

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

Подвиги лучников...стали в Англии легендой после того, как это оружие уже вышло из употребления.

Молодежь имела смутное представление о луке и не могла спорить с рассказчиком.¹

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Зачем и как изучать действие снаряда по цели на основе археологических данных

Наверняка всякий современный историк понимает, что в условиях информационного взрыва сколько-нибудь продуктивная деятельность в области изучения прошлого становится просто немислима без привлечения точных наук. Таким образом, для осуществления междисциплинарного исследования археолог или историк вооружений должны обладать хотя бы минимальным запасом знаний из сферы баллистики. Предлагаемая книга призвана, с одной стороны, очертить круг проблем в области исторической баллистики цели, а с другой стороны, познакомить читателя с некоторыми результатами, которые иллюстрируют возможности междисциплинарного подхода.

Баллистика цели изучает действие снаряда на цель. Таким образом, она наиболее приближена к познанию существенных признаков оружия, ведь поражение цели в той или иной форме является единственным побудительным мотивом стрелка. Именно ради этого он использует и лук, и стрелу. Решение познавательных вопросов в этой области является на сегодня актуальным в силу того, что именно здесь, с одной стороны, существует наибольшее количество эмоциональных и бездоказательных утверждений, а с другой стороны, баллистика цели сегодня интересует многих: производителей оружия и криминалистов, историков и ролевиков-реконструкторов. Так, криминалисты занимаются проведением экспертиз, в ходе которых устанавливают способность снаряда наносить опасные для жизни и здоровья повреждения [Тихонов], историки пытаются моделировать деятельность исторического субъекта, а ролевики в поисках экстрима даже обстреливают добровольцев из своей среды, одетых в доспехи [Кинетическая энергия...].

Для историка методы баллистики могут быть полезны, прежде всего, при изучении периодов революционных изменений вооружения и тактики войска, ибо в конечном счете такие перемены, связанные с принципами организации войска, неотделимы от преобразований в социальном устройстве того или иного общества. Например, как известно, эпоха Великого переселе-

¹ [Пейн-Галлуэй, С. 36]

ния народов принесла в военное дело Европы крупные изменения в области тактики боя, в результате чего лук приобрел бóльшее значение, чем в античности, а ядром войска и его решающей силой стала конница [Бехайм, С. 279]. Но простая логика подсказывает, что самой уязвимой частью конного воина является его лошадь: во-первых, она намного крупнее человека, и вероятность попадания стрелы в нее, а не во всадника пропорциональна величине ее силуэта. Во-вторых, движущиеся части лошади просто невозможно защитить от поражения метательными снарядами (забронировать). Наконец, всадник без лошади, или на раненой лошади, уже не является полноценной боевой единицей в составе подразделения кавалерии.

Именно в области баллистики цели циркулирует множество легенд; стоит лишь упомянуть легенду о так называемых “срезнях” – наконечниках, передняя кромка которых имеет прогиб в средней части. Согласно распространенному мнению они являются “особым видов наконечников... и предназначены для подрезания сухожилий у коней или тетив на луках противника” [Шокарев, С. 29], а также “для подрезания сухожилий у животных, к примеру, при охоте на косулю делались ножевидные наконечники, с прямым или полулунным лезвием” [Тихонов, С. 120]. Разумеется, авторы таких постулатов не утруждают себя вопросом относительно того, **зачем** подрезать бедному животному сухожилия: если это боевая лошадь, то вероятность попадания в иные части ее тела гораздо выше, чем непременно в сухожилие (ног), а результат тот же – раненая лошадь перестанет слушаться седока. А если надо поразить лошадь непременно в ноги (в предположении, что все остальное прикрыто доспехом), то это можно сделать стрелами любого типа. И всякий охотник стремится не подранить животное, а надежно убить с первого выстрела. Ведь если животному предназначено умереть от стрелы, то зачем калечить его предварительно столь замысловатым способом? А каков же процент вероятности попадания срезнем в тетиву вражеского лука?! Еще исследователи-оружиеведы конца XIX в. отмечали, на основе эмпирических данных, полученных по арбалетным болтам, что стрелы с наконечниками вилкообразной формы неустойчивы в полете и имеют значительный разброс попаданий [Бехайм, С. 304]. Знакомство с основами баллистики позволяет привести научные основания тому, что всякая стрела, имеющая широкий плоский наконечник, относительно неустойчива в полете: малейшее конструктивное отклонение ее центра массы от продольной оси, либо отклонение ветром хвостовой части приведут к тому, что плоский развитой наконечник станет двигаться в воздухе с некоторым углом атаки, то есть создаст подъемную силу, действие которой приведет к сходу снаряда с расчетной траектории, либо к отклонению угла встречи с целью от нормали. Иными словами, попадание по малоразмерным целям таким наконечником маловероятно. Таким образом, для окончательной оценки разброса попаданий необходимо доказать, что центр массы срезня и центр давления (точка приложения аэродинамических сил к нему) совпадают с продольной

осью стрелы. Видимо, эту задачу нельзя решить, не имея в руках стрелы в сборе и без результатов серии аэродинамических испытаний.

1.2. Поражающие факторы стрелы

Тема предлагаемой работы касается снарядов, получивших наибольшее распространение, а именно, речь идет о стрелах, которые были выпущены из лука и предназначены для поражения живой силы. Исходя из общей логики применения метательных снарядов, можно выделить основные поражающие (повреждающие) факторы стрелы:

1. Психологическое (деморализующее) воздействие;
2. Опрокидывающее действие (свалить с коня, со стены);
3. Контузия (ушибы);
4. Непроницающие поражения наружных покровов и частей тела (кровотечения, осаднения);
5. Поражения внутренних органов и опорного аппарата (разрывы, внутренние кровоизлияния, раздробления, размозжения, инфекция);
6. Болевой шок.

Нетрудно заметить, что поражающие факторы существенно различаются по признаку проникновения снаряда вглубь цели; стрела причиняет либо поверхностное, либо проникающее ранение. Глубина проникновения в тело цели (способность преодолевать динамическое сопротивление среды) зависит от величины энергии и от формы снаряда. Поэтому логично полагать, что форма снаряда определяется его назначением, ведь снаряды одинаковой массы, выпущенные из одного лука, имеют одинаковую энергию у цели. Однако действие по цели у них различно. Необходимо констатировать, что натурное изучение боевой баллистики цели затрудняется неоднородностью человеческого тела, высокой стоимостью имитаторов и биологического материала и нерешенностью острых вопросов морального плана. Известно, однако, что исследования отдельных поражающих факторов стрелы проводились на трупном материале, что позволило криминалистам опубликовать некоторые выявленные закономерности. Разумеется, на живой организм отмеченные (и иные?) факторы воздействуют в комплексе, взаимно усиливая друг друга. Однако не вызывает сомнения то обстоятельство, что заостренные снаряды в целом легче преодолевают сопротивление среды и, соответственно, рассчитаны на проникающие ранения, а наконечники с притупленной кромкой наносят лишь поверхностные повреждения. Откуда следует, что стрелы с такими наконечниками могут составлять аналог современному нелетальному оружию, каковым являются, например, “резиновые” пули и т.п. Назначением такого оружия является временное выведение противника из строя. Останавливающее действие нелетальных снарядов основано на нанесении несмертельных (не опасных для жизни) телесных повреждений (осаднений, поверх-

ностных кровотечений и т.п.) и болевого воздействия за счет того, что они мгновенно передают поражаемым тканям бóльшую часть своей кинетической энергии. Иными словами, они действуют преимущественно на психику человека, лишая его возможности к осмысленным действиям и подавляют волю к сопротивлению. Значит, логично полагать, что применение нелетального оружия целесообразно прежде всего там, где агрессор планирует ресурсное использование пораженных стрелами: захват пленных и реализацию их в качестве рабов (или эксплуатацию оседлого населения) после несложного лечения поверхностных ран.

Как представляется, вопросы раневой баллистики не получили пока должного внимания со стороны отечественных историков. К примеру, Ю.С. Худяков, приводя свидетельство Плано Карпини о “монгольских” стрелах с наконечниками в три пальца ширины для стрельбы в безоружных людей, утверждает, что “прицельная стрельба по незащищенному панцирем противнику и лошадям привела к появлению разнообразного спектра плоских широколопастных наконечников, оставляющих кровоточащие раны, выводя неприятеля из строя” [Худяков, С. 124–125]. Нетрудно заметить, что средневековый источник пишет о безоружных людях (нонкомбатантах), а современный исследователь говорит о небронированных воинах. Но воин может быть защищен если не панцирем, то щитом, он прикрыт лошадью и, наконец, командир тактически выводит свое подразделение из-под обстрела, перемещая его на поле боя, а отдельные стрелы обученный воин умеет парировать. А безоружный гражданский от стрелы может только попытаться бежать. Следовательно, речь идет о разных целях, и вывод исследователя здесь не основан на свидетельстве письменного источника. Кроме того, переводчик средневекового автора по отношению к цели употребляет термин “безоружный”. Однако, по нашему мнению, основываясь на том, что исходное (?) *Agmatius* переводится не только как вооруженный, но и защищенный, боевой [Дворецкий, С. 76] здесь, видимо, вообще недостаточно данных для того, чтобы однозначно утверждать относительно характера цели; идет ли в средневековом источнике речь о гражданском населении либо о воинах без защитного снаряжения. Наконец, о “разнообразном спектре плоских широколопастных наконечников” можно говорить исключительно в морфологическом аспекте; с точки зрения действия по цели все эти наконечники однотипны, и форма не является их существенным признаком, ибо все они достигают технического результата (поражения цели) одинаковым способом – нанесением непроникающего ранения. Иными словами, можно предположить, что за формальным разнообразием здесь сокрыта стандартизация снарядов внутри войсковой организации. (Хотя до взвешивания серий наконечников и инструментального исследования их аэродинамических характеристик высказанная нами гипотеза повисает в воздухе.) Представляется вполне логичным, что для того, чтобы обеспечить приемлемую устойчивость траектории стре-

лы с наконечником столь несовершенной аэродинамической формы, какой является срезень, и гарантированно попасть в подвижную цель, стрела должна была получать импульс движения гораздо более того, что нужен для наконечника с оптимальной аэродинамикой и балансом (шиловидного, пулевидного, ланцетовидного). Следовательно, применение широкого тупоконечного в плане наконечника (broadhead) есть явное свидетельство увеличения энергии лука либо уменьшения дистанции стрельбы.

На наш взгляд, широкое применение нелетальных наконечников могло быть обусловлено потребностями временного поражения там, где надо победить войско (нейтрализовать воинов), но нет нужды уничтожать податное население, и такая гипотеза соответствует историческим реалиям: по мнению исследователей, плоские наконечники с расширением на конце были принесены в Европу во время монголо-татарского нашествия [Медведев, С. 75–76]. М.В.Горелик, иллюстрируя материал о монгольских наконечниках стрел XIII–XIV вв., приводит около полусотни изображений наконечников из Монголии, Узбекистана, южной Украины и Прикубанья [Горелик]. И все наконечники, за исключением трех-четырех – это срезни, либо они имеют широкие лопасти. Трудно судить о репрезентативности представленной выборки, но в сознании современного читателя описываемый тип нелетального наконечника прочно ассоциируется с нашествием мобильного войска. Поэтому их применение, как представляется, может служить маркером статуса в военном конфликте: так, защитникам городища нет никакого интереса выводить из строя воинов атакующей стороны лишь на короткое время. Агрессор, напротив, рассматривает жителей городища (оккупированной территории) как желанную военную добычу, реализация которой (или эксплуатация) покрывает его затраты на организацию экспедиции. Следовательно, именно агрессор заинтересован в применении нелетального оружия.

Обнаружение разнотипных наконечников в материале городища порождает вопросы, в частности относительно так называемых бронебойных наконечников:

– Кто стрелял заостренными (в т.ч. шиловидными, бронебойными) наконечниками: агрессор или защитник? Очевидно, что защитник городища (крепости) защищен в первую очередь инженерными сооружениями (бруствером и т.п.), против которых стрелы бесполезны. А воин штурмовой колонны несет защиту (дорогостоящий панцирь) на себе. Значит, бронебойные наконечники применяют против войска агрессора? Если так, то энергия стрелы у цели и длина рабочей части такого наконечника должны быть достаточными, чтобы пробить панцирь и толщину подстилающей защитной одежды (дублета и т.п.).

– Может ли обнаружение длинных заостренных (шиловидных) наконечников однозначно свидетельствовать о том, что ими были обстреляны бронированные цели? Наверное нет, не может. Ведь отличие (или достоинство) та-

ких наконечников от иных состоит в том, что они не вызывают рикошета снаряда на любых углах встречи с небронированной целью. То есть ими вполне могли поражаться и небронированные цели. Просто вероятность поражения последних (путем пенетрации) с применением такого наконечника увеличивалась.

– Являются ли шиловидные наконечники безусловно летальным оружием? Видимо нет, не являются. Невероятно предположение о том, что древний лучник умел попадать срезом в малоразмерные движущиеся предметы (тетиву, сухожилия и т.п. – см. выше), однако вполне допустимо полагать, что он мог попасть шиловидным наконечником в крупные мышцы (бицепс, бедро, ягодицы) и вызвать останавливающее действие при минимальном разрыве тканей и с прямолинейной раневой траекторией. Из мышечной ткани (или из легких, костей и т.п.?) такой наконечник мог быть элементарно и сравнительно безболезненно извлекаем путем вытягивания за древко стрелы. Соответственно, такое ранение, не затрагивающее внутренние органы, могло быть целенаправленно нелетальным. Кроме того, такой наконечник, отдавший свою энергию на пробивание наружной преграды, вызывает и относительно меньшие повреждения в броневом пространстве (меньше травмирует внутренне органы) в силу своего меньшего сечения. Вообще, термин “броневой наконечник”, применяемый в типологии стрел, на наш взгляд, является очень условным при описании археологических памятников там, где сами брони (или свидетельства их применения) не обнаружены. Видимо, до моделирования работоспособной системы, включающей лучника, лук и стрелу с броневым наконечником, возможность применения такого оружия для пробивания доспеха находится под сомнением. К слову, античный мир имел и развитое кузнечное ремесло, и различная броневая защита широко применялась, однако специальные броневые наконечники стрел, кажется, не известны для этого периода? Может быть потому, что действенным броневым оружием были метательные копья типа *pilum*? В самом деле, зачем именно стрелять для пробития брони? Человек – это не танк, по которому стреляют с дистанции в несколько километров. Воин всегда оставляет уязвимые и видные с дистанции прямого выстрела пространства, которые просто невозможно прикрыть броней.

– Является ли шиловидный наконечник технологически более сложным (и дорогостоящим) изделием, чем, например, плоский листовидный, или срезень? Безусловно так, ведь при его изготовлении, в отличие от последних типов, для баланса стрелы в полете надо обеспечить симметрию переменного сечения металла сразу в двух перпендикулярных плоскостях. Следовательно, кузнецу не обойтись без специальных оправок или калибров, либо он должен иметь очень развитые навыки металлообработки. И почему не известны шиловидные наконечники из бронзы; ведь осевую симметрию (тело вращения) проще обеспечить литьем, а не ковкой?

Разумеется, все сказанное о бронебойных наконечниках является, скорее, постановкой исследовательских задач для историков вооружений на будущее, и в условиях отсутствия собственного высокотехнологического металлообрабатывающего производства либо при дефиците материалов или в условиях крайней необходимости обороняющаяся сторона могла использовать все имеющиеся под рукой средства и все типы наконечников без разбора для поражения, к примеру, таких крупноразмерных и неприкрытых броней целей, коими являлись лошади кавалерии агрессора, ибо всегда самой уязвимой областью всякой “бронированной машины” является ее ходовая часть.

Видимо, применение нелетального оружия оставляет в археологическом (остеологическом) материале следы, которые трудно поддаются идентификации, они могут походить и на следы применения ударного оружия. Другое дело – заостренные наконечники, рассчитанные на проникающее ранение: наконечники с невозвратными шипами, ланцетовидные и шиловидные. Их применение четко прослеживается на костных останках. И они являются весьма эффективными экспонатами музеев. Так, например, в экспозиции Музея Антропологии и Этнографии УНЦ РАН в Уфе можно видеть бронзовый втульчатый трехлопастной неизвлекаемый наконечник стрелы, вошедший в позвонок шейного отдела человека спереди справа на глубину около двух сантиметров.

