

**А.В. Коробейников  
Н.В. Митюков**

# **БАЛЛИСТИКА СТРЕЛ**

**по данным археологии**



Ижевск 2007

Негосударственное образовательное учреждение  
«Камский институт гуманитарных и инженерных технологий»

**А.В. Коробейников**  
**Н.В. Митюков**

**БАЛЛИСТИКА СТРЕЛ  
ПО ДАННЫМ АРХЕОЛОГИИ:  
введение в проблемную область**

Ижевск 2007

УДК 902/904/623.561

К 68

ББК 63.400 + 63.48(2Рос.Удм)-425+К

Настоящее исследование выполнено в соответствии с тематикой “Историческая реконструкция параметров технических систем” (шифр “СТРЕЛА”, Государственный регистрационный № 01.2006–14646, код ВНТИЦ 024000230–0388).

Рецензенты:

*А.В. КОРОТАЕВ*, доктор философии, доктор исторических наук, профессор, директор Центра антропологии Востока Российского государственного гуманитарного университета, ведущий научный сотрудник Центра цивилизационных и региональных исследований и Института востоковедения РАН

*А.Э. ПУШКАРЕВ*, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической механики, теории механизмов и машин Ижевского государственного технического университета

**Коробейников А.В., Митюков Н.В.**

**К 68** Баллистика стрел по данным археологии: введение в проблемную область. – Ижевск: Изд-во НОУ КИТ, 2007. – 140 с.

**ISBN 978-5-902352-20-4**

Книга очерчивает круг проблем в области исторической баллистики стрел, описывает алгоритмы исследовательских задач в этой области и знакомит читателя с некоторыми результатами, которые иллюстрируют возможности междисциплинарного подхода.

Ключевые слова: археология; методология археологии; реконструкция (ист); моделирование историческое; имитационное моделирование; памятники археологические; городища; краеведение; баллистика; военная история, моделирование боевых действий.

**УДК 902/904/623.561**

**К 68**

**ББК 63.400 + 63.48(2Рос.Удм)-425+К**

ISBN 978-5-902352-20-4

© А.В. Коробейников, Н.В. Митюков, 2007  
© НОУ «Камский институт гуманитарных и инженерных технологий», 2007

### 3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРЕЛ РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

#### 3.1. Описание ситуации

К настоящему времени опубликовано множество работ, посвященных истории метательного оружия, однако обнаруженные нами публикации, во-первых, или посвящены только механике лука, то есть, не реконструируют полет стрелы уже после схода ее с тетивы лука [Kooi]; или освещают вопросы внешней баллистики и не рассматривают движение стрелы вместе с тетивой [Jackson]. Кроме того, эти работы не привязаны к археологическим артефактам. Иными словами, они могут реконструировать лишь отдельные элементы системы лук–стрела и не пытаются их привязать к археологическим данным. С другой стороны, существуют десятки публикаций, где авторы предлагают собственное программное обеспечение для расчета стрел и луков, оформленных в виде калькуляторов (например [Arrow velocity], [There more...]). Но при их использовании перед российскими исследователями неизбежно встает проблема адаптации этих программных пакетов к метрической системе мер. Кроме того, такие пакеты ориентированы на современных любителей целевой (спортивной и охотничьей) стрельбы из лука, и потому решают лишь прикладные задачи повышения точности индивидуального выстрела одиночного стрелка по мишени. Наконец, они оперируют параметрами всей системы стрела–наконечник, в то время как археологи видят перед собой лишь одни наконечники, а реконструкция стрелы по ее наконечнику является самостоятельной задачей историка войн и вооружений. На наш взгляд, и историки вооружений, и баллистики исключают из области исследования и такой важнейший компонент системы вооружения, коим является сам стрелок.

В силу отмеченных причин археологи вынуждены констатировать, что и возможности боевого применения, и возможности многократного применения одного наконечника, и результат действия стрелы по цели – все это не выходит пока за область непроверенных гипотез [Thomas, P. 246]. Кроме того, появившиеся в последние годы клубы исторической реконструкции и ролевых игр испытывают потребность в методике реконструкции конкретных видов вооружения и нуждаются в способах расчета действия стрелы по цели, так как стремятся по возможности избежать травматизма участников организуемых ими инсценировок сражений. Таким образом, назрела проблема реконструкции параметров стрелы по наконечнику и оценки ее аэродинамических и баллистических характеристик в составе комплекса стрелок–лук–стрела.

В основу всех дальнейших умозаключений нами был положен гуманитарный метод (от *humanitas*), то есть изучение системы “лук–стрела” организовано через потребности человека и способы их удовлетворения. Чтобы наши результаты были как можно более объективны, т.е. каждый оппонент или последователь смог бы их перепроверить, все выводы и умозаключения базировались лишь на фундаментальных законах физики.

Таким образом, цель исследования можно сформулировать как попытку извлечь из источника (имеющейся базы данных о наконечниках стрел) максимум гуманитарной информации. Ближайшая задача видится в том, чтобы понять логику древних производств. В самом деле, синхронно существующие на одной территории десятки, если не сотни типоразмеров наконечников вряд ли можно объяснить с точки зрения узкой специализации этих устройств, или отнести это на счет погрешности серийного производства либо влияния моды (см. например, [Худяков], [Кирпичников, Медведев], [Медведев]). С другой стороны, простейшая модель боевого применения стрел с различными наконечниками ставит перед нами вопрос о том, каковы были полетные характеристики стрел с различными наконечниками. Ведь если предположить, что в колчане у отдельно взятого стрелка находится широкий ассортимент снарядов с разными баллистическими характеристиками, то для того, чтобы исключить их рассеивание (то есть, чтобы попадать в цель любым снарядом) он должен при каждом выстреле изменять либо передаваемую луком энергию, либо изменять угол бросания, соизмеряя его с определяемой на глаз гаммой параметров. Разумеется, такое допущение сделать можно, если забыть о возможных ошибках в горячке боя и абстрагироваться от громадного расхода стрел разной формы, неизбежно истраченных в учебных целях, пока навык стрельбы разными снарядами не был бы доведен до автоматизма. А если не обременять изложение столь многими допущениями и просто предположить, что все стрелы в колчане (в обнаруженной археологом синхронной серии) представляли собой снаряды со сходными аэродинамическими и баллистическими характеристиками? Разумеется, для адепта морфологической типологии такая мысль еретична, но для оценки предметов вооружения по их полезным свойствам такая гипотеза вполне оправдана.

### **3.2. Слагаемые силы лобового сопротивления стрел**

Как известно, сила лобового сопротивления снаряда вытянутой формы состоит из четырех слагаемых: силы трения (появляющейся за счет вязкости соседних слоев воздуха), донного сопротивления (за счет сжатия воздуха перед стрелой и создания разряжения в донной части), волнового сопротивления (за счет образования волн разряжения и скачков уплотнения при движении тела в вязкой среде) и индуктивного сопротивления (часть нормальной аэродинамической силы, проецирующейся на вектор скорости, при наличии

угла атаки). Пропорции между этими составляющими имеют тенденцию изменяться на разных скоростях. Так при дозвуковых скоростях сила трения может составлять до 70–80 %, а волновое сопротивление близко к нулю (поскольку звуковой барьер не преодолен). На сверхзвуковых скоростях пропорция изменяется кардинально. Большую часть сопротивления составляет волновое, в то время как сила трения не превышает 20–30 %. Из-за этого сверхзвуковые объекты стараются сделать с острым носиком и каплевидной кормовой частью. В свою очередь у дозвуковых снарядов оптимизация формы головной части не так актуальна: для них гораздо важнее суммарная боковая площадь, которая дает основное сопротивление.

В качестве исходных данных для пробного расчета лобового сопротивления стрелы были взяты параметры реальной стрелы с оперением в два пера и с очень крупным наконечником [Кирпичников, Медведев, С. 346–349]. Эти параметры видны на рис. 3.1.

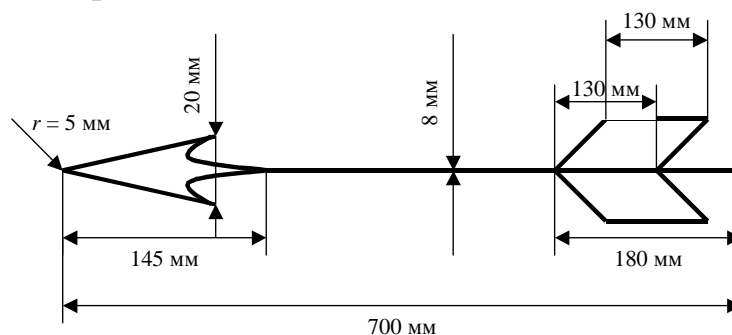


Рис. 3.1. Аэродинамическая схема рассчитанной стрелы

В качестве базы правил была принята методика аэродинамического расчета, принятая для оперенных тел вращения [Храмов].

В предположении отсутствия углов атаки индуктивное сопротивление равно нулю. В результате структура безразмерного коэффициента лобового сопротивления  $c_x$  при максимальном  $M = 0,3$  (для скорости при сходе с тетивы около 100 м/с) получается следующая: сопротивление трения 0,5440; донное сопротивление 0,0020; волновое сопротивление 0,0001. Таким образом, наибольший вклад в лобовое сопротивление стрелы вносит сопротивление трения<sup>1</sup>. В свою очередь оно подразделяется по составляющим: сопротивление трения тела вращения (древко с наконечником) 0,161; сопротивление трения оперения 0,383. При этом коэффициент сопротивления трения собственно наконечника составляет примерно половину коэффициента сопротив-

<sup>1</sup> Напомним, что для всех деталей стрелы каждая из составляющих сопротивления определяется по формуле, которая восходит к формуле канонического вида, связывающей коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы, площадь поверхности, плотность воздуха и скорость движения. Так как для всех элементов стрелы значения плотности воздуха  $\rho$  и скорости движения  $V$  равны, то об относительной величине сопротивления этого элемента можно судить на основе показателя его  $c_x$  и площади смоченной поверхности.

ления тела вращения. Поэтому, на наш взгляд сопротивление наконечника незначительно, несмотря на то, что для расчета был принят прямо-таки гигантский экземпляр наконечника. А с учетом того, что площадь поверхности древка стрелы, как правило, превышает площадь поверхности наконечника, доля сопротивления наконечника в общем сопротивлении стрелы для большинства случаев будет незначительна.

