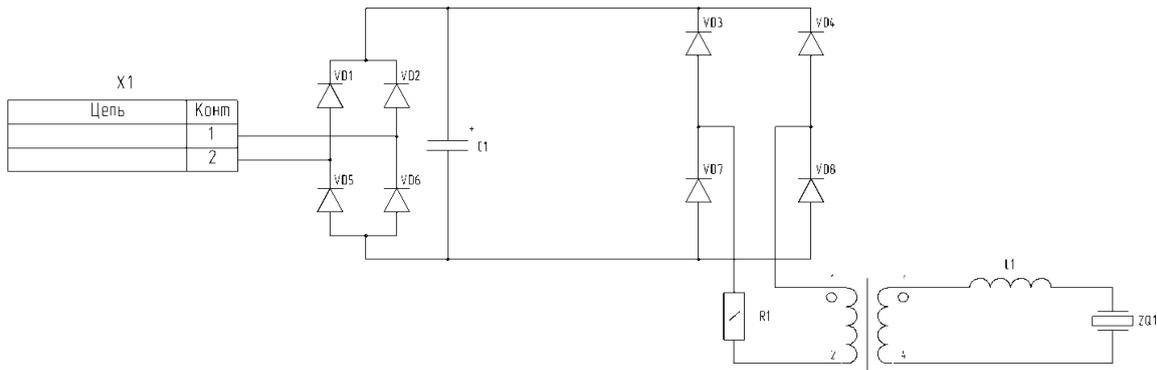


Рисунок 3 – Схема выходной части УЗГ при работе УЗКС в режиме свободных колебаний

В режиме свободных колебаний электрический вход УЗКС оставался подключенным через диоды транзисторных ключей к выпрямительной части ультразвукового генератора, что ускоряло процесс затухания свободных колебаний УЗКС (электрическое демпфирование).

Проведенные исследования ставили целью определение временных параметров формируемого импульса УЗ колебаний в водной среде.

### Результаты измерений

На рисунке 4 представлена осциллограмма сигнала, пропорционального току, протекающему по пьезокерамическим элементам УЗКС. Время T1 работы УЗКС в режиме вынужденных колебаний было установлено равным 590 мкс, что составило 25,9 полупериода вынужденных колебаний УЗКС.

После выключения генерации время затухания колебаний составило 86 мкс, что соответствует 3,8 полупериодам колебаний тока УЗКС (частота колебаний тока УЗКС, регистрируемая на резисторе R1 соответствует частоте вынужденных механических колебаний УЗКС). Рисунок 4 дает представление о периоде следования серий ультразвуковых импульсов и форме огибающей сигнала на токовом датчике.

Для сигнала, представленного на рисунке 4:

По истечении времени T1, транзисторные ключи мостовой схемы запирались и УЗКС переходила в режим свободных колебаний. Эквивалентная схема выходной части ультразвукового генератора, при работе УЗКС в режиме свободных колебаний показана на рисунке 3.

длительность импульса (время работы в режиме вынужденных колебаний и в режиме свободных колебаний) – 681 мкс (30 полупериода вынужденных колебаний УЗКС);

время работы УЗКС в режиме вынужденных колебаний – 590 мкс (26 полупериодов вынужденных колебаний УЗКС);

время нарастания импульса – 295 мкс (13 полупериодов вынужденных колебаний УЗКС);

время затухания импульса – 87 мкс (3,8 полупериода колебаний УЗКС);