Какую информацию можно извлечь из таких свидетельств, если изучать их методами баллистики? Во-первых, можно оценить вероятность смерти пораженного стрелой. Во-вторых, можно в первом приближении судить о количестве энергии, которым обладала стрела в момент встречи с целью, и, соответственно, делать выводы о параметрах применяемого оружия. Рассмотрим некоторые свидетельства применения наконечников из разного материала.

1.3. Примеры раневой баллистики по данным археологии

1. Н.А.Лещинская обнаружила парное захоронение (№ 23) на Еманаевском могильнике. Внутри костей грудной клетки на обоих скелетах ею найдены наконечники стрел (рис. 1.1). По ее мнению, ранения этими стрелами послужили причиной смерти захороненных. Один из наконечников имеет более длинный черешок (верхний на нашем рис. 1.1).

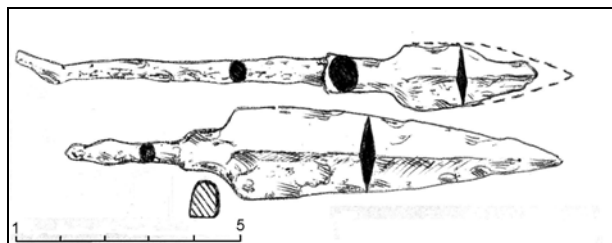


Рис. 1.1. Железные наконечники стрел, обнаруженные Н.А.Лещинской [Лещинская] на Еманаевском могильнике в окружении костей грудной клетки. (По Л.Д.Макарову [Макаров, С. 178])

Этот черешок загнут на конце. По нашему мнению, такой загиб мог появиться в результате попытки извлечь стрелу из тела жертвы. Наконечники имеют ширину 13–20 мм, следовательно, они произвели значительный разрыв тканей и обширное внутреннее кровотечение. Кроме того, сечение наконечников сильно уменьшается в черешковой части, следовательно, если они прошли в тело, например, между ребрами, раздвинув последний острием, то назад их было вынуть весьма сложно вследствие “схлопывания” раневого канала и спазмирования мышц в области раны. Видимо, попытки извлечения стрел в обоих случаях остались безуспешными, и убитые были захоронены вместе с ними.

Нами получены следующие данные при измерении габаритов этого наконечника на натуре: общая длина 95 мм, длина черешка 50 мм, наибольшее сечение черешка 5 мм, сечение жала ромбическое, 13×4 мм, диаметр причерешковой части (сечение по миделю) 9–10 мм. Второй наконечник пока недоступен для натуральных измерений.

Попытаемся оценить величины кинетической энергии стрел, которые оставили рассматриваемые нами следы. “Значение кинетической энергии стрелы на границе поражения можно оценить, используя экспериментальные данные, полученные судебными медиками. Ими было установлено [Тихонов], что усилие, необходимое для нанесения колотых и колото-резаных ран телу человека равно 200...250 Н (20,4...25,5 кгс), поэтому стрелы, для нанесения проникающего ранения на глубину, обеспечивающую повреждение жизненно важных органов, должны обладать кинетической энергией не менее 15 Дж (1,53 кгс·м)” [Криминалистическое исследование...].

Способность снаряда наносить проникающие повреждения зависит от формы его головной части, кинетической энергии и площади поперечного сечения. Значение кинетической энергии снаряда на границе поражения человека носит название минимальной кинетической энергии, величина которой различна для снарядов разного калибра. Экспериментальным путем установлено, что минимальное значение кинетической энергии для снарядов (пуль) следующее: 5,6 мм – 11 Дж, 6,35 мм – 16 Дж, 7,62 мм – 27 Дж, 9 мм – 30 Дж. При этом было установлено, что пули названных калибров, обладая скоростью 100 м/с, заведомо способны нанести проникающее повреждение телу человека.

Очевидно, что при одинаковой кинетической энергии способность нанести проникающее повреждение человеку больше у пули (или наконечника стрелы) с меньшей площадью поперечного сечения. Поэтому для оценки поражающей способности снаряда предложено использовать в качестве единого критерия значение удельной кинетической энергии пули $E_{уд} = \frac{E}{\pi \cdot R^2}$, где R – радиус максимального поперечного сечения (радиус миделя) снаряда, а $\pi = 3,14$.

Согласно произведенным оценкам пули калибра от 5,6...9 мм при скорости 100 м/с имеют удельную кинетическую энергию в интервале 40...60 Дж/см²,

поэтому за минимальное значение удельной кинетической энергии, соответствующей границе поражения человека, в криминалистике принято среднее значение этого интервала 50 Дж/см^2 [Криминалистическое исследование...].

По данным судебной медицины, при выстреле в средние отделы груди при заданных значениях удельной кинетической энергии снаряд причиняет следующие повреждения:

6...8 Дж/см² – ссадины

14...17 Дж/см² – поверхностные раны

32...36 Дж/см² – непроникающее ранение с переломами грудины

54...60 Дж/см² – проникающее ранение грудной клетки

135...145 Дж/см² – проникающее ранение грудной клетки с повреждением ее задней стенки

При невозможности измерить удельную кинетическую энергию, ее оценивают примитивным методом: по результатам стрельбы в пакет сухих сосновых досок. Поражающая способность считается достаточной, если пуля внедрится в мишень на глубину порядка своей длины [Криминалистическое исследование...]. В соответствии с принятой методикой криминалистического исследования метательного оружия “луки для отдыха и развлечений, не являющиеся метательным оружием, имеют усилие натяжения от 5 до 14 кг и конструкцию стрелы, исключаящую ее проникновение в сухую сосновую доску на глубину более 8 мм. Возможность направленного выстрела проверяется экспериментальной стрельбой в мишень с расстояния порядка 5 м” [Тихонов].

В случае с нашими двумя наконечниками мы имеем дело, по меньшей мере, с проникающим ранением грудной клетки, следовательно, величина удельной энергии стрелы лежит в интервале $60...135 \text{ Дж/см}^2$. Наибольший диаметр верхней стрелы при соединении лезвия и черешка близок к 1 см, следовательно, площадь сечения S составит около $0,8 \text{ см}^2$. Тогда величина ее общей кинетической энергии при попадании в цель:

$$E = E_{\text{уд}} \cdot S = (60...135) \cdot 0,8 = 48...108 \text{ Дж} (4,9...11 \text{ кгс}\cdot\text{м}).$$

Так как $E = \frac{mv^2}{2}$, то скорость первой стрелы в момент встречи с целью

$$v_1 = \sqrt{\frac{2E}{m}}, \text{ где } m \text{ – масса стрелы.}$$

Принимая во внимание указание источников², что “у древнерусских стрел вес наконечника стрелы и древка соотносится 1:5, а согласно арабским источникам это соотношение равно 1:7” [Шокарев, С. 30], получаем, что масса снаряда в 6...8 раз больше массы наконечника, которым мы располагаем, что позволяет вывести общую формулу для скорости стрелы:

² Источник этого тезиса мы приводим в соответствующей главе данного издания – см. о книге Arab Archery.

$$v_1 = \sqrt{\frac{2E}{m}}.$$

Масса наконечника m_n может быть определена взвешиванием и подставлена в формулу, что позволит получить некоторое представление о динамических характеристиках примененного лука. Взвешиванием мы установили, что наконечник весит 0,012 кг. Тогда скорость стрелы у цели составит:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (48 \dots 108)}{0,012 \cdot (6 \dots 8)}} = 31 \dots 55 \text{ м/с}.$$

Рассчитаем общую продолжительность движения этой стрелы. Допустим, она выпущена горизонтально, стрелком из положения стоя с высоты $h = 1,5$ м. Традиционный подход в физике – это разложение вектора скорости по двум составляющим – параллельной поверхности земли и перпендикулярной. При этом считается, что обе проекции изменяются независимо. В данном случае в момент пуска вертикальная проекция равна нулю, и в дальнейшем она будет изменяться так, как если бы стрела находилась в свободном падении. В этом случае время до ее встречи с землей будет определять время полета стрелы:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,5}{9,81}} = 0,56 \text{ с},$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения. (Расчет верен и для условия, когда стрелу выпускают под небольшим углом возвышения с тем, чтобы попасть в ростовую фигуру, либо с лошади, т.е. высоты позиции стрелка и цели различаются на 1,5 м).

Следовательно, для настильной стрельбы полученное значение времени есть общее время движения до падения. Дальнейшее исследование сводится к решению типичных физических задач: Какова была скорость стрелы при сходе с тетивы? И какова была дистанция стрельбы?

Движение стрелы в полете будет определяться двумя силами: аэродинамической и тяжести. В предположении, что векторы этих сил взаимно перпендикулярны, что с достаточно большой долей достоверности справедливо для настильной траектории, уравнение движения по закону Ньютона запишется как:

$$m \frac{dv}{dt} = -c_x \frac{\rho v^2}{2} S_m,$$

где m – масса стрелы; v – текущая скорость полета; t – текущее время полета; c_x – коэффициент лобового сопротивления, который примем в первом приближении равным единице; ρ – плотность воздуха (для нормальных атмосферных условий равна приблизительно $1,25 \text{ кг/м}^3$); S_m – площадь миделя ($0,8 \text{ см}^2 = 0,00008 \text{ м}^2$).

Перед нами дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными. Для простоты дальнейших вычислений введем подстановку – постоянный член: $A = \frac{2m}{c_x \rho S_m} = \frac{2 \cdot 0,012 \cdot (6 \dots 8)}{1 \cdot 1,25 \cdot 0,00008} = 1384 \dots 1846 \text{ м} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{кг}/\text{м}^3} = \text{м} \right]$.

$$\text{Тогда: } A \frac{dv}{dt} = -v^2 \Rightarrow -Av^{-2} dv = dt \Rightarrow -A \int_{v_0}^v v^{-2} dv = \int_0^t dt \Rightarrow Av^{-1} \Big|_{v_0}^v = t.$$

В итоге скорость при сходе с тетивы определится как:

$$A \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} \right) = t \Rightarrow v_0 = \left(\frac{1}{v} - \frac{t}{A} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{31 \dots 55} - \frac{0,56}{1384 \dots 1846} \right)^{-1} = 31 \dots 56 \text{ м/с}.$$

Отсюда видно, что разница скорости у цели и при сходе с тетивы почти не фиксируется. Значит, при таких скоростях и при столь незначительном времени полета работа силы лобового сопротивления невелика. А потому ускорение торможения можно принять примерно постоянным:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{c_x \rho v^2}{2m} S_m = \frac{1 \cdot 1,25 \cdot (30 \dots 55)^2}{2 \cdot 0,012 \cdot (6 \dots 8)} 0,00008 = 0,49 \dots 2,18 \text{ м/с}^2.$$

Отсюда дальность (дистанция) стрельбы:

$$S = v_0 t - \frac{at^2}{2} = (31 \dots 56) \cdot 0,56 - \frac{(0,49 \dots 2,18) \cdot 0,56^2}{2} = 17 \dots 31 \text{ м}.$$

Но вернемся к рис. 1.1. Нижняя стрела в наибольшем сечении (по миделю) представляет собой ромб с диагоналями $d_1 = 2 \text{ см}$ и $d_2 = 0,5 \text{ см}$. Его площадь $S = 0,5 d_1 d_2 = 0,5 \cdot 2 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ см}^2$.

Следовательно, величина общей кинетической энергии этой стрелы находится в интервале:

$$E_k = (60 \dots 135) \cdot 0,5 = 30 \dots 67,5 \text{ Дж} (3 \dots 6,9 \text{ кгс} \cdot \text{м}).$$

Соответственно, взвешивание второго наконечника позволит произвести расчеты характеристик использованного метательного оружия.

Итак, что нам может дать значение конечной кинетической энергии? На рис. 1.2 приводятся номограммы, составленные по результатам внешнебаллистических расчетов для двух стрел с различной массой. При стрельбе на максимальную дальность предполагается оптимальный угол возвышения – 45° . Если на основе повреждений, произведенных стрелой, нам известен интервал значения ее кинетической энергии (см. выше) и предполагаемая дистанция стрельбы, то мы имеем возможность с помощью номограммы восстановить начальную скорость стрелы (при сходе с тетивы), и сделать заключение об энергии лука, из которого она выпущена. (Энергия лука зависит от силы натяжения и амплитуды тетивы.) Либо же, зная достоверно параметры

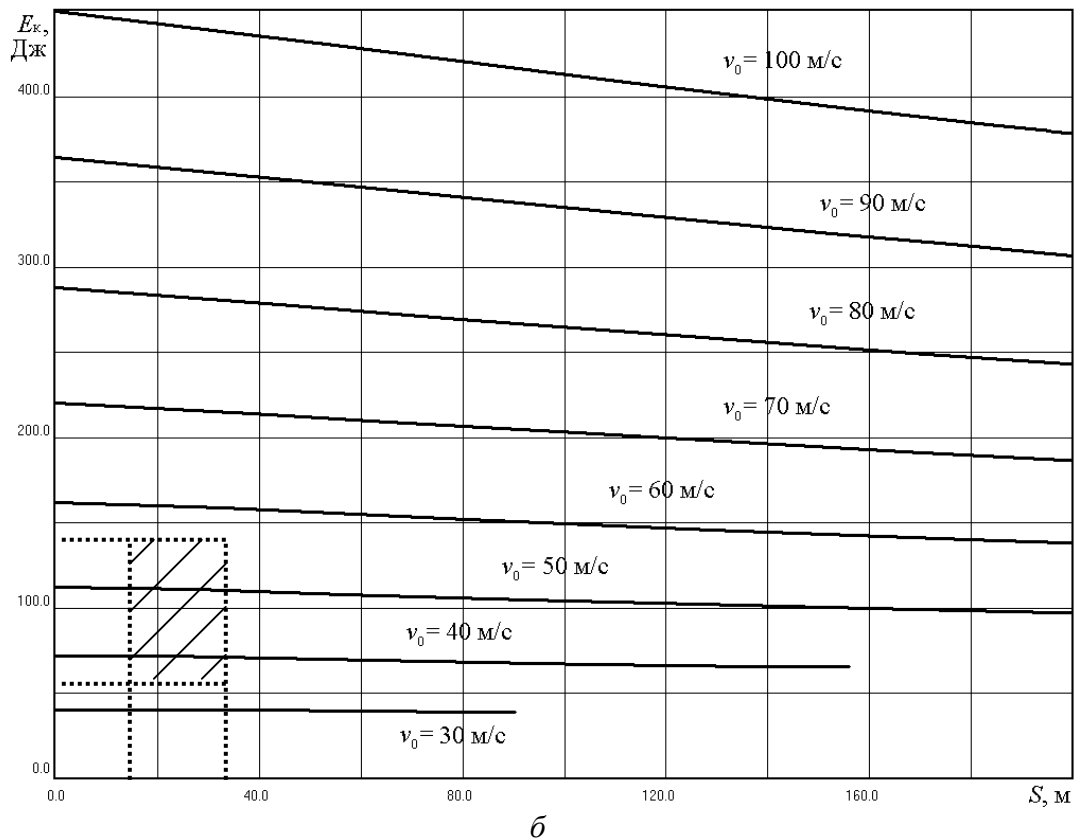
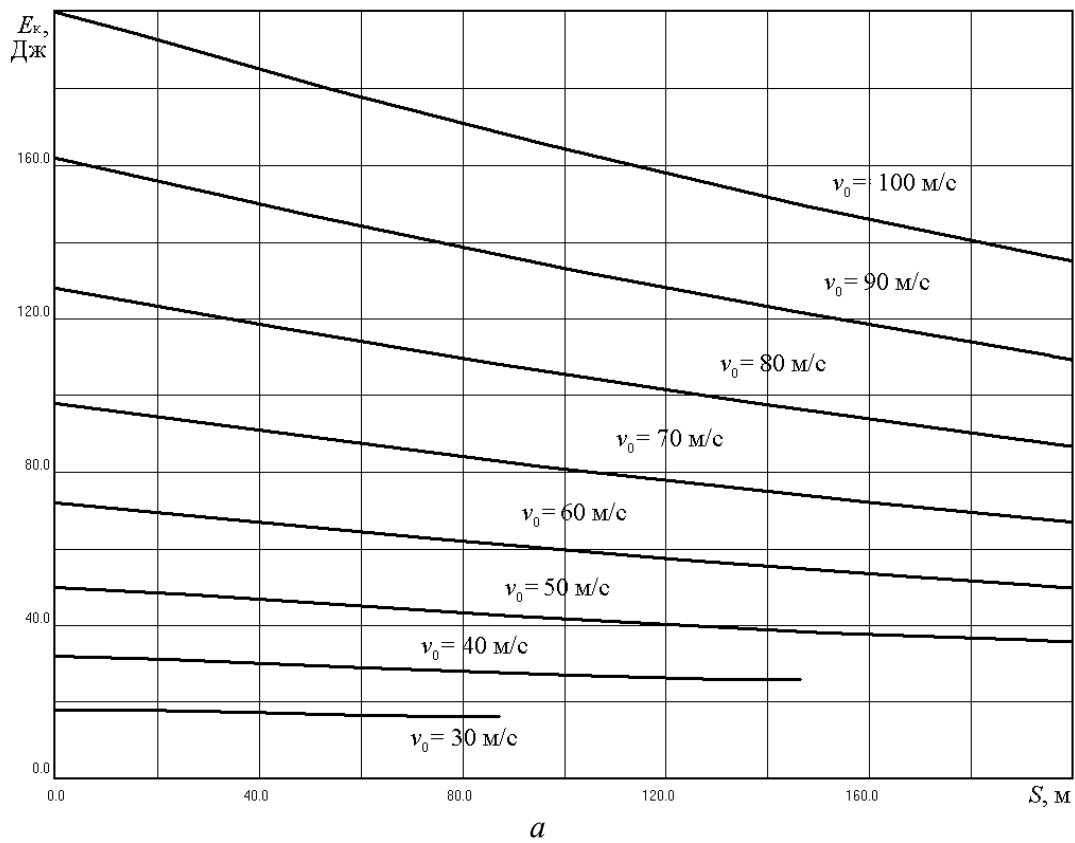