Поэтому становится очевидным вывод о том, что аэродинамика стрел в основном определяются не формой и конструкцией головной части, а формой и конструкцией оперения в первую очередь, а во вторую (в предположении об отсутствии оперения) – величиной поверхности древка. Следовательно, для меткой стрельбы лучнику достаточно было иметь в колчане стрелы пусть и с разными наконечниками, но одинаковой массы. Если это были неоперенные стрелы, то они могли иметь и разную длину. Однако в целях стандартизации боезапаса некоторые стрелы могли утяжеляться и за счет снаряжения наконечника древком увеличенного диаметра, ибо удлинение древка, как мы видели выше, оказывает значительное влияние на аэродинамику снаряда<sup>2</sup>. Разумеется, и граница зоны поражения (дальность при постоянной энергии лука) будет одинаковой для стрел равной массы. Таким образом, с точки зрения аэродинамики, все наконечники одинаковы (или почти одинаковы), несмотря на разницу их форм, а с точки зрения внешней баллистики наконечники (и, соответственно, стрелы) различаются по массе и габаритам.

Озвученные выводы ставят на повестку дня задачу создания алгоритма для реконструкции габаритов стрел. В качестве базы данных здесь могут быть приняты данные о массах обнаруженных археологами наконечников, измеренные инструментально и сведенные в единые множества по генетическим признакам. Кроме того, следует принять в рассмотрение известные и описанные в литературе рекомендованные соотношения веса наконечника и древка. Это может позволить вычислять энергию стрелы у цели, а также реконструировать длину стрелы, амплитуду движения тетивы и вероятную область значений энергии использованных луков, то есть решать задачи механики лука и реконструировать древние предметы вооружения.

### **3.3. Оценка параметров стрелы через параметры наконечника**

Вопрос об исходных параметрах, например, о массах стрел не настолько очевиден, как кажется. Например, анализ артефактов, найденных при раскопках городища Иднакар<sup>3</sup>, может дать лишь сведения о наконечниках, но не по стрелам в сборе. Так по информации автора раскопок всего было обнаружено 715 наконечников стрел, из которых 503 костяных и 212 железных

---

<sup>2</sup> При увеличении диаметра цилиндра его объем и масса растут по квадратичному закону, а с увеличением длины при постоянном диаметре объем и масса возрастают линейно.

<sup>3</sup> Чепецкая археологическая культура, IX–XIII вв. н.э., Глазовский р-н Удмуртии.

[Иванова]. При этом публикация не предлагает никаких гипотез относительно древков стрел.

Попытаемся, используя естественнонаучные подходы, оценить или, по возможности, реконструировать массово-габаритные характеристики хотя бы наиболее часто встречавшихся стрел с костяным наконечником. К сожалению, информация о весовых параметрах наконечников не фиксируется большинством авторов, по крайней мере, ее нет в упомянутой выше работе. Поэтому оценим этот параметр аналитически. Примем в качестве типичного наконечник с фрикционным насадом<sup>4</sup> [Иванова, С. 124], который можно представить в виде двух трехгранных пирамид, состыкованных основаниями. Измеряем по масштабному рисунку 47-25 [Иванова] габариты наконечника и вычисляем его объем: 2,07 см<sup>3</sup>. А, принимая плотность кости<sup>5</sup> за 2 г/см<sup>3</sup>, определяем массу наконечника: 4,14 г.

В отечественной литературе циркулирует указание (как увидим, безосновательное), согласно которому “подсчитано, что у древнерусских стрел вес наконечника стрелы и древка соотносится как 1:5, а согласно арабским источникам это соотношение равно 1:7” [Шокарев, С. 30].

Вероятнее всего, эта информация восходит к работе А.Ф. Медведева, который указывает: “В трактате «Arab archery» говорится, что военные (боевые) стрелы должны весить от 15 до 20 дирхемов (42–57 г) и что вес наконечника должен составлять 1/7 от веса стрелы, а оперения – 1/7 веса наконечника. Эти цифры очень близки весовым соотношениям, обычным для русских стрел XVI–XVII вв.” [Медведев, С. 51–52]. Оставим пока без комментария абсолютные цифры веса стрелы, приводимые автором. А.Ф.Медведев ссылается на “с. 113 и далее” трактата “Arab archery”. Мы располагаем этим изданием. Для того, чтобы дать читателю возможность самому оценить качество книги А.Ф. Медведева приводим в учебных целях перевод<sup>6</sup> параграфа средневекового источника, где идет речь о весовых соотношениях частей стрелы:

*“XL. О ВЕСЕ СТРЕЛ, НАКОНЕЧНИКОВ И ОПЕРЕНИЙ. Лучники яростно спорят относительно веса стрел, их наконечников и оперений. Некоторые утверждают, что для лука в двадцать ратлей надо иметь стрелу в три дирхема, а для лука в тридцать ратлей – четыре дирхема. Каждому увеличению веса<sup>7</sup> лука на*

---

<sup>4</sup> О фрикционном насаде – см. главу данного издания о реляционной базе данных наконечников.

<sup>5</sup> Плотность кости сплошной структуры, например, зубной ткани равна 1,99 г/см<sup>3</sup> (см. [http://port.odessa.ua/medic/sea\\_med/0002/000230.htm](http://port.odessa.ua/medic/sea_med/0002/000230.htm)).

<sup>6</sup> Книга марокканского автора датируется приблизительно первой третью XVI в. Она была переведена с арабского на английский и издана в США в 1945 г. [Arab archery]. Мы приводим собственный перевод с английского.

<sup>7</sup> Здесь и далее в оригинале употребляется термин *weight*, но очевидно, что применительно к луку речь идет не о весе лука, а о величине силы его натяжения (на максимальной амплитуде?), которая измеряется в тех же единицах, что и вес.

десять ратлей соответствует увеличению веса стрелы на один дирхем. Другие утверждают, что вес стрелы должен быть от семи до двадцати дирхемов вне зависимости от жесткости лука. Если лук эластичен и имеет вес менее восьмидесяти ратлей, стрелы для него должны весить семь дирхемов, что значит: шесть дирхемов без одной трети приходится на вес дерева, один дирхем на наконечник, а треть дирхема на клей и перья.

Если лук имеет восемьдесят ратлей, стрелы для него должны весить десять дирхемов: восемь с половиной дирхемов приходится на древко, полтора дирхема на наконечник, перья и клей. Для луков свыше сотни ратлей стрела должна весить от шестнадцати до двадцати дирхемов, и никогда больше, если вы хотите достичь точности и скорости.

Тахир аль-Бальхи сообщил, ссылаясь на мнение своего деда Сафира дуль-Акфара (Сафир II, 310-379 н.э.), что вес стрелы для тугого лука должен составлять двенадцать дирхемов, десять из которых приходятся на древко, а два – на наконечник и оперение...

Некоторые лучники полагают, что стрелы для целевой стрельбы должны весить от двенадцати до шестнадцати дирхемов, и никогда больше, если вы желаете достичь точности и скорости. Боевые стрелы, однако, должны иметь вес от пятнадцати до двадцати дирхемов...

Наконечник, по мнению некоторых лучников должен весить одну седьмую от веса стрелы, а оперение – одну седьмую от веса наконечника. Другие же полагают, что наконечник должен весить одну восьмую часть от веса стрелы, а оперение – одну восьмую от веса наконечника. Есть и те, что утверждают, что наконечник должен весить одну девятую часть от веса стрелы, а оперение – одну девятую от веса наконечника..." [Arab archery, P. 113–116].

Как видно из текста трактата, здесь нет однозначного утверждения насчет обязательного и единственно верного весового соотношения наконечника и древка боевых стрел как 1/7. Напротив, мы видим, что допустимые параметры весового отношения находятся в диапазоне от 1/5,66 до 1/9<sup>8</sup>.

На основе указанного соотношения можно определить полную массу рассматриваемой стрелы  $m$ , которая лежит в интервале от  $4,14 \times 5,66 = 23,4$  г до  $4,14 \times 9 = 37,3$  г.

Что касается начальной скорости стрелы, то прямо оценить ее не представляется возможным. Существующие калькуляторы и рекомендации разных авторов дают диапазон скоростей в довольно широком интервале. Это может быть и 50 м/с [There more...], и 200 fps (футов в секунду: то есть 60 м/сек [Arrow velocity]), и 300...345 fps (то есть около 100 м/с [Thomas]). В итоге, максимальный рассматриваемый диапазон начальных скоростей стрелы составляет 50...100 м/с.

---

<sup>8</sup> Остается лишь сделать неутешительный вывод: содержание текста А.Ф.Медведева однозначно свидетельствует, что названный автор либо не был знаком с текстом арабского трактата, на который ссылается, либо пристрастно и вне контекста процитировал слишком малый фрагмент параграфа этого произведения. Конечно же, в силу ограничений налагаемых законодательством об авторском праве и мы не можем приводить главу трактата полностью.

А вот на вопрос о реконструкции длины стрелы по ее наконечнику авторы смогли найти несколько вариантов ответа.

Массово-габаритный подход. Если представить древко стрелы упрощенно в виде цилиндра длиной  $l$  и диаметром  $d$ , то можно определить объем древка  $V$ . Но объем выражается через плотность древесины:  $V = m / \rho$ . А выше говорилось, что масса стрелы составляет 5,7...9 массы наконечника  $m_n$ . Тогда длина древка составит:

$$l = \frac{4 \cdot (5,7 \dots 9) m_n}{\pi d^2 \rho}.$$

Область значения плотностей для разных пород древесины приводится в физических справочниках. Так по данным [Ландсберг, С. 84] и [Общетехнический справочник, С. 165] они имеют следующие значения:

береза	0,6...0,8 г/см <sup>3</sup>	дуб	0,7...1,0 г/см <sup>3</sup>	ель	0,4...0,7 г/см <sup>3</sup>
клен	0,5...0,8 г/см <sup>3</sup>	липа	0,3...0,6 г/см <sup>3</sup>	орех	0,6...0,7 г/см <sup>3</sup>
сосна	0,4...0,7 г/см <sup>3</sup>	ясень	0,6...0,8 г/см <sup>3</sup>		

А для некоторых металлов:

железо	7,8...7,9 г/см <sup>3</sup>	медь	8,40...8,96 г/см <sup>3</sup>	серебро	10,5 г/см <sup>3</sup>
--------	-----------------------------	------	-------------------------------	---------	------------------------

Итак, единственной неизвестной переменной для расчета длины у нас остается диаметр стрелы  $d$ . Попробуем очертить область значений и здесь. Для реконструкции древка мы имеем возможность обратиться к таким объективным свидетелям, как устройство узла крепления наконечника к древку. На рис. 3.2 приводим два костяных наконечника в необычном ракурсе – так, чтобы стала видна контактная площадка наконечника и древка.