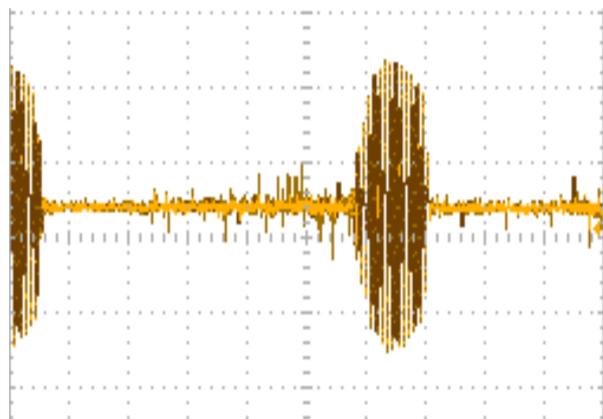
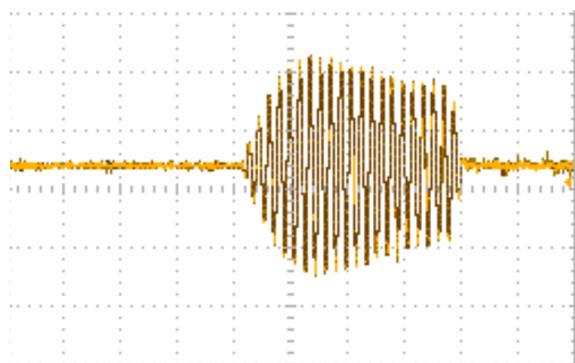


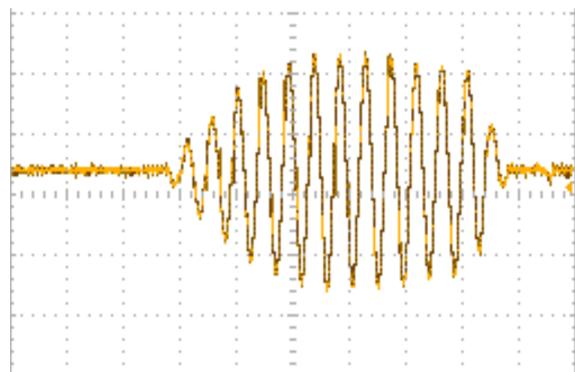
Рисунок 4 – Сигнал с токового датчика.

На рисунке 5 представлены осциллограммы тока, потребляемого УЗКС, в процессе формирования серии колебаний, причем скважность инициирующего тестовый сигнал импульса увеличивалась с каждым опытом.

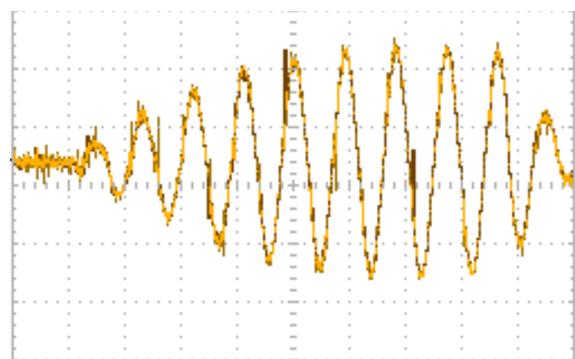
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АППАРАТА В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ



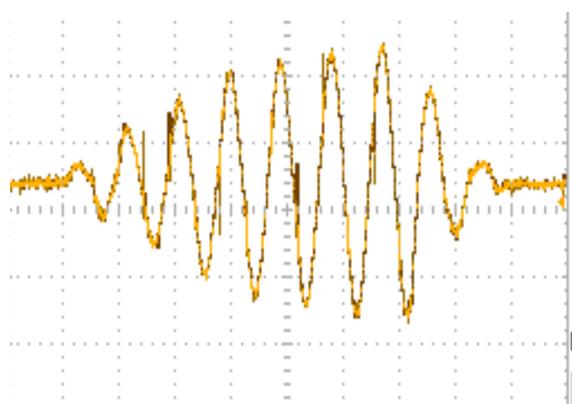
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – Сигнал с токового датчика для времен работы в режиме вынужденных колебаний

870мкс (а), 500 мкс (б), 350 мкс (в), 300 мкс (г)

В таблице 1 представлены характерные времена, соответствующие осциллограммам, представленным выше.