Рис. 1.2. Номограммы внешнебаллистического расчета стрел: *a* – масса 40 г; *б* – масса 90 г.
Штриховкой показана область значений для рассмотренной выше стрелы:
 $v = 31 \dots 55 \text{ м/с}$; $S = 17 \dots 31 \text{ м}$; $E = 48 \dots 108 \text{ Дж}$

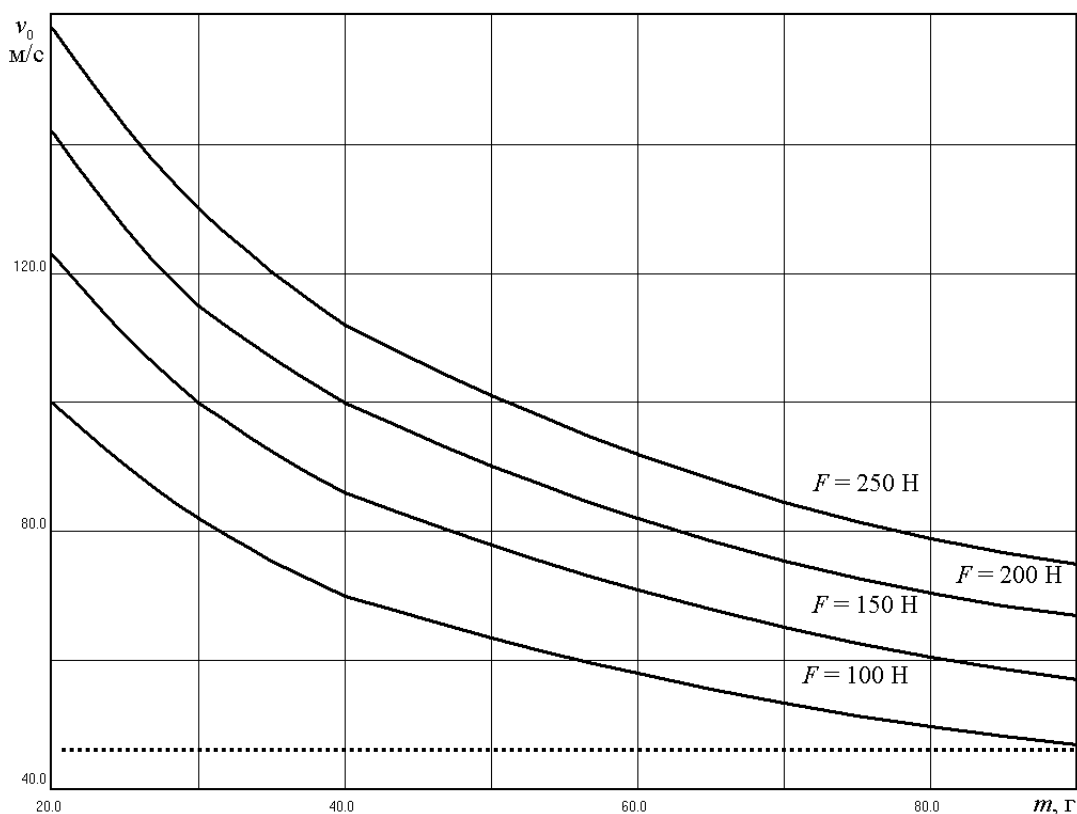


Рис. 1.3. График зависимости скорости стрелы при сходе с тетивы от ее массы для разных значений энергии лука F . Пунктиром показана проекция на ось скорости; при $m = 90$ г, $v \approx 50$ м/с

лука, можно определить дистанцию, с которой выпущена стрела. Наконец, имея в руках наконечник стрелы, мы можем оценить дистанцию, на которой стрела сохраняла убойную силу в некотором интервале скоростей. Это позволит историку оценивать множество фортификаций с позиции их уровня защиты и реконструировать возможный облик оборонительных сооружений. Например, в случае с рассмотренной стрелой мы установили, что снаряд сохраняет убойность на дальности до тридцати одного метра. (В предположении, что лук был использован на полную мощность.)

Следовательно, если мы имеем мысовое городище, где обнаружены такие стрелы, и расстояние до коренного берега превышает названный рубеж, логичным становится предположение, что периметр по бровкам мог и не иметь защитных сооружений. С другой стороны, высота оборонительного вала (с навальными конструкциями) на перешейке должна быть достаточной, чтобы с названной дистанции перекрывать стрелку извне линию визирования на цели внутри городища.

2. В отделе этнографии Института истории, языка и литературы УНЦ РАН (Уфа) имеются кости скелета, обнаруженные в ходе археологических раскопок. Интересно, что кости, принадлежавшие одному индивиду, имеют

следы трех прижизненных ранений, но ни одно из которых не послужило причиной смерти: перелома ноги, травматической трепанации черепа и ранения стрелой. Наконечник стрелы бронзовый, трехлопастной, втульчатый. Он вошел в кость предплечья на глубину полтора-два сантиметра и плотно засел в ней³. Видимо, вытянуть его за древко стрелы не удалось; дерево просто вышло из втулки наконечника. Разумеется, древний стрелок не задавался целью проткнуть стрелой непременно кость; анатомы “сравнивают кость по прочности с некоторыми металлами (медь, железо)” [Борзяк, С. 42]. Значения плотности натуральной кости приближается к $1,99 \text{ г/см}^3$, а величина прочности вдоль волокон определяется как 200 МПа ($200 \cdot 10,2 \text{ кгс/см}^2$) при сжатии и 100 МПа при растяжении. (Для сравнения: плотность сосны $0,5 \text{ г/см}^3$, предел прочности при сжатии вдоль волокон 420 кгс/см^2 . Плотность меди около $8,96 \text{ г/см}^3$ [Общетехнический справочник, С. 165]). Костяной наконечник стрелы при ударе в цель сжимается вдоль волокон. Соответственно, материал цели (кость) раздвигается поперек волокон. Но прочность материала на сжатие вдоль волокон всегда выше прочности поперек волокон. Кроме того, кость, из которой сделан наконечник, и кость, в которую этот наконечник попадает – по сути разные кости. Известно, что наружный слой кости представлен толстой (в диафизах трубчатых костей) пластинкой компактного вещества, *substantia compacta*. Наконечники стрел сделаны именно из этого плотного вещества. В эпифизах губчатых костей, в губчатых и плоских костях этот слой тонок. Именно он и пробивается наконечником. Под компактным веществом располагается губчатое вещество, *substantia spongiosa*; пористое, построенное из костных балок с ячейками между ними, по виду напоминающих губку. Конечно, заманчиво было бы проверить прочностные характеристики кости, к примеру, динамометрически задавив в свежую трубчатую кость металлический конус аналогичный наконечнику. Однако археологические раскопки дают нам обезжиренные и высушенные (мацерированные) кости, поэтому их характеристики весьма отличаются от живой костной ткани⁴. Следовательно, для чистоты эксперимента необходимо изготовить свежие реплики костяных наконечников. Но и в этом случае элемент субъективизма неизбежен – прочностные характеристики костей у разных людей индивидуальны.

3. Е.М.Черных при раскопках Бярского “Арай” могильника обнаружила погребение (раскоп IV, №78), в котором имелся обезглавленный костяк. Правая подвздошная (тазовая) кость имеет костяной наконечник, который вошел в

³ Благодарим начальника Отдела этнографии УНЦ РАН, д-ра ист. наук Р.М. Юсупова за предоставленную возможность ознакомиться с остеологическим материалом и консультации при подготовке данной публикации.

⁴ Наша благодарность патологоанатому, канд. мед. наук С.А. Зворыгину за его консультации и ценные замечания.

нее снаружи на глубину не менее одного—полутора сантиметров и плотно за-сел. Возле левой стопы погребенного обнаружены четыре костяных наконечника стрел [Черных]. Костяной наконечник не имеет невозвратных шипов. Тем не менее, он не мог быть извлечен из раны. Сказанное свидетельствует о том, что в окружении жертвы не было никакого инструментария, которым можно было бы извлечь выступающий (черешковый) конец снаряда. Во-вторых, сила трения снаряда в ране оказалась выше силы сцепления наконечника с древком, и вытянуть стелу за древко тоже не удалось. Подвздошная кость является плоской костью, и ее наружный слой плотного вещества покрывает более мягкую субстанцию. Иными словами, структура цели гетерогенна, и ее материал работает подобно броне с упрочненным поверхностным слоем. Таким образом, некоторые динамические характеристики снарядов, которые застряли в кости, могут быть рассчитаны (в первом приближении) на основе общефизических законов после выявления глубины проникновения в цель путем рентгеноскопирования образцов. Вместе с тем, на сегодня не совсем ясно, возможны ли на основе данных о глубине пенетрации наконечников обратные баллистические расчеты снарядов (стрел) по аналитическим и эмпирическим формулам подобно тому, как это делают оружейники для гомогенной среды (брони) по формулам Круппа (Krupp) и Якоба Демара (Jacob DesMarres). Таким образом, в качестве постановки задач на будущее может идти речь о целом наборе алгоритмов или относительно простых формул, которые можно будет попытаться свести в единый алгоритм, позволяющий реконструировать параметры древнего лука и оборонительных сооружений на основе имеющихся археологических следов поражения стрелами.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО АЭРОБАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМАТИКЕ

2.1. Основная задача внешней баллистики стрелы

Уже более ста лет специалисты формулируют основную задачу внешней баллистики следующим образом: изучение движения снаряда под действием сил и моментов. Применительно к стреле, из определяющих ее движение сил и моментов остаются силы тяжести и аэродинамическая. Разумеется, решение этой задачи аналитическими (и экспериментальными) методами представляет собой моделирование: мы абстрагируемся от многих параметров снаряда и учитываем лишь те из них, которые оказывают влияние на достижение технического результата, под которым подразумевается попадание в цель и ее поражение. Аналитический метод исследования предполагает расчленение объекта изучения на элементы. Иными словами, мы должны построить систему формул (уравнений), которая описывает движение снаряда с достаточной точностью. Изученные нами труды по баллистике, изданные на протяжении последних семидесяти лет (например: [Шапиро], [Вентцель], [Окунев], [Чернозубов], [Дмитриевский]), содержат весьма обширный математический аппарат и, на взгляд гуманитария, который не знаком с высшей математикой, могут показаться “китайской грамотой”. С другой стороны, для практического баллистика, инженера или криминалиста, любые наши тезисы, не подкрепленные обращениями к точным наукам, будут декларативными. Поэтому мы вынуждены в предельно сжатой форме указать основные принципы исследования баллистики снаряда с привлечением математики.

Итак, на снаряд, который не имеет двигателя и летит по инерции (например, на стрелу), в полете действуют две силы: сила тяжести mg и аэродинамическая сила R . Траектория полета представляет собой параболу, и лишь сравнительно короткие участки ее могут быть приняты за прямые. При отсутствии боковых сил (например, бокового ветра), эти силы проецируются на плоскость стрельбы, и их действие показано схематически на рис. 2.1.

Угол между продольной осью стрелы и плоскостью горизонта принято называть углом тангажа θ^1 . В общем случае продольная ось снаряда (а в нашем примере продольная ось стрелы) не совпадает с направлением век-

¹ Понятно, что стрела получает от тетивы импульс, вектор которого совпадает с продольной осью снаряда, то есть для точки, с которой производится выстрел, угол тангажа θ совпадает с углом наклона оси стрелы к стартовому горизонту; начальный угол тангажа обычно равен углу бросания.

тора скорости v . Тогда между продольной осью и вектором скорости образуется угол, который принято называть углом атаки α . Аэродинамическая сила обычно направлена в сторону, противоположную движению. При этом принято выделять две ее проекции: на ось симметрии летательного аппарата – ось x и перпендикулярную ей – ось y (по ГОСТ 20058-80 эти проекции называются соответственно X – “продольная аэродинамическая сила” и Y – “нормальная аэродинамическая сила”). Но аэродинамическая сила также дает проекции и на вектор скорости. В этом случае по тому же стандарту проекции получили названия X_a “сила лобового сопротивления” и Y_a “аэродинамическая подъемная сила”. В большинстве задач, которые приходится решать в механике полета, ее можно свести в материальную точку, то есть пренебречь всеми размерами, и в этом случае наибольшее значение приобретают не проекции X и Y , а X_a и Y_a . Кроме того, в первом приближении действием аэродинамической подъемной силы можно пренебречь². Таким образом, при движении стрелы как материальной точки, в соответствии с законом Ньютона, произведение массы тела на сообщенное ускорение равняется сумме всех действующих на него сил. А ускорение – это производная скорости по времени $\frac{dv}{dt}$.

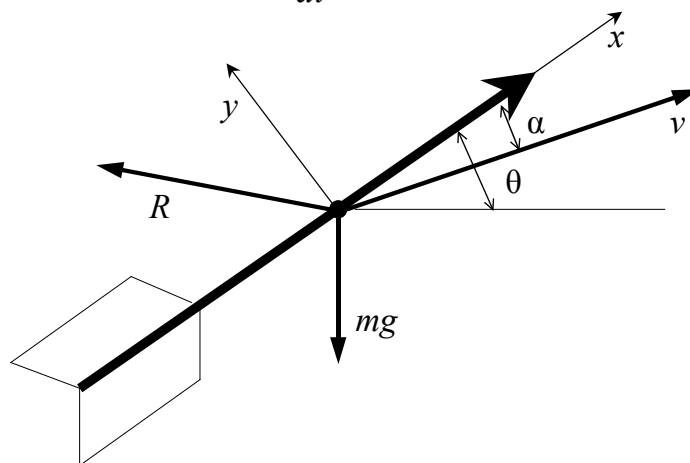


Рис. 2.1. Силы, действующие на стрелу в полете

Тогда проекцию сил на вектор скорости можно представить в виде:

$$m \frac{dv}{dt} = -X_a - mg \sin \theta .$$

² Строго говоря, аэродинамическая подъемная сила все-таки действует на стрелу, заставляя ее планировать. Но это, как правило, имеет место при полете на максимальную дальность. Физика данного процесса очень хорошо, применительно к спортивному копью, описана в книге В.Н. Тутевича [Тутевич]. В данной же работе рассматриваются лишь прицельная стрельба и, следовательно, настильные траектории, на которых работа аэродинамической подъемной силы сравнительно мала.