Поверхности контактных площадок приводимых наконечников (указаны стрелками на рисунке) имеют насечки из пересекающихся линий, очевидно, для повышения коэффициента сцепления (ведь основная кинетическая энергия стрелы сосредоточена в древке). Интересно и то, что несмотря на различие габаритов наконечников протяженность контактных площадок у них одинаковая. Угол наклона контактной площадки к продольной оси в обоих случаях также совпадает – около 10°. Отсюда можно сделать важное предположение: древки стрел, срезанные “на ус”, были стандартизированы, по крайней мере, для костяных наконечников, и, по крайней мере, в узле крепления. Наконечник на рис. 3.2, *верх* по габаритам близок тому, для которого мы начали наш расчет.

Логично полагать, что острие наконечника находится на продольной оси стрелы, следовательно, диаметр древка не может превышать сечения наконечника по миделю, в противном случае стрела не полетит прямо. Тогда, как видно на рис. 3.2, диаметр древка  $d$  для обоих наконечников составляет величину, близкую одному сантиметру.

Есть археологические данные о том, что материалом для древков стрел в Приуралье служила береза [Сунгатов, С. 60]. Следовательно, область значений плотности древесины  $\rho$  можно принять в интервале  $0,6...0,8 \text{ г/см}^3$ .

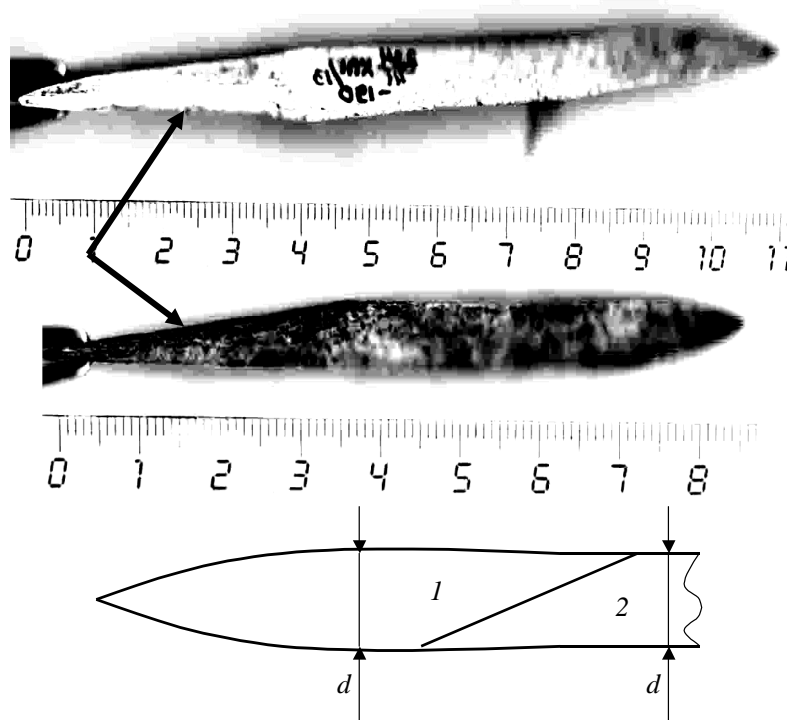


Рис. 3.2. Вверху и в центре костяные наконечники из раскопок Г.Т. Ленц на городище Анюшкар в 1989–93 гг., (На конце черешков видны захваты пинцета, которым наконечники удерживаются на сканере);  
Внизу: схема определения диаметра стрелы по костяному наконечнику;  
1 – тело наконечника; 2 – тело древка

Таким образом, для рассматриваемого наконечника область значений при подстановке переменных в формулу для длины древка из березы ( $\rho = 0,7 \text{ г/см}^3$ ) составит:

$$l = \frac{4 \cdot (5,7...9) m_{\text{н}}}{\pi d^2 \rho} = \frac{4 \cdot (5,7...9) \cdot 4,14}{\pi \cdot 1^2 \cdot 0,7} = 42,5...67,7 \text{ см.}$$

Вычисленная область значений длины стрелы соответствует общепринятым параметрам.

Аэродинамический подход для определения длины стрелы. Как известно, устойчивость невращающемуся летящему телу на траектории придает условие, при котором центр тяжести (точка приложения гравитационной силы) находится впереди центра давления (точки приложения аэродинамической силы). Только в этом случае при случайном отклонении носика стрелы аэродинамическая сила создает момент, возвращающий носик в первоначальное

положение. В противном случае тело будет “кувыркаться” вокруг своего центра масс. Опыт, полученный при конструировании и проектировании летательных аппаратов, показывает, что обычно для неуравновешенных невращающихся объектов (ракеты, мины и т.п.) запас статической устойчивости  $K$  не превышает 10...15 % [Дмитриевский, С. 179]:

$$K = \frac{\ell_{\text{цм}} - \ell_{\text{цд}}}{L} \cdot 100\% < 10...15\%,$$

где  $\ell_{\text{цм}}$  – расстояние от носика до центра масс;  $\ell_{\text{цд}}$  – расстояние от носика до центра давления;  $L$  – полная длина стрелы. Причем эта пропорция была получена эмпирически в разных странах абсолютно независимо и носит объективный характер.

Эта информация поможет оценить максимальную длину стрелы, имеющей конкретный наконечник. Действительно, если стрелу снабдить оперением, то центр давления будет сдвинут назад, и чем больше площадь оперения, тем более назад будет смещен центр давления. Таким образом, в случае неоперенной стрелы (или правильной сказать стрелы с бесконечно малой площадью оперения) центр давления находится в крайней передней точке, совпадающей с геометрическим центром стрелы. По этому условию мы можем оценить максимально допустимую длину стрелы (когда она лишена оперения) и записать уравнение:

$$\frac{L}{2} - (l_1 + l_2) = (0,10...0,15)L, \text{ откуда}$$

$$l_1 + l_2 = 0,5L - (0,10...0,15)L \Rightarrow l_1 + l_2 = (0,35...0,40)L,$$

где  $l_1$  – длина костяной части;  $l_2$  – длина деревянной части до центра тяжести.

Для упрощения дальнейших рассуждений примем  $A(l_1 + l_2) = L$ , где  $A = 2,50...2,86$ . Наложение на это условие второго уравнения (равновесие стрелы относительно ее центра тяжести), поможет найти координату центра тяжести:

$$l_1\rho_1 + l_2\rho_2 = (L - l_1 - l_2)\rho_2,$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности кости и дерева соответственно. Выражая из первого уравнения  $l_2$  и подставляя его во второе, можно выразить общую длину стрелы в функции от длины наконечника:

$$L < \frac{A}{A-2} l_1 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right).$$

Отношение плотностей кости ( $2 \text{ г/см}^3$ ) к дереву ( $0,6...0,8 \text{ г/см}^3$ ) получается  $2,5...3,3$ , а комплекс  $A / (A - 2) = 3,32...5,00$ . Таким образом, длина неоперенной стрелы из условия устойчивости ее полета составит:

$$L < 5,0...11,5 l_1.$$

Или для костяных наконечников, изображенных на рис. 3.2 ( $l_1 = 9$  см), **длина стрелы должна быть меньше 45...104 см.** В данном случае значение коэффициента  $A$  было взято из опыта механики полета, которая описывает поведение **всех** летящих тел. И вполне очевидно, что в результате у нас получился довольно широкий диапазон, исключающий нижнее значение длины стрелы (оно теоретически может быть вообще равным нулю). А кроме того, наша гипотеза о нахождении центра давления в середине стрелы также вызывает сомнение. Но массив статистических данных по стрелам позволяет отказаться от него и получить минимальное значение длины стрелы.

В. Бехайм, изучая в семидесятых годах XIX в. “восточные” стрелы из собрания Императорского музея в Вене, установил, что они имели длину в среднем 75 см при диаметре не более 7 мм, а их “центр тяжести находился обычно только в нескольких сантиметрах от середины, ближе к наконечнику” [Бехайм, С. 285]. Если принять термин “несколько сантиметров” диапазоном 2...10 см, то координата центра тяжести получается 27...35,5 см. В этом случае комплекс  $A = 75 / (27...35,5) = 2,1...2,8$ ; соответственно  $A / (A - 2) = 3,5...21,0$ , а запас статической устойчивости (при условии нахождения центра давления в середине стрелы):

$$K = \left( 0,5 - \frac{1}{A} \right) \times 100\% = 2,4...14,3\%.$$

Отсюда видно, что отсутствие точных указаний В. Бехайма дает диапазоны, соизмеримые с указанными выше, полученными из работы А.А. Дмитриевского. Поэтому необходимо поискать более точные данные на положение центра тяжести стрелы.

Р. Пейн-Голлуэй, изучавший турецкие летучие (т.е. рекордные?) стрелы XVIII в., указывает, что при весе 12,5 г. они имели длину 64,8–65,4 см, а их центр тяжести находился на расстоянии 29,0–31,3 см от ушка [Пейн-Голлуэй, С. 392–393]. О неоперенных метательных стрелах начала XX в. он сообщает, что при весе около 14 г и длине около 80 см они имели центр тяжести на удалении 33 см от головной части [Пейн-Голлуэй, С. 272]. Делением общей длины на расстояние от головной части до центра тяжести получаем значение  $A = 80 / 33 = 2,4$ ; комплекс  $A / (A - 2) = 6$ , а запас статической устойчивости (опять при условии нахождения центра давления в середине стрелы)  $K = 8,3\%$ .

Ю.В. Шокарев, относительно стрел (правда, арбалетных, и, видимо, неоперенных), замечает: “у коротких болтов с древком до 35 см центр тяжести располагался в конце первой трети его длины от наконечника. У более длинных болтов он находился, как правило, в конце первой четверти” [Шокарев, С. 120]<sup>9</sup>. Это утверждение позволяет записать значение диапазонов  $A = 3...4$ ,

<sup>9</sup> Вероятнее всего данное утверждение заимствовано из работы В. Бехайма, который утверждал: “У короткого болта с длиной древка до 35 см центр тяжести, как правило, располагался точно на расстоянии  $\frac{1}{3}$  от наконечника, при большей длине – обычно на рас-

или  $A / (A - 2) = 2...3$ . В этом случае запас статической устойчивости приобретает явно избыточное значение  $K = 17...25\%$ , что как раз и неопровержимо свидетельствует о ненахождении центра давления в середине болта.

