

# МЕХАНИКА БЛОЧНОГО ЛУКА

## Ч.3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ВЫСТРЕЛА

*К.В. Добрего*

Статья посвящена рассмотрению блочного лука как механической системы, обсуждению факторов, влияющих на качество выстрела с точки зрения физики.

В первой части рассматривался вопрос геометрии траектории толчка стрелы как важнейшего фактора стабильности и точности выстрела. Во второй части лук рассматривался как колебательная система, изучался вопрос предотвращения нежелательных вибраций при прицеливании и выстреле. В третьей части обсуждаются другие технические моменты, определяющие качество выстрела, а также вопросы общего характера.

Статья носит научно- популярный характер и адресована любителям лучного спорта, желающим углубить понимание механических процессов, происходящих в луке и их влияние на качество стрельбы. Более опытные стрелки могут найти научные основания для совершенствования техники стрельбы. Читатели, не интересующиеся математическими выкладками, могут их пропускать, а останавливаться только на результатах, оценках значений конкретных характеристик лука, иллюстрациях и выводах.

### Введение

В предыдущих статьях были рассмотрены вопросы механики блочного лука, имеющие наибольшее значение для обеспечения стабильной стрельбы, – особенности траектории толчка стрелы и сглаживание вибраций. Помимо этого имеется большое количество других технических факторов и механизмов, влияющих на качество стрельбы, – начиная от относительного размера и расположения скопа и пип-сайта, вопросов клиренса стрелы, блуждания точки опоры лука, толчка стрелы при ее схождении с тетивы и т.п. Наконец имеются вопросы, имеющие общий интерес для лучников, например, как зависит скорость вылета стрелы от параметров и конструкции лука, как зависит величина сброса усилия натяжения лука от геометрии блоков и модулей и другие. В данной статье рассмотрены подобные вопросы.

Следует понимать, что углубляясь в поставленную в начале данной работы проблему, можно находить все новые и новые физико-механические факторы, мешающие «идеальному» выстрелу. Однако исправлять или компенсировать многие из них не имеет смысла в силу их второ-

степенного значения. Ведь, очевидно, что начиная с определенного уровня совершенства оружия, главным препятствием улучшения качества стрельбы становится ограниченность возможностей стрелка.

Информация может быть полезна стрелкам для совершенствования техники выстрела, а также для понимания возможностей и ограничений лука.

### 1. Схождение стрелы с тетивы

Завершающей фазой метания стрелы, оказывающей влияние на качество выстрела, является ее схождение с тетивы. Очевидно, что незначительное усилие срыва концевика с тетивы, направленное по оси стрелы, не влияет на направление вылета и, соответственно, качество выстрела (при этом в практических руководствах по стрельбе рекомендуется контролировать это усилие и оставлять его малым). Однако наличие тормоза тетивы, а точнее, его несимметричное расположение снизу от оси лука, может приводить к толчку концевика стрелы и изменению направления ее вылета. Действительно, резкое торможение тетивы при ее ударе о тормоз, приводит к толчку тетивы вниз, который передается стреле

если к моменту прихода этого возмущения к гнезду она находится в жестком сцеплении с тетивой. В связи с этим, оценим характеристики процесса схождения стрелы с тетивы и возможность невозмущенного вылета стрелы при наличии тормоза.

Схематически система представлена на рис. 1, оценим ее параметры.

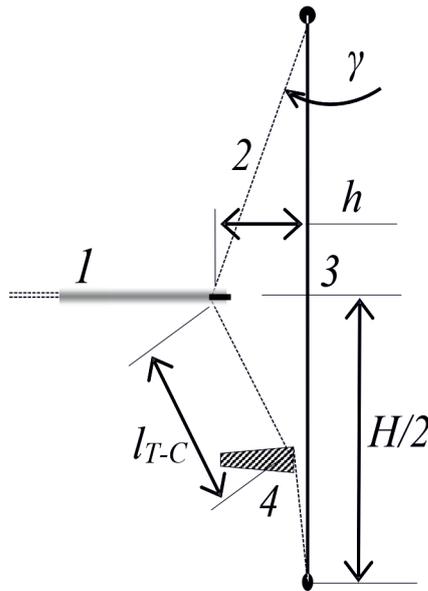


Рис. 1. Торможение тетивы и схождение с ней стрелы:

1 – стрела, 2 – тетива, 3 – начальное положение тетивы, 4 – тормоз тетивы, h – высота прогиба тетивы

Длина тетивы в начальном («нулевом») положении –  $H = 0.7$  [м]; масса свободной части тетивы –  $m_s = 5 \cdot 10^{-3}$  [кг]; материал тетивы – «фастфлайт» с плотностью  $\rho_T = 1000$  [кг/м<sup>3</sup>]; площадь сечения тетивы –  $S = 3 \cdot 10^{-6}$  [м<sup>2</sup>]; модуль упругости тетивы (Юнга) –  $E = 10^9$  [Н/м<sup>2</sup>]; коэффициент упругости тетивы (Гука) –  $k = ES/H \approx 4286$  [Н/м] [2]. Скорость распространения возмущений (продольных волн звука) в тетиве –  $c_0 = \sqrt{E/\rho_T} \approx 1000$  [м/с]. Считаем, что блоки и плечи после полного спуска тетивы неподвижны вследствие их инерции, поэтому, модуль упругости тетивы соответствует упругости материала тетивы. Скорость вылета стрелы –  $v_{\max} = 60$  [м/с], средняя скорость тетивы в конце разгона с учетом неподвижности ее концов  $\bar{v} = v_{\max}/2 = 30$  [м/с].

Время схождения концевика стрелы с тетивы:

$$t_{rel} \approx \frac{l_{кон}}{v_{\max}} \approx 0.17 \cdot 10^{-3} \quad [с], \quad (1)$$

где  $l_{кон} = 10^{-2}$  [м] – длина замка концевика стрелы.

Время прохождения импульса от удара о тормоз тетивы до концевика стрелы определяется скоростью звука в тетиве и длиной участка  $l_{T-C}$ :

$$t_{shock} \sim \frac{l_{T-C}}{c_0} = 0.15 \cdot 10^{-3} \quad [с]. \quad (2)$$

Из оценок (1) и (2) видно, что времена  $t_{rel}$  и  $t_{shock}$  примерно одинаковы, следовательно, для предотвращения толчка стрелы при ее схождении с тетивы необходимо, чтобы концевик разъединился с тетивой очень быстро.

