



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 541.183:534.2

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.028



## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ

Владимир Николаевич Хмелёв <sup>1</sup>, Алексей Николаевич Сливин <sup>2</sup>,  
Роман Николаевич Голых <sup>3</sup>, Александр Романович Барсуков <sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийск, Россия

<sup>1</sup>vnh@bti.secna.ru

<sup>2</sup>san@bti.secna.ru

<sup>3</sup>grn@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

<sup>4</sup>barsukov.ar@bti.secna.ru

**Аннотация.** Для повышения эффективности технологических процессов в жидких средах при избыточном давлении предложен и разработан специализированный ультразвуковой (УЗ) технологический аппарат, способный реализовать воздействия на среды под давлением УЗ колебаниями с интенсивностью в пределах от 100 Вт/см<sup>2</sup> до 600 Вт/см<sup>2</sup>. Для достижения такой интенсивности воздействия в составе колебательной системы предусмотрено применение пьезоэлектрического преобразователя, промежуточного усилительного звена и трехменных рабочих инструментов с различными по диаметру излучающими поверхностями, обеспечивающими формирование колебаний с амплитудой до 136 мкм. Для обеспечения задаваемой амплитуды колебаний при всех возможных изменениях состояния обрабатываемой среды электронный генератор снабжен системами фазовой автоподстройки частоты и стабилизации амплитуды. Результаты проведенных стендовых исследований позволили подтвердить возможность реализации ультразвуковых воздействий при потребляемой мощности не более 600 Вт при избыточном давлении до 2 МПа и эффективность применения практически реализованного оборудования для интенсификации различных технологических процессов в жидких средах, при совместном применении повышенных давлений и ультразвуковых колебаний.

**Ключевые слова:** ультразвук, кавитационные явления, воздействие на вещество, интенсификация диффузии, избыточное давление.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>.

**Для цитирования:** Хмелёв В. Н., Сливин А. Н., Голых Р. Н., Барсуков А. Р. Ультразвуковой аппарат для повышения эффективности технологических процессов при избыточном давлении // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 182–186. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.028. EDN: <https://elibrary.ru/YWPLYA>.

Original article

## ULTRASONIC DEVICE TO INCREASE EFFICIENCY TECHNOLOGICAL PROCESSES UNDER EXCESSIVE PRESSURE

Vladimir N. Khmelev <sup>1</sup>, Alexey N. Slivin <sup>2</sup>, Roman N. Golykh <sup>3</sup>,  
Aleksandr R. Barsukov <sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

<sup>1</sup>vnh@bti.secna.ru

<sup>2</sup>san@bti.secna.ru

<sup>3</sup>grn@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

<sup>4</sup>barsukov.ar@bti.secna.ru

**Abstract.** To increase the efficiency of technological processes in liquid media at excessive pressure, a specialized ultrasonic (ultrasonic) technological device has been proposed and developed that is capable of influencing media under pressure with fluctuations in intensity ranging from 100 W/cm<sup>2</sup> to 600 W/cm<sup>2</sup>. To achieve such an intensity of

© Хмелёв В. Н., Сливин А. Н., Голых Р. Н., Барсуков А. Р., 2025

# УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ

*impact, the oscillatory system includes the use of a piezoelectric transducer, an intermediate amplifying link and three interchangeable working tools with radiating surfaces of different diameters, providing the formation of vibrations with an amplitude of up to 136 microns. To ensure a preset oscillation amplitude for all possible changes in the state of the treated medium, the electronic generator is equipped with phase-locked frequency and amplitude stabilization systems. The results of the conducted bench studies confirm the possibility of realizing ultrasonic effects with a power consumption of no more than 600 watts at an excess pressure of up to 2 MPa and the effectiveness of using practically implemented equipment to intensify various technological processes in liquid media, with the combined use of increased pressures and ultrasonic vibrations.*

**Keywords:** ultrasound, cavitation phenomenon, effect on matter, diffusion intensification, excessive pressure.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>.

**For citation:** Khmelev, V.N., Slivin, A.N. Golykh, R.N. & Barsukov, A.R. (2025). Ultrasonic device to increase efficiency technological processes under excessive pressure. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 182-186. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.028. EDN: <https://elibrary.ru/YWPLYA>.