В итоге, объединяя данные Р. Пейн-Голлуэя и Ю.В. Шокарева, можно записать возможные диапазоны для  $A = 2,4...4,0$  и записать условие аэродинамического существования стрелы как:

$$L = (2...6)l_1 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right).$$

В итоге, для изображенного на рис. 3.2 наконечника получается диапазон длин:  $L = 3,0...13,8 l_1$  (или  $L = 27...124$  см).

Длина стрелы по эргонометрии лука. Возможен еще один подход к оценке длины стрелы – через эргонометрические показатели. Действительно, если лучник держит в одной руке лук, а другой оттягивает тетиву, то максимальный ход тетивы ограничивается параметрами оружия и возможностями организма. В этом случае, если предположить, что наконечник стрелы остается за луком, а кривизна самого лука равна нулю (самый крайний случай), то ход тетивы как раз и будет равен длине древка. По данным Т. Вакер [Waker], для современного простого лука это расстояние не превышает 28 дюймов (711 мм). Это близко соответствует длине вытянутой руки от корпуса до основания большого пальца мужчины среднего роста (180...185 см).

Мак Оуэн, Миллер и Бергман на основе испытаний изготовленной ими копии составного углового лука установили, что ход тетивы для него составляет 101 см. Они же сообщают, что для “скифских” луков, обнаруженных в курганах Пазырыка, ход тетивы может находиться в интервале от 45 до 76 см, причем верхний предел значения соответствует длине стрел, обнаруженных там же [McEwen].

Попробуем логически смоделировать процесс стрельбы. При натяжении лука на максимальный ход тетивы стрелок сначала держит лук перед собой (например, в левой руке), развернув корпус фронтально на цель. Затем он, сгибая правую руку в локте, натягивает тетиву “до уха” на высоте ниже подбородка. Пока амплитуда невелика, стрела может быть удержана напряжением бицепса (рис. 3.3, *слева*). Но тут же он, удерживая стрелу напряжением более сильных мышц поясницы, спины и плечевого пояса, отводит правое плечо назад, разворачивается левым боком к цели, “дожимая” тетиву на максимальную амплитуду (рис. 3.3, *справа*). Иными словами, ход тетивы пред-

---

стоянии  $\frac{1}{4}$ . Центр тяжести проверялся на каждом экземпляре и подгонялся путем подрезания нижнего конца древка. Вот почему большинство боевых болтов встречается с обрезанным концом” [Бехайм, С. 302–303].

варительно не напряженного лука при этом равен длине левой руки (от ладони), сложенной с шириной плеч стрелка за вычетом прогиба лука. С рулеткой в руках нетрудно убедиться, что общая амплитуда с разворотом плеч увеличивается чуть ли не вдвое.

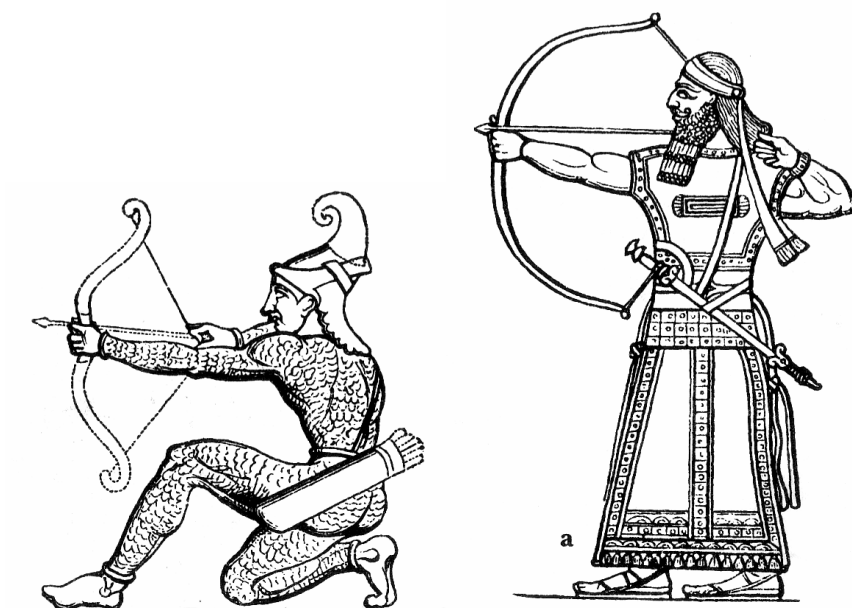


Рис. 3.3. Разные способы натяжения лука по Г. Вейсу [Вейс]:  
слева: с. 171, рис. 221; справа: с. 99, рис. 146

Авторы этих строк путем эксперимента с рулеткой установили, что для человека ростом 170 см, с длиной руки от плеча до кисти 60 см, длиной ключицы 10 см и длиной плечевой кости 25 см при натяжении тетивы бицепсом длина древка стрелы должна быть минимум 50 см, а при натяжении всем телом – 90 см. Разумеется, и здесь параметр может быть скорректирован путем моделирования с рулеткой на людях, антропометрические параметры которых близко соответствуют реконструированным параметрам древних воинов, полученным по измерениям остеологического материала конкретной археологической культуры или даже отдельно взятого могильника.

Анализ расчетных данных. Для удобства представления материалов, сведем все полученные данные по длине изучаемой стрелы в таблицу:

	Подход	Весь диапазон, см
1	Массово-габаритный	42,5–67,7
2	Аэродинамический	27–124
4	Эргонометрический	50–90

Как видно из таблицы, наиболее вероятная длина древка стрелы с исследованным костяным наконечником составляет 50...60 см, что позволяет сделать вывод о том, что стрельба в данном случае производилась от груди, а тетива натягивалась работой бицепса.

Для реализации задачи автоматизированной оценки и возможной реконструкции массово-габаритных характеристик хотя бы наиболее часто встречающихся стрел был создан пакет программ “Osseus” [Коробейников, Митюков (2)], который реализует все вышеуказанные аналитические подходы. В соответствующие окна ввода данных требуется ввести параметры наконечника после его измерения и взвешивания, а также данные о его материале и указать предполагаемую породу (породы) дерева, из которой могло быть сделано древко, использованное с данным наконечником. Интерфейс программы построен таким образом, что выходные данные обобщаются в виде графиков, на которых показаны диапазоны наиболее вероятных значений. При необходимости пользователь может вызвать подсказки с подробным объяснением сути изложенных методов идентификации, указанием расчетных формул и схем.

Таким образом, описанные методы решают задачи исторической реконструкции на основе археологических источников и могут быть использованы для верификации гипотез исследователей военной истории.

### 3.4. Длина стрелы и исследовательские подходы к реконструкции лука

Приблизительно определив длину стрелы и максимальный ход тетивы, можно оценить и параметры лука. В первом приближении будем считать, что деформации и перемещения процесса натяжения не выходят за области применимости закона Гука, т.е. находятся в области пропорциональности. Также, для простоты расчетов, примем, что лук имеет кривизну, равную бесконечности. Тогда для описания системы лук–тетива можно применить классические формулы сопротивления материалов, расчетная схема которых изображена на рис. 3.4.

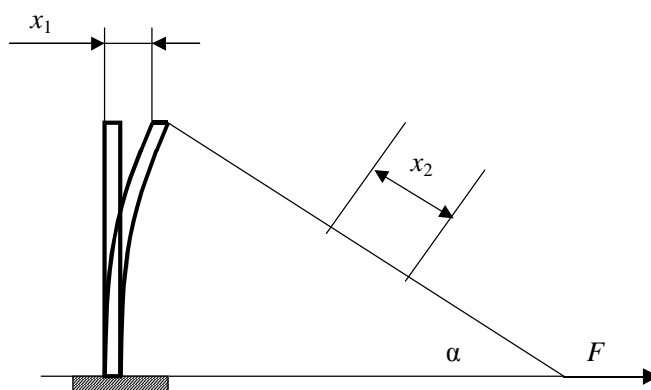


Рис. 3.4. Расчетная схема механики лука

Поскольку схема нагружения плеч лука является симметричной, то сила, растягивающая тетиву  $F_2$ , и сила, изгибающая лук  $F_1$ , определяются как:

$$F_2 = \frac{F}{2 \cos \alpha}; F_1 = \frac{F}{2}.$$

Тогда прогиб лука  $x_1$ , как консольно закрепленной балки определяется по формуле:

$$x_1 = \frac{F_1 \ell^3}{3EI} = \frac{F \ell^3}{6EI},$$

где  $\ell$  – длина одной ветви лука,  $E$  – модуль упругости материала лука,  $I$  – момент инерции, при изгибе балки круглого сечения определяемый как  $\pi D^4/64$ ,  $D$  – диаметр лука.

Растяжение тетивы определится по зависимости:

$$x_2 = \frac{F_2 l_T}{E_T S} = \frac{F l_T}{2 E_T S \cos \alpha},$$

где  $l_T$  – длина тетивы,  $E_T$  – модуль упругости материала тетивы,  $S$  – площадь поперечного сечения тетивы. Но, принимая во внимание, что для определения хода тетивы нам нужно не растяжение тетивы как таковое, а проекция растяжения на ось симметрии лука, необходимо умножить значение  $x_2$  на  $\cos \alpha$ . И тогда окончательно ход лука определится как:

$$x = x_1 + x_2 \cos \alpha = \frac{F \ell^3}{6EI} + \frac{F l_T}{2 E_T S} = F \left( \frac{\ell^3}{6EI} + \frac{l_T}{2 E_T S} \right) = \frac{F}{c},$$

где, таким образом  $c$  – общая жесткость лука и тетивы.

Зависимость  $F(x)$  или  $F$ – $x$  диаграмма в нашем случае имеет линейный характер. Это позволяет довольно просто решить уравнение механики лука, ведь при линейном характере зависимости  $F(x)$ , среднее ускорение стрелы определится как:

$$a = \frac{F_{\max}}{2m} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{F_{\max} x_{\max}}{m}}.$$

Строго говоря, характеристика лука может быть и не линейной. Очевидно, одним из решающих факторов, определяющих ее выпуклость или вогнутость, является форма лука. На рис. 3.5 приведена зависимость  $F(x)$  для некоторых форм луков, из которой видно, что линейная зависимость является лишь частным случаем (рис. 3.5, форма В).

Если максимальный ход лука определяется эргометрией стрелка, тогда единственным неизвестным нам параметром остается сила  $F$ , изгибающая лук. Данные, которые циркулируют сегодня в литературе, мало способствуют прояснению вопроса.

Мы видели выше, что средневековый арабский источник приводит интервал значений силы натяжения лука от двадцати до сотни и более ратлей.

Переводчики данного трактата указывают, что эти величины соответствуют интервалу от 16 до 82 фунтов [Arab archery, P. 174]<sup>10</sup>.

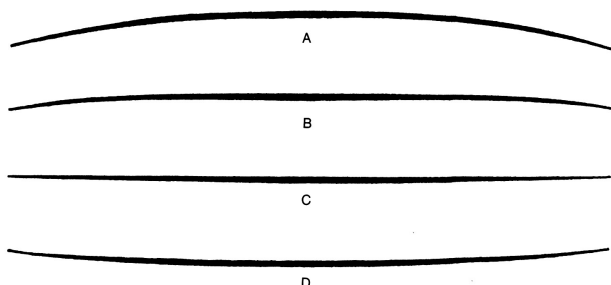
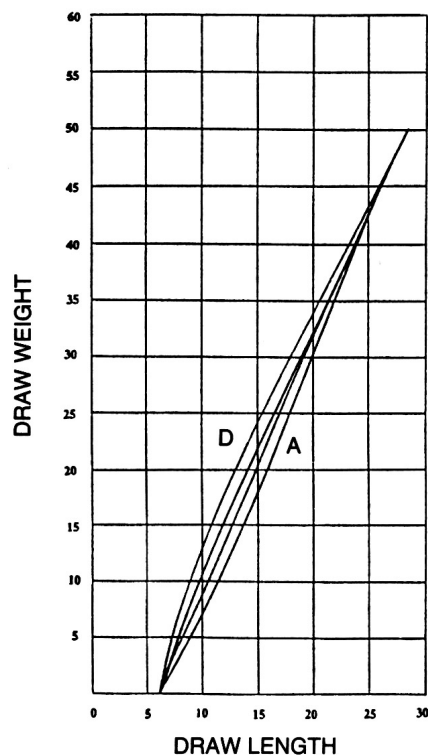


Рис. 3.5. F-x диаграмма для некоторых форм луков [Baker]



Так, в соответствии с современными “Правилами проведения соревнований по стрельбе из лука” усилие натяжения спортивных луков лежит в интервале 15,0–36,3 кг [Луки спортивные...].

Дж. Гордон полагает, что “на практике стрелу удастся оттянуть примерно на 0,6 м, и даже сильный человек не может натянуть тетиву с силой больше 350 Н (35,7 кг). Соответствующая энергия мышц составляет примерно 0,6 м × 350 Н, то есть около 210 Дж” [Гордон].

Т. Бейкер приводит графики зависимости амплитуды тетивы и силы натяжения для различных луков, но верхний предел последнего параметра ограничивает величиной в 60 фунтов [Baker, P. 45–52].

МакОуэн, Миллер и Бергман установили экспериментально, что точная копия составного лука с силой натяжения 27 кг должна выпускать аналогичную стрелу с такой же скоростью, как и копия средневекового тисового длинного лука с силой натяжения 36 кг (принятая скорость около 50 м/с) [McEwen].

Как видно, интервал значений силы натяжения при максимальной амплитуде, принимаемых современными исследователями, ограничивается величиной 60–80 фунтов, или 27–36 кг, что составляет 265–350 Н. Вероятно, современные

<sup>10</sup> Если считать, что речь идет о принятых в США торговых фунтах, заимствованных из Английской системы мер (1 ф = 0,45 кг), то названный интервал составит 7,2–36,9 кгс.

экспериментальные данные, полученные для спортивных и охотничьих луков, нельзя безоговорочно принимать для древних боевых луков, хотя бы потому, что тактика их использования различна. А именно: целевая стрельба предполагает плавное натяжение тетивы сгибанием локтя (при начальном развороте корпуса левым боком к цели – см. рис. 3.3, слева). При этом стрелок производит прицеливание, то есть визуально совмещает цель с продольной осью стрелы. Иными словами, любая современная стрельба является стрельбой прицельной и индивидуальной, и современные стрелки не стреляют ни залпами по групповым целям, ни по площадям. Следовательно, усилие натяжения современного стрелка в цель ограничивается силой бицепса и мышц плечевого пояса с правой стороны. Исключение составляет спортивное упражнение в стрельбе на дальность, но при этом поза стрелка обусловлена необходимостью задавать стреле оптимальный угол возвышения –  $45^\circ$ , следовательно, правая рука тянет тетиву со стрелой назад и вниз, а ось вращения тела при развороте плеч остается вертикальной, следовательно амплитуда натяжения здесь увеличивается не на ширину плеч, а на величину, пропорциональную косинусу  $45^\circ$ , то есть на 0,7 ширины плеч. Кроме того, в создании тянущего усилия при этом не задействованы мышцы спины – попробуйте растянуть эспандер сначала на уровне груди, а потом в положении “косая сажень” – в последнем случае это гораздо труднее. Таким образом, логично полагать, что тугой лук древнего воина мог натягиваться рывком, с разворотом плеч, как мы показали выше, для сообщения стреле максимальной энергии, а стрела посылаясь не только по настильной, но и по навесной траектории. Конечно, визуальное прицеливание при этом затруднено, однако промахи отдельного выстрела здесь компенсируются множеством выстрелов, а погрешности отдельного стрелка элиминируются за счет множественности этих стрелков. Значит, величина усилия тут может быть определена путем эргономического эксперимента. Как его организовать? Наверное, всякий относительно здоровый мужчина, не обладающий избыточным весом, способен приподняться из положения лежа, ухватившись пальцами<sup>11</sup> за перекладину, расположенную на высоте, равной длине его руки, а затем удержаться несколько секунд, или удержаться на трех пальцах в вертикальном вися на высокой перекладине (по крайней мере, авторам это удается). Если допустить, что пальцы древнего стрелка, натягивающие тетиву, как и у современных лучников были защищены накладкой – *гардаманом*, то вполне логичным становится допущение о том, что этот стрелок был способен приложить к луку усилие не менее собственного веса. Данный тезис легко проверяется экспериментально: в любом тренажерном зале есть возможность потянуть груз изменяемого веса, подвешенный на канате, перекинутом через блок. Таким образом, верхнюю границу значения силы натяжения  $F$  для тугого боевого лука следует поднять, по крайней мере, в полтора раза выше той, что установ-

---

<sup>11</sup> Пальцы следует держать любым из многочисленных способов, принятых для удержания тетивы.

лена в литературе, и величина этого параметра, на наш взгляд, должна приближаться к 50–60 кг (около 500–600 Н).

В простом луке с длинными плечами энергия стрелка при натяжении затрачивается впустую на растяжение длинной тетивы, преодоление инерции плеч, а после спуска тетивы запасенная энергия опять-таки расходуется непроизводительно на разгон деталей лука, их вибрацию и т.п. Следовательно, повышение качества оружия заключается в уменьшении амплитуды тетивы при одновременном увеличении силы натяжения. Видимо, таким требованиям соответствует лишь предварительно напряженный лук с большим (до 80 %) коэффициентом полезного действия (КПД). Но такой лук не натянешь напряжением бицепса. Тяговое усилие, равное весу стрелка, можно обеспечить лишь совместной работой больших мышц спины и поясницы. На рис. 3.6 приведем схему, которая помогает понять, от чего зависит величина амплитуды тетивы (это вид на стрелка сверху). Итак, перед выстрелом стрелок держит лук со стрелой (показана жирной стрелкой), наложенной на тетиву в левой руке, которая вытянута к цели, и прицеливается. Правой рукой, согнутой в локте и прижатой к корпусу в области правого плеча, он удерживает тетиву и хвостовик стрелы. Корпус стрелка повернут правым плечом по направлению к цели.

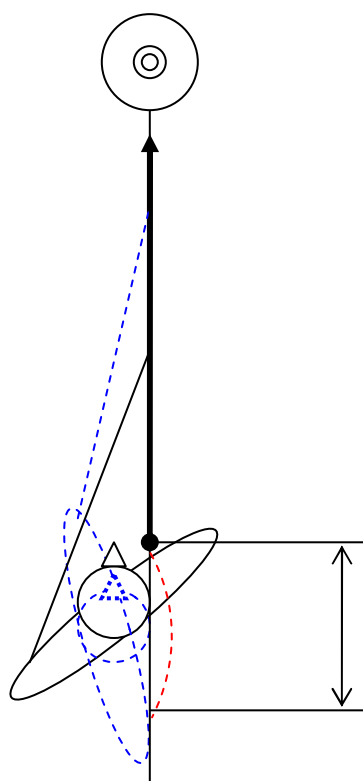


Рис. 3.6. Амплитуда тетивы  $x$  при натяжении поворотом корпуса (показана двойной стрелкой по хвостовику стрелы)

Затем, удерживая лук и стрелу, он поворачивает свой корпус вокруг вертикальной оси, распрямляя левую руку в сторону цели (“отжимает” от себя

лук) и поворачивается левым плечом в сторону цели, отводя правое плечо назад (показано пунктиром). Хвостовик стрелы при этом совершает движение по дугообразной траектории (она отмечена пунктиром). Так как расстояние между ладонью левой руки, в которой зажат лук, и правым плечом стрелка, у которого зафиксирована тетива с хвостовиком стрелы, при повороте корпуса увеличивается, то происходит натяжение тетивы. Амплитуда ее натяжения показана двусторонней стрелкой.

Амплитуда тетивы здесь определяется антропометрически. Так, авторы этих строк путем эксперимента с рулеткой установили, что для человека, ростом 172 см, с длиной руки от плеча до кисти 60 см, длиной ключицы 10 см, и длиной плечевой кости 24 см этот показатель возрастает с 50 до 90 см, то есть амплитуда составляет 40 см. Значит, верхнюю границу значений амплитуды в условиях максимальной силы натяжения предварительно напряженного тугого боевого лука для данного стрелка следует принять в области 40 см.

### **3.5. Баллистическая реконструкция стрел**

Изложенные идеи открывают путь к процессуальному моделированию боевого прицельного применения древних луков в условиях конкретных фортификаций. Для этого необходимо обладать ситуационными схемами местности, которыми, как правило, сопровождаются публикации о раскопках того или иного городища.

Для решения поставленных целей был создан пакет программ “Archer” [Коробейников, Митюков (3)], предназначенный для реконструкции баллистических параметров лука и стрелы по характеристикам наконечника (рис. 3.7).

Алгоритм состоит из трех модулей: модуль параметров наконечника, модуль механики лука и модуль внешней баллистики. Пакет имеет удобный пользовательский интерфейс (снабженный для простоты восприятия системой всплывающих подсказок), позволяющий последовательно переходить из одного модуля в другой. У пользователя всегда есть возможность закончить расчеты, не переходя в следующий модуль.

Программа предусматривает два возможных маршрута расчетов: прямой и обратный. При прямом баллистическом расчете она дает возможность построения по данному наконечнику семейств траекторий и определения внешнебаллистических параметров (рис. 3.8).

Обратный расчет подразумевает определение для данного наконечника угла возвышения и дальности при заданных начальной скорости и энергии у цели, а также угла возвышения и начальной скорости по дальности и энергии у цели. Для использования программы в целях реконструкции параметров фортификаций имеется блок редактора местности, который автоматически строит рельеф местности в направлении траектории полета по восьми ключевым точкам, для которых необходимо ввести значения высоты и дальности. В этом случае мож-

но построить ситуационный план местности, вблизи которой была найдена та или иная археологическая находка, а при необходимости и виртуально обстрелять данную местность, используя реконструированные параметры стрелы.

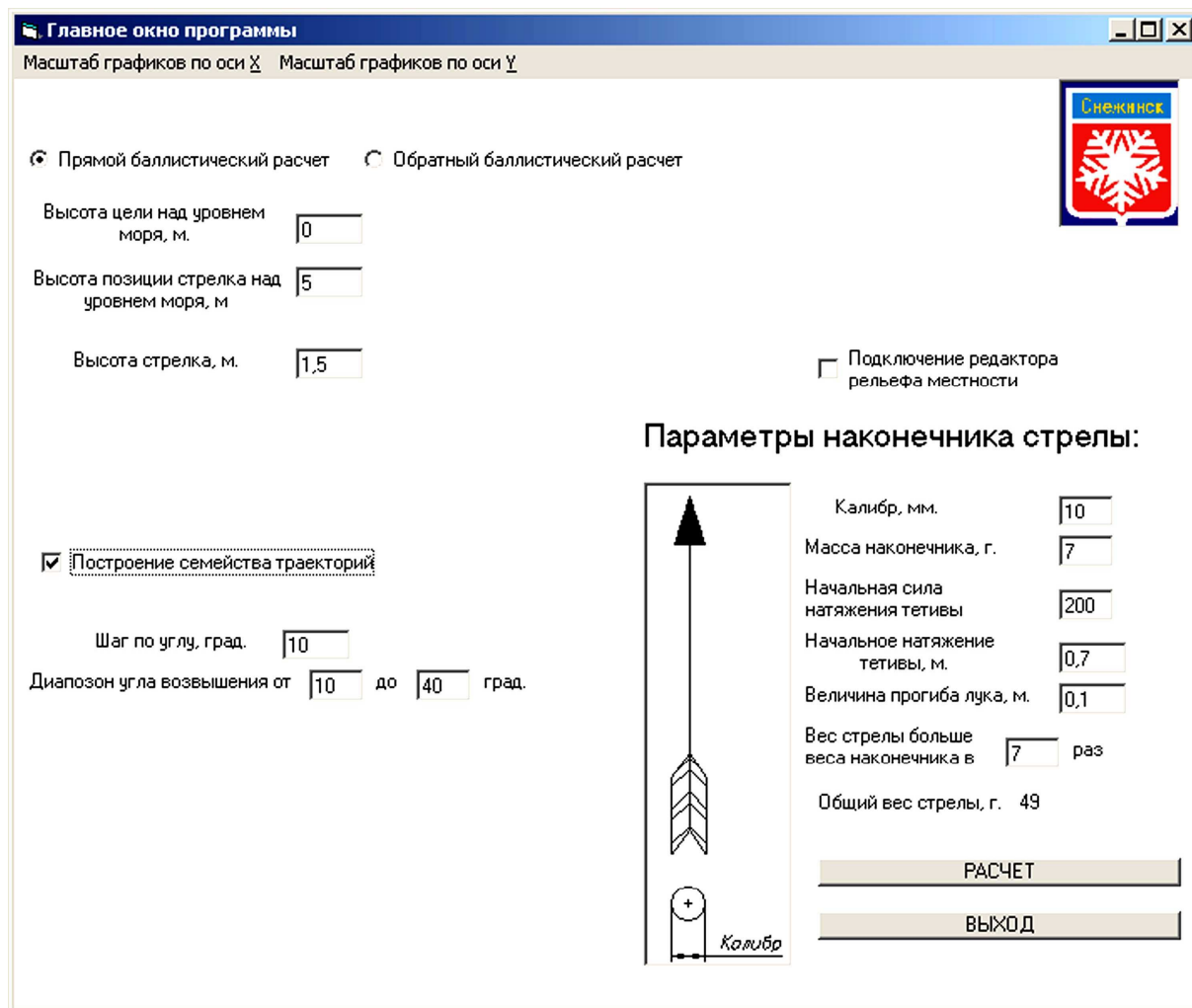


Рис. 3.7. Главное окно программы Archer

Для расчета возможности обстрела фортификации конкретными снарядами, при использовании “Archer”, необходимо собрать исходные данные: отметки высот могут быть взяты с плана местности, масса снаряда определена взвешиванием и вычислениями с использованием программы “Osseus”, калибр определен штангенциркулем, а угол возвышения принят в соответствии с превышением цели (путем решения прямоугольного треугольника, если предположить, что прицеливание возможно на относительно прямолинейном участке траектории).

Безусловно, в силу неопределенности такого параметра, как потенциальная энергия упругой деформации древнего лука, предложенный подход имеет свои ограничения. Мы сегодня не знаем достоверно, какую энергию стрела получала от лука, и с какой скоростью она двигалась. Следовательно, возможными становятся лишь оценочные расчеты параметров стрельбы. Несмотря на отмечен-

ную ограниченность, предлагаемый метод позволяет обратиться к процессуальному моделированию боевого применения городищ хотя бы в первом приближении. Покажем это на примере городища Иднакар.

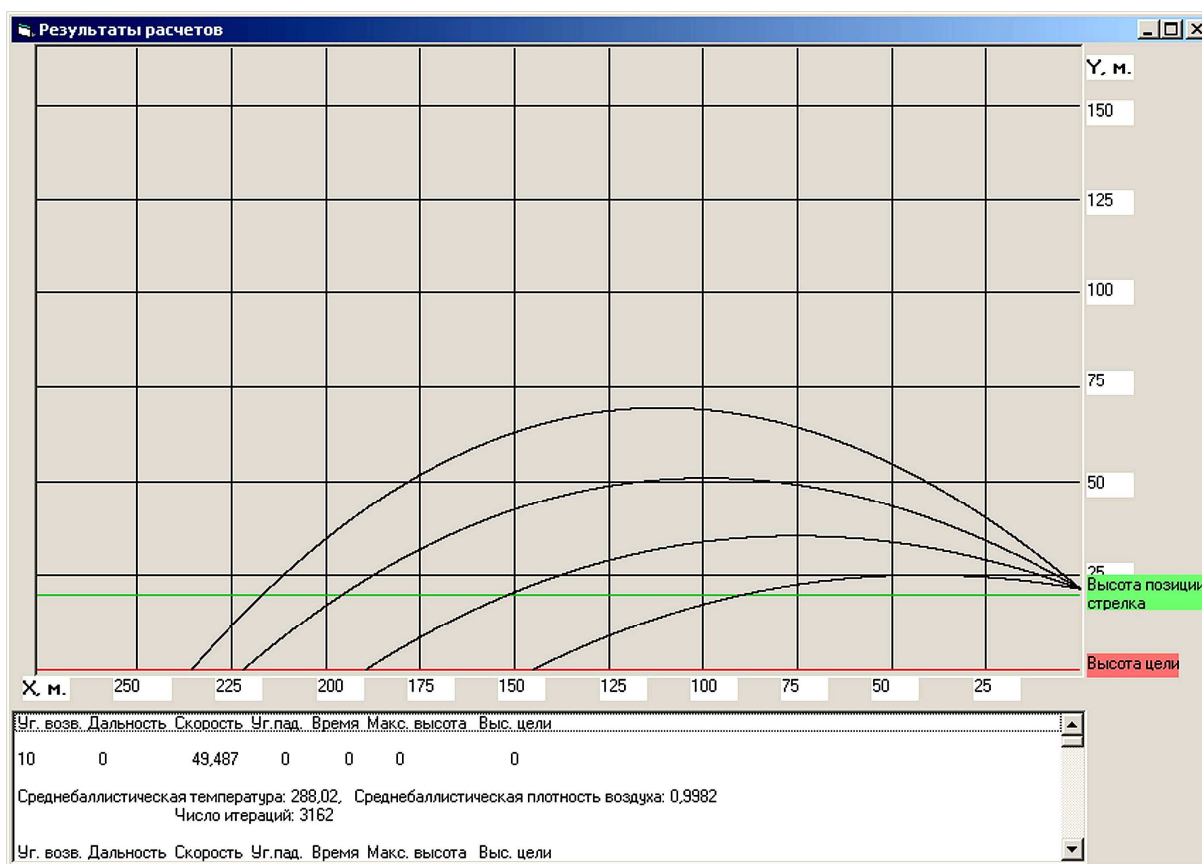


Рис. 3.8. Окно результатов программы Archer

Обратимся к плану этого поселения: рис. 3.9 [Иванова, С. 13]. Подвергнем городище виртуальному “обстрелу” с поймы реки (с отметки 67 м, точка 5), с возвышенности, расположенной к востоку от наружного вала (с отметки 99 м, точка 1), и со склона этой возвышенности, обращенного к городищу (с отметки 95 м, точка 2).