Произведем упрощающую подстановку и перенесем массу в правую часть формулы. Получаем первое уравнение движения стрелы:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{X_a}{m} - g \sin \theta .$$

Проекция на ось перпендикулярную (нормальную) вектору скорости даст выражение для нормального ускорения $\frac{v^2}{r}$:

$$m \frac{v^2}{r} = -mg \cos \theta .$$

Величина, обратная радиусу траектории, является ее кривизной k , которую, в свою очередь, можно выразить через отношение:

$$\frac{1}{r} = k = \frac{d\theta}{dS} ,$$

где S – длина участка кривой. Но поскольку длина участка кривой выражается через скорость, то можно записать: $dS = v dt$, откуда проекция уравнения движения примет вид:

$$mv^2 \frac{d\theta}{v dt} = -mg \cos \theta \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = -\frac{g}{v} \cos \theta .$$

Для замыкания системы уравнений необходимо привести выражения для вычисления перемещения в неподвижной относительно земли системе координат (по ГОСТ 20058-80 называемой “стартовой”), по высоте траектории h и дальности полета L :

$$\frac{dL}{dt} = v \cos \theta \quad \text{и} \quad \frac{dh}{dt} = v \sin \theta .$$

Таким образом, система из четырех уравнений и составляет общее уравнение движения стрелы в плоской системе координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv}{dt} = -\frac{X_a}{m} - g \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} = -\frac{g}{v} \cos \theta \\ \frac{dL}{dt} = v \cos \theta \\ \frac{dh}{dt} = v \sin \theta \end{array} \right.$$

2.2. Обязательные допущения внешней баллистики

Как было указано выше, внешняя баллистика изучает систему, которую образуют три элемента: снаряд, земля и атмосфера. Для этой науки традиционными являются некоторые допущения.

1. Ранее, при проецировании сил мы пренебрегли размерами стрелы и свели ее к материальной точке, как это принято в механике Ньютона. Тем самым мы ввели первое допущение: *стрела рассматривается как материальная точка, совпадающая с центром ее масс.*

2. Как известно, Земля имеет форму сфероида, отсюда конечные участки земной поверхности должны иметь некоторую кривизну. В первом приближении можно предположить следующую модель: полет стрелы рассматривается в стартовой системе координат (отсчет координаты L и h ведется от точки старта в прямоугольной или декартовой системе координат). При этом начало системы координат находится на поверхности Земли, а значит ось дальности проходит по касательной к ней. Отсюда в точке падения (в точке с нулевой высотой в стартовой системе координат) на самом деле будет иметься некоторое расстояние до реальной поверхности Земли. Попробуем оценить, насколько стрела “перелетает” по сравнению с дальностью в стартовой системе координат.

Во внешней баллистике для оценки подобного эффекта существует баллистическая поправка на кривизну Земли, определяемая по формуле:

$$\Delta L = \frac{L^2}{2R_3} \operatorname{ctg} \theta_k,$$

где R_3 – радиус Земли (6371 110 м); L – полная дальность стрельбы в стартовой системе координат; θ_k – конечный угол тангажа (угол падения в стартовой системе координат).

Попробуем оценить влияние этой поправки при стрельбе, например, на дальность 200 м, при условии, что угол $\theta_k = 45^\circ$:

$$\Delta L = \frac{200^2}{2 \cdot 6371110} \operatorname{ctg} 45^\circ = 0,003 \text{ м.}$$

Таким образом, увеличение дальности из-за кривизны Земли составляет всего 0,002 %, и это при том, что была взята поистине гигантская дальность и просто мизерный для такой дальности угол падения. Поэтому *поверхность земли считается плоской, совпадающей с плоскостью горизонта в точке бросания.*

3. Несмотря на то, что Землю можно считать плоской, можно ли поле тяготения Земли принять плоскопараллельным? В этом случае кроме параллельности векторов ускорений свободного падения \vec{g} в двух произвольно выбранных точках требуется и его равенство. Но с удалением от поверхности Земли \vec{g} уменьшается, причем степень этого уменьшения можно оценить по зависимости:

$$g = g_0 \left(\frac{R_3}{R_3 + h} \right)^2,$$

где g_0 – ускорение свободного падения на поверхности Земли; h – высота полета, м.

Попытаемся оценить влияние этого фактора. Предположим, что высота полета стрелы равна одному километру. В этом случае снижение гравитационной силы составит 0,031%. Стрелы летят по траектории, высота которой теоретически и практически не превышает десятков метров. Таким образом, применительно к стрелам, фактором снижения гравитации можно пренебречь. Поэтому *ускорение свободного падения g считается постоянным по величине и направленным перпендикулярно к плоскости горизонта.*

4. Земля вращается, совершая один оборот в течение суток. Таким образом, все находящиеся на Земле предметы совершают вращательное движение вместе с ней. Но при прямолинейном движении во вращающейся системе возникает ускорение и сила Кориолиса. Следствие этой силы проявляется, например, в законе Бэра (у рек в северном полушарии подмывается правый берег, а в южном – левый), а также в том, что пассаты, дующие из тропиков к экватору, отклоняются к западу.

Ускорение Кориолиса определяется по известной из школьной физики зависимости:

$$a = 2v\omega \sin(\vec{v} \vec{\omega}),$$

где ω – угловая скорость вращения Земли ($7,2912 \cdot 10^{-5}$ рад/с), $(\vec{v} \vec{\omega})$ – угол между векторами скоростей.

Для оценки этого фактора примем самый неблагоприятный случай, когда скорость стрелы равна 100 м/с, а векторы скорости стрелы и угловой скорости Земли перпендикулярны (то есть стрела летит вдоль меридиана). В этом случае ускорение Кориолиса получается равным $0,0146$ м/с², что составляет примерно 0,15% от величины ускорения свободного падения для стрелы. Как видно, этот фактор совершенно ничтожен, а потому в баллистических расчетах стрел *Земля считается неподвижной, ускорение Кориолиса отсутствует.*

5. Поскольку теоретический расчет плотности среды (воздуха) как функции от высоты полета снаряда h затруднен (высота полета пушечного снаряда или ракеты сильно меняется вследствие параболичности траектории особенно при навесной стрельбе), для ее определения существует несколько эмпирических подходов. Все они были сформулированы в результате обобщения замеров, произведенных для атмосферы в разное время года, на разных широтах. В СССР и России наиболее встречаются следующие зависимости, подходящие для высот до 5–10 км:

Формула Ветчинкина: $\rho = \frac{20\,000 - h}{20\,000 + h}$.

Нормальная артиллерийская атмосфера: $\rho = (1 - 0,0000219h)^{4,4}$.

Стандартная атмосфера 1964 г. (ГОСТ 4401-64): $\rho = (1 - 0,0000226h)^{4,247}$.

Стандартная атмосфера 1981 г. (ГОСТ 4401-81): $\rho = (1 - 0,00002256 h)^{4,256}$.

Обратившись к приведенным формулам, увидим, что если принять плотность воздуха на уровне моря за единицу, то на высоте 200 м этот показатель уменьшается до 0,98. Подобная картина наблюдается и для других параметров атмосферы (давление, температура и т.д.). Иными словами, двухпроцентным разбросом значений параметров атмосферы в интервале высот до двухсот метров можно пренебречь, и, следовательно, для баллистики стрел полагаем ввести еще одно допущение: *параметры атмосферы являются неизменными на всей траектории полета стрелы.*

Таким образом, в течение полета параметры окружающей среды можно принять постоянными. Но если речь идет о стрельбах, совершенных в разное время и в разном месте, как будут соотноситься их параметры между собой?

Влияние высоты и широты запуска. Приведенная выше формула по снижению g от высоты полета также подойдет и для описания изменения g от высоты над уровнем моря. А, кроме того, из-за сплюснутости Земли³, ускорение свободного падения на полюсах будет больше, чем на экваторе. Данный фактор рассчитывается с помощью формулы Клеро:

$$g = 9,78034 + 0,0516403 \sin^2 \varphi,$$

где φ – географическая широта точки выстрела. Отсюда если $\varphi = 90^\circ$, то $g = 9,83198 \text{ м/с}^2$ (на полюсе), а если $\varphi = 0^\circ$, то $g = 9,78034 \text{ м/с}^2$ (на экваторе).

Поэтому, если сравнить значения g , например, для Мурманска и для Мехико, то разница составит 4% ($9,82 \text{ м/с}^2$ против $9,78 \text{ м/с}^2$). В то время как разница в плотности воздуха – 20%! Поэтому при стрельбе из одного и того же лука одной и той же стрелой дальность изменится вследствие:

- сообщения стреле большей начальной скорости, ввиду снижения ее массы (при условии, что упругость лука изменилась мало);
- полета стрелы на большую дальность, из-за уменьшения гравитационной и аэродинамической сил.

Расчеты, произведенные в СССР перед олимпиадой в Мехико, показали, что, например, копьё, запущенное в Мурманске на 81,09 м, при тех же самых условиях пуска улетит в Мехико на 82,77 м [Тутевич].

Влияние изменения плотности воздуха. Еще одним фактором, существенно влияющим на траекторию стрелы, является изменение плотности воздуха. Для его оценки используется метод определения вариации плотности $\delta\rho$, предложенный Ю.Г. Сихарулидзе [Сихарулидзе]:

$$\delta\rho = \frac{\rho - \rho_{CA}}{\rho_{CA}},$$

³ Сфероид – одноосный эллипсоид или эллипсоид вращения. Реальная форма Земли представляет собой трехосный эллипсоид, который в литературе принято называть геоидом.

где $\rho_{СА}$ – плотность по стандартной атмосфере, ρ – действительная плотность окружающей среды.

Всего Ю.Г. Сихарулидзе выделил три основных слагаемых вариации плотности: *сезонно-широтную* (зависит от высоты и широты места пуска, а также от месяца); *суточную* (зависит от изменения интенсивности солнечного нагрева днем и ночью, а также от лунных приливов и отливов в атмосфере) и *случайную* (зависит от солнечной активности, геомагнитных процессов и прочих трудноучитываемых случайных факторов).

Поэтому для определения максимального влияния состояния реальной атмосферы, рекомендуется проводить два баллистических расчета: с максимально благоприятным сочетанием факторов (плотность минимальная – июнь, день, лунный отлив и т.д.), и с максимально неблагоприятным (плотность максимальная – январь, ночь, лунный прилив и т.д.). Так, например, по данным Сихарулидзе, максимальное значение случайной составляющей вариации плотности может достигать $\pm 0,8\%$.

Ветровое воздействие также может быть оценено по методике Сихарулидзе, выделившего две проекции скорости ветра – меридиональную W_m (по меридиану) и зональную W_z (по параллели). В этом случае полная скорость ветра определится по теореме Пифагора: $W = \sqrt{W_m^2 + W_z^2}$, а направление – через арктангенс соотношения проекций.

Сихарулидзе выделяет три составляющие скорости ветра: сезонно-широтную, суточную и случайную. Что интересно, сезонно-широтная составляющая, определяемая сезонными ветрами и вращением Земли вокруг собственной оси, присутствует лишь у меридиональной проекции, а у зональной равна нулю.

Порядок определения степени ветрового воздействия на стрелу следующий. Задаются максимально благоприятная (попутная) и максимально неблагоприятная (встречная) скорости, при которых и проводят баллистический расчет. Пример расчета ветрового воздействия приводится в упомянутой работе Тутевича. Так, если при отсутствии ветра копье летит на 81,17 м, то при встречном ветре в 5 м/с – на 79,59 м, а при попутном в 5 м/с – на 83,58 м, т.е. прирост дальности составляет в среднем 0,24 м на каждый м/с скорости ветра.

Все сказанное позволяет сформулировать последнее допущение. *Параметры окружающей среды принимаем равными параметрам стандартной атмосферы, при необходимости расчета экстремальных траекторий вводим поправки на изменение ускорения свободного падения, изменение плотности воздуха и на ветер.*

2.3. Величина силы лобового сопротивления

Для подстановки в систему баллистических формул аэродинамической силы необходимо знать величину силы лобового сопротивления:

$$R_a = c_x \rho \frac{v^2}{2} S_m,$$

где c_x – коэффициент лобового сопротивления; ρ – плотность среды (международная стандартная атмосфера определяется из значения $0,00125 \text{ г/см}^3$, а технические справочники дают значение $0,00121 \text{ г/см}^3$); S_m – площадь мидела (наибольшего сечения) снаряда.

Откуда появилась эта формула?

В начале XVIII в. И.Ньютон установил, что сила лобового сопротивления тела пропорциональна площади его сечения и квадрату скорости движения. Однако такое заключение было получено в результате опытов, в ходе которых с высоты восьмидесяти метров сбрасывались тела, форма которых была близка к очертаниям пушечных снарядов того времени, то есть сферических ядер. Кроме того, скорость в данных опытах ограничивалась величиной, обусловленной ускорением свободного падения, не превышая 40 м/с^4 .

Впоследствии было установлено, что сопротивление воздуха пропорционально квадрату скорости только для небольших скоростей⁵. Но так ли это?

В XIX в. были проведены многочисленные опыты с пушечными снарядами (ядрами): после выстрела снаряд ударялся в мишень, подвешенную на рычаге (так называемый баллистический маятник), и по степени отклонения мишени от вертикали исследователи судили о величине энергии снаряда. Устанавливая баллистический маятник на разных участках траектории, баллистики получали данные о том, в какой степени энергия снаряда убывает по мере удаления от точки выстрела вследствие торможения о воздух. Но и здесь опыты ограничивались прикладными задачами баллистического расчета снарядов шарообразной формы, которые летели со скоростями порядка десятков метров в секунду. При переходе к нарезной и казнозарядной артиллерии скорости снарядов резко увеличились и баллистики быстро установили, что тела, которые имеют разную форму и отличаются размерами, могут иметь одинаковое лобовое сопротивление. И наоборот, тела равного размера (например, снаряды одного калибра, но с разной степенью заострения) по-иному преодолевают сопротивление воздушной среды. Поэтому возникла необходимость оценивать степень обтекаемости снаряда – коэффициент c_x . В 60-х гг. XIX в. во многих странах были проведены опыты по определению значения c_x для снарядов различной формы, движущихся с различными скоростями.

В 1869 г. русский ученый Н.В. Майевский проводил опыты со снарядами длиной в 2 калибра, с головными частями длиной от 0,9 до 1,1 калибра при скоростях от 172 до 409 м/с. Им были получены данные, аппроксимированные в виде кусочно-линейной функции, которая имеет следующий вид:

⁴ Скорость свободнопадающего тела (при отсутствии сопротивления воздуха) можно рассчитать по формуле $v = \sqrt{2gh}$, при $h = 80 \text{ м}$, искомая скорость $v = 40 \text{ м/с}$.

⁵ Исследователи середины прошлого века указывали предел в 250 м/с [Шапино, С. 21].

$$c_x = \begin{cases} 0,224 & v < 240 \\ 9,328 \cdot 10^{-4} v & 240 \leq v < 295 \\ 1,072 \cdot 10^{-8} v^3 & 295 \leq v < 375 \\ 1,504 \cdot 10^{-4} v & 375 \leq v < 419 \\ 0,6304 & 419 \leq v < 550 \\ 4,1853v^{-0,3} & 550 \leq v < 800 \\ 11,408v^{-0,45} & v \geq 800 \end{cases}$$

В 1896 г. выдающийся итальянский баллистик и механик Франческо Сиаччи (Siacci) объединил баллистические опыты Башфорта, проводившиеся в Англии в 1866–70 гг., Хойеля, в Голландии в 1884 г., Круппа, полученные на германском полигоне в Меппене в 1879–96 гг. (данные по этим опытам приведены в табл. 2.1) и Майевского.