## ВВЕДЕНИЕ

Создание избыточных (в сравнении с атмосферным) давлений в рабочих камерах при реализации различных технологических процессов позволяет не только создавать принципиально новые материалы, но и изменять структуру, свойства известных материалов для повышения их качества [1], а также реализовывать замкнутые безотходные и энергосберегающие производства.

Так, перевод сернокислотного производства на технологическую схему, работающую при давлении 1,5 — 2 МПа, обеспечивает утилизацию вторичных энергоресурсов и перевод всего производства на энергетическое самообеспечение. Применение дополнительного гидростатического давления сокращает продолжительность пропитки с нескольких суток до 10-30 с и существенно ускоряет растворение газов [1,2]. Повышение давления оказывает влияние на протекание газозаменных химико-технологических реакций [3]. При переработке полимерных материалов использование избыточного давления обеспечивает бездефектное заполнение расплавом формы, ускоряет процесс кристаллизации, сдвигает температуру кристаллизации в область повышенных температур, а изменение величины избыточного давления позволяет регулировать усадку материала [4].

В производстве отдельных видов химической продукции (стирола, аммиака, некоторых сверхтвердых материалов) высокое давление обеспечивает существенное ускорение технологического процесса [5].

Однако, в большинстве случаев, создание избыточного давления требует увеличения затрат на производство. Это не всегда экономически целесообразно из-за неоправданно больших эксплуатационных и энергетических затрат, необходимости установки толстостенного оборудования повышенной прочности. Поэтому, в технологической практике, вопрос о целесообразности использования избыточного давления решается в каждом конкретном случае в зависимости от соотношения степени повышения эффективности процесса от затрат на создание избыточного давления, обеспечивающего эту эффективность.

Таким образом, ключевым моментом практической реализации технологий при избыточном давлении является, либо необходимость дальнейшего повышения эффективности процесса при достигаемых давлениях, или поиск путей обеспечения достигнутой эффективности при меньших избыточных давлениях.

Наиболее эффективным путем совершенствования известных и разработки новых технологий является применение избыточных давлений при одновременном воздействии ультразвуковыми колебани-

ями высокой интенсивности [6]. Так, ускорение гетерогенных процессов в системах жидкость-жидкость и жидкость-твердое тело, в том числе за счет ускорения процессов на границе раздела фаз, осуществляется под воздействием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, с применением ультразвуковых технологических аппаратов [7].

В большинстве случаев, при ускорении технологических процессов под давлением более 0,5-0,7 МПа, заметные эффекты ультразвукового кавитационного воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды начинаются при амплитуде УЗ колебаний не менее 50 мкм [8]. Таким образом, для создания кавитации в жидкой среде при избыточном давлении необходимо создание колебаний с такой амплитудой для обеспечения интенсивности (плотности энергии) ультразвукового воздействия не менее 100 Вт/см<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение интенсивности ультразвукового воздействия очень благоприятно влияет на интенсификацию всех реализуемых технологических процессов.

Однако, до настоящего времени, такие технологии практически не реализуются из-за отсутствия специализированного ультразвукового оборудования [9], способного реализовать такие воздействия в средах при избыточном давлении.

## МЕТОДЫ

В связи с этим, возникает необходимость разработки и практической реализации ультразвукового аппарата, способного обеспечить создание в обрабатываемых средах необходимых амплитуд колебаний для реализации новых технологий, основанных на совместном применении повышенных давлений и ультразвуковых колебаний. Достигнуто это может быть только за счет создания аппаратов с пьезоэлектрической колебательной системой, имеющей рабочие инструменты с различными по размерам излучающими поверхностями [10].

Это обуславливает необходимость создания пьезоэлектрической колебательной системы заданной мощности и разработки рабочих инструментов со специальной формой образующей и диаметром излучающей торцевой поверхности, способных обеспечить максимальную эффективность УЗ воздействия (интенсивность ультразвуковых колебаний) при повышенных значениях давлений в проточном объеме.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для комплектации аппарата разработана ультразвуковая колебательная система, выполненная по трехполуволновой конструктивной схеме — пьезопреобразователь, промежуточный полуволновой усилительный

концентратор (бустерное звено) и сменные рабочие инструменты на резьбовом соединении с бустером.

Ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь выполнен по полуволновой конструктивной схеме (схеме Ланжевена) и имеет в своем составе 4 пьезоэлектрических элемента кольцевого типа, стальную отражательную и алюминиевую рабочую накладки для увеличения амплитуды колебаний пьезоэлементов (максимальное достигаемое значение не менее 10 мкм). Дальнейшее увеличение амплитуды УЗ колебаний обеспечивается применением бустерного усилительного звена с коэффициентом усиления не менее 3, что позволяет увеличить амплитуду формируемых колебаний до 30 мкм. Входящее в состав колебательной системы промежуточное бустерное звено, выполненное по полуволновой схеме, позволяет разместить на его поверхности, в месте минимума механических ультразвуковых колебаний, фланец для крепления колебательной системы в технологическом объеме. Такой фланец практически не влияет на формирование колебаний и позволяет обеспечить герметичность и надежность крепления при эксплуатации колебательной системы при высоких избыточных давлениях.

Для обеспечения необходимой амплитуды и интенсивности ультразвуковых колебаний при избыточном давлении от 0,1 до 2 МПа были спроектированы инструменты со специальной формой образующей конического типа (с излучающей поверхностью, диаметром 4 и 10 мм и коэффициентами усиления 5 и 3, соответственно), и с образующей ступенчатого типа в зоне минимальной амплитуды колебаний (с рабочей поверхностью, диаметром 15 мм и коэффициентами усиления 2,5) (Рисунок 1). Для питания созданной колебательной системы и реализации новых технологий был спроектирован и практически реализован ультразвуковой технологический аппарат, представленный на рисунке 2.

Электронный генератор созданного ультразвукового технологического аппарата оснащен системой фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) для работы на резонансной частоте пьезоэлектрической колебательной системы при любых изменениях условий её эксплуатации (изменения давлений, температур, плотности и вязкости среды и др.).

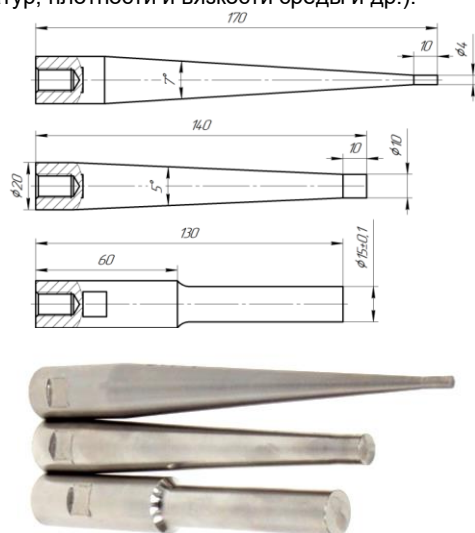


Рисунок 1 – Рабочие инструменты для работы при избыточном давлении

Figure 1 – Working tools for overpressure operation



Рисунок 2 – Ультразвуковой технологический аппарат с комплектом сменных рабочих инструментов специальных конфигураций

Figure 2 – Ultrasonic technological device with a set of interchangeable working tools of special configurations

Генератор снабжен также системой автоматического поддержания задаваемой (устанавливаемой на передней панели) амплитуды колебаний при изменении давления от 0,1 до 2 МПа (а также при изменении других условий эксплуатации).

Основные технические характеристики созданного аппарата:

- мощность, ВА, не более 1000;
- частота ультразвуковых колебаний, кГц  $20 \pm 2,0$ ;
- питание от сети переменного тока напряжением, В  $220 \pm 22$ ;
- время непрерывной работы, ч 8.

Габаритные размеры:

- электронный генератор, мм 430x290x115;
- колебательная система, мм  $\varnothing 110 \times 300$ ;
- диаметр окончаний рабочих инструментов, мм 15, 10, 4.

