

УДК 621.98.044.7

## Совершенствование конструкции двухкамерного устройства для газовой штамповки

**А.Ю. Боташев, А.А. Мусаев**

Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия, 369000, Черкесск, Российская Федерация, Ставропольская ул., д. 36.

## Improving the design of a dual-chamber device for gas forming

**A.Y. Botashev, A.A. Musaev**

North Caucasian State Academy of Humanities and Technology, Stavropol'skaya str., 36, 369000, Cherkessk, Russian Federation.

 e-mail: botashev11@mail.ru, brain\_95@mail.ru

**i** Многим отраслям промышленности характерно мелкосерийное производство, поэтому повышение его эффективности является актуальной задачей. Один из путей ее решения — использование газовой штамповки, при которой деформирование листовой заготовки осуществляется давлением газа. Двухкамерное устройство для газовой штамповки обеспечивает существенное повышение давления газа на поверхности штампуемой заготовки за счет предварительного сжатия и сгорания топливной смеси в полости, примыкающей к штампуемой заготовке. В статье предложено совершенствование конструкции двухкамерного устройства для газовой штамповки с целью повышения его технико-экономических показателей путем переноса свечи зажигания из верхней камеры устройства в полость, непосредственно примыкающую к штампуемой заготовке, и оптимизации конструктивных параметров устройства. Благодаря этому при давлении топливной смеси 1 МПа давление газа на поверхности штампуемой заготовки достигает до 70...80 МПа, что обеспечивает штамповку широкой номенклатуры деталей.

**Ключевые слова:** двухкамерное устройство, сжатие, топливная смесь, штампуемая заготовка, оптимизация, давление газа.

**i** Small-scale production is typical for many industries. Therefore, it is very important to increase its efficiency. One of the solutions to this problem is using gas pressure forming. A dual-chamber device for gas pressure forming significantly increases gas pressure acting on the surface of a formed blank by pre-compression and combustion of the fuel mixture in the cavity adjacent to the blank. This paper suggests improving the design of a dual-chamber device for gas forming in order to increase its technical and economic characteristics. This is achieved by transferring the ignition spark plug from the upper chamber to the cavity adjacent to the formed blank and optimizing the design parameters of the device. In this case, if the pressure of the fuel mixture is 1 MPa, the gas pressure acting on the surface of the formed blank is 70 ... 80 MPa. This approach makes it possible to fabricate a wide range of parts by gas forming.

**Keywords:** dual-chamber device, compression, fuel mixture, formed blank, optimization, and gas pressure.

В настоящее время во многих отраслях промышленности, в частности, в авиастроении, кораблестроении, энергетическом и химическом машиностроении, используется мелкосерийное производство, которому характерна сравнительно высокая себестоимость производимой продукции. Поэтому актуальным является повышение его эффективности. Один из путей решения этой проблемы — использование газовой штамповки, при которой деформирование листовой заготовки осуществляется давлением газа [1–4]. Использование газовой штамповки в мелкосерийном производстве позволяет существенно снизить себестоимость производимых изделий.

Одной из разновидностей данных устройств газовой штамповки является двухкамерное устройство газовой штамповки. Наличие двух камер обеспечивает существенное повышение давления газа на поверхности штампуемой заготовки за счет предварительного сжатия и сгорания топливной смеси в полости, примыкающей к штампуемой заготовке. Испытание экспериментального образца двухкамерного устройства для штамповки показало, что оно обладает широкими технологическими возможностями [5].

Цель работы — совершенствование конструкции двухкамерного устройства для штамповки, обеспечивающее дальнейшее повышение его технико-экономических показателей.

В работе [6] описано исследование процессов, совершающихся в обеих камерах данного устройства для штамповки. Установлено, что в период горения топливной смеси в первой камере давление топливной смеси во второй камере увеличивается в 6–6,5 раз. При зажигании этой смеси происходит дальнейшее повышение давления во второй камере. Соответственно увеличивается и давление топливной смеси в полости, примыкающей к штампуемой заготовке. Однако значительная часть энергии, выделяющейся при сгорании топливной смеси во второй камере, идет не на увеличение давления топливной смеси на поверхности обрабатываемой заготовки, а на остановку поршня и его перемещение в обратном направлении. Это уменьшает эффективность использования энергии топливной смеси, т. е. снижает экономичность устройства для штамповки.

Для более эффективного использования энергии топливной смеси, сжатой во второй камере, целесообразно исключить горение топливной смеси в этой камере и обеспечить ее сгорание в полости, непосредственно примы-

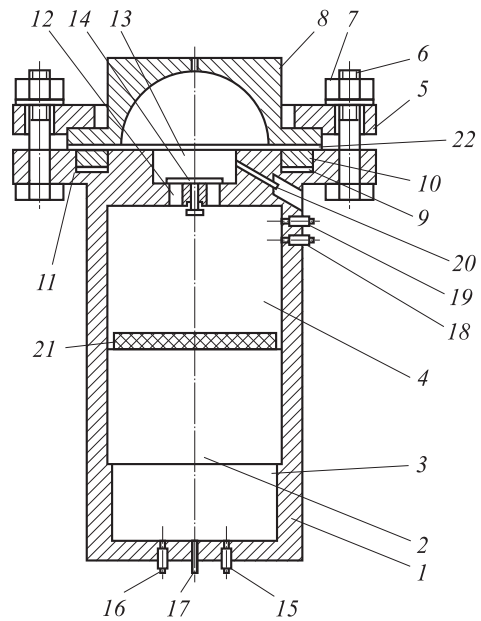


Рис. 1. Схема двухкамерного устройства газовой штамповки:

- 1 — корпус; 2 — поршень; 3 — нижняя камера сгорания; 4 — верхняя камера сгорания; 5 — фланец; 6 — болт; 7 — гайка; 8 — матрица; 9 — кольцевая полость; 10 — кольцевой поршень; 11 — канал; 12 — сквозные каналы; 13 — полость; 14 — тарельчатый клапан; 15, 18 — впускные клапаны; 16, 19 — выпускные клапаны; 17, 20 — свечи зажигания; 21 — резиновая пластина; 22 — штампуемая заготовка

кающей к штампуемой заготовке. Это достигается путем переноса свечи зажигания из второй камеры в эту полость. Схема такого двухкамерного устройства для штамповки представлена на рис. 1. К корпусу 1 с помощью фланца 5, болтов 6 и гаек 7 присоединена матрица 8. В верхней части корпуса 1 выполнена кольцевая полость 9, в которой установлен кольцевой поршень 10. Для подачи в кольцевую полость 9 рабочей среды выполнен канал 11.

Устройство содержит корпус 1, в котором расположена цилиндрическая полость, разделенная поршнем 2 на нижнюю 3 и верхнюю 4 камеры. В верхней части корпуса 1 выполнены сквозные каналы 12, соединяющие верхнюю камеру 4 с полостью 13. Эти каналы перекрываются тарельчатым клапаном 14. Нижняя камера сгорания снабжена впускным клапаном 15, выпускным клапаном 16 и свечей зажигания 17. Верхняя камера также имеет впускной клапан 18 и выпускной клапан 19, а полость 13 — свечу зажигания 20. На поршне 2 установлена резиновая пластина 21, служащая для обеспечения безударной остановки поршня 2. Штампуемая заготовка 22 зажимается между торцом матрицы 8 и кольцевым поршнем 10.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Камеры 3 и 4 через впускные клапаны 15 и 18 наполняются топливной смесью (см. рис. 1). При этом топливная смесь через каналы 12 поступает также в полость 13. Давление смеси в обеих камерах одинаковое, поэтому поршень 2 остается неподвижным. Топливная смесь в камере 3 с помощью свечи 17 поджигается. При сгорании этой смеси давление в камере 3 увеличивается. Под действием давления продуктов сгорания поршень 2 перемещается вверх, сжимая топливную смесь в камере 4. При этом топливная смесь из камеры 4 через каналы 12 вытесняется в полость 13. При достижении поршнем 2 крайнего верхнего положения свеча 20 производит зажигание топливной смеси, находящейся в полости 13. При этом давление в этой полости резко повышается. Под действием давления продуктов сгорания происходит деформирование заготовки 22, т. е. осуществляется процесс штамповки. Одновременно под действием давления продуктов сгорания тарельчатый клапан 14 перекрывает каналы 12, предотвращая перетекание газа из полости 13 в камеру 4. Благодаря организации процесса горения сжатой топливной смеси в полости 13 обеспечивается существенное повышение давления газа на поверхности штампуемой заготовки.

Определим оптимальные соотношения объемов рабочих полостей устройства для штамповки. Для этого рассмотрим совершающиеся в них термодинамические процессы. При этом примем следующие допущения: давление топливной смеси в камере 4 и в полости 13 одинаковое; сгорание топливной смеси в камере 3 происходит при постоянном объеме; процессы расширения продуктов сгорания и сжатия топливной смеси являются адиабатическими ввиду их быстротечности. Соответствующим подбором проходных сечений каналов 12 можно обеспечить малые перепады давлений между камерой 4 и полостью 13, что подтверждает приемлемость первого допущения. Корректность второго допущения обусловлена малым временем горения топливной смеси в камере 3, особенно при использовании нескольких свечей зажигания.

Давление в камере 3 в конце процесса сгорания можно определить по следующей зависимости:

$$P_z = \lambda P_c, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — степень повышения давления при сго-

рании в постоянном объеме;  $P_c$  — начальное давление топливной смеси.

При перемещении поршня 2 вверх продукты сгорания расширяются. Считая процесс их расширения адиабатическим, давление в нижней камере можно определить зависимостью

$$P_1 = P_z (V_{10}/V_1)^{\kappa_r}. \quad (2)$$

Здесь  $V_{10}$ ,  $V_1$  — начальное и текущее значения объема нижней камеры 3;  $\kappa_r$  — показатель адиабаты продуктов сгорания.

По мере перемещения поршня топливная смесь в верхней камере 4 и полости 13 сжимается, при этом ее давление изменяется по адиабатическому закону

$$P_2 = P_c \left( \frac{V_{20} + V_3}{V_2 + V_3} \right)^{\kappa_c}, \quad (3)$$

где  $P_2$  — текущее значение давления топливной смеси;  $V_{20}$ ,  $V_2$  — начальное и текущее значения объема верхней камеры 4;  $V_3$  — объем полости 13;  $\kappa_c$  — показатель адиабаты топливной смеси.

В конце хода поршня, т. е. в крайнем верхнем его положении, объем нижней камеры равен суммарному объему нижней и верхней камер:

$$V_{1к} = V_{10} + V_{20}; \quad V_{20} = 0. \quad (4)$$

Подставляя формулу (4) в зависимости (2) и (3) и учитывая формулу (1), определим конечные значения давления продуктов сгорания и топливной смеси в крайнем верхнем положении поршня:

$$P_{1к} = P_c \lambda \left( \frac{V_{10}}{V_{10} + V_{20}} \right)^{\kappa_r}; \quad (5)$$

$$P_{2к} = P_c \left( \frac{V_{20} + V_3}{V_3} \right)^{\kappa_c}. \quad (6)$$

Работа, совершенная продуктами сгорания по перемещению поршня из нижнего положения в крайнее верхнее, определяется следующей зависимостью [7]:

$$L_p = \frac{1}{\kappa_r - 1} (P_z V_{10} - P_{1к} V_{1к}). \quad (7)$$

Аналогично рассчитывается работа сжатия топливной смеси в верхней камере и полости 13:

$$L_c = \frac{1}{\kappa_c - 1} [P_{2к} V_3 - P_c (V_{20} + V_3)]. \quad (8)$$

Чтобы обеспечить максимальное увеличение давления топливной смеси работа сжатия топ-

ливной смеси должна быть равна работе расширения продуктов сгорания, т. е.

$$L_c = L_p. \tag{9}$$

Введем следующие безразмерные величины:

$$v_2 = \frac{V_{20}}{V_{10}}, v_3 = \frac{V_3}{V_{10}}; \Pi = \frac{P_{2к}}{P_c}. \tag{10}$$

Здесь  $v_2$  — относительный объем верхней камеры;  $v_3$  — относительный объем полости 13, примыкающей к штампуемой заготовке;  $\Pi$  — степень повышения давления топливной смеси.

Тогда зависимость (6) можно представить в следующем виде:

$$\Pi = \left(1 + \frac{v_2}{v_3}\right)^{\kappa_c}. \tag{11}$$

Эта зависимость определяет степень повышения давления топливной смеси в конце процесса ее сжатия. Используя формулы (1), (5)–(8) и соотношения (10), из уравнения (9) получим

$$\begin{aligned} \frac{v_2 + v_3}{\kappa_c - 1} \left[ \left( \frac{v_2 + v_3}{v_3} \right)^{\kappa_c - 1} - 1 \right] &= \\ &= \frac{\lambda}{\kappa_r - 1} \left[ 1 - \frac{1}{(1 + v_2)^{\kappa_r - 1}} \right]. \end{aligned} \tag{12}$$

Уравнение (12) позволяет найти оптимальные значения  $v_2$  в зависимости от величины  $v_3$ , обеспечивающие максимальное повышение давления топливной смеси и высокую экономичность устройства для штамповки. Уравнение (12) решим графически, представив его в следующем виде:

$$Y(v_2, v_3) = X(v_2),$$

где

$$Y(v_2, v_3) = \frac{v_2 + v_3}{\kappa_c - 1} \left[ \left( \frac{v_2 + v_3}{v_3} \right)^{\kappa_c - 1} - 1 \right];$$

$$X(v_2) = \frac{\lambda}{\kappa_r - 1} \left[ 1 - \frac{1}{(1 + v_2)^{\kappa_r - 1}} \right].$$

Зависимости  $X$  и  $Y$  от  $v_2$  при различных значениях  $v_3$  приведены на рис. 2. Точки пересечения этих кривых определяют значения  $v_3$ , удовлетворяющие уравнению (12). Назовем их рациональными значениями  $v_2$ .

Зависимость рациональных значений  $v_2$  от  $v_3$  приведена на рис. 3. На этом же рисунке показана зависимость степени повышения давле-

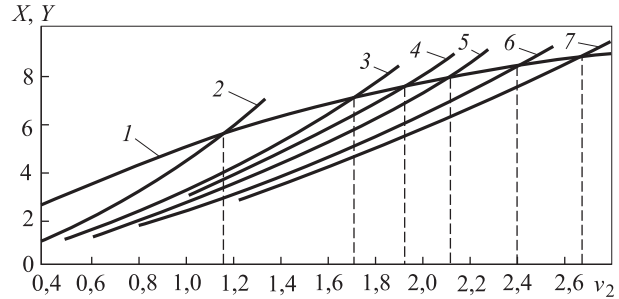


Рис. 2. Зависимость  $X$  (1) и  $Y$  (2–7) от  $v_2$ :  
2 —  $v_3 = 0,1$ ; 3 —  $v_3 = 0,2$ ; 4 —  $v_3 = 0,25$ ; 5 —  $v_3 = 0,3$ ;  
6 —  $v_3 = 0,4$ ; 7 —  $v_3 = 0,5$

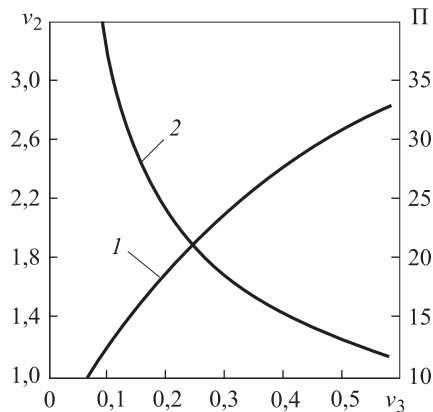


Рис. 3. Зависимость рациональных значений  $v_2$  (1) и степени повышения давления  $\Pi$  (2) от  $v_3$

ния топливной смеси  $\Pi$  от  $v_3$ . Как видно на этих рисунках с увеличением  $v_3$  значение  $v_2$  увеличивается, а значение  $\Pi$  интенсивно уменьшается. При малых значениях  $v_3$  степень повышения давления топливной смеси достигает 30 и выше. Однако уменьшение  $v_3$  ниже 0,1 нецелесообразно, поскольку наряду с ростом давления топливной смеси повышается и ее температура, т. е.

$$T_2 = T_{20} \left(1 + \frac{v_2}{v_3}\right)^{\frac{\kappa_c - 1}{\kappa_c}}, \tag{13}$$

где  $T_{20}$  — начальное значение абсолютной температуры топливной смеси.

Расчет по зависимости (13) показывает, что при  $v_3 < 0,1$  абсолютная температура топливной смеси может достигать 1 000 К, что может привести к самовоспламенению топливной смеси в верхней камере. Кроме того, уменьшение  $v_3$  при фиксированном значении объема полости 13 ведет к росту габаритных размеров устройства для штамповки. Поэтому минимальное значение  $v_3$  примем равным 0,1. При этом значении  $v_3$  по кривой 1 на рис. 3 получим  $v_2 = 1,2$ .

Технологические возможности данного типа устройства для штамповки определяются мак-

симальным давлением газа на поверхности штампуемой заготовки, которое зависит от давления топливной смеси. Поэтому снижение степени повышения давления топливной смеси  $\Pi$  ниже 15 не целесообразно. На рис. 3 видно, что при  $\Pi = 15$  (кривая 2)  $v_3 \approx 0,4$ . Исходя из этого примем верхнее значение  $v_3 = 0,4$ . По кривой 1 (см. рис. 3) находим  $v_2 \approx 2,5$ . Таким образом, оптимальная область изменения  $v_3$  находится в пределах  $0,1 \dots 0,4$ , а оптимальная область значений  $v_2$  — в пределах  $1,2 \dots 2,5$ . В соответствии с выражением (10), это означает, что объем нижней камеры 3 (см. рис. 1) должен быть в 2,5–10 раз больше объема полости 13, а объем верхней камеры 4 — в 1,2–2,5 раза больше объема нижней камеры. При этом следует отметить, что объем полости 13 зависит от объема внутренней полости штампуемых деталей. Объем полости 13 целесообразно принять равным примерно половине максимально возможного объема штампуемой детали. При указанных оптимальных значениях  $v_2$  и  $v_3$  степень повышения давления топливной смеси  $\Pi$  составляет 15...35. Следовательно, на поверхности штампуемой заготовки давление топливной смеси повышается в 15–35 раз. При сгорании этой смеси давление на поверхности заготовки в зависимости от формы штампуемой детали будет повышаться еще в 3–5 раз, причем большие значения давления соответствуют меньшим значениям  $\Pi$ .

Таким образом, в результате сжатия топливной смеси и последующего ее сгорания

давление на поверхности штампуемой заготовки увеличивается примерно в 75–100 раз. Однако эти значения получены без учета потерь энергии на теплоотдачу. Основываясь на данные в области поршневых двигателей внутреннего сгорания [8, 9], можно ожидать, что в этом случае потери энергии на теплоотдачу могут достигать 15...20 %. С учетом этого можно считать, что давление газа на поверхности штампуемой заготовки повышается в 60–80 раз, что позволяет при сравнительно малом начальном давлении топливной смеси порядка 0,5...1,0 МПа производить штамповку деталей разнообразной формы из стали и цветных сплавов.

## Выводы

1. Перенос свечи зажигания из верхней камеры в полость, примыкающую к штампуемой заготовке, позволяет более эффективно использовать энергию топливной смеси.

2. Объем нижней камеры должен быть в 2,5–10 раз больше объема полости, примыкающей к штампуемой заготовке, а объем верхней полости — в 1,2–2,5 раза превышать объем нижней камеры.

3. Предлагаемое совершенствование конструкции устройства для штамповки позволяет увеличить давление газа на поверхности штампуемой заготовки до 70...80 МПа при давлении топливной смеси 1 МПа, что обеспечивает штамповку широкой номенклатуры деталей.

## Литература

- [1] Ковалевич М.В. Расчет режимов пневмотермической формовки деталей коробчатой формы в режиме сверхпластичности. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2006, № 9, с. 35–39.
- [2] Боташев А.Ю., Бисилов Н.У. Исследование рабочего процесса устройства для газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки. *Обработка материалов давлением. Сб. науч. тр.* Краматорск, ДГМА, 2010, № 4(25), с. 126–132.
- [3] Боташев А.Ю., Мусаев А.А. Исследование и разработка двухкамерного устройства для газовой листовой штамповки. *Материалы Междунар. конф. Обработка материалов давлением. Сб. науч. тр.* Краматорск, ДГМА, 2011, № 1(26), с. 221–226.
- [4] Соболев Я.А. Технология изготовления полусфер из титанового сплава ВТ23 методом газовой формовки в условиях сверхпластичности. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2013, № 8, с. 25–27.
- [5] Боташев А.Ю., Мусаев А.А. Разработка, исследование и создание двухкамерного устройства для газовой листовой штамповки. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2012, № 3, с. 20–23.
- [6] Мусаев А.А. Экспериментальные исследования газовой листовой штамповки на двухкамерном устройстве. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2012, № 4, с. 19–23.
- [7] Шатров М.Г., ред. *Теплотехника*. Москва, Издательский центр «Академия», 2013. 288 с.

- [8] Буров А.Л. *Сгорание в поршневых двигателях*. Москва, МГИУ, 2006. 76 с.
- [9] Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. *Двигатели внутреннего сгорания: Теория, моделирование и расчет процессов*. Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2004. 344 с.

## References

- [1] Kovalevich M.V. Raschet rezhimov pnevmotermicheskoi formovki detalei korobchatoi formy v rezhime sverkhplastichnosti [Payment modes pnevmotermicheskoy molding parts box form in superplasticity]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo* [Forging and Stamping Production]. 2006, no. 9, pp. 35–39.
- [2] Botashev A.Iu., Bisilov N.U. Issledovanie rabocheho protsessa ustroystva dlia gazovoi shtampovki s dvukhstoronnim nagrevom zagotovki [Study workflow device for forming a two-way gas heating billets]. *Obrabotka materialov davleniem: Sbornik nauchnykh trudov* [Materials processing pressure: Collection of scientific papers]. Kramatorsk, Donbass State Engineering Academy publ., 2010, no. 4(25), pp. 126–132.
- [3] Botashev A.Iu., Musaev A.A. Issledovanie i razrabotka dvukhkamernogo ustroystva dlia gazovoi listovoi shtampovki [Research and development of a dual-chamber device for gas stamping]. *Obrabotka materialov davleniem: Sbornik nauchnykh trudov* [Materials processing pressure: Collection of scientific papers]. Kramatorsk, Donbass State Engineering Academy publ., 2011, no. 1(26), pp. 221–226.
- [4] Sobolev Ia.A. Tekhnologiya izgotovleniya polusfer iz titanovogo splava VT23 metodom gazovoi formovki v usloviakh sverkhplastichnosti [Manufacturing technology of hemispheres made of titanium alloy VT23 by gas forming process in superplasticity conditions]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* [Procurement of production engineering]. 2013, no. 8, pp. 25–27.
- [5] Botashev A.Iu., Musaev A.A. Razrabotka, issledovanie i sozdanie dvukhkamernogo ustroystva dlia gazovoi listovoi shtampovki [Development, reseach and construction of two-chamber device for gas sheet forming]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* [Production engineering procurement]. 2012, no. 3, c. 20–23.
- [6] Musaev A.A. Eksperimental'nye issledovaniia gazovoi listovoi shtampovki na dvukhkamernom ustroystve [Experimental studies of gas sheet forming using two-chamber device]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* [Production engineering procurement]. 2012, no. 4, pp. 19–23.
- [7] *Teplotekhnika* [Heating engineer]. Ed. Shatrov M.G. Moscow, Izdatel'skii tsentr «Akademii» publ., 2013. 288 p.
- [8] Burov A.L. *Sgoranie v porshnevnykh dvigateliakh* [Combustion in piston engines]. Moscow, MSIU publ., 2006. 76 p.
- [9] Sharoglazov B.A., Farafonov M.F., Klement'ev V.V. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia: Teoriia, modelirovanie i raschet protsessov* [Internal combustion engines: Theory, modeling and calculation processes]. Cheliabinsk, SUSU publ., 2004. 344 p.

Статья поступила в редакцию 13.10.2014

## Информация об авторах

**БОТАШЕВ Анвар Юсуфович** (Черкесск) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология и оборудование пищевых производств». Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия (369000, Черкесск, Российская Федерация, Ставропольская ул., д. 36, e-mail: botashev11@mail.ru).

**МУСАЕВ Абубакар Абдрахманович** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация и технический сервис машин». Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия (369000, Черкесск, Российская Федерация, Ставропольская ул., д. 36, e-mail: brain\_95@mail.ru).

## Information about the authors

**BOTASHEV Anvar Yusufovich** (Cherkessk) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Technology and Equipment of Food Production» Department. North Caucasian State Academy of Humanities and Technology (Stavropol'skaya str., 36, 369000, Cherkessk, Russian Federation, e-mail: botashev11@mail.ru).

**MUSAEV Abubakar Abdrakhmanovich** (Cherkessk) — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of «Operation and Maintenance of Machines» Department. North Caucasian State Academy of Humanities and Technology (Stavropol'skaya str., 36, 369000, Cherkessk, Russian Federation, e-mail: brain\_95@mail.ru).