Рассмотрим динамику тетивы и концевика стрелы после прохождения «нулевой» позиции тетивы. Найдем прогиб тетивы  $h$  (рис. 1) в случае отсутствия тормоза из закона сохранения энергии

$$\frac{m_s \bar{v}^2}{2} = \frac{k \cdot \Delta x^2}{2} \quad (3)$$

где  $\Delta x = 2h \sin \gamma$  – удлинение тетивы, рис.1. Из геометрии следует  $\gamma = \arctg\left(\frac{2h}{H}\right)$ , поэтому

$$\Delta x = h \frac{4h/H}{\sqrt{1+(2h/H)^2}}, \quad \text{а для малых отклонений}$$

$$\Delta x \approx \frac{4h^2}{H}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует:

$$h = \sqrt[4]{\frac{m_s \bar{v}^2 H^2}{8k}}. \quad (5)$$

Расчет согласно (5) дает высоту прогиба  $h \approx 0.09$  [м], а максимальное ускорение, соответствующее максимальному усилию на тетиве –  $a_{\max} \approx 39000$  [м/с<sup>2</sup>]. С другой стороны, при равноускоренном движении тетивы ее ускорение и время до остановки найдется из простейших уравнений движения  $h = v_0 t - at^2/2$  и  $0 = v_0 t - at$ :

$$a \approx 1200 \text{ [м/с}^2\text{]}, \quad t \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ [с]}.$$

Поскольку две оценки ускорения сильно различаются, ускорение тетивы неравномерное. Предполагаем, что ускорение линейно растет с высотой прогиба тетивы до величины  $a_{\max}$ :

$$a = \frac{a_{\max}}{h} x. \quad (6)$$

Считая усилие срыва стрелы с тетивы 1 Ньютон и используя (6), видим, что стрела начнет расцепляться с тетивой после прохождения нескольких миллиметров после «нулевого» положения. Определим момент полного разделения концевика стрелы и тетивы. Для этого найдем решение (6) как дифференциального уравнения:

$$x = \frac{v_0}{\sqrt{a_{\max}/h}} \sin(\sqrt{a_{\max}/h} \cdot t). \quad (7)$$

Расстояния между тетивой и концевиком запишем в соответствии с (7):

$$\Delta h = v_0 \cdot t - \frac{v_0}{\sqrt{a_{\max}/h}} \sin(\sqrt{a_{\max}/h} \cdot t). \quad (8)$$

На рис. 2 представлены графики положения тетивы и концевика стрелы после прохождения «нулевой» позиции, рассчитанные по (7), а также расстояние между ними согласно (8). Из представленных данных видно, что разъединение концевика и тетивы произойдет на расстоянии около 8 см (пунктирная линия) в то время как импульс удара о тормоз достигнет концевика уже при прохождении 1.5–2 см (кружки). Влияние тормоза на динамику тетивы может быть учтено в (7) за счет уменьшения величин  $v_0$ ,  $H$ ,  $m_s$  и соответствующее увеличение  $k$  и  $a_{\max}$  после удара тетивы о тормоз (кривая 4 на рис. 2).

В действительности уравнение, описывающее динамику тетивы сложнее, чем (6) поскольку скорость звука в тетиве ограничена, однако решения (7), (8), как увидим ниже, достаточно точны.

Таким образом, тетива начинает освобождаться от стрелы после прохождения нескольких миллиметров после прохода нулевой координаты. Окончательное разъединение со стрелой происходит существенно позже, – по прохождении 4–6 см. Поэтому концевик стрелы получает толчок вниз, *связанный с ударом тетивы о тормоз. Избежать* влияния этого толчка на вылет стрелы можно устранив жесткое ограничение гнезда

тетивы сверху, либо симметрично установив два тормоза (сверху и снизу).

### Визуализация схождения стрелы с тетивы

Благодаря технической поддержке лаборатории физико-химической гидродинамики Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси были сняты видеоклипы разгона и выброса стрелы с частотой 3 и 5 тыс. кадров в секунду. На рис. 3 представлена кинограмма выброса стрелы.

Данные видеосъемки позволяют точно определить динамику разгона и скорость вылета стрелы, время начала и окончания падения полочки (для падающей полочки), момент расщепления стрелы и тетивы, амплитуду и частоту колебаний тетивы и других элементов лука, микросмещения лука при выстреле и другие параметры.

В данном эксперименте лук МК СВ50 был ослаблен на 10 фунтов, использовалась стрела массой 32 грамма, скорость ее вылета составила 61 [м/с]. Момент расщепления стрелы – 1 [мсек] после прохождения нулевой позиции, а расстояние расщепления – 6 [см]. Максимальная амплитуда заброса тетивы – 9 [см]. Период первого колебания тетивы – 13.3 [мсек], второго колебания – 12 [мсек], третьего – 10.7 [мсек]. Полное успокоение тетивы происходит за 10 периодов или за 70 [мсек]. Стрела вылетела с небольшим отклонением от осевого направления (наконечник приподнят на 3 [мм] от хвостовика, – положительный тангаж).

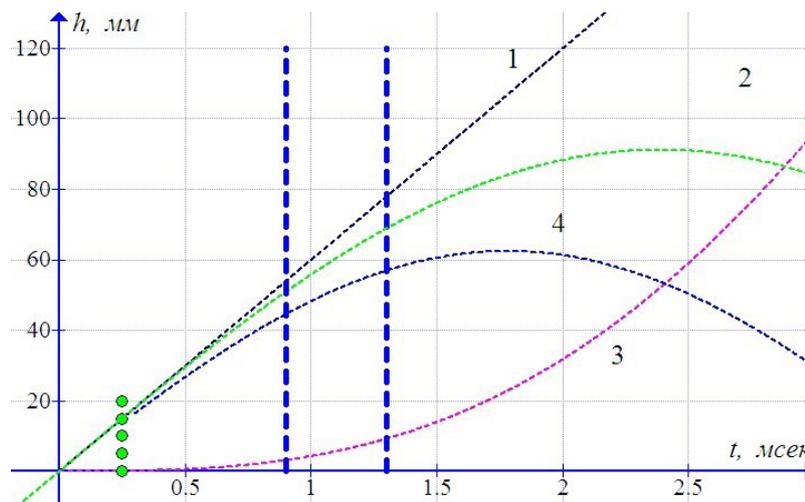


Рис. 2. Положение концевика стрелы и тетивы при вылете от времени после пересечения «нулевой» линии: 1 – концевик стрелы, 2 – седло тетивы в отсутствии тормоза, 3 – расстояние между концевиком и тетивой (без тормоза), 4 – седло тетивы при наличии тормоза, кружки – момент прихода толчка от удара о тормоз, вертикальные штриховые линии – момент разделения стрелы и тетивы, в случае наличия тормоза (левая) и без него (правая)

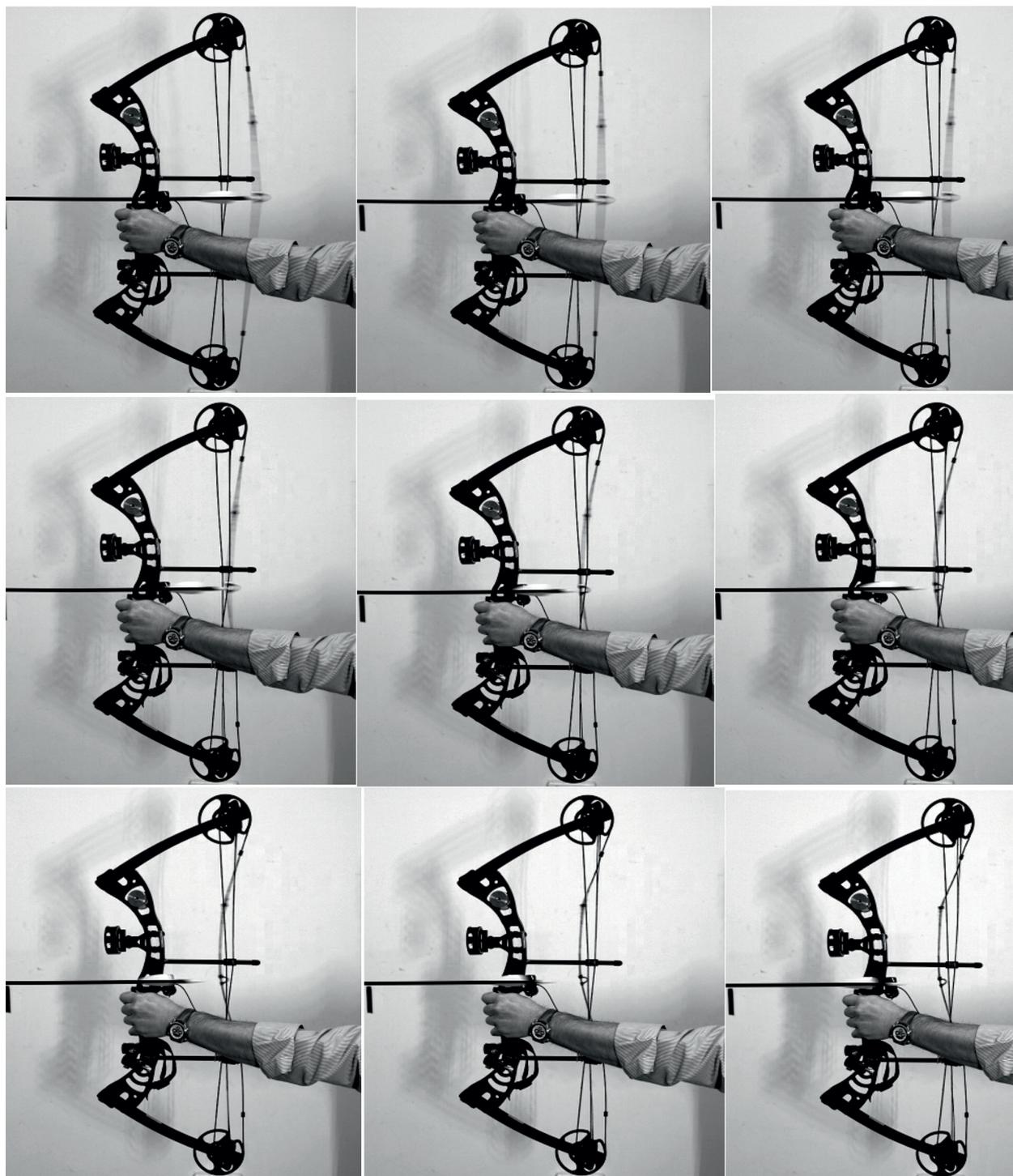


Рис. 3. Кинограмма выброса стрелы. Интервал между кадрами – 0.0333 мсек

Как видно, простая модель (9), (10), приведенная в начале раздела хорошо воспроизводит динамику движения тетивы и ее расщепления с концевиком стрелы. Погрешности связаны, прежде всего, с неточностью задания коэффициента упругости тетивы, не учетом движения плеч и модулей на стадии выброса стрелы.

Принятая нами для расчетов скорость стрелы практически точно совпала с установленной по кинограмме.

Использование скоростной видеосъемки позволяет детально изучать динамику системы «лук – стрела – стрелок», однако эта задача выходит за рамки данной статьи.

### Блуждание точки опоры при прицеливании и выстреле

Фактором, влияние которого на стабильность выстрела легко недооценить, является неточная повторяемость положения точки опоры на рукоятке от выстрела к выстрелу и блуждание этой точки во время прицеливания. Если исходить из того, что ширина рукоятки около 2 см, а длина упорной части рукоятки около 6 см, то вероятно блуждание точки опоры в диапазоне  $\pm 5$  мм по ширине и  $\pm 10$  мм по высоте рукоятки даже у спортсмена высокой квалификации. Используя геометрическое построение (рис. 4), легко показать, что смещение точки опоры  $A$  по своему эффекту на толчок стрелы эквивалентно аналогичному сдвигу положения полочки.