Таблица 2.1. Данные, обобщенные Сиаччи

Экспериментатор	Длина снаряда, калибров	Длина головной части, калибров	Диапазон изменения скоростей, м/с	Калибр снарядов, мм
Башфорт (Bashfort)	2,54	1,12	230...520	7,6...229
Хойель (Hojel)	2,5...4	1,3	138...660	80...400
Крупп (Krupp)	2,8...4	1,3	150...910	–

В результате Сиаччи предложил собственную эмпирическую формулу. При этом результаты Круппа и Хойеля он поделил на 0,896, поскольку эти эксперименты проводились со снарядами более острой формы. Этот же коэффициент сохраняется при переходе от закона Майевского к закону Сиаччи. В соответствии с этой формулой коэффициент лобового сопротивления снаряда

$$c_x = \frac{0,2002v - 48,05 + \sqrt{(0,1648v - 47,95)^2 + 9,6} + \frac{0,0442v(v - 300)}{371 + \left(\frac{v}{200}\right)^{10}}}{0,000474v^2}.$$

Таким образом, выражение Сиаччи относится к группе пушечных снарядов различных калибров и различной формы. Однако нижний предел скорости обобщенной им экспериментальной базы данных (138...150 м/с; см. табл. 2.1) находится вне области значений, которые актуальны для стрел.

Научно-исследовательским органом французской морской артиллерии – Гаврской комиссией, в 1873 г. был организован ряд опытов с продолговатыми снарядами. Снаряды выбирались разного калибра, они имели головную часть различной формы, а их хвостовая часть была цилиндрической. В ре-

зультате был получен закон сопротивления, для которого исследователь Демог (Demogue) подобрал эмпирическое выражение:

$$c_x = \frac{8}{\pi} \left(0,255 + \frac{\sqrt[4]{1 + 0,0392 \left(\frac{v_1}{10} \right)^3}}{27266 + 494v_1^2} \operatorname{arctgv}_1 \right),$$

где $v_1 = \frac{v - 330}{50}$, а arctg выражается в минутах.

При небольших значениях закон Демога имеет локальный минимум, который отсутствует на опытных данных, поэтому считается, что его можно применять лишь при скоростях, больших 200 м/с.

В 1921–23 гг. Дююи (Duis) проводил опыты со 140-мм снарядами различной формы, как с цилиндрической хвостовой частью, так и с конической. На основании этих опытов Гарнье (Garnier) получил эмпирическое выражение, известное как закон Гарнье-Дююи. Позднее он был введен в СССР как закон сопротивления 1930 г.

С началом Второй мировой войны резко повысилась дальность снарядов, появились новые экспериментальные данные, из-за чего закон 1930 г. стал плохо применим к снарядам, стоявшим на вооружении. Тогда в нашей стране был принят для расчетов закон сопротивления 1943 г. Весь диапазон скоростей был разделен на несколько сотен участков, внутри которых коэффициент c_x аппроксимировался параболой. Запись закона 1943 г. имеет форму [Коновалов]:

$$c_x = \begin{cases} 0,157 & M < 0,73 \\ 0,033 \cdot M + 0,133 & 0,73 \leq M < 0,82 \\ 0,161 + 3,9(M - 0,823)^2 & 0,82 \leq M < 0,91 \\ 1,5 \cdot M - 1,176 & 0,91 \leq M < 1,00 \\ 0,384 - 1,6(M - 1,176)^2 & 1,00 \leq M < 1,18 \\ 0,384 \sin \frac{1,85}{M} & 1,18 \leq M < 1,62 \\ \frac{0,29}{M} + 0,172 & 1,62 \leq M < 3,06 \\ 0,316 - 0,016 \cdot M & 3,06 \leq M < 3,53 \\ 0,259 & M \geq 3,53 \end{cases}.$$

И, наконец, после Второй мировой войны по мере внедрения реактивных систем залпового огня (РСЗО), противотанковых управляемых реактивных снарядов (ПТУРС) и т.д. встала необходимость подкорректировать закон

сопротивления в соответствии с новыми реалиями. Был принят закон сопротивления 1956 г.⁶ После критического анализа существующих форм записи, авторы остановились на следующей:

$$c_x = \begin{cases} 0,308 & M < 0,61 \\ 0,505(M - 0,61)^{2,31} + 0,308 & 0,61 \leq M < 1,00 \\ 0,4485(M - 1)^{0,505} \exp(-5,68(M - 1)) + 0,551 & 1,00 \leq M < 1,40 \\ \frac{M}{0,356 \cdot M^2 + 2,237 \cdot M - 1,4} & 1,40 \leq M < 4,00 \\ 0,302 & M \geq 4,00 \end{cases}$$

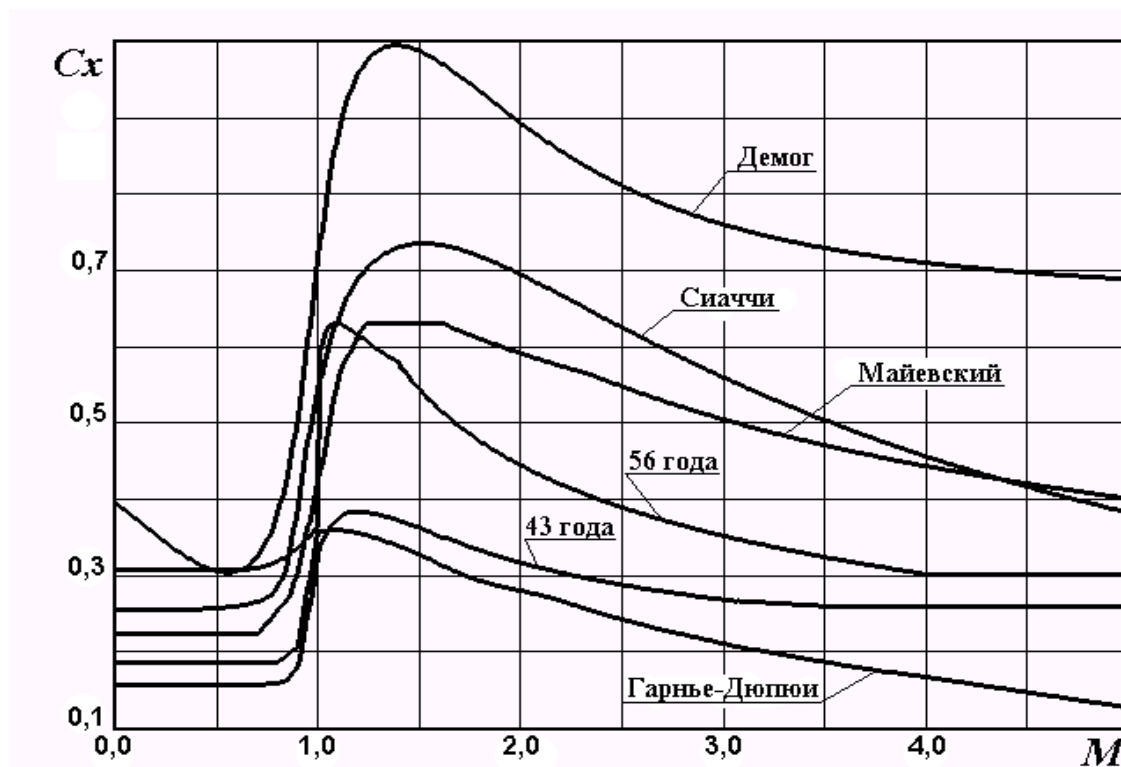


Рис. 2.2. Основные законы сопротивления

Сравнительные значения основных законов сопротивления, рассчитанные по вышеприведенным формулам, представлены на рис. 2.2.

Таким образом, законы сопротивления воздуха, рассмотренные в исторической ретроспективе и в ассортименте, позволяют сделать заключение о том, что для снарядов различной формы коэффициент лобового сопротивления c_x является возрастающей функцией скорости, но в области скоростей приблизительно до $0,7 M$ (≈ 200 м/сек) определяется из предположения о его постоянстве, а его абсолютное значение находится в интервале от $0,05$ (закон

⁶ На рис. 2.2 видно, что данный закон представляет собой попытку усреднения экстремальных зависимостей, выявленных ранее.

Гарнье-Дюпюи) до 0,4 (закон Демого). Абсолютный пик коэффициента сопротивления приходится на область “звукового барьера”.

Значит ли это, что величина лобового сопротивления всякого снаряда, который летит с дозвуковой скоростью, прямо пропорциональна квадрату его скорости? И вообще, в какой степени законы аэродинамики, выведенные для артиллерийских снарядов огнестрельной артиллерии, могут быть применимы и к исследованию внешней баллистики сравнительно медленно летящих металлических снарядов столь специфичной формы, как стрела? Вспомним, что все исследования, о которых шла речь выше, проводились исключительно в интересах военного ведомства той или иной страны. Изучению подвергались снаряды, рассчитанные на пробитие брони, либо на заглобление в грунт для производства фугасного действия. Иными словами, для снаряда ствольной артиллерии скорость является важнейшим фактором, который влияет на величину дульной энергии, а значит, на достижение технического результата, и развитие ствольной артиллерии долгое время происходило в направлении повышения скорости снаряда. Но на каком участке своего движения пушечный снаряд имеет дозвуковую скорость? В результате исследований внутренней баллистики стало известно, что скорость движения снаряда огнестрельного оружия на разных участках ствола может быть отражена графически в виде параболы, отражающей зависимость от давления пороховых газов в данной точке. Однако формулы для расчета кривых давлений и скорости снаряда в канале ствола, хотя и оперируют диапазоном скоростей от нулевого значения, но не принимают во внимание лобового сопротивления снаряда до его вылета из ствола. Кроме того, скорость снаряда в канале ствола может представлять интерес для конструктора оружия, но практическое значение для стрелка имеет лишь дульная скорость. Известно, что максимальной скорости снаряд достигает после выхода из ствола оружия, когда на него воздействуют газы, вытекающие из канала ствола. Также известно, что для пушечных снарядов величина дульной скорости в несколько раз превышает скорость звука. В свою очередь, и для поражения цели (пробития брони или бетона, заглобления в грунт и т.п.) современный пушечный снаряд имеет в точке падения скорость, как правило, не менее скорости звука. Иными словами, область скоростей до 0,3 М (≈ 100 м/с), которая актуальна для стрел, не является актуальной и значимой для баллистики пушечных снарядов. Значит, теоретически, авторы приводимых графиков могли в дозвуковой области строить зависимость достаточно произвольно – ведь она не влияла на результаты стрельбы. У исследователей не было и нужды моделировать полет снаряда на малых скоростях, меньше 0,5...0,6 М путем обдува в аэродинамической трубе. То есть степень достоверности всего множества графиков приводимых на рис. 2.2, в части абсолютных значений коэффициента лобового сопротивления c_x для дозвуковых скоростей может быть поставлена под сомнение. Ясно лишь одно: на малых скоростях этот параметр постоянен. Так все-таки какое значение c_x может быть принято для стрел?

Обратимся к курсу “Теория автомобиля”. Здесь принято рассчитывать силу аэродинамического сопротивления P как произведение проекции автомобиля на плоскость, перпендикулярную его продольной оси F , коэффициента сопротивления воздуха K и квадрата скорости:

$$P = K F V^2.$$

При этом для грузовых машин площадь определяется как произведение колеи и наибольшей высоты автомобиля, а для легковых как 0,78 произведения наибольшей ширины и высоты автомобиля. Нетрудно убедиться, что коэффициент сопротивления воздуха в соответствии с ранее полученными зависимостями определится как:

$$K = \frac{c_x P}{2}.$$

А значения его принимаются постоянными для данного автомобиля, не зависящими от каких-либо факторов, кроме конструктивных особенностей: ЗАЗ-968 – 0,373; ВАЗ-2106 – 0,314; Иж-2715 – 0,363; ГАЗ-53А – 0,589; ЗИЛ-130 – 0,775 [Умняшкин]. Но опять, будет ли это убедительным доказательством постоянства коэффициента аэродинамического сопротивления на дозвуковых скоростях? Если учесть, что общая доля лобового сопротивления в суммарном сопротивлении автомобиля сравнительно невелика, и с уменьшением скорости она еще более снижается. Так что оптимизировав форму автомобиля для больших скоростей и определив для этого диапазона c_x , это значение с вполне достаточной степенью точности можно распространить и на меньшие скорости. Впрочем, и диапазон изменения скоростей автотранспорта составляет лишь до 0,5 М, то стоит ли удивляться, что для упрощения расчетов c_x принимается постоянным?

А теперь обратимся к аэробаллистике летательных аппаратов. Вплоть до пятидесятых годов прошлого века здесь было принято считать, что “при не очень больших скоростях полета, соответствующих числам М, не превышающим 0,5–0,6 *аэродинамические коэффициенты можно считать не зависящими от скорости*. Указанный предел скоростей до недавнего времени как раз соответствовал скоростям, освоенным в авиации...” [Федосьев, С. 302].

Скорость ракеты плавно возрастает от нуля (на пусковой установке) и достигает наивысшего значения в конце активного участка траектории, в момент окончания работы двигателя, когда масса ракеты уменьшилась до минимума из-за выгорания топлива, а плотность атмосферы минимальна вследствие высоты.

Таким образом, в ракетной технике приходится иметь дело с полным диапазоном изменения скоростей: от нулевой до гиперзвука. Соответственно, модели ракет подвергаются натурным испытаниям в аэродинамической трубе в широком диапазоне скоростей. Можем ли мы взять данные, которые были получены при обдуве ракеты с цилиндрическим корпусом, и распро-

странить их на стрелу, форма которой аналогична? Вряд ли ответ будет утвердительным: ведь кроме подобия формы мы должны будем соблюсти и подобие по числу Рейнольдса (Re), которое выражает отношение сил инерции, действующих на поток к силам его вязкости⁷. Причем всегда существует некоторое число Re , при котором ламинарное (равнослойное) течение становится турбулентным (вихревым). Понятно, что если снаряд затрачивает свою энергию на турбулизацию потока, то он быстрее тормозится. Кроме того, даже при ламинарном обтекании снаряд перемещает слой воздуха, который “прилип” к его поверхности. Для крупного снаряда действием данного слоя (его принято называть пограничным) обычно пренебрегают. Другое дело – снаряд малого калибра, пуля, стрела: здесь толщина пограничного слоя может иметь тот же порядок, что и линейный размер (калибр) снаряда, то есть величина пограничного слоя сопоставима с величиной самого снаряда (или его элемента). Иными словами, вязкость воздуха оказывает значительное влияние на торможение за счет трения. Так, например, известно, что для снаряда калибром 76 мм при скорости 100 м/с ускорение торможения составляет $0,6 \text{ м/с}^2$, а для пули калибра 7,6 мм – приблизительно в семь раз больше [Вентцель, С. 32]. В приведенном примере линейный размер тела уменьшается на порядок, а ускорение его торможения возрастает вследствие возрастания удельного трения⁸. Конечно же, существуют эксперимен-

⁷ Число Рейнольдса есть произведение плотности воздуха на скорость и на характерный размер (диаметр снаряда), деленное на динамическую вязкость воздуха: $Re = \rho \cdot v \cdot l / \eta$. Допустим, мы нашли таблицу экспериментальных данных для ракеты диаметром 100 мм. Диапазон скоростей стрелы 30–100 м/с, следовательно, для пересчета по критерию подобия для стрелы диаметром 10 мм, который в 10 раз **меньше**, для соблюдения условия $Re_{\text{ракеты}} = Re_{\text{стрелы}}$ мы должны обратиться к области таблицы, в которой содержатся данные для скорости в 10 раз **большей**, то есть 300–1000 м/с. Однако для сверхзвуковых скоростей ($M > 1$) закономерности сопротивления воздуха отличаются от тех, что известны для дозвукового обтекания (см., например рис. 2.2 – на всех графиках линейная зависимость сохраняется лишь для дозвукового движения). Следовательно, экспериментальные данные, полученные для ракет к изучению стрел не применимы.

⁸ Говоря по-простому, каждый сантиметр поверхности снаряда перемещает с собой x граммов воздуха, но в сравнении с массой пушечного снаряда эта величина ничтожна: масса снаряда на порядки превышает массу этого перемещаемого воздуха. В свою очередь при уменьшении калибра и длины снаряда его поверхность и величина массы воздуха в пограничном слое уменьшается лишь по квадратическому закону, а объем снаряда (значит его мера инертности и энергия) убывает по кубической зависимости. Кроме того, пограничный слой, образно говоря, “увеличивает аэродинамический калибр” и если для снаряда, истинный калибр которого составляет десятки миллиметров, такое увеличение на несколько миллиметров проходит незаметно, то для маленького снаряда (пули, стрелы) трение за счет вязкости вполне заметно. Источник приводит отношения силы лобового сопротивления R к весу снаряда q для скорости 250 м/с: для 76,2-мм дальнобойной гранаты массой $m = 6,5 \text{ кг}$ $R/q = 0,4$, а для 7,62-мм тяжелой пули при $m = 0,011 \text{ кг}$ $R/q = 2,1$ [Шапиро, С. 20]. Далее увидим расчет, согласно которому толщина пограничного слоя вокруг стрелы может быть около двух миллиметров.

тальные данные о коэффициентах лобового сопротивления у различных тел. Например, для кругового цилиндра, ось которого расположена параллельно направлению потока, а длина в семь раз превышает диаметр $c_x = 0,88$, для конуса с углом при вершине 60° $c_x = 0,51$, а для сигарообразного тела, длина которого в шесть раз превышает диаметр, $c_x = 0,07$ [Окунев, С. 331–335]. Однако даже если мы представим древко стрелы в виде простого тела (например, цилиндра), то результат вычисления вряд ли будет удовлетворительным в силу того, что справочные данные часто не учитывают абсолютных размеров тела по отношению к толщине пограничного слоя и не указывают скорость, для которой эти данные получены (напомним, что скорость и линейные размеры связаны числом Рейнольдса).

Таким образом, представляется, что существующий опыт аэродинамики автомобилей и баллистики снарядов и летательных аппаратов напрямую неприменим к стрелам, а задача аналитического изучения аэродинамики стрел должна решаться с применением специального математического аппарата, создание которого на сегодня является самостоятельной задачей.

В дополнение к общим для баллистики допущениям, полагаем целесообразным ввести для стрел еще и следующие: аэродинамическое сопротивление стрел изучается исходя из того, что весь ассортимент изучаемых объектов имеет линейные размеры (диаметр, калибр) одного порядка⁹, а обтекание в установившемся (для головной части, то есть для наконечника в ламинарном?) потоке происходит в одинаковых условиях. Кроме того, мы должны принять в качестве исходного реальный диапазон скоростей стрел: нижним пределом следует принять скорость, при которой в воздухе принципиально возможен горизонтальный полет тела тяжелее воздуха по инерции, а верхнюю границу произвольно примем за 100 м/с.

2.4. Закон силы лобового сопротивления для стрел¹⁰

Баллистики середины прошлого века утверждали: “Что касается изучения суммарного сопротивления воздуха при обтекании тела, то эта задача теоретически не решена даже для случая идеальной жидкости¹¹” [Шапиро, С. 31]. “Современная гидромеханика не позволяет теоретически подсчитать сопротивление воздуха для снаряда произвольной формы” [Шапиро, С. 35].

⁹ Массив изученных данных о древках стрел позволяет заключить, что их диаметр находится в интервале 8...15 мм. В свою очередь диаметр современных боевых ракет не менее 80 мм.

¹⁰ В данном параграфе скорость будем обозначать в формулах большой литерой V , чтобы не смешивать с переменной ν , которая обозначает кинематическую вязкость среды.

¹¹ Идеальной полагают условную жидкость, у которой отсутствует вязкость и сжимаемость. Реальный воздух обладает вязкостью, и, кроме того, сжимаем. С некоторыми оговорками, сжимаемостью воздуха (изменением его плотности) можно пренебречь для дозвуковых скоростей, которые актуальны для стрел, но можно ли пренебречь вязкостью?

На сегодняшний день нам не удалось обнаружить в литературе сколько-нибудь развитой теории обтекания тел большого удлинения на дозвуковых скоростях. Поэтому в целях формирования подходов к решению задачи аэродинамики стрел, в предельно сжатом виде рассмотрим картину обтекания стрелы воздухом. Напомним, что мы приняли выше некоторые допущения, в соответствии с которыми можно утверждать, что для стрелы сила лобового сопротивления есть функция от ее диаметра, длины и скорости.

Донное сопротивление

При полете стрелы воздух впереди нее сжимается. Снаряд, подобно поршню, совершает работу, создавая избыточное давление, величина которого определяет “сопротивление давления”. При дискретном описании процесса, образно говоря, снаряд постоянно сжимает воздух и толкает перед собой область повышенного давления; сжатый воздух стекает с носика, снаряд перемещается вперед, снова сжимает воздух, который снова стекает по обводам головной части и т.п. И наоборот, в донной части снаряда создается область разрежения. Из-за этого падающая вода приобретает форму капли: в носовой части обводы капли наилучшим образом способствуют схождению элементарных струек тока, а в кормовой части практически отсутствует область разрежения.

Если предположить для простоты, что летит пластинка, на одной стороне которой избыток давления $+p$, а на другой – недостаток $-p$, то получается, что на нее действует сила, равная произведению площади пластинки S и значению перепада давления Δp : $F = S \Delta p$. Причем направление этой силы будет обратное вектору скорости, а потому по своей природе – это часть лобового сопротивления. Поскольку минимизировать данную силу можно в первую очередь за счет оптимизации формы донной части, она называется “донным сопротивлением”¹².

Величина Δp в соответствии с законом Бернулли пропорциональна скоростному напору, определяемому как произведение плотности воздуха на квадрат скорости, деленное пополам: $0,5 \rho V^2$, т.е.:

$$F \sim S \frac{\rho V^2}{2}.$$

Таким образом, для небольших скоростей гипотеза Ньютона, предложенная им после бросания ядер с колокольни (см. выше), современными баллистами признается в целом правильной. Летящий цилиндр воздействует на воздух площадью, которая равна площади его миделева сечения, но, строго говоря, летящий конус того же диаметра воздействует площадью конуса. Однако, продолжая аналогию с поршнем, можно сказать, что совершенная работа

¹² Известны конструкции ракет, на которых для минимизации донного сопротивления стоят специальные газогенераторы, осуществляющие впрыск газа в донную область, чтобы понизить существующее там разрежение.

по сжатию воздуха зависит не от формы поршня, а лишь от величины перемещаемого воздуха и расстояния этого перемещения. В свою очередь, объем воздуха, перемещаемого тем или иным поршнем (при равной амплитуде перемещения), прямо пропорционален его площади. Кроме того, можно заметить, что в условиях обтекания максимальная траектория движения частиц воздуха простирается от центра (носика) снаряда до его края, и длина этой траектории составляет половину диаметра снаряда. В свою очередь, известно, что величина совершенной работы не зависит от формы траектории перемещения. Таким образом, объем работы по сжатию воздуха будет пропорционален диаметру снаряда или площади его миделевого сечения, а не степени заостренности. Если мы будем делать наконечник все более острым, то площадь его будет расти, и скоростной напор на единицу его площади будет уменьшаться, однако, сопротивление останется пропорциональным проекции этого наконечника на плоскость, которая перпендикулярна движению. Следовательно, можно было бы предположить, что сопротивление давления **зависит** не от степени заостренности, а от площади сечения снаряда. Однако, если мы представим поток набегающего воздуха ламинарным, то есть в виде пакета прямолинейных струек, то увидим, что в силу наличия вязкости воздуха снаряд своей головной частью должен изменить направление потока этих струек: если это торец цилиндра перпендикулярен потоку, то он меняет направление струек на 90° , а если это конус с углом при вершине 45° , то только на 45° и т.п. Следовательно, чем меньше угол заострения (например, чем меньше угол при вершине конуса), тем меньшая работа совершается на отклонение струек воздуха.

Конечно же, сопротивление воздуха зависит от формы всего тела, а не только головной его части.

В опытах Ньютона за показатель площади воздействия принималась площадь поперечного сечения испытываемого эталонного снаряда (шара). Для расчета сопротивления произвольного тела исследователь предлагал вводить в формулу коэффициент формы. Ньютон установил, что чем меньше угол при вершине (угол заострения) головной части, тем меньше сила сопротивления скоростному напору¹³. Но у шарообразного тела на стороне, обратной потоку, образуется область пониженного давления, где происходит отрыв пограничного слоя и зона турбулентности (шар не обтекаем). Чем больше диаметр снаряда, тем больше разница давления перед телом и за телом. В

¹³ Современными исследованиями было установлено, что сопротивление падает лишь до некоторой величины угла заострения, значение которого обусловлено материалом и конструкцией снаряда, а, точнее до известных пределов абсолютных размеров тела: число Рейнольдса (показатель турбулентности) в числителе имеет переменную, характеризующую размер тела. Иными словами, при малом характерном размере тела (тонкое оперение, игольчатый наконечник и т.п.), на дозвуковой скорости этот элемент турбулизует поток и воздушное сопротивление в этом месте возрастает. Впрочем, для принятого нами диапазона скоростей и размеров снарядов однозначные экспериментальные свидетельства влияния турбулизации пока нами не обнаружены.

свою очередь у тел продолговатой формы без резких перепадов диаметра избыточное давление стравливается постепенно от носика к хвосту и завихрения потока минимальны (стрела обтекаема). Однако значения показателя обтекаемости $c_{x \text{ донн.}}$ о физическом смысле которого уже шла речь выше, для стрел разной формы, кажется еще не были опубликованы. Так можно ли применять для стрел каноническую формулу как для расчета сопротивления артиллерийских снарядов? Приведем ее еще раз:

$$R = c_x \rho \frac{v^2}{2} S_m.$$

Надо заметить, что форма стрелы характерна тем, что ее длина на порядок (то есть не менее, чем в десять раз) превосходит диаметр, следовательно, диаметр (калибр) характерным размером для расчета полного сопротивления в соответствии с приведенной формулой являться не может, так как эта формула никак не учитывает длину снаряда. В то же время, полагаем вполне оправданным рассматривать стрелу в качестве эталонного снаряда, что позволит использовать вышеприведенную формулу в качестве основы для расчета донного сопротивления. Для этого достаточно создать виртуальную стрелу, присвоив ей $c_x = 1$ (например, с диаметром 1 см, длиной 50 см с конусным заострением с углом при вершине 45°) и использовать ее для аналитических расчетов и экспериментов. По этому пути пошли американцы, закрепив в виде стандарта формы, приведенные на рис. 2.3.

Однако вышеприведенное замечание о характерной форме стрелы позволяет априори утверждать, что доля донного сопротивления в суммарном сопротивлении стрелы будет незначительна. С другой стороны, диаметры древков разных стрел не только составляют значения одного порядка; они близки друг другу. Сказанное позволяет предположить гипотезу о том, что донное сопротивление стрелы может быть введено в общую формулу в виде константы, или близкого к константе значения.

Стрелу с точки зрения аэродинамической формы можно рассматривать как сопряжение головной части (наконечника, как правило, заостренного) и цилиндрической части (древка). На торцы стрелы воздействует преимущественно донное сопротивление, а на цилиндрическую часть – трение.

Площадь донной части стрелы (с учетом выреза для тетивы) пренебрежительно мала по отношению к показателю ее полной смоченной поверхности. То есть, логичным становится предположение о почти безотрывном обтекании стрелы, при котором за дном снаряда не образуется сколько-нибудь заметной зоны пониженного давления. Следовательно, сопротивлением подсоса при расчете можно пренебречь. Таким образом, представляется закономерным рассматривать аэродинамическое сопротивление стрелы преимущественно с позиций сопротивления трения.

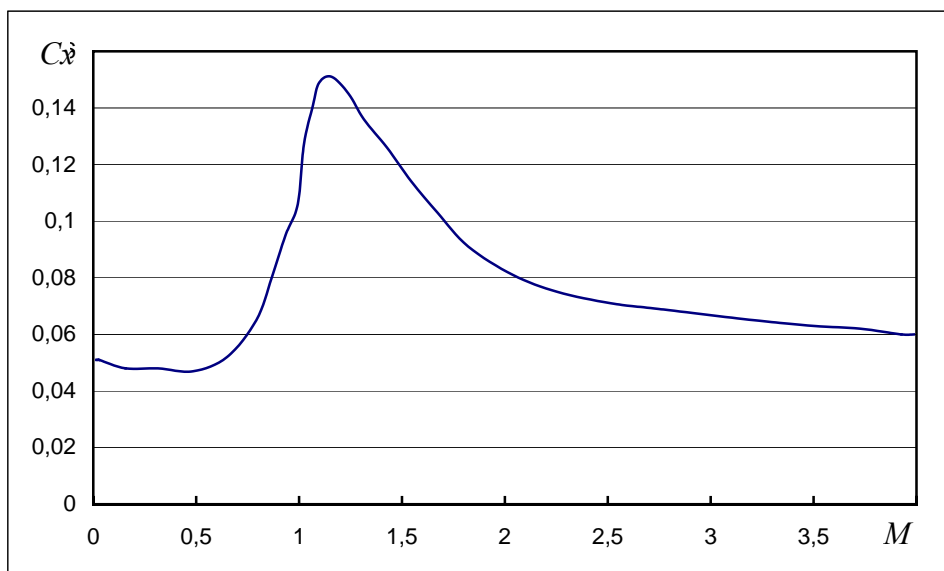
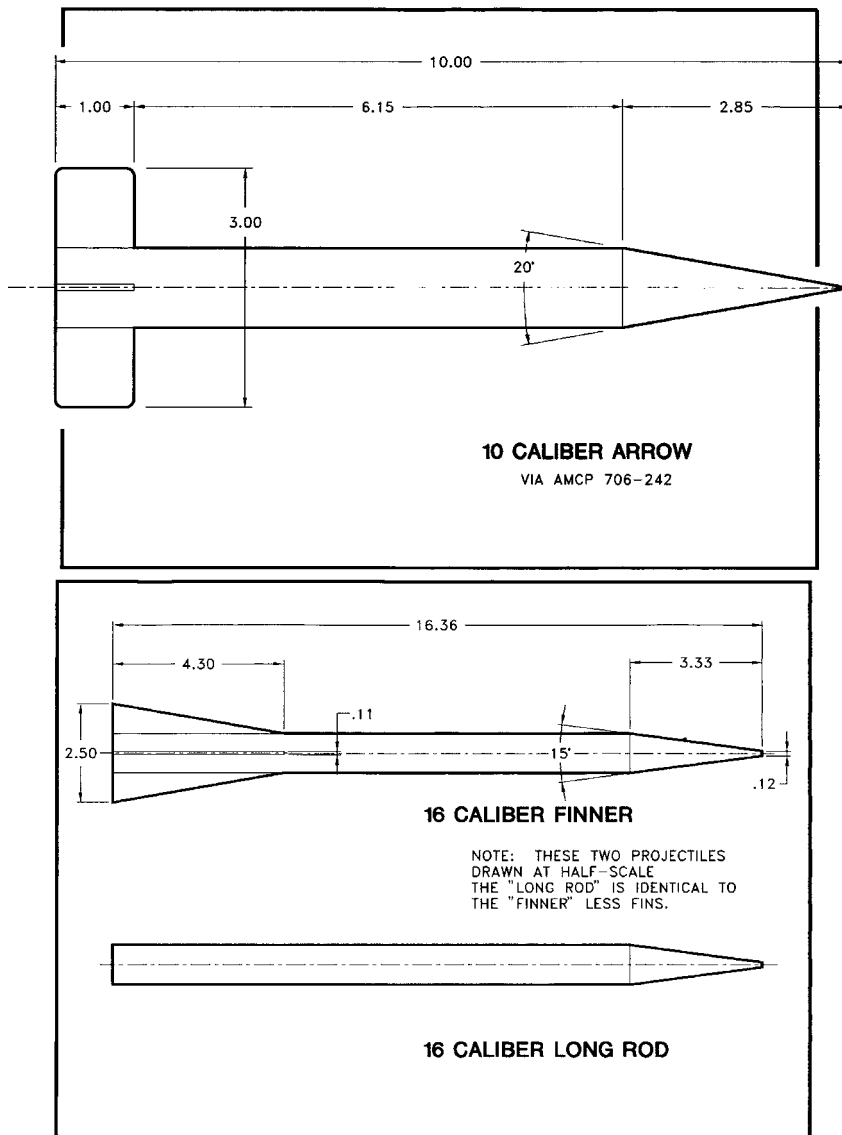


Рис. 2.3. Эталоны форм, близких к стреловидной и значения $c_x(M)$ для "Arrow" (верхний рисунок, данные [Jurens])

Соппротивление трения

В баллистических исследованиях артиллерийских снарядов и ракет силы трения снаряда о воздух априори признаны незначительными и в общий расчет их зачастую не включают¹⁴. Однако при изучении стрелы мы должны учитывать действие силы трения (вязкости) и понимать ее физический смысл.

Сила трения направлена по касательной к поверхности стрелы. Иными словами, величина этой силы прямо пропорциональна площади боковой поверхности. В свою очередь величина боковой поверхности связана с площадью сечения S и пропорциональна длине стрелы L .

Источники приводят формулу для расчета силы сопротивления воздуха для всего диапазона скоростей с учетом трения [Шапиро, С. 36]. Так как изучаемые нами снаряды движутся на дозвуковых скоростях, полагаем оправданным исключить из формулы отношение скорости снаряда к скорости звука, а характерным размером, который оказывает влияние на величину силы трения, принять длину стрелы. Предложим следующий вариант формулы для дозвуковых скоростей:

$$R = S \frac{\rho V^2}{2} c_f \left(\frac{VL}{v} \right),$$

где: V – скорость движения; ρ – плотность воздуха (равная $1,25 \text{ кг/м}^3$); v – кинематическая вязкость воздуха (равная $1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$).

По общему правилу коэффициент c_f зависит от формы снаряда и должен быть определен из опытов для снарядов различной формы. Как мы установили, значения этого показателя для различных стрел пока недоступны. А можно ли вообще избежать употребления этого показателя?

Для расчета абсолютной величины силы трения, действующей на снаряд, для случая ламинарного пограничного слоя источники [Чернозубов, С. 97] приводят формулу:

$$R_{\text{тр}} = 1,33 \frac{\rho V^2}{2} F_6 \frac{1}{\sqrt{\text{Re}}},$$

где F_6 – площадь боковой (смоченной) поверхности. В приводимой формуле имеется численный коэффициент, полученный при решении задачи обтекания пластинки, к площади которой условно приравнивают площадь поверхности снаряда. Для тел иных форм исследователи предлагают иные коэффициенты. Но исследователи указывают, что приведенная закономерность действительна лишь для условия ламинарного обтекания, а для случая турбулентного пограничного слоя необходима постановка опытов.

Существуют и более сложные формулы (например, [Чернозубов, С. 102] и пр.). Однако возможности их применения в нашем случае весьма сомнительны

¹⁴ При сверхзвуковых скоростях артиллерийского снаряда относительная величина работы силы трения в работе всей аэродинамической силы не превосходит 5–10% [Шапиро, С. 33].

хотя бы потому, что они были получены в начале прошлого века при исследовании объектов с большими линейными размерами: снарядов, дирижаблей и т.п. Иными словами, при использовании готовых формул, выведенных для пластин и снарядов, нам пришлось бы иметь дело с громадным числом допущений.

Можно посмотреть на означенную проблему с точки зрения теории пограничного слоя. Применим теорию вязкости Ньютона.

Пусть два слоя жидкости или газа отстоят друг от друга на бесконечно малое расстояние dx (рис. 2.4). Тогда за счет вязкости среды их скорость будет различаться на величину dV и справедливо уравнение Ньютона для вязкости среды:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dx},$$

где: τ – величина касательных напряжений в среде или сила трения на единицу поверхности; μ – динамическая вязкость среды (для воздуха $19 \cdot 10^{-5}$ г/см·сек); а отношение $\frac{dV}{dx}$ есть градиент скорости потока, показывающий, в какой степени скорость изменяется по мере удаления от поверхности.

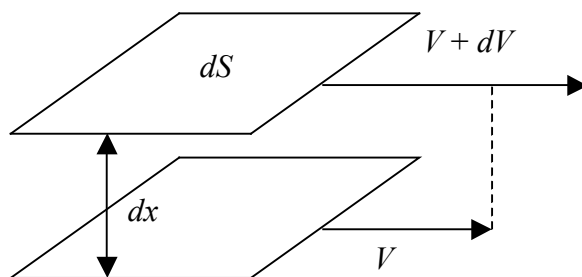


Рис. 2.4. К определению силы трения

Но с другой стороны, касательные напряжения пропорциональны силе трения R и обратно пропорциональны площади смоченной поверхности S :

$$\tau = \frac{dR}{dS}.$$

Отсюда: $dR = \mu dS \frac{dV}{dx}.$

Переходя к интегральным выражениям, можно получить формулу для расчета сопротивления: $R = \mu S \frac{\Delta V}{\Delta \delta}$, а с учетом того, что на бесконечном удалении от летящего объекта скорость среды равна нулю, то $\Delta V = V - 0$, где V – скорость летящего объекта, а $\Delta \delta = \delta$ – толщина пограничного слоя: $R = \mu S V / \delta$.

Таким образом, сила трения определяется: площадью боковой поверхности объекта S (чем большая поверхность, тем большая сила трения), вязко-

стью среды μ (более вязкая среда сильнее сопротивляется); скоростью объекта V (в данном случае наблюдается парадокс-нестыковка с законом Бернулли, поскольку в нем сопротивление пропорционально скоростному напору, т.е. квадрату скорости), обратно пропорционально толщине пограничного слоя δ .

В свою очередь толщину пограничного слоя источники [Чернозубов, С. 97] предлагают определять по формуле:

$$\delta = 5,83 \sqrt{\frac{\nu \cdot L}{V}},$$

где кинематическая вязкость среды ν есть отношение динамической вязкости воздуха к его плотности $\nu = \mu/\rho = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, а L – длина снаряда. Там же градиент скорости потока предлагается вычислять по формуле:

$$\frac{dV}{dx} = 2 \frac{\nu}{x}.$$

При рассмотрении формулы для толщины пограничного слоя видно, что переменная L помещается в числитель. Иными словами, если мы возьмем две стрелы одинакового диаметра, меньшую толщину пограничного слоя будет иметь та, что короче. Трение увеличивается по мере вязкости среды: если бы частицы воздуха не “прилипали” к поверхности снаряда в результате сил молекулярного взаимодействия, он бы скользил беспрепятственно. Однако слой воздуха, находящийся на поверхности (пограничный слой), двигается вместе со снарядом с той же скоростью. На сообщение кинетической энергии этим частицам воздуха расходуется энергия снаряда. Вблизи точки своего зарождения течение в пограничном слое является ламинарным, но постепенно завихряется (становится турбулентным) ниже по течению. Наконец, разогнанный слой воздуха отрывается от поверхности, на его место тут же прилипают новые молекулы газа. Турбулентный пограничный слой обычно тоньше ламинарного. Толщины этих слоев зависят от числа Рейнольдса, которое определяется как произведение $Re = V \cdot X / \nu$, где X – расстояние от передней кромки тела.

Каковы абсолютные значения толщины пограничного слоя δ в соответствии с методикой расчета для артиллерийских снарядов, применявшейся в середине прошлого века (см. формулу выше)? Представим себе стрелу длиной 0,5 м, которая летит со скоростью 50 м/с.

Подстановкой значений переменных получаем:

$$\delta = 5,83 \sqrt{\frac{\nu \cdot L}{V}} = 5,83 \sqrt{\frac{1,45 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5}{50}} = 5,83 \cdot 0,000387 \approx 0,002 \text{ м}.$$

Видимо, нами получено значение интегрированной толщины пограничного слоя, абсолютный показатель которой имеет тот же порядок, что и диаметр стрелы.

В современной аэрогидродинамике [Белевич] толщина пограничного слоя δ для ламинарного и турбулентного потока считается по отдельности и задается следующими соотношениями:

$$\delta_{\text{лам}} = 5,2 / \text{Re}^{1/2};$$

$$\delta_{\text{турб}} = 0,37 / \text{Re}^{1/5}.$$

Подстановкой значений получаем, что для той же стрелы на удалении 0,5 м от носика имеем:

$$\text{Re} = (0,5 \text{ м} \times 50 \text{ м/с}) / (1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}) = 1\,724\,000.$$

Для воздушной среды критическое число Рейнольдса $\text{Re}_{\text{кр}}$ (Рейнольдс, при котором ламинарный режим переходит в турбулентный) составляет от 40 тыс. до 60 тыс. Таким образом, на удалении 0,5 м от носика стрелы поток получается турбулентным ($\text{Re} > \text{Re}_{\text{кр}}$), отсюда его толщина определяется как:

$$\delta_{\text{турб}} = 0,37 \cdot (1\,724\,000)^{-0,2} = 0,0209 \text{ м}.$$

На удалении 0,01 м от носика Рейнольдс равен:

$$\text{Re} = (0,01 \text{ м} \times 50 \text{ м/с}) / (1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}) = 34\,400.$$

Поскольку $\text{Re} < \text{Re}_{\text{кр}}$, течение будет ламинарным, следовательно:

$$\delta_{\text{лам}} = 5,2 \cdot (34\,400)^{-0,5} = 0,0280 \text{ м}.$$

Обобщая данные, можно построить массив значений толщин пограничного слоя от удаленности от носика (табл. 2.2). До критических значений Рейнольдса расчет идет по зависимостям для ламинарного течения, при длинах свыше критического Рейнольдса – по турбулентным (рис. 2.5).

Таблица 2.2. Значения толщины пограничного слоя и коэффициента сопротивления при скорости 50 м/с

L	Re	$\delta_{\text{лам}}$	$\delta_{\text{турб}}$	$C_{f(\text{лам})}$	$C_{f(\text{турб})}$
0,001	3 448	0,088553	–	0,011308	–
0,010	34 482	0,028003	–	0,003576	–
0,020	68 965	–	0,039854	–	0,031883
0,030	103 448	–	0,036750	–	0,029400
0,100	344 827	–	0,028886	–	0,023108
0,200	689 655	–	0,025146	–	
0,300	1 034 483	–	0,023188	–	
0,400	1 379 310	–	0,021891	–	
0,500	1 724 138	–	0,020936	–	

Как видно из приведенных расчетов, турбулизация потока ведет к снижению толщины пограничного слоя и, следовательно, к снижению сопротивления. На удалении от носика 0,005–0,010 м наблюдается всплеск (резкое

увеличение толщины погранслоя), что связано с переходом ламинарного течения в турбулентное. Причем с увеличением скорости потока этот скачок наступает раньше. Точку перехода ламинарного потока в турбулентный на поверхности стрелы можно вычислить через критическое число Рейнольдса, и после подстановки значения плотности воздуха и небольшого преобразования формула определится как [Храмов]:

$$X = 3,7 \cdot 10^4 \frac{\nu}{V},$$

где ν – кинематическая вязкость среды, X – координата точки, считая от носика (если координата превышает длину тела, то все тело находится в зоне ламинарного течения).

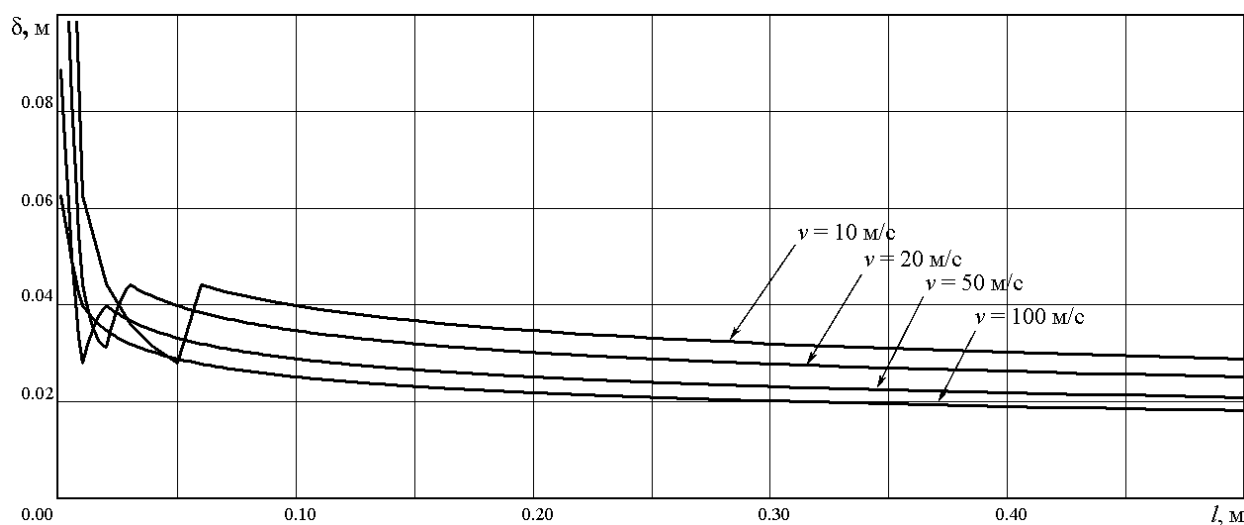


Рис. 2.5. Толщины пограничного слоя по длине стрелы при разных скоростях полета

Если подставить в данную формулу значение кинематической вязкости воздуха для малой высоты, то получится: $X = 0,5365/V$. Или в рассмотренном выше примере точка перехода ламинарного режима в турбулентный (при скорости 50 м/с) будет на удалении 0,01073 м от носика.

Следовательно, обтекание является смешанным для малых скоростей, с ростом скорости обтекание стрелы становится преимущественно турбулентным, а площадь ламинарного обтекания пренебрежительно мала: $X_{20\text{м/с}} = 2,7$ см; $X_{50\text{м/с}} = 1,0$ см; $X_{100\text{м/с}} = 0,5$ см. Иными словами, в соответствии с приводимыми данными для стрел область наконечника находится в зоне ламинарного обтекания, а зона оперения всегда в области турбулентности. Какие отсюда следуют выводы? Во-первых, очевидно, что область приложения сил трения на корпус стрелы всегда смещена к задней части, ибо здесь может находиться оперение, площадь которого бывает сравнима с площадью смоченной поверхности древка стрелы. Во-вторых, в хвостовой части под воздушными вихрями сохраняется чрезвычайно тонкий пограничный подслой ламинарной структуры.

Турбулентный пограничный слой очевидно тоньше ламинарного и имеет меньший коэффициент сопротивления. В современной аэрогидродинамике [Белевич] коэффициенты сопротивления трения для ламинарного и турбулентного слоев обтекания пластины задаются формулами:

$$C_{f(\text{лам})} = 0,664/\text{Re}^{1/2};$$

$$C_{f(\text{турб})} = 0,296/\text{Re}^{1/5}.$$

Значения коэффициентов трения приведены на рис. 2.6, а для скорости 50 м/с – в табл. 2.2. Увеличение скорости ведет к более ярко выраженной турбулизации и, следовательно, к уменьшению сопротивления.