Для иллюстрации возможностей программы попытаемся применить ее для виртуального обстрела Иднакара. Воображаемый стрелок стреляет каждый раз одинаковыми стрелами. В данном случае приняты следующие данные:  $m = 25$  г,  $d = 10$  мм,  $V_0 = 60$  м/с.

1. Стрелок с точки у подошвы мыса ПС 5 (рис. 3.9) поражает цели на бровке и в узкой полосе вдоль бровки. Так как он находится ниже целей, бровка перекрывает ему линию визирования. Теоретически, он может поражать видимые ему цели прямым выстрелом (на восходящей ветви траектории) и навесным, “на авось” (на нисходящей ветви траектории). Результаты баллистического расчета представлены на рис. 3.10.

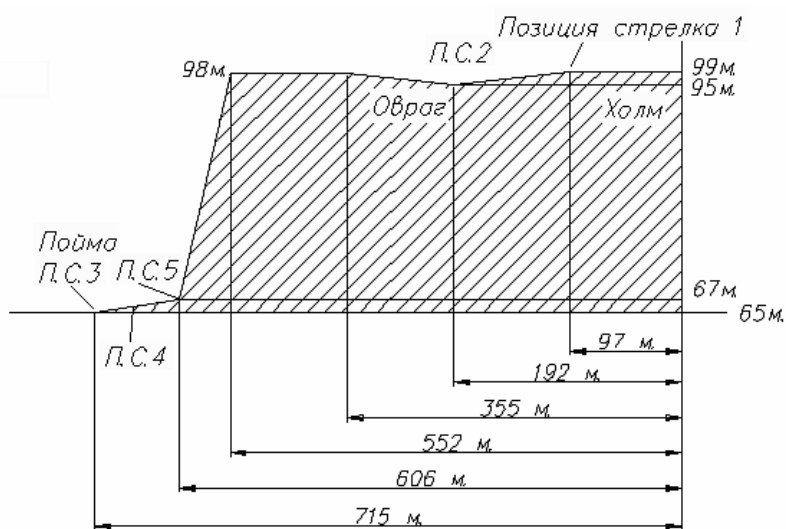
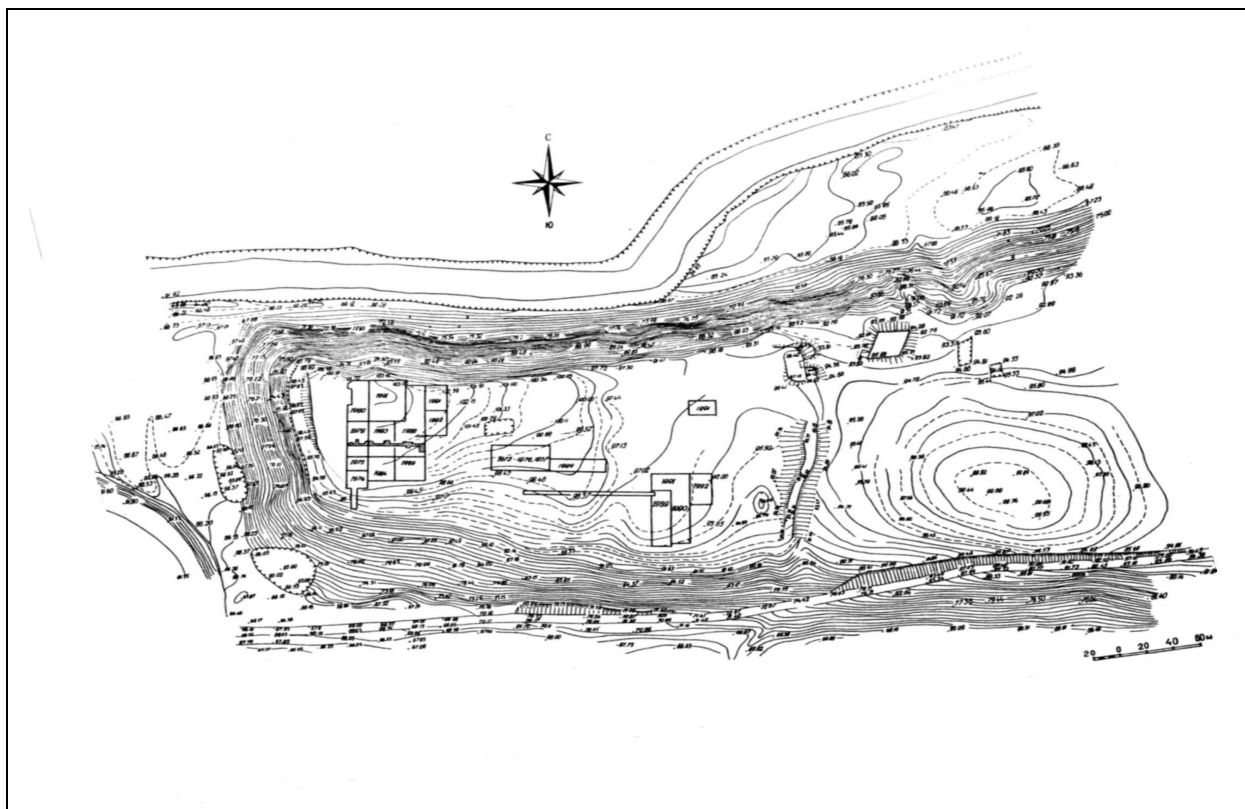


Рис. 3.9. Схематический продольный профиль площадки городища Иднакар

Воображаемый стрелок должен иметь эталон возвышения: он может давать упреждение по высоте в пределах двойной высоты фигуры на бровке. Для простоты примем высоту цели 1,7 м. Всякий, кому приходилось смотреть в оптический прицел винтовки, гранатомёта и т.п. помнит, что мерой возвышения при прицеливании является высота цели на известной дистанции. Тогда в общем случае лучник целится в некоторую точку, превышающую его на высоту

точки стояния цели и на высоту самой цели. Чем дальше отходит лучник от склона городища, тем большее количество целей он может просматривать, но при этом неизбежно увеличивается дальность стрельбы, и, например, уже при угле прицеливания  $50^\circ$ , давая возвышение по высоте цели, лучник точно попадает в цель. При угле прицеливания  $40^\circ$  выбранного возвышения в рост цели становится недостаточно, и стрела попадает в бровку. В этом случае лучник находится от бровки на дальности примерно 45 м, и, соответственно, видит свою цель ростом 1,7 м на удалении от бровки примерно до 2 м ( $1,7 \cdot \text{ctg } 40^\circ$ ).

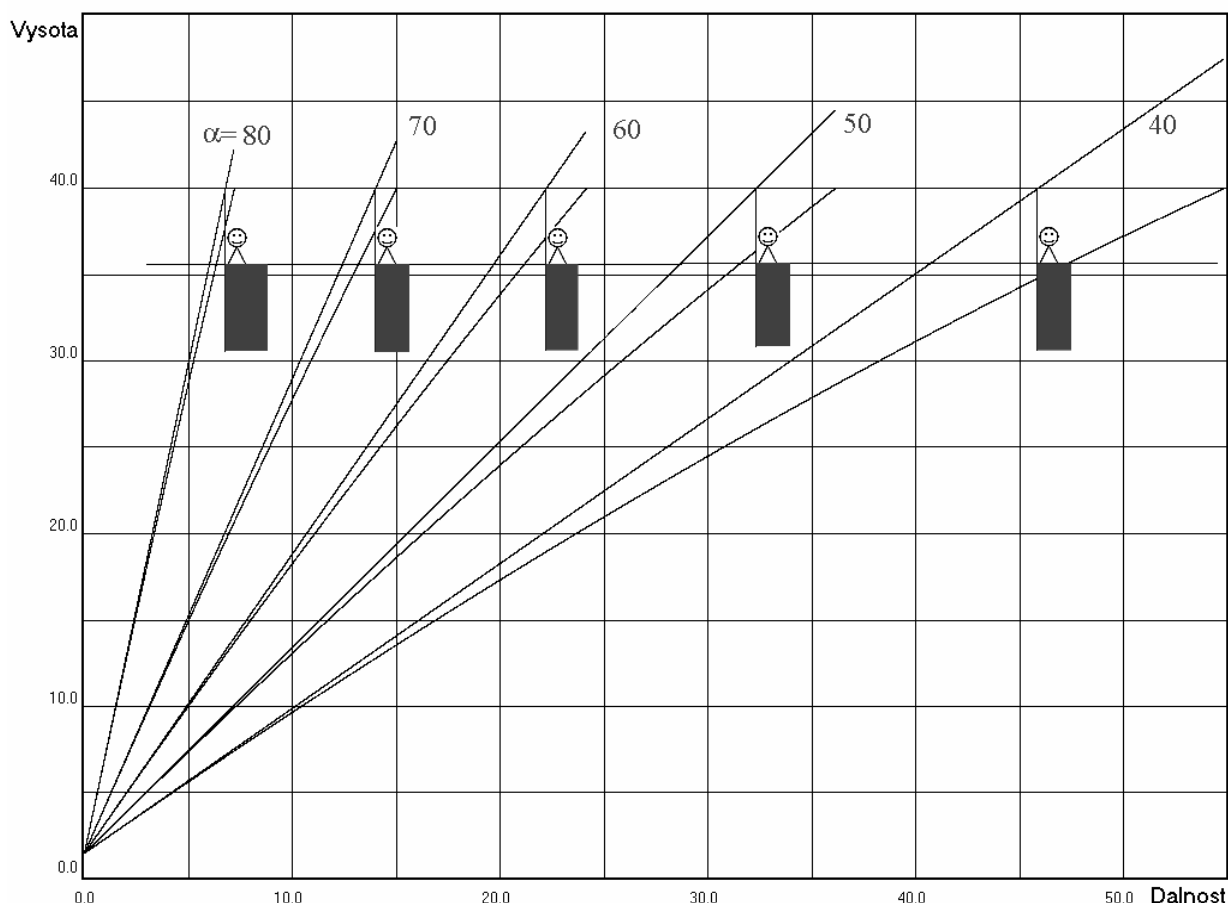


Рис. 3.10. Результаты виртуального обстрела Иднакара с поймы

2. Той же стрелой лучник стреляет из точки 1 (рис. 3.9: Позиция стрелка 1). Результаты баллистического расчета приведены на рис. 3.11. Как видно, стрелок, находящийся на вершине холма перед внешним валом, поразить цели даже у подошвы не может: максимальная дальность полета стрелы составляет всего 40 м. Угол прицеливания, при учете упреждения по высоте, равной удвоенному росту цели (человека высотой 1,7 м), составляет: высота превышения точки цели – 5 м, высота лука 1,5 м, упреждение по высоте 3,4 м ( $2 \cdot 1,7 = 3,4$  м), длина подошвы холма (до первого вала) 100 м, т.е. угол прицеливания равен:  $\arctg((5,0 + 1,5 - 3,4)/100) = 1,8^\circ$ .