Таблица 1 – Временные характеристики импульсного режима возбуждения УЗКС

Номер Рисунка	$T_{For1}$	$T_{For2}$	$T_{L1}$	$T_{L2}$	$T_{R1}$	$T_{R2}$	$T_{F1}$	$T_{F2}$
5, а	870	38,3	950	43,0	295	13,0	80	3,50
5, б	500	22,0	590	25,9	295	13,0	90	3,96
5, в	350	15,4	436	19,2	295	13,0	87	3,82
5, г	300	13,2	375	16,3	295	13,0	75	3,30

В таблице использованы следующие обозначения:

$T_{For1}$  – Время работы в режиме вынужденных колебаний (мкс);

$T_{For2}$  – Время работы в режиме вынужденных колебаний (периоды колебаний);

$T_{L1}$  – Длительность импульса (мкс);

$T_{L2}$  – Длительность импульса(периоды колебаний);

$T_{R1}$  – Время нарастания (мкс);

$T_{R2}$  – Время нарастания(периоды колебаний);

$T_{F1}$  – Время затухания (мкс);

$T_{F2}$  – Время затухания (периоды колебаний).

На рисунке 6 представлена осциллограмма сигнала, пропорционального току, протекающему по пьезокерамическим элементам УЗКС. Время  $T_1$ , было установлено равным 159 мкс, что составило 7 полупериодов вынужденных колебаний УЗКС. После выключения генерации время затухания колебаний составило 68 мкс, что соответствует 3 полупериодам колебаний тока УЗКС. При столь малом времени возбуждения УЗКС не происходит выход на рабочий режим, то есть амплитуда колебаний тока не становится максимальной и постоянной.

Для сигнала, представленного на рисунке 6: длительность импульса (время работы в режиме вынужденных колебаний и в режиме свободных колебаний) – 227 мкс (10 полупериода колебаний УЗКС);

время работы УЗКС в режиме вынужденных колебаний – 159 мкс (7 полупериодов вынужденных колебаний УЗКС);

время нарастания импульса – 159 мкс (7 полупериодов вынужденных колебаний УЗКС);

## РАЗДЕЛ 5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

время затухания импульса – 68 мкс (3 полупериода колебаний УЗКС).

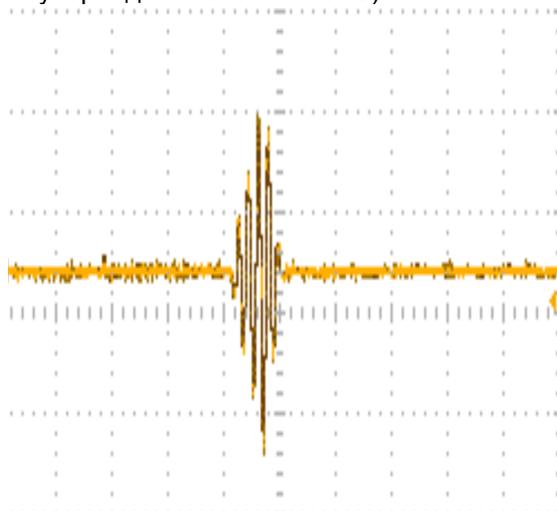


Рисунок 6 – Сигнал с токового датчика.

### Выводы

В результате проведенных исследований установлена возможность формирования коротких импульсов ультразвукового воздействия на водную среду.

Время формирования электрического импульса максимальной амплитуды, характеризующего колебания УЗ излучателя, соответствует 13 полупериодов колебаний на резонансной частоте колебательной системы.

Время затухания электрических колебаний пьезопреобразователя не превышает 4 полупериодов.

Уменьшение длительности формирования импульса менее 13 полупериодов приводит к снижению амплитуды колебаний (уменьшению амплитуды формируемых колебаний).

Таким образом, формируемый при помощи ультразвукового технологического аппарата с пьезоэлектрической колебательной системой импульс УЗ воздействия на технологические среды не может быть менее 8 полупериодов колебаний на рабочей частоте колебательной системы, т.е. не менее 180 мкс.