Поясним это утверждение. При смещении точки опоры линия направления усилия тетивы  $BC'A'$  отклоняется от оси стрелы  $BCA$  (рис. 4,б) на угол  $\approx \Delta x/(r+l)$ . Линия направления усилия  $BCA$  смещается от оси стрелы (при ее смещении) на аналогичный угол  $\approx \Delta y/(r+l)$ .

Стрелки знают, что положение полочки настраивается с точностью до долей миллиметра, а смещение ее на несколько миллиметров весьма существенно влияет на угол вылета стрелы и ее вибрации. Таким образом, блуждание точки опоры – весьма существенный, хотя и не очевидный фактор качества и стабильности стрельбы.

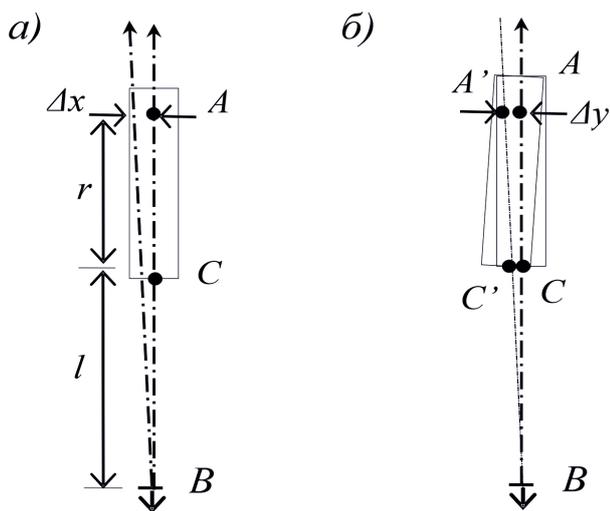


Рис. 4. Геометрическая схема эффекта сдвига точки опоры  $A$ :

а) смещение положения полочки на  $\Delta x$ , б) смещение точки опоры  $A$  на  $\Delta y$ .  $C$  – точка выхода тетивы

### 2. Стартовый толчок стрелы при спуске тетивы

При спуске тетивы имеет место быстрый толчок петельки вниз независимо от геометрии последующей траектории толчка (особенности траектории проанализированы в [1]). Назовем его стартовый толчок. Природа его очевидна (рис. 5) и обусловлена тем, что в натянутом состоянии вектор силы натяжения  $F_H$  не совпадает с осью стрелы, а направлен вверх, поскольку точка опоры  $A$  располагается ниже стрелы (поддерживающей ее полочки). Составляющая силы натяжения, направленная вверх, перераспределяет усилие между нижней и верхней частями тетивы, – нижняя часть тетивы получает дополнительное усилие, с верхней некоторое усилие снимается, в результате петелька смещается вверх. При спуске тетивы происходит мгновенный сброс усилия натяжения, натяжение верхней и нижней частей тетивы выравнивается, вследствие чего петелька смещается вниз, а затем следует по траектории обусловленной самим луком [1], рис. 6.

Величина компоненты силы натяжения вверх легко оценивается геометрически  $F_{Up} \cong F_H \cdot r/L$  и при усилии  $F_H = 80$  [Н] составляет 5 [Н]. На эту величину перераспределяются усилия натяжения верхней и нижней частей тетивы.

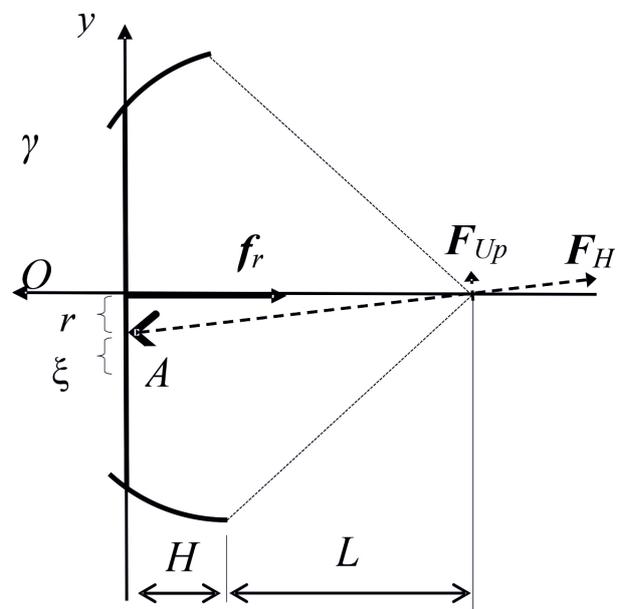


Рис. 5. Схема возникновения усилия, перераспределяющего натяжение в нижней и верхней частях тетивы:

$A$  – точка опоры,  $O$  – ось стрелы,  $F_H$  – сила натяжения

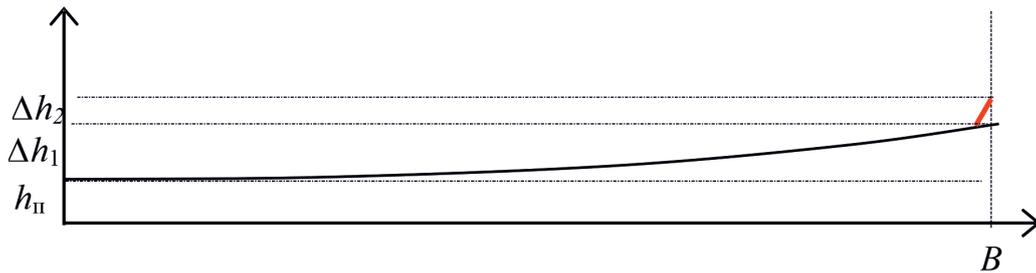


Рис. 6. Траектория толчка стрелы с участком стартового толчка вниз:

$B$  – координата точки удержания петельки,  $h_n$  – высота полочки,  $\Delta h_1$  – уход траектории вследствие нецентрального расположения стрелы,  $\Delta h_2$  – уход траектории вследствие стартового толчка

Однако смещение петельки вверх точно оценить сложно, поскольку оно будет зависеть от степени приближения натяжения к «стенке», т.е. состоянию жесткого упора блоков. Простое экспериментирование показывает, что длина смещения может быть 3–5 мм.

Заметим, что нестабильная сила натяжения тетивы при прицеливании сказывается на величине стартового толчка, а следовательно приводит к нестабильности выстрела.

Для уменьшения/компенсации стартового толчка могут применяться следующие меры. Приближение точки упора  $A$  к оси лука и оси стрелы. При удержании натянутого лука, стрелок имеет возможность приложить усилие вниз компенсирующее компоненту  $F_{up}$ , однако при этом требуется прилагать скручивающее усилие на рукоятку лука, что противоречит принципам техники спортивной стрельбы. Третий, наиболее обоснованный метод компенсации данного эффекта – использование массивного стабилизатора. Действительно легко видеть, что в этом случае возникает момент силы относительно точки опоры  $A$ , компенсирующий  $F_{up}$ . При этом действенная компенсация будет иметь место в случае когда

$$l \cdot g \cdot m' \sim F_{up}(L+H), \quad (9)$$

где  $l$  – длина штанги стабилизатора,  $m'$  – масса груза стабилизатора.

Те есть, необходима достаточно большая масса груза стабилизатора (порядка 300–500 гр), что требует соответствующей физической подготовки лучника.

### 3. Другие технические факторы, влияющие на выстрел

Перечислим некоторые технические факторы, препятствующие стабильному выстрелу и прицеливанию. Важно понимать, что факторы, о которых идет речь, различаются по степени своего влияния

на выстрел и устранение малозначительных факторов не имеет смысла, пока не устранены более существенные. Поэтому необходимо правильно оценивать степень и характер их влияния.

1. Боковой толчок хвостовика в начале разгона стрелы за счет быстрого перераспределения усилия между тетивой и тросами, которые располагаются в разных плоскостях.

Способ компенсации: Снижение величины сброса усилия; изменение геометрии провода тросов; применение более широких и монолитных (более устойчивых к скручиванию) плеч лука; компенсация при помощи наклона блоков.

2. Поворот (сдвиг) лука во время выбрасывания стрелы – отдача лука.

Если бы отдача приводила к плоскому движению лука назад – это не приводило бы к возмущению толчка стрелы, но из-за реакции опоры (опорной руки) и смещенному вниз центру масс лук совершает поворотное движение. Данный фактор проанализирован в первой части статьи [1].

Способ компенсации: Смещение центра масс вверх, приближение точки опоры лука к оси лука.

3. Отклонение оси запястного релиза от оси стрелы приводит к несимметричному соскальзыванию петельки и небольшому толчку влево или вправо хвостовика при спуске.

Способ компенсации: коррекция положения оси релиза при прицеливании, использование кистевого релиза.

4. Плохое совмещение пип-сайта и скопа из-за расплывчатой видимой границы пип-сайта.

Способ компенсации: выбор размеров пип-сайта и скопа так, чтобы кольцо легко позиционировалось внутри поля пип-сайта.

5. Несоплоскостность верхнего, нижнего блока и тетивы. Может приводить к легкому уходу тетивы влево – вправо от оси стрелы. Это слабый эффект.

Способ компенсации: подтяжка тросов. С другой стороны, этот эффект можно использовать для компенсации бокового толчка плеч лука при спуске (родовой дефект) поскольку силовой источник обоих возмущений один и тот же.

6. Касание тетивы подбородком и щекой во время спуска тетивы. Может создавать легкий толчок концевика стрелы вправо.

Способ компенсации: минимизация силы касания стрелы и тетивы лицом.

7. Недостаточно быстрое затухание колебаний лука в диапазоне частот 2–10 Гц.

Способ компенсации: Установление демпферов разной жесткости на стабилизирующих грунтах и на плечах лука.

#### 4. Скорость вылета стрелы в блочном и рекурсивном луке

Скорость вылета стрелы может быть оценена из законов сохранения импульса и энергии. Введенную в систему энергию (энергию натяжения)  $E$  можно измерить, фиксируя усилие при натяжении лука при помощи динамометра, затем перемножая среднее усилие натяжения тетивы на рабочий ход тетивы ( $E = f_{0, \text{среднее}} \cdot L$ ) или измеряя усилие натяжения тетивы на испытательном стенде и суммируя работу по всей длине натяжения.

В идеальном случае из законов сохранения импульса и энергии –  $mv_{\text{л}} = \mu v_c$  – и  $E = mv_{\text{л}}^2/2 + \mu v_c^2/2$  – можно вычислить скорости стрелы и лука и их кинетические энергии.

$$v_c = \sqrt{\frac{2E/\mu}{1+\mu/m}}, v_{\text{л}} = \sqrt{\frac{2E/m}{1+m/\mu}},$$

$$E_c = \frac{E}{1+\mu/m}, E_{\text{л}} = \frac{E}{1+m/\mu}, \quad (10)$$

$m$  – полная масса лука,  $\mu$  – масса стрелы,  $v_c$ ,  $v_{\text{л}}$  – скорость стрелы и лука соответственно.

В реальности запасенная энергия теряется на трение, в том числе и с окружающим воздухом, часть энергии остается в системе в виде остаточных вибраций и колебаний (сумма потенциальной и кинетической энергии частей лука). Некоторый импульс система отдает воздуху, который плечи лука толкают вперед при разгибании. Таким образом в уравнения сохранения должны быть внесены поправки

$$mv_{\text{л}} = \mu v_c + m_{\text{воздух}} v_{\text{плеч}}$$

и  $E - \delta E_{\text{тр}} - \delta E_{\text{ост}} = \mu v_c^2/2 + mv_{\text{л}}^2/2$ ;

где  $m_{\text{воздух}}$  – масса увлеченного плечами лука воздуха,  $v_{\text{плеч}}$  – составляющая скорости плеч, направ-

ленная вперед,  $\delta E_{\text{тр}} –$  потери энергии на трение в системе,  $\delta E_{\text{вибр}} –$  остаточная энергия вибраций в системе. При этом задача определения скорости вылета стрелы, по сути, сводится к оценке величин  $\delta p = m_{\text{воздух}} v_{\text{плеч}}$ ,  $\delta E_{\text{тр}} –$  и  $\delta E_{\text{вибр}}.$

Потери энергии на трение малы и могут быть оценены на уровне ~1 % от изначально переданной в систему энергии. Энергия остаточных вибраций системы может быть более существенной и зависит от кинетической энергии запасенной в частях лука – тетиве, блоках, плечах, рукоятке рассчитанной относительно центра масс лука. Так средняя скорость тетивы в момент схода стрелы равна половине скорости стрелы. При массе тетивы – 0.005 кг, ее кинетическая энергия около 5 % от энергии стрелы. Кинетическая энергия плеч рекурсивного лука – того же порядка, что и кинетическая энергия тетивы. Кинетической энергией плеч блочного лука можно пренебречь поскольку скорость их движения меньше вследствие работы блочной системы, а собственные частоты колебаний очень высоки (из-за высокой жесткости) и поэтому не могут возбуждаться от имеющихся источников возбуждения. (Как упоминалось в части 2 система воспринимает энергию колебаний в том случае, когда частота источника возбуждения близка или по крайней мере сопоставима с собственными частотами системы)

Потерянный (переданный воздуху) импульс оценится как произведение скорости плеч (составляющая в направлении вылета стрелы), площади плеч, толщины присоединенного слоя воздуха (порядка полуширины плеч) и плотности воздуха. Здесь имеются существенные различия между блочным и рекурсивным луками. Как площадь, так и скорость движения плеч у блочного лука существенно меньше. (Согласно «закону рычага» если коэффициент передачи усилия на плечи 3, то расстояние и скорость движения плеч в 3 раза меньше). Можно с уверенностью полагать, что потерянный импульс блочного лука в 10–20 раз меньше, чем у рекурсивного.

Если выразить потери импульса через скорость стрелы и эквивалентную присоединенную массу воздуха  $\kappa_0$ :  $mv_{\text{л}} = \mu v_c + \kappa_0 \cdot v_c = v_c(\mu + \kappa_0)$ , то рабочие формулы для оценки скорости и энергии стрелы и лука примут вид

$$v_c = \sqrt{\frac{2(E - \delta E)}{\mu + (\mu + \kappa)^2/m}}, v_{\text{л}} = \sqrt{\frac{2(E - \delta E)}{m + m^2\mu(\mu + \kappa)^2}},$$

$$E_c = \frac{E - \delta E}{1 + \frac{(\mu + \kappa)^2}{\mu m}}, E_{\text{л}} = \frac{E - \delta E}{1 + \frac{\mu m}{(\mu + \kappa)^2}}. \quad (11)$$

Оценим «потерянный» импульс рекурсивного лука. Суммарная площадь плеч  $S = 240$  [см<sup>2</sup>]. Толщина присоединенного слоя сопоставима с шириной плеч  $\sim 2$  [см], плотность воздуха  $\sim 1$  [кг/м<sup>3</sup>], скорость плеч  $v_{\text{плеч}} \approx v_c / 2 \approx 10$  [м/с], следовательно  $m_{\text{воздух}} v_{\text{плеч}} \sim 5 \text{ гр} \cdot 10$  [м/с] = 0.05 [кг.м/с], а эквивалентная присоединенная масса  $k = 2.5$  [гр].

Основная причина относительно меньшей ско-

рости вылета стрелы рекурсивного лука – меньшая запасенная энергия. Потери энергии на трение – пренебрежимо малы, остаточная энергия вибраций в системе может достигать 10 % от запасенной и выше в рекурсивном луке. Потери импульса за счет толчка воздуха существенно выше у рекурсивного лука и могут достигать 10 % импульса стрелы в зависимости от геометрии плеч.

Табл. 1

Оценки динамических параметров рекурсивного и блочного луков

	Рекурсивный лук	Блочный лук
Энергия натяжения	$E = 100[\text{Н}] \cdot 0.5[\text{м}] = 50$ [Дж]	$E = 200[\text{Н}] \cdot 0.5[\text{м}] = 100$ [Дж]
Масса лука	1 кг	2.5 кг
Масса стрелы	0.025 кг	0.025 кг
Импульс стрелы	1.55 кг.м/с	2.22 кг.м/с
Потерянный импульс	0.05 кг.м/с	0.005 кг.м/с
Скорость вылета стрелы	62 м/с	89 м/с
Энергия стрелы	48 Дж	99 Дж
Скорость отдачи лука	1.56 м/с	0.89 м/с
Энергия отдачи лука	1.2 Дж	0.99 Дж
Остаточная энергия	5 Дж	5 Дж

**Связь величины сброса усилия с геометрией системы блоков**

Найдем связь между величиной сброса усилия лука и геометрией блока, модуля и самого лука.

Три характерных состояния лука, – начальное, максимального усилия и состояние сброса усилия – представлены на рис. 7. Соответствующие геометрические параметры представлены на рисунке.

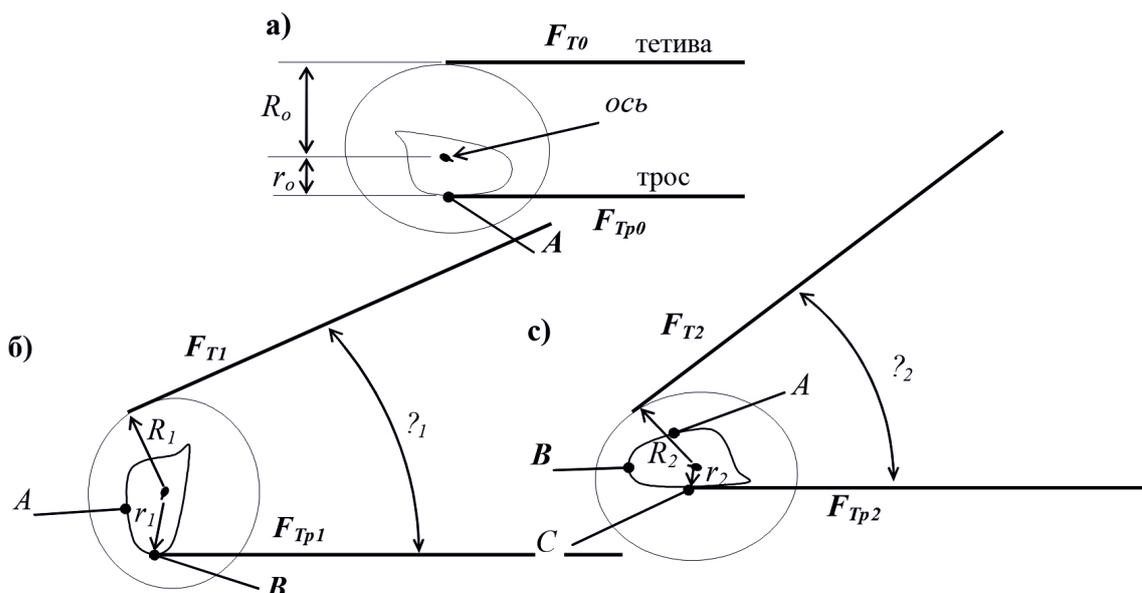


Рис. 7. Характерные состояния блока и соответствующие параметры: а – начальное, б – максимального усилия, с – состояние сброса усилия

На основании баланса сил (моментов сил) записываем уравнения.

$$F_{T0}R_0 = F_{Tp0}r_0 \quad (12)$$

$$F_{axis0} = 2F_{Tp0} + F_{T0} \quad (13)$$

$$F_{T1}R_1 = F_{Tp1}r_1 \quad (14)$$

$$F_{axis1} = 2F_{Tp1} + F_{T1} \cos \gamma_1 \quad (15)$$

$$F_{T2}R_2 = F_{Tp2}r_2 \quad (16)$$

$$F_{axis2} = 2F_{Tp2} + F_{T2} \cos \gamma_2 \quad (17)$$

$$F_{axis1} = F_{axis0} (1 + [AB] / (B/2)) \quad (18)$$

$$F_{axis2} = F_{axis0} (1 + [ABC] / (B/2)) \quad (19)$$

Здесь уравнения (18) (19) построены из приближения закона Гука для общего усилия плеч при сближении осей лука,  $[AB]$  и  $[ABC]$  – длины периметра модуля, определяющие сближение осей лука. Уравнения (12)–(19) записаны приближенно. Пренебрегали изменением направления вектора силы  $F_{axis}$  при натяжении и смещением точки приложения силы к модулю (относительно перпендикуляра), связанным с его сложной геометрией.

Для того чтобы найти сброс усилия используем только геометрические (не силовые) характеристики системы воспользуемся уравнениями (14)–(19). Определим сброс усилия натяжения как

$$\xi = 1 - \frac{F_{T2} \sin \gamma_2}{F_{T1} \sin \gamma_1} \quad \text{и с учетом (14)–(19)}$$

$$\xi = 1 - \frac{1 + [ABC]/(B/2)}{1 + [AB]/(B/2)} \cdot \frac{\cos \gamma_1 + 2R_1/r_1}{\cos \gamma_2 + 2R_2/r_2} \cdot \frac{\sin \gamma_2}{\sin \gamma_1}, \quad (20)$$

где  $\sin \gamma_1 = \frac{L_1}{\sqrt{L_1^2 + (B/2)^2}}$ ,  $\sin \gamma_2 = \frac{L_2}{\sqrt{L_2^2 + (B/2)^2}}$

$$\cos \gamma_1 = \frac{B/2}{\sqrt{L_1^2 + (B/2)^2}}, \quad \cos \gamma_2 = \frac{B/2}{\sqrt{L_2^2 + (B/2)^2}}.$$

Для лука МК СВ50 (ослаблен на 10 фунтов, растяжка 28 дюймов):  $[AB] = 56$  [мм],  $[ABC] = 95$  [мм],  $r_1 = 32$  [мм],  $r_2 = 8$  [мм],  $R_1 = 70$  [мм],  $R_2 = 65$  [мм],  $L_1 = 360$  [мм],  $L_2 = 470$  [мм],  $B/2 = 350$  [мм]. Расчет по формуле (20) дает  $\xi = 63\%$  вместо указанных в паспорте  $70\%$ . Прямое измерение сброса усилия при помощи электронного динамометра показало  $\xi = 1 - 8/22 = 64\%$ . Таким образом, оценка по геометрическим данным лука и блоков дает возможность адекватно (в нашем случае точнее паспортного значения) оценить сброс усилия лука при невозможности прямого измерения динамометром. Заметим, что основной вклад в конечное значение  $\xi$  дает отношение  $\frac{2R_1/r_1}{2R_2/r_2}$ . Формула (20)

показывает какими конструктивными приемами можно увеличить или уменьшить сброс усилия.

## 7. Возбуждения колебаний лука ветром

Природа обтекания воздухом твердых тел такова, что при определенных скоростях возникает регулярное (периодическое) образование и соскальзывание вихрей в кормовой части тела. Вихри создают вибрации как в воздухе, так и в обтекаемом теле. Частота вибраций определяется геометрией обтекаемого тела и величиной, задаваемой скоростью потока  $u$ , вязкостью воздуха  $\mu$  и диаметром тела  $D$ , называемой числом Рейнольдса  $Re = u/(\mu \cdot D)$ . Это так называемая струхалевская частота (по имени чешского физика 19–20 века Стоухала). В случае поперечного обтекания цилиндра или трубки, частота вибраций равна

$$f = 0.18 \frac{u}{D} \quad [\text{Гц}]. \quad (21)$$

Частота отклоняется от значения задаваемого (21) только при очень маленьких или чрезвычайно высоких скоростях воздуха. Согласно (21) частота вибрации, возникающих при обтекании штанги стабилизатора диаметром  $D = 2$  [см] боковым ветром, дующим со скоростью  $u = 2$  [м/с] равна  $18$  [Гц] (число Рейнольдса при этом  $Re = 2000$ ). Плечи лука имеют характерный размер  $5$  [см], поэтому в этих же условиях будут возбуждаться вибрации частотой около  $7$  Герц.

Для борьбы с негативным влиянием гидродинамических вибраций необходимо демпфирование вибраций в системе в целом, а также использование штанги стабилизатора переменного сечения, винтообразного или сложного профиля (в этом случае генерируются широкий набор различных частот, которые «заглушают» друг друга).

## 8. Снос стрелы при ее вращении

Среди любителей лучного спорта возникает вопрос о влиянии вращения стрелы на траекторию ее полета. Известно, что в силу закона сохранения момента импульса, вращение стабилизирует направление оси стрелы. Однако известен эффект прецессии вследствие которого, при действии момента силы  $M$  перпендикулярного моменту количества движения стрелы  $L$ , возникает угловое движение  $\Omega$  вокруг оси перпендикулярной как оси стрелы, так и оси приложенного момента силы, рис.8.

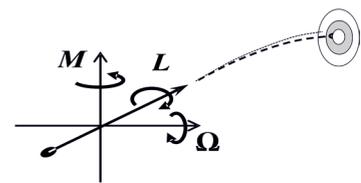


Рис.8. Схема эффекта прецессии стрелы

Может ли этот эффект привести к боковому сносу стрелы? Проведем оценку. Принимая массу стрелы 30 [г], ее диаметр 8 [мм], а скорость вращения 100 [рад/сек] (что соответствует 1 обороту на 4 метра полета при скорости 64 м/сек) вычислим момент инерции стрелы

$$L = 0.03 * (4 \cdot 10^{-3})^2 * 100 \approx 5 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{сек}} \right].$$

Дугообразный полет стрелы (рис.10) интерпретируем как ее вынужденное вращение в вертикальной плоскости со скоростью вращения  $\Omega \sim 1 \left[ \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \right]$ . Связь между скоростью прецессии, моментом инерции и моментом приложенной силы для эффекта прецессии в случае взаимного перпендикулярности всех указанных векторов записывается в виде

$$\Omega = \frac{M}{L}.$$

Таким образом, на стрелу может действовать отклоняющий ее вбок момент сил  $M \sim 5 \cdot 10^{-5}$  [н·м].

Если сила гидродинамического сопротивления стреле в полете  $f \sim 0.5$  [Н], то момент сил выравнивающих стрелу при отклонении  $M_f \sim 0.5 \cdot 0.5 \cdot \beta$  [Н·м], где  $\beta$  – угол отклонения оси стрелы от направления ее полета, плечо сил  $l = 0.5$  [м]. Приравнявая  $M$  и  $M_f$  получим угол отклонения стрелы, связанный с гироскопическим эффектом

$$\beta \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ [рад]}.$$

Исходя из этой оценки угла отклонения стрелы, уход ее вбок за счет гироскопического эффекта на дистанции 50 метров может составить 1 сантиметр.

### Заключение

Мы рассмотрели важнейшие особенности работы блочного лука, как механической системы, с точки зрения их влияния на качество выстрела. Основной вывод работы заключается в том, что для выполнения качественного выстрела необходимо обеспечить прямолинейный, соосный стреле толчок и ликвидировать факторы, вносящие возмущения в ее импульс (толчки в поперечном направлении). На стадии прицеливания надо замедлить лук, разумно его загрузив, повысив его инерцию, «разнести» собственные частоты лука и частоты внешних возмущений, эффективно демпфировать колебания системы. Однако для того, чтобы понимать, как этого добиться, необходимо разобраться в механике лука, понять и почувствовать влияние тех или иных факторов на его динамику и взаимодействие со стрелой во время выстрела.

Можно встретить мнение, что теоретические представления о работе лука не влияют на результаты стрельбы, – все определяется практической пристрелкой, тренировкой и опытом. Возможно получив в руки высококачественное, настроенное спортивное оружие, стрелку можно не задумываться о механике выстрела, а заниматься только спортивной тренировкой. Однако жизненный опыт подсказывает, что при равных условиях лучшего результата добьётся спортсмен, хорошо понимающий свойства своего оружия, природу погрешностей выстрела.

Конечно, вопросы механики лука рассматривались в литературе. Имеются даже диссертационные исследования по этим вопросам. Так в диссертации [3] разработана модель разгона стрелы в рекурсивном луке, основанная на уравнениях механики упругих деформируемых сред. Изучается влияние геометрии плеч на динамику разгона и скорость вылета стрелы, делаются рекомендации по конструкции и геометрии лука, обеспечивающей большую скорость вылета стрелы. К сожалению, узконаправленные, хотя и детальные исследования, зачастую не дают ясных рекомендации для повышения стабильности и точности стрельбы.

С другой стороны, имеется большое количество практических рекомендаций и инструкций по настройке лука и технике стрельбы, учитывающих опыт стрелков, спортсменов и производителей луков, например, руководство по настройке лука и стрел от компании EASTON [4]. Имеется разнообразная литература и видеоматериалы для желающих освоить данный вид спорта. Одной из популярных книг является книга Брайна Дж. Споллерса «Стрельба из лука для начинающих» [5]. В ней автор вводит читателя в мир лучной стрельбы, дает программу отработки навыков стрельбы, затрагивает вопросы выбора инвентаря, техники стрельбы и участия в соревнованиях и другие. Стандартная терминология содержится в документе [6].

Безусловно, информацию о настройке лука и технике стрельбы можно почерпнуть от тренеров и инструкторов в лучных клубах и в спортивных секциях. При этом надо иметь ввиду, что даже опытный инструктор не может заменить сведения специализированных книг и исследований, также и наоборот, – никакая книжка не заменит живого опыта стрельбы, работы с луком и участия в соревнованиях.

**Список использованных источников**

1. Доброго, К.В. Механика блочного лука .Ч.1. Траектория толчка стрелы / К.В. Доброго. – Инженер –механик. – №2(87), 2020. – С.38–48
2. Сазанкова, Е.С. Физико-механические свойства синтетических волокон используемых при изготовлении кордной ткани для резинотканевых конвейерных лент <http://www.giab-online.ru/files/Data/2015/06/385-395.pdf>; Характеристики полиэтилена низкого давления (высокой плотности) <https://plastinfo.ru/information/articles/42>
3. Лужин, А.А. Моделирование выстрела из лука: диссерт. на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук / А.А. Лужин. – М.: МГУ, 2008.
4. Easton. Руководство по настройке лука и стрел. Изд. BigMichel. – 2008. – 14 с.
5. Сорреллс, Б.Дж. Стрельба из лука для начинающих / Б.Дж. Сорреллс. – М.: АСТ, Астрель, 2006. – С.140.
6. ГОСТ Р 51549-2000. Оружие метательное. Арбалеты и луки спортивные. Арбалеты и луки для отдыха и развлечения. Термины и определения