Для определения функциональных возможностей созданного аппарата, а также для установления энергетических режимов его эксплуатации при различных режимах ультразвукового воздействия на жидкость при избыточном давлении, был разработан и изготовлен исследовательский стенд. Стенд для проведения экспериментальных исследований с ультразвуковым технологическим аппаратом и технологическим объемом, представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Стенд с ультразвуковым технологическим аппаратом и технологическим объемом

# УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ

Figure 3 – Stand with ultrasonic technological apparatus and technological volume

В состав стенда входит созданный ультразвуковой аппарат с потребляемой электрической мощностью не более мощностью 1000 ВА, специализированный технологический объем для реализации проточной ультразвуковой обработки жидких сред, и обеспечения необходимой в объеме интенсивности воздействия при избыточном давлении от 0,1 до 2 МПа.

Избыточное давление от 0,1 до 2 МПа обеспечивалось при помощи насоса высокого давления плунжерного типа Hawk NMT1520R. Для контроля величины давления жидкости применялся стандартный манометр из комплекта насоса. Для измерения электрических параметров качества потребляемой энергии использовался измеритель мощности Instek GPM-8212. При проектировании и настройке ультразвукового аппарата, а также перед проведением стендовых испытаний были проведены измерения амплитуды колебаний рабочей поверхности инструментов с использованием стробоскопического метода в воздушной среде.

С учетом того, что разработанный ультразвуковой технологический аппарат оснащен системой автоматического поддержания задаваемой амплитуды колебаний при изменении давления от 0,1 до 2 МПа измеренные значения амплитуд будут оставаться неизменными при всех возможных изменениях условий эксплуатации аппарата.

Проведенные измерения и исследования позволили установить следующее.

1. Максимальная амплитуда ультразвуковых колебаний, формируемых в жидкой или в жидкодисперсной среде при использовании инструмента с окончанием диаметром 15 мм достигает 65 мкм (ин-

тенсивность до 150 Вт/см<sup>2</sup>).

2. Максимальная амплитуда колебаний при использовании инструментов диаметрами 10 и 4 мм достигает 85 мкм (интенсивность до 250 Вт/см<sup>2</sup>) и 135 мкм (интенсивность до 500 Вт/см<sup>2</sup>), соответственно.

Создаваемых аппаратом амплитуд колебаний и интенсивностей воздействия достаточно для формирования кавитационного процесса в средах при избыточном давлении до 2 МПа.

Для подтверждения значений формируемой в объеме интенсивности были проведены измерения выделяемой аппаратом энергии ультразвуковых колебаний в воде, в объеме 1 л методом калориметра-ваттметра в соответствии с требованиями ГОСТ 27955-88 п.п. 7.2.

В таблице 1 представлены значения потребляемой активной мощности ультразвукового технологического аппарата на максимальной потребляемой мощности (100% установленной на передней панели аппарата), в зависимости от величины избыточного давления в технологическом объеме, а также в зависимости от разных типов установленных сменных инструментов.

Проведенные в соответствии с требованиями ГОСТ 27955-88 измерения КПД аппарата позволили установить, что с применением рабочего инструмента с рабочей поверхностью излучения диаметром 4 мм КПД аппарата составляет 40%, для аппарата с инструментом диаметром 10 мм КПД аппарата составляет 55%, для аппарата с инструментом диаметром 15 мм КПД аппарата составляет 60%.

На исследовательском стенде были проведены испытания созданного аппарата на режимах эксплуатации, наиболее часто применяемых на практике при установлении в объеме избыточных давлений от 0 до 2 МПа.

Таблица 1 – Значения потребляемой активной мощности ультразвукового технологического аппарата, в зависимости от давления в проточном объеме, для разных типов сменных инструментов

Table 1 – Values of the consumed active power of the ultrasonic technological apparatus, depending on the pressure in the flow volume, for different types of replaceable instruments

Тип сменного инструмента	Без давления	0,3 МПа, (проточное давление в воде)	0,5 МПа	1 МПа	1,5 МПа	2 МПа
сменный инструмент с излучающей поверхностью диаметром 4 мм	350 Вт	370 Вт	380 Вт	372 Вт	372 Вт	366 Вт
сменный инструмент с излучающей поверхностью диаметром 10 мм	360 Вт	410 Вт	435 Вт	470 Вт	470 Вт	479 Вт
сменный инструмент с излучающей поверхностью диаметром 15 мм	360 Вт	410 Вт	608 Вт	620 Вт	620 Вт	615 Вт

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ реализуемых на практике процессов позволил установить возможность повышения их эффективности за счет одновременного применения с избыточным давлением, воздействия на жидкие и жидко дисперсные среды ультразвуковыми колебаниями.