В проведенных экспериментах время между пачками УЗ импульсов было выбрано равным 3,26 миллисекунд. С учетом того, что минимальная длительность импульса (от нарастания до максимума до полного затухания) составляет 0,386 миллисекунд, интервал времени между импульсами может быть уменьшен вплоть до 0,386 миллисекунд.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг, Л.Д. Источники мощного ультразвука. Фокусирующие излучатели ультразвука [Текст] / Л.Д. Розенберг. – М.: Наука, 1967. – 380с.
2. Хмелев, В.Н. Разрушение масляной эмульсии ультразвуковым воздействием [Текст] / В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, Ю.М. Кузовников // Научно – технический вестник Поволжья. – 2011. – № 5. – с.194 – 198
3. Урик, Роберт Дж. Основы гидроакустики [Текст] / Роберт Дж. Урик; перевод с англ. – Л.: Судостроение, 1978. – 448с.
4. Ультразвуковой технологический аппарат серии «Булава» [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.usonic.com/catalog/apparaty\\_dlya\\_uskoreniya\\_prot\\_sessov\\_v\\_zhidkikh\\_sredakh/ultrazvukovoy\\_tekhnologicheskij\\_apparat\\_serii\\_bulava\\_03/](http://www.usonic.com/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_prot_sessov_v_zhidkikh_sredakh/ultrazvukovoy_tekhnologicheskij_apparat_serii_bulava_03/)
5. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая колебательная система / В.Н. Хмелев [и др.] // Патент РФ №2473400, 2013.
6. Ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна» [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.usonic.com/catalog/apparaty\\_dlya\\_uskoreniya\\_prot\\_sessov\\_v\\_zhidkikh\\_sredakh/ultrazvukovoy\\_tekhnologicheskij\\_apparat\\_serii\\_volna\\_v1/](http://www.usonic.com/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_prot_sessov_v_zhidkikh_sredakh/ultrazvukovoy_tekhnologicheskij_apparat_serii_volna_v1/)
7. Ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна-М» [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.usonic.com/catalog/apparaty\\_dlya\\_uskoreniya\\_prot\\_sessov\\_v\\_zhidkikh\\_sredakh/ultrazvukovoy\\_tekhnologicheskij\\_apparat\\_serii\\_volna\\_m\\_01/](http://www.usonic.com/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_prot_sessov_v_zhidkikh_sredakh/ultrazvukovoy_tekhnologicheskij_apparat_serii_volna_m_01/)
8. Ультразвуковой аппарат серии «Алена» [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.usonic.com/catalog/apparaty\\_dlya\\_uskoreniya\\_prot\\_sessov\\_v\\_zhidkikh\\_sredakh/ultrazvukovoy\\_apparat\\_serii\\_alena\\_v1/](http://www.usonic.com/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_prot_sessov_v_zhidkikh_sredakh/ultrazvukovoy_apparat_serii_alena_v1/)
9. Аппарат ультразвуковой проточный серии «Поток» [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.usonic.com/catalog/apparaty\\_dlya\\_protchnoy\\_obr\\_abotki\\_zhidkikh\\_sred/apparat\\_ultrazvukovoy\\_protchnyy\\_serii\\_potok\\_02/](http://www.usonic.com/catalog/apparaty_dlya_protchnoy_obr_abotki_zhidkikh_sred/apparat_ultrazvukovoy_protchnyy_serii_potok_02/)  
Д.т.н., проф., директор по научной работе **В.Н. Хмелев** – [vnh@bti.secna.ru](mailto:vnh@bti.secna.ru); к.т.н., доцент, технический директор **Р.В. Барсуков** – [rotan@bti.secna.ru](mailto:rotan@bti.secna.ru); инженер **Е.В. Ильченко** – [iev@bti.secna.ru](mailto:iev@bti.secna.ru); (3854)43-25-70 МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ» д.т.н., проф., **Г.В. Леонов** – [leonov@bti.secna.ru](mailto:leonov@bti.secna.ru); (3854)43-23-04 – Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова"