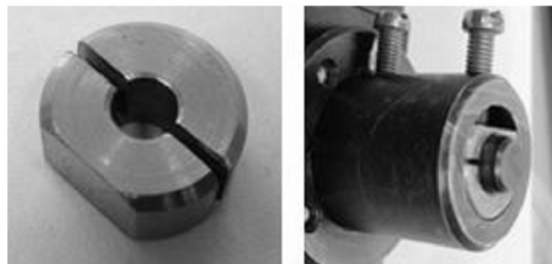




в



г

Схема испытаний «палец – диск» (окончание): в – верхний образец «палец»; г – держатель образца

В результате производства 600 деталей с использованием внутренней оправки с многозаходными спиральными выступами, на которые нанесено наноструктурированное PVD-покрытие, было определено, что износостойкость такой оснастки повышается в 1,5-2 раза, а вероятность ее поломки, соответственно, значительно снижается. Помимо снижения вероятности простоя штамповочного участка также снизилось и усилие выполнения технологического перехода (за счет снижения коэффициента трения между инструментом и заготовкой) на 10 %, что увеличило скорость выполнения операции и снизило процент брака в производстве изделий.

Получено 11.09.2015

#### Библиографические ссылки

1. Пат. РФ № 113189 МПК В21J5/12. Устройство изготовления деталей с внутренними спиральными рифлями / Ю. О. Михайлов, Д. Г. Дресвянников, С. Н. Князев. Оpubл. 10.02.2012.
2. Михайлов Ю. О., Дресвянников Д. Г., Князев С. Н. Способ получения трубчатых заготовок с нарезами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1. – С. 81.
3. Князев С. Н., Михайлов Ю. О. Методика расчета технологического усилия редуцирования трубной заготовки с оправкой // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 1(25). – С. 45–47.
4. Князев С. Н., Михайлов Ю. О., Дресвянников Д. Г. Математическое и компьютерное моделирование технологического процесса редуцирования трубной заготовки с оправкой // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 1(25). – С. 47–49.

УДК 536.24: 519.63

С. С. Макаров, кандидат технических наук, доцент, Институт механики УрО РАН, Ижевск  
 К. Э. Чекмышев, аспирант, Институт механики УрО РАН, Ижевск  
 Е. В. Макарова, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК КВАЗИСТАЦИОНАРНЫМ ПОТОКОМ ВОДЫ С ПУЗЫРЬКАМИ ВОЗДУХА\*

В ранее опубликованных работах [1, 2, 3] приводятся результаты математического моделирования процесса теплообмена при охлаждении высокотемпературной поверхности металла потоком воды. Проведенные исследования начальной стадии теплообмена при спрейерном охлаждении металлических изделий в [4] показали, что у поверхности закаливаемого изделия образующийся пар моментально сносится набегающим потоком жидкости. Теплота, затрачиваемая на парообразование, зависит от скорости потока жидкости и массы охлаждаемого металлического тела и составляет незначительную часть от всей отведенной теплоты в

начальный период охлаждения. При математическом моделировании движения пузырька в потоке жидкости около нагретой поверхности металла [5] установлено, что температура пузырька в потоке воды меняется также незначительно. Это объясняется малым временем его нахождения около нагретого металла – порядка долей секунды. Потоки испаряющегося пара и растворенного газа в пузырек малы, и роста пузырька от начального его размера не происходит. В процессе съема тепла активно участвует слой жидкости малой толщины – порядка долей миллиметра, а температура основной части потока практически не изменяется.

Результаты решения задачи тепломассобмена в пузырьке, находящемся в потоке жидкости при охлаждении высокотемпературного металла [6], показывают, что увеличение радиуса пузырька и его температуры происходит в зависимости от скорости перемещающегося потока воды вдоль нагретой поверхности и имеет нелинейный характер. Анализ полученных результатов показывает, что для математического описания движения потока воды с пузырьками для режимов спрейерного охлаждения возможно применять упрощенные модели движения пузырьков сред.

В работе [7] рассмотрена математическая модель процесса охлаждения двухфазной водо-воздушной средой металлических заготовок, нагретых под закалку. Расчетная область представлена в виде совокупности гидродинамических и тепловых конечных элементов, моделирующих расчетный объем сплошной среды и описываемых аналогами физических уравнений сохранения энергии, количества движения, неразрывности течения и состояния среды. Коэффициент тепловой емкости среды записывается с учетом удельной теплоты парообразования, затрачиваемой на превращение воды в пар. Приведены результаты, показывающие изменение интенсивности отвода тепла от металлических заготовок в зависимости от объемного содержания воздуха в охлаждающей среде и скорости ее подачи.

В работе [8] приводятся результаты математического моделирования охлаждения осесимметричной металлической заготовки из конструкционной стали 30ХГСА квазистационарными потоками охлаждающей среды. Дается математическое описание решения задачи конвективного теплообмена при охлаждении водой и воздухом. Анализируются результаты численных расчетов параметров теплообмена в зависимости от геометрии, теплофизических свойств веществ и времени процесса.

Настоящая работа является продолжением исследований и посвящена построению и исследованию математической модели охлаждения осесимметричных металлических заготовок квазистационарным потоком воды с пузырьками воздуха.

#### Математическая модель квазистационарного потока воды с пузырьками воздуха

Рассмотрим случай, когда поверхность высокотемпературной осесимметричной заготовки обтекает стационарный одномерный поток воды. Тогда уравнение неразрывности можно записать в виде

$$F\rho V = \text{const}, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения потока;  $\rho$  – плотность;  $V$  – скорость потока воды.

Уравнение движения по направлению вдоль продольной оси  $x$ :

$$\frac{d}{dx}(F\rho V^2) + F \frac{dp}{dx} = -\Pi\tau, \quad (2)$$

где  $p$  – давление;  $\Pi$  – смоченный периметр поперечного сечения потока;  $\tau$  – напряжение трения, возник-

ающие в жидкости при контакте с поверхностью заготовки.

Учитывая равенство (1) при  $F = \text{const}$  и  $\rho = \text{const}$ , имеем  $V = \text{const}$ . Поэтому уравнение импульса можем записать в виде

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\Pi\tau}{F}. \quad (3)$$

Уравнение сохранения энергии запишем в виде

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{V^2}{2} + cT_1 + \frac{p}{\rho} \right) = \frac{\Pi\alpha(T_m - T_1)}{F\rho V}.$$

Отсюда с учетом (3) найдем:

$$c \frac{dT_1}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = c \frac{dT_1}{dx} - \frac{\Pi\tau}{\rho F} = \frac{\Pi\alpha(T_m - T_1)}{F\rho V},$$

или

$$\frac{dT_1}{dx} = \frac{\Pi}{cF} \left( \frac{\tau}{\rho} + \frac{\alpha(T_m - T_1)}{\rho V} \right). \quad (4)$$

Здесь  $c$  – удельная теплоемкость среды;  $T_1$  – температура охлаждающего потока среды;  $T_m$  – температура поверхности заготовки;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

В результате решения уравнений (1)–(4) можно рассчитать температуру охлаждающей среды (воды) при движении вдоль поверхности заготовки.

Распределение температур в металлической заготовке находится решением уравнения теплопроводности, в котором удельная теплоемкость  $c = c(T)$ , плотность  $\rho = \rho(T)$ , теплопроводность  $\lambda = \lambda(T)$  зависят от температуры:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \nabla T). \quad (5)$$

Здесь  $t$  – время процесса;  $T$  – температура.

При условии симметричного распределения температур относительно оси  $x$  уравнение (5) примет вид

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (6)$$

Здесь  $r$ ,  $x$  – пространственные координаты, вдоль которых рассматривается процесс теплопроводности.

Для интенсивных тепловых процессов, происходящих при охлаждении высокотемпературных металлических заготовок, необходим учет времени релаксации тепловых напряжений и теплоты внутренних источников. В этом случае уравнение (6) примет вид гиперболического уравнения теплопроводности:

$$c\rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \tau_r \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_v + \tau_r \frac{\partial q_v}{\partial t}, \quad (7)$$

где  $\tau_r$  – время релаксации тепловых напряжений;  $q_v$  – теплота внутренних источников.

Математическая модель и численный алгоритм решения задачи охлаждения металлической заготовки цилиндрической формы продольными квазистационарными потоками воды с учетом времени релаксации тепловых напряжений и внутренних источников тепла, вызванных полиморфными превращениями, приведены в работе [9].

Для дальнейшего анализа примем расчетную схему полой металлической заготовки цилиндрической формы (рис. 1). Заготовка ограничена внешним радиусом  $r_m$ , внутренним радиусом  $r_0$  и длиной  $L$ . Пойлый цилиндр обтекают квазистационарные потоки воды, двигающиеся продольно оси  $x$  между радиусами  $r_m$  и  $r_l$  со скоростью  $V_1$  и температурой  $T_{l1}$  и во внутреннем канале цилиндра радиусом  $r_0$  со скоростью  $V_2$  и температурой  $T_{l2}$ . Движение потоков может происходить как в одном направлении, так и противотоком.

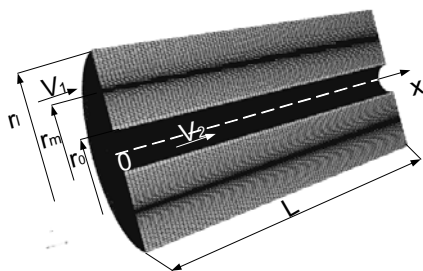


Рис. 1. Расчетная схема цилиндра, охлаждаемого потоками воды

Начальные условия для заготовки:

$$T(x, r, 0) = T_{m0} \text{ при } x \in [0, L], r \in [r_0, r_m].$$

Краевые условия:

$$\frac{\partial T_m}{\partial x} = 0 \text{ при } x = 0, x = L;$$

$$\alpha_{1x}(T_m - T_{l1}) = -\lambda \frac{\partial T_m}{\partial r} \text{ при } r = r_m;$$

$$\alpha_{2x}(T_m - T_{l2}) = -\lambda \frac{\partial T_m}{\partial r} \text{ при } r = r_0.$$

Начальные условия для потока:

$$T_{l1}(x, r, 0) = T_l, V_1(x, r, 0) = V_1 \text{ при } x \in [0, L], r \in [r_m, r_l];$$

$$T_{l2}(x, r, 0) = T_l, V_2(x, r, 0) = V_2 \text{ при } x \in [0, L], r \in [0, r_0].$$

Краевые условия:

$$T_{l1} = T_l \text{ и } T_{l2} = T_l \text{ при } x = 0;$$

$$\frac{\partial T_l}{\partial x} = 0 \text{ при } x = L; \quad \frac{\partial T_l}{\partial r} = 0 \text{ при } r = r_l.$$

Будем считать, что в потоке воды присутствуют отдельные пузырьки, заполненные воздухом. Кинетика пузырьковых сред и гидродинамические аспекты течения приводятся в работах [10, 11, 12]. Возьмем за основу модель одномерного пузырькового течения вдоль оси  $x$  при отсутствии фазовых переходов [13].

Имеем следующие уравнения, описывающие поведение пузырька в потоке:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(\rho_2 R^3) &= 0, \quad p_1 = p_2 - \frac{2\sigma}{R}, \quad \rho = \rho_1(1 - \varphi_2) + \rho_2\varphi_2, \\ \varphi_2 &= \frac{3}{4}\pi R^3 n, \quad \rho_2 = \frac{p_2}{R_2 T_2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\varphi$  – объемное газосодержание;  $R$  – радиус пузырьков;  $R_2$  – удельная газовая постоянная;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе пузырька;  $n$  – концентрация пузырьков. Индекс 1 – параметры жидкой фазы, 2 – параметры газовой фазы.

Будем считать, что в воде в начальный момент времени равномерно распределены пузырьки с начальным радиусом  $R_0 \approx (10^{-4} \dots 10^{-6})$  м и концентрацией  $n \approx (10^{11} \dots 10^{13}) \text{ м}^{-3}$  [14].

Коэффициент теплоотдачи будем определять по формулам конвективного теплообмена для потока воды как в [15, 16].

Влияние объемного газосодержания на границу существования пузырькового течения при однонаправленном течении двух фаз исследованы недостаточно. Диапазон объемного газосодержания при котором нарушается пузырьковый режим широк и составляет 0,1...0,6 [17]. При этом жидкость приобретает свойство неньютоновских сред, что приводит к необходимости использовать сложные реологические уравнения.

Как показывает предварительный анализ для потока воды с пузырьками воздуха, присутствующих в малых объемах, можно принять, что  $T = T_1$ ,  $\lambda = \lambda_1$ ,  $c = c_1$ . Течение можно считать ньютоновским, а эффективную вязкость определять как в [18]:  $\mu = \mu_1(1 + \varphi)$ . Следовательно, напряжение трения, возникающие в жидкости при контакте с поверхностью заготовки, определим как в [19].

### Результаты численных расчетов

Численные решения проведены для нагретых осесимметричных металлических заготовок. Распределение температуры заготовки  $T_m = f(x, r, t)$  при граничных условиях III рода определяется решением уравнений (2)–(4) методом Рунге – Кутты четвертого порядка с автоматическим выбором шага интегрирования по координате для каждого шага интегрирования по времени. Согласно принятым допущениям величина объемного газосодержания  $\varphi$  влияет только на значения плотности среды. Температуру начала полиморфного превращения стали 30ХГСА примем 350 °С.

Рассмотрим охлаждение осесимметричной заготовки потоком воды. Заготовка из стали 30ХГСА. Внутренний радиус канала цилиндра  $r_0 = 0,01$  м, наружный радиус цилиндра  $r_m = 0,022$  м, радиус поверхности потока воды  $r_l = 0,027$  м. Скорость потока воды  $V_1 = 10$  м/с на внешней границе цилиндра и  $V_2 = 10$  м/с во внутреннем канале цилиндра. Длина  $L = 250$  мм. Начальная температура цилиндра  $T_m = 850$  °С, воды  $T_l = 20$  °С. Расчетное время  $t = 1$  с, начальный шаг по времени  $\Delta t = 10^{-5}$  с. Теплофизические свойства воды и воздуха приняты согласно [20], а стали – согласно [21]. По теоретическим оценкам

время релаксации тепловых напряжений  $\tau_r$  для металлов составляет  $10^{-11}$  с. Тепловой эффект полиморфного превращения металла при охлаждении  $q_v$  для стали с содержанием углерода 0,4 % составляет 49 кДж/кг. Движение потоков воды примем в одном направлении. Диапазон изменения объемного газосодержания воздуха в потоке воды примем  $\varphi = 0 \dots 0,1$ .

На рис. 2 приведены значения температур модельной пузырьковой среды  $T_l$  при  $\varphi = 0$  и  $T_{l(\varphi)}$  при  $\varphi = 0,1$ . Температура поверхности заготовки, соответственно,  $T_m$  при  $\varphi = 0$  и  $T_{m(\varphi)}$  при  $\varphi = 0,1$ .

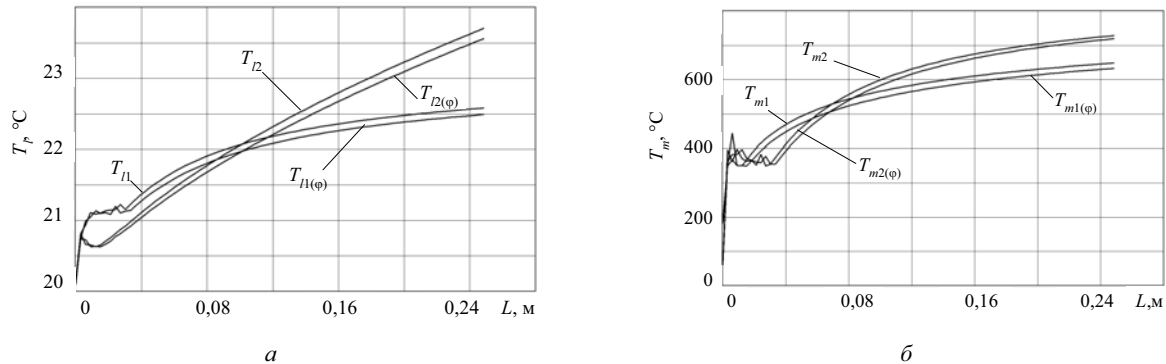


Рис. 2. Температуры среды (а) и заготовки (б)

Из проведенных расчетов видно, что температура воды, как и температура металла, при отсутствии газовой фазы  $\varphi = 0$  в потоке воды больше аналогичных значений при газосодержании в потоке воды  $\varphi = 0,1$ . Начальные колебания температур есть влияние учета полиморфных превращений, учтенных в уравнениях тепловым эффектом. На рисунке индекс 1 – параметры, относящиеся к наружной поверхности цилиндра, а индекс 2 – к внутреннему каналу цилиндра.

На рис. 3 приведены значения приведенных температур поверхности металлической заготовки в зависимости от объемного содержания потока охлаждающей воды.

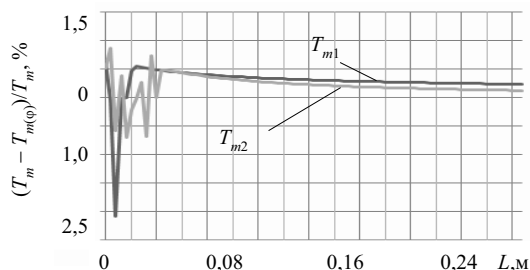


Рис. 3. Приведенная температура воды с пузырьками воздуха

Как показали расчеты, начальные колебания температуры, вызванные полиморфным превращением в охлаждаемом материале, проявляются на начальной стадии (в районе температуры 350 °С). Отклонение

по величине температуры поверхности материала достигает 2,5 % при учете наличия газосодержания в потоке воды  $\varphi = 0,1$ . Влияние эффектов полиморфного превращения на температуру охлаждающей среды на порядок меньше.

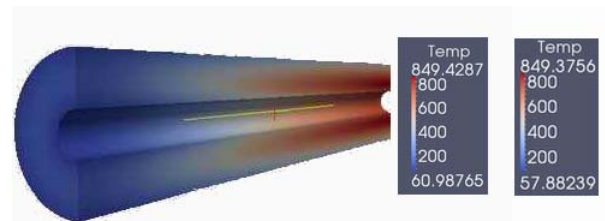


Рис. 4. Температурное поле заготовки

Видно, что полученное за расчетный период температурное поле заготовки (рис. 4), охлаждаемой потоком воды с пузырьками воздуха и без таковых, отличается незначительно. Причем меньшее значение температур соответствует охлаждающему потоку воды с газосодержанием воздуха  $\varphi = 0,1$ .

### Заключение

Приведенные в статье математическая модель охлаждения осесимметричных металлических заготовок квазистационарным потоком воды с пузырьками воздуха и результаты численных расчетов параметров теплообмена показывают потенциальную возможность использования полученного алгоритма для проведения предварительных оценок теплового состояния заготовок в потоке охлаждающей среды с наличием небольшого газосодержания.

## Библиографические ссылки

1. Макаров С. С. Исследование начальной стадии теплообмена при спрейерном охлаждении металлических изделий // Химическая физика и мезоскопия. – 2010. – № 3(12). – С. 325–332.

2. Макаров С. С., Дементьев В. Б., Макарова Е. В. Математическое моделирование движения пузырька в потоке жидкости около нагретой поверхности металла // Химическая физика и мезоскопия. – 2009. – № 3(11). – С. 289–296.

3. Макаров С. С. Моделирование тепло- и массообмена в пузырьке, находящемся в жидкости, при спрейерном охлаждении высокотемпературного металла // Вестник Удм. ун-та. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2010. – № 4. – С. 96–100.

4. Макаров С. С. Исследование начальной стадии теплообмена при спрейерном охлаждении металлических изделий.

5. Макаров С. С., Дементьев В. Б., Макарова Е. В. Математическое моделирование движения пузырька в потоке жидкости около нагретой поверхности металла.

6. Макаров С. С. Моделирование тепло- и массообмена в пузырьке, находящемся в жидкости, при спрейерном охлаждении высокотемпературного металла.

7. Макаров С. С., Храмов С. Н. Математическое моделирование водо-воздушного охлаждения металлических заготовок в процессе термообработки // Вестник ИжГТУ. – 2011. – № 2. – С. 47–51.

8. Математическое моделирование охлаждения при закатке осесимметричных металлических заготовок //

Получено 29.09.2015

С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев, С. Н. Храмов, Е. В. Макарова // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 3(63). – С. 38–43.

9. Липанов А. М., Макаров С. С. Численное решение задачи охлаждения полых металлических заготовок цилиндрической формы продольными потоками воды // Химическая физика и мезоскопия. – 2014. – № 4(16). – С. 524–529.

10. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения / под ред. И. Т. Аладьева. – М. : Мир, 1972. – 440 с.

11. Нигматулин Р. Н. Динамика многофазных сред : в 2 ч. – М. : Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.

12. Ван Вейнгарден Л. Одномерные течения жидкостей с пузырьками газа / под общ. ред. В. В. Гогосова и В. Н. Николаевского // Реология суспензий : пер. с англ. – М. : Мир, 1975. – С. 68–103.

13. Нигматулин Р. Н. Указ. соч.

14. Там же.

15. Липанов А. М., Макаров С. С. Указ. соч.

16. Макаров С. С., Чекмышев К. Э., Макарова Е. В. Математическая модель охлаждения цилиндрической заготовки одномерным нестационарным потоком воды // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. – 2014. – № 4(207). – С. 196–202.

17. Уоллис Г. Указ. соч.

18. Там же.

19. Липанов А. М., Макаров С. С. Указ. соч.

20. Вукалович М. П. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М. : Машиностроение, 1967. – 160 с.

21. Стали и сплавы. Марочник / под ред. В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева. М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

УДК 351.82

**Б. А. Якимович**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

**С. А. Писарев**, доктор технических наук, кандидат экономических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

**Д. В. Чирков**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

**Р. Р. Фархетдинов**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ КУЧНОСТИ СТРЕЛЬБЫ ИЗ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

**В** работах [1, 2] на основе анализа и расчетно-теоретических исследований функционально-конструктивных возможностей основных кинематических схем автоматического оружия дано обоснование целесообразности создания системы стрелкового оружия, основанной на модульном принципе, который, образно говоря, можно считать высшей формой унификации оружия.

Модульный образец оружия, например автомат, предполагает наличие главного объединяющего узла – платформы (аналог ствольной коробки) – и отдельных функциональных узлов-модулей, подсоединяемых к платформе. Меняются модули, изменяется конструкция автомата и его тактико-технические характеристики.

Таким образом, под решение различных боевых задач можно создавать образцы автоматов, собранных на одной платформе, без увеличения номенкла-

туры принимаемых на вооружение новых образцов оружия. При этом увеличивается номенклатура только отдельных модулей, а не самого оружия. В этом случае будут удовлетворяться требования различных потребителей без существенного увеличения номенклатуры оружия при снижении затрат на его производство и эксплуатацию. Предполагается, что потребности в таком оружии могут быть сформированы силовыми структурами и подразделениями Российской армии.

Преимуществом модульной схемы является то, что пользователь оружия, например, автомата калибра 5,45 мм, может при необходимости и наличии дополнительных стволов самостоятельно заменять стволы и тем самым получать другой образец оружия для решения конкретной боевой задачи: укороченный автомат, автомат с повышенной кучностью стрельбы (автомат с более длинным стволом), руч-