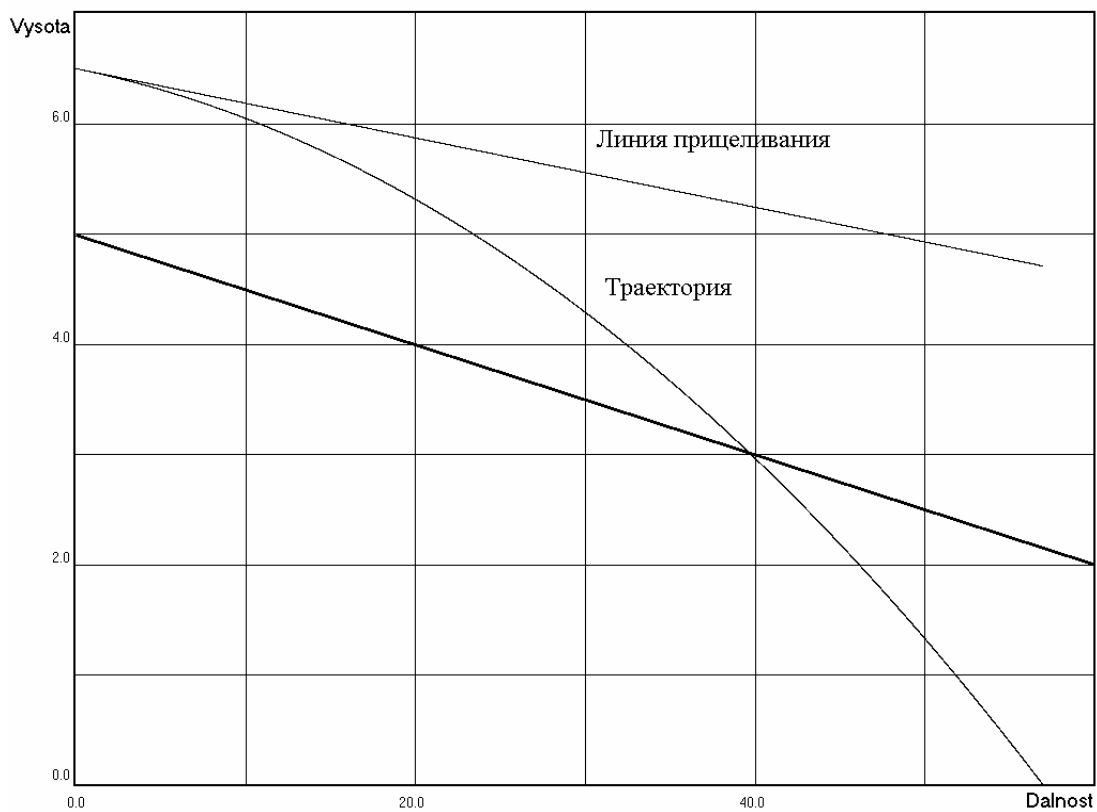


Рис. 3.11. Результаты виртуального обстрела Иднакара с холма

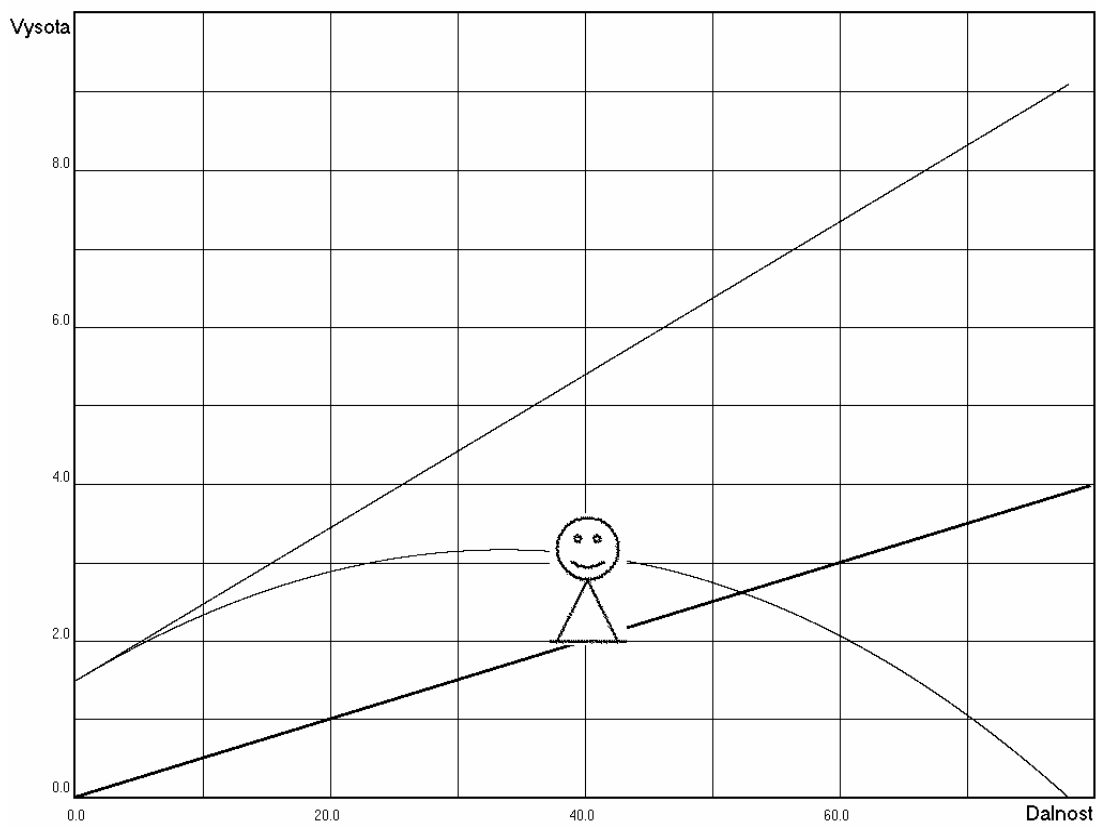


Рис. 3.12. Результаты виртуального обстрела Иднакара от первого вала

3. Обстрел из позиции 2. В данном случае, если предположить, что высота оборонительного сооружения составляла здесь 1,7 м, становится ясно, что все цели на возвышенной площадке городища оставались непоражаемы прицельными выстрелами. Рассмотрим стрельбу по цели на удалении 40 м (рис. 3.12, где самая нижняя линия графика отражает рельеф местности, средняя линия – траекторию стрелы, а верхняя – линию прицеливания). Угол прицеливания вычисляется следующим образом: превышение цели над позицией стрелка 2 м, упреждение по высоте 3,4 м, высота лука 1,5 м,  $\arctg((2,0 + 3,4 - 1,5)/40) = 5,6^\circ$ . Из рисунка видно, что теоретическое максимальное удаление поражаемой цели составляет всего 53 м.

### **Вывод**

Таким образом, предложенный подход позволяет реконструировать стрелу в сборе, получить данные о параметрах лука, из которого эта стрела могла быть выпущена, и сделать обоснованные предположения об ее баллистических характеристиках. Иными словами, археологические данные позволяют авторам решать одновременно вопросы как внутренней (механики лука), так и внешней баллистики конкретной системы наконечник–стрела–лук–стрелок, в силу чего становится возможной перспектива оценки оборонительных качеств и реконструкция боевого применения конкретных фортификаций, в окружении которых были обнаружены те или иные наконечники стрел.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
1.1. Зачем и как изучать действие снаряда по цели на основе археологических данных .....	3
1.2. Поражающие факторы стрелы .....	5
1.3. Примеры раневой баллистики по данным археологии.....	9
2. Общие сведения по аэробаллистической проблематике.....	18
2.1. Основная задача внешней баллистики стрелы.....	18
2.2. Обязательные допущения внешней баллистики .....	21
2.3. Величина силы лобового сопротивления .....	24
2.4. Закон силы лобового сопротивления для стрел .....	32
2.5. Постановка задач для эксперимента .....	44
3. Реконструкция параметров стрел расчетными методами.....	47
3.1. Описание ситуации .....	47
3.2. Слагаемые силы лобового сопротивления стрел .....	48
3.3. Оценка параметров стрелы через параметры наконечника .....	50
3.4. Длина стрелы и исследовательские подходы к реконструкции лука.....	59
3.5. Баллистическая реконструкция стрел .....	64
4. Принципы и возможности реляционной базы данных о стрелах .....	71
4.1. Ограниченность типологии А.Ф. Медведева и ее клонов.....	71
4.2. Архитектура и принципы построения базы данных.....	75
4.3. Новые возможности с использованием реляционной базы .....	79
4.4. Демонстрация математического метода исследования .....	84
5. Стрела из могильника Пыштайн.....	92
5.1. Натурная реконструкция и типологизирование наконечника .....	92
5.2. Реконструкция стрелы в сборе.....	100
6. Бронебойные проникающие малых энергий .....	104
6.1. Некоторые концептуальные аналоги .....	105
6.2. О научном подходе к моделированию бронепробития .....	110
6.3. Краткий перечень энергозатрат стрелы .....	111
6.4. Механизм пенетрации и типология стрел.....	112
6.5. Фрикционная гипотеза пенетрации и ассортимент наконечников .....	116
6.6. Срезень – бронебойное оружие массовой армии? .....	122
Заключение .....	131
Литература .....	133

Научное издание

Коробейников Алексей Владимирович  
Митюков Николай Витальевич

Баллистика стрел по данным археологии: введение в проблемную область

Верстка *Н.В. Митюкова*  
Корректор *С.А. Перевозчикова*

Подписано в печать 23.12.2006. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура Таймс. Печать на ризографе. Усл. печ. л. 8,14. Уч.-изд. л. 7,13.  
Тираж 300 экз. Заказ № 304.

Редакционно-издательский отдел  
Камского института гуманитарных и инженерных технологий  
426057, г. Ижевск, ул. Советская, 13.