2. Для обеспечения воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности в кавитационном режиме на среды при избыточном давлении предложен и разработан специализированный ультразвуковой технологический аппарат, включающий электронный генератор с системами стабилизации амплитуды и автоподстройки частоты и пьезоэлек-

трическую колебательную систему.

3. Для обеспечения на среды под давлением ультразвукового воздействия с интенсивностью в пределах от 100 Вт/см<sup>2</sup> до 600 Вт/см<sup>2</sup> в составе колебательной системы предусмотрено применение пьезоэлектрического преобразователя, промежуточного усилительного звена и трех сменных рабочих инструментов с различными по диаметру излучающими поверхностями, обеспечивающими формирование колебаний с амплитудой до 136 мкм.

4. Проведенные стендовые экспериментальные исследования позволили определить функциональные возможности аппарата при реализации различных технологий при избыточном давлении до 2 МПа и подтвердить возможность реализации эффективных

ультразвуковых воздействий при потребляемой мощности не более 600 Вт.

5. Результаты проведенных разработок и экспериментальных исследований подтвердили эффективность применения практически реализованного оборудования для интенсификации различных технологических процессов в жидких средах, при совместном применении повышенных давлений и ультразвуковых колебаний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Классификация энергетических воздействий по влиянию на структуру и свойства армированных реактопластов / И. В. Черемухина // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. Т. 83, № 2(88). С. 197-201.
2. Исследование гидрофильных свойств бетонных смесей для гидротехнических сооружений / С. В. Николаев, Е. Р. Богданова // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. № 2(39). С. 99-106.
3. Общая химическая технология: учебное пособие / М. А. Ленский, [и др.]. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Барнаул: АлтГТУ, 2022. 185 с. Текст : электронный. Режим доступа: [http://el.lib.altstu.ru/uploads/open\\_mat/2022/Lenskiy\\_ObHimTe\\_h\\_up.pdf](http://el.lib.altstu.ru/uploads/open_mat/2022/Lenskiy_ObHimTe_h_up.pdf).
4. Усиление эффекта наномодифицирования алюминиевых сплавов ультразвуком / Г. Г. Крушенко, [и др.] // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 622-623.
5. Разработка методики ультразвукового процессирования химически агрессивных сред при повышенных температурах и давлении и соответствующего ультразвукового технологического оборудования / А. А. Вьюгина, [и др.] // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2020. № 3. С. 12-17.
6. Формирование зон с максимальной интенсивностью ультразвуковой кавитации в однокомпонентных и многокомпонентных средах / Б. И. Бахтин, [и др.] // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 3. С. 662-669.
7. Ультразвуковые аппараты для интенсификации процессов в системах с дисперсионной жидкой средой / В.Н. Хмелев, [и др.]. Современные задачи инженерных наук. Сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ 2017» Международного научно-технического Форума «Первые международные Косыгинские чтения (11-12 октября 2017 года). Т. 1 / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. С.268-272.
8. Выявление оптимальных условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред / В.Н. Хмелев, [и др.]. Ползуновский вестник. 2017. № 4. С.123-128.
9. Ультразвук. Аппараты и технологии / В.Н. Хмелев, [и др.]. Барнаул: АлтГТУ, 2015. 688 с.
10. Пути развития пьезоэлектрических преобразователей для увеличения мощности. Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы международной научной конференции / В.Н. Хмелев, [и др.]. Витебск, Беларусь: УО ВГТУ, 2021. С. 82-85.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 21 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 21 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

## Информация об авторах

В. Н. Хмелёв – доктор технических наук, профессор кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

А. Н. Сливин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Р. Н. Голых – доктор технических наук, профессор кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

А. Р. Барсуков – старший преподаватель кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

## Information about the authors

V. N. Khmelev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

A. N. Slivin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

R. N. Golykh, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

A. R. Barsukov, Senior Lecturer of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.