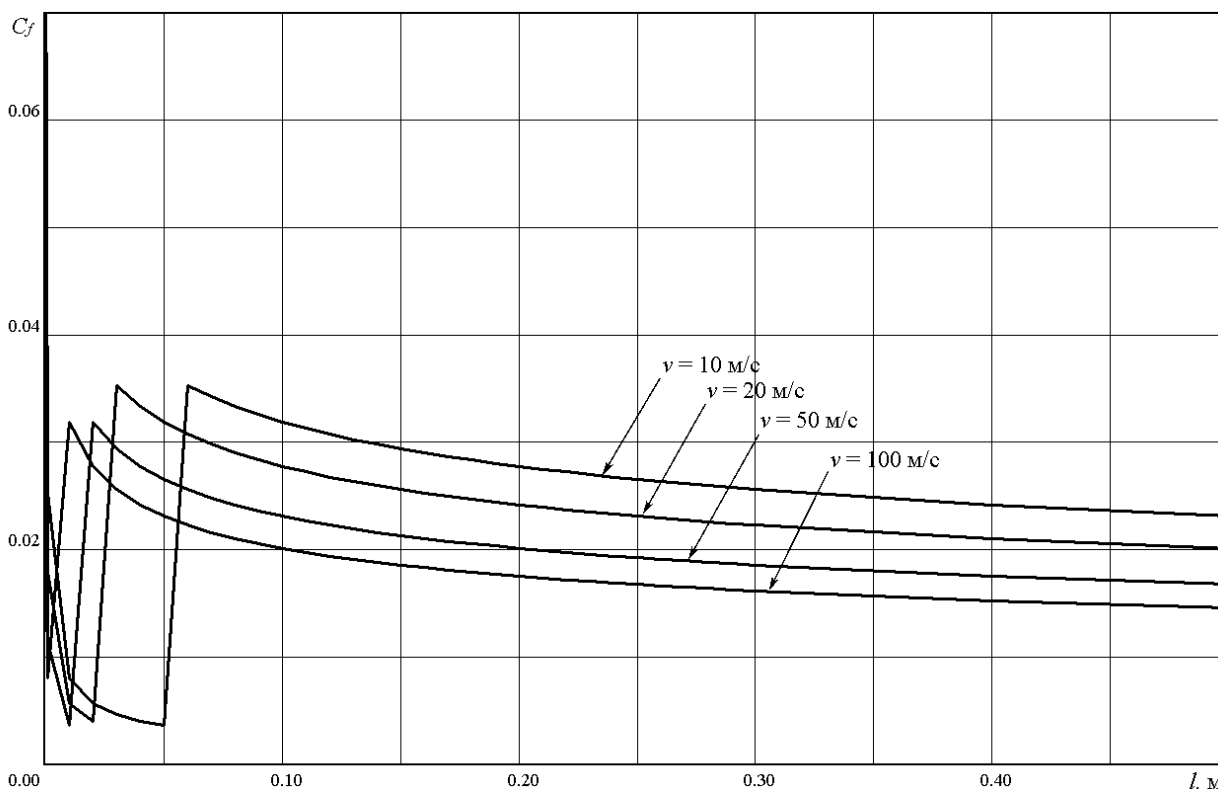


Рис. 2.6. Значения C_f по длине стрелы при разных скоростях полета

Если безразмерный коэффициент трения определяют как

$$C_f = \frac{R}{0,5\rho V^2 S},$$

а для расчета силы трения принять за S величину смоченной поверхности $S_{\text{пов}}$, то мы возвращаемся к формуле известного канонического вида:

$$R = c_f \rho \frac{V^2}{2} S_{\text{пов}}.$$

Таким образом, алгоритм аналитического расчета лобового сопротивления стрелы будет включать в себя:

- расчет донного сопротивления, которое пропорционально миделевому сечению стрелы;
- расчет площадей поверхности частей стрелы, которые обтекаются преимущественно турбулентным потоком, определение точки турбулизации по числу Re для вычисления доли поверхности, находящейся в ламинарном потоке;
- расчет сопротивления “ламинарной”¹⁵ и “турбулентной” части и суммарного сопротивления трения;
- сложение полученных значений.

Все указанные выше подходы и расчетные формулы были получены для случая идеально гладкой поверхности: артиллерийские снаряды для снижения сопротивления шлифуются, ракеты делаются со специальными покрытиями. Было установлено, что простая покраска снаряда (для уменьшения шероховатости поверхности) приводит к увеличению дальности стрельбы при прочих равных условиях до 2,5%. Но в случае стрелы, шероховатостью вряд ли можно пренебречь.

Обычно шероховатость характеризуется некоторой средней высотой неровностей, которая как-то должна соотноситься с толщиной погранслоя. В этом случае выделяют три типа течения.

1. Аэродинамически гладкое течение, когда высота шероховатостей намного меньше толщины погранслоя. При малых скоростях потока, и в случае, когда высота бугорков шероховатости очень мала, происходит безотрывное обтекание бугорков. Сопротивление трения является функцией числа Re и не зависит от размеров шероховатостей.

2. Переходная область, когда высота неровностей начинает влиять на картину обтекания. С увеличением скорости поток на поверхности тела переходит от ламинарного движения к турбулентному, имеющему ламинарный вязкий подслой, и если высота бугорков шероховатости имеет тот же порядок, что и толщина этого подслоя, то лишь вершины бугорков, попадая в область больших скоростей, обтекаются с отрывом от ламинарного вязкого подслоя. В этом случае коэффициент сопротивления растет, являясь функцией числа Re и относительной шероховатости.

3. Аэродинамически шероховатое течение, когда высота неровностей соизмерима или превышает толщину погранслоя. Обтекание неровностей происходит вихреобразно, и коэффициент трения резко возрастает. Он перестает зависеть от числа Re и определяется только степенью шероховатости поверхности [Чернозубов, С. 104].

¹⁵ Мы видели выше, что в соответствии с принятыми на сегодня аналитическими подходами ламинарное обтекание стрелы характерно лишь для головной части стрелы и для малых скоростей полета. Традиционно считается, что если длина ламинарного участка составляет менее 5% длины тела, то им можно пренебречь [Храмов]. Поэтому для скоростей свыше 30–40 м/с обтекание стрелы следует полностью считать турбулентным и вычисление доли площади ламинарного обтекания теряет смысл.

К сожалению, к настоящему времени исследователями более-менее собран и обработан материал лишь по внутренним течениям (в трубах), как имеющий несоизмеримо большую важность, чем внешние течения. Чтобы понять объемы проделанной работы, можно взглянуть в любой справочник по гидравлическим сопротивлениям, наиболее фундаментальным из которых является работа И.В. Идельчика [Идельчик]. На протяжении почти 600 страниц автор приводит значения гидравлических сопротивлений для труб разных форм, разных режимов течения и разных сред. Причем работа не является исчерпывающей, потому как для любого справочника всегда возникает ситуация, когда более богатая практика дает повод добавить к теории новый случай. При этом самое простое решение состоит в обосновании, что данное сопротивление является наиболее близким к случаю, описанному составителем справочника на странице такой-то. Очевидно, что нечто подобное предстоит сделать с внешними течениями. И при этом следует иметь в виду, что многообразие внешних течений гораздо богаче, чем внутренних.

2.5. Постановка задач для эксперимента

В литературе по баллистике, выпущенной в прошлом веке, общим местом является тезис о том, что при громадном разнообразии снарядов, в непредсказуемых условиях стрельбы даже при всех допущениях и упрощениях те или иные формулы в состоянии лишь приблизительно описать траекторию. Баллистики прошлого видели свою задачу в том, чтобы дать практикам (артиллеристам) хоть какой-то инструментарий, который внушал бы им уверенность в возможности победы над врагом. Конечно же, в реальных условиях боя до появления электронных калькуляторов зачастую некогда да и некому было производить многоступенчатые вычисления с многозначными числами. С другой стороны, множественность подходов и разнообразие уравнений, о которых шла речь выше, свидетельствуют о том, что в массе своей “аналитические” баллистики были в состоянии лишь формулировать перечень исследовательских задач для экспериментаторов. Разумеется, в последние десятилетия баллистика получила невиданное развитие, с внедрением вычислительных машин стал возможен расчет траекторий рукотворных космических объектов. Однако изучение движения снаряда под действием силы сопротивления воздуха в значительной степени находится в русле классической парадигмы. Кроме того, на момент написания этих строк авторам не удалось обнаружить в литературе (по крайней мере, отечественной) сколько-нибудь развитой теории аэробаллистики стрел. Поэтому изложенные выше отрывочные сведения явно нуждаются в экспериментальной проверке для того, чтобы данные, используемые при исторической реконструкции, имели объективный характер. В нескольких словах наметим основные требования и задачи комплекса экспериментов, нацеленных на получение необхо-

димой информации для предсказания траектории стрел и оценки величины их кинетической энергии в точке попадания в цель.

1. Выбор эталонного объекта, для которого будут установлены закономерности обтекания воздухом. Мы предполагаем возможность и перспективу сопоставления эталона с реальными стрелами, каждая из которых может в дальнейшем получить соответствующий коэффициент формы, который можно будет вычислить в первом приближении аналитически. Эталон должен иметь свойство воспроизводимости для того, чтобы те или иные эмпирические данные могли быть перепроверены. Значит, форма его, в отличие от обводов артиллерийских снарядов, должна быть проста и воспроизводима без специальных мерительных инструментов, лекал и пр.¹⁶ Выше мы упоминали, что наиболее простой формой эталонной стрелы нам представляется цилиндр большого удлинения (длина которого превышает диаметр в десятки раз). При этом ничто не мешает нам во избежание масштабирования обратиться к реальным размерам стрелы; рабочая зона даже небольшой аэродинамической трубы вполне это позволяет. Полагаем логичным снабдить этот цилиндр сменными наконечниками, например, известных в археологии форм: листовидным, долотовидным, срезневидным, шиловидным или конусным заострением с углом при вершине $30^\circ \dots 45^\circ \dots 60^\circ$ и пр. Оценка изменения суммарного сопротивления в ходе продувки древка с различными наконечниками при изменении скорости потока позволит установить долю донного сопротивления и его величину для конкретных аэродинамических форм.

2. Эталон должен быть стабильным во времени, то есть не менять своих свойств в неблагоприятных условиях хранения, транспортировки и эксплуатации. Как ни странно, но оригинальный материал (дерево) на эту роль не годится, так как его массово-габаритные характеристики и, самое важное, степень шероховатости неокрашенной поверхности меняются под влиянием влажности, нагрузок и температур. Поэтому, для приближения к натуре по массовым показателям полагаем оправданным прибегнуть к использованию алюминиевых трубок.

3. Считаем, что алюминий наиболее распространенной марки по известному ГОСТу соответствует и условию дешевизны использованных материалов.

4. Алюминиевая труба отвечает условию делимости и кратности эталона – для эксперимента легко изготовить набор древков с любым необходимым диаметром и шагом длины: 1 см, 5 см, 10 см, либо скручивать трубки встык для образования нужной длины. Это позволит определить закономерности возрастания сопротивления трения с увеличением длины и диаметра древка.

5. Предложенный материал позволит поддерживать стандарт чистоты поверхности эталона: достаточно обрабатывать ее наждачной бумагой определенного номера, для которой известна величина абразивного зерна. Выше

¹⁶ Вспомним, что Ньютон и его ближайшие последователи экспериментировали с шаром, который имеет всего один линейный размер – диаметр.

мы показали, что степень шероховатости поверхности имеет решающее влияние на величину сопротивления трения. Следовательно, обработка экспериментальных древков наждачной бумагой с зерном известной крупности (разумеется, во всех случаях либо вдоль, либо поперек потока) позволит выявить закономерность между чистотой поверхности и степенью ее сопротивления и описать эту закономерность математически.

6. Для экспериментального определения координаты точки перехода ламинарного потока в турбулентный относительно острия стрелы полагаем оправданным использовать отработанную в аэродинамике методику индикаторных лент (наклеиваемых на корпус исследуемого изделия), либо внесение в поток индикаторных частиц. Но в условиях незначительных линейных размеров объекта считаем необходимым использовать ленты алюминиевой фольги шириной не более 1–2 мм или кусочки нити. В свою очередь, для облегчения визуального определения точки турбулентности для разных скоростей предполагаем снабдить боковую поверхность обдуваемого древка линией проекции его продольной оси и сантиметровыми рисками, выполненными на его поверхности контрастным красителем.

Авторы надеются, что экспериментальная проверка высказанных ими гипотез окажет влияние на формирование исследовательской парадигмы историков вооружений.

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.

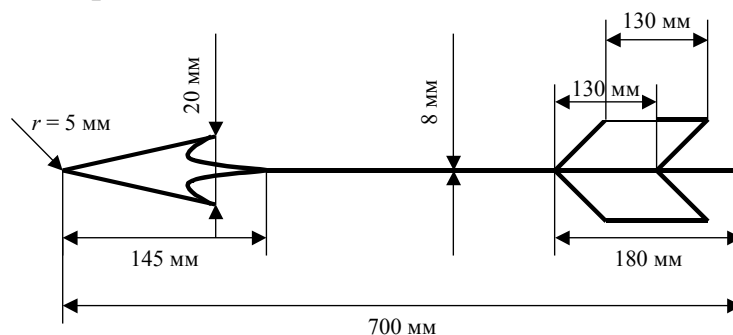


Рис. 3.1. Аэродинамическая схема рассчитанной стрелы

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 трения¹. 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-

¹ 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 ρ 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 снаряда². 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 Иднакар³, 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

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

³ 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 встречающихся 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 насадом⁴ [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 см³. А, принимая плотность кости⁵ за 2 г/см³, 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 перевод⁶ 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 веса⁷ лука на

⁴ О фрикционном насаде – см. главу данного издания о реляционной базе данных наконечников.

⁵ Плотность кости сплошной структуры, например, зубной ткани равна 1,99 г/см³ (см. http://port.odessa.ua/medic/sea_med/0002/000230.htm).

⁶ 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.

⁷ 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 1/9⁸.

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.

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

А для некоторых металлов:

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

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 ρ можно принять в интервале $0,6 \dots 0,8 \text{ г/см}^3$.

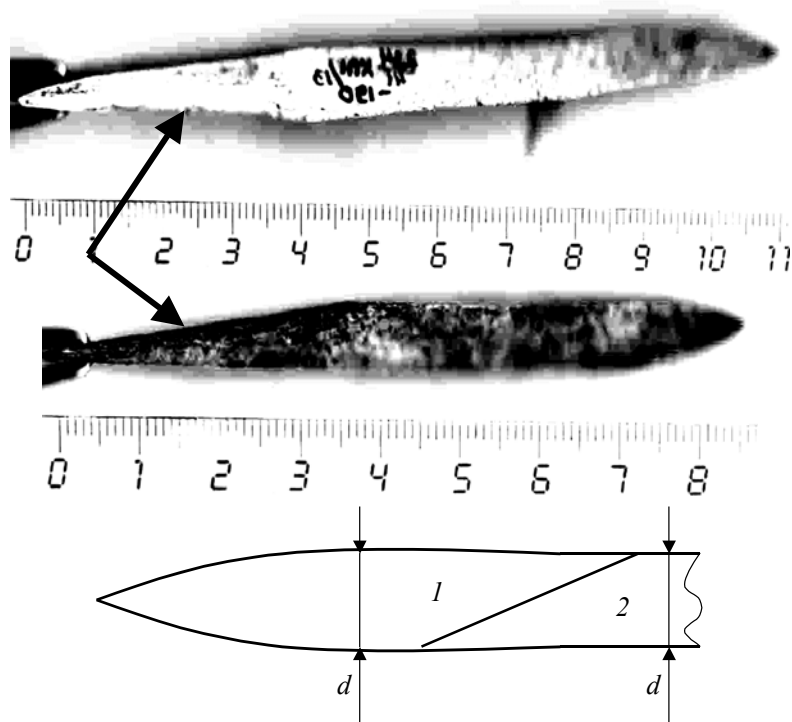


Рис. 3.2. Вверху и в центре костяные наконечники из раскопок Г.Т. Ленц на городище Анюшкар в 1989–93 гг., (На конце черешков видны захваты пинцета, которым наконечники удерживаются на сканере);
Внизу: схема определения диаметра стрелы по костяному наконечнику;
 1 – тело наконечника; 2 – тело древка

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:

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

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 ρ_1 и ρ_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 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, исключаящий 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]⁹. Это утверждение позволяет записать значение диапазонов $A = 3...4$,

⁹ 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 $A / (A - 2) = 2 \dots 3$. В этом случае запас статической устойчивости приобретает явно избыточное значение $K = 17 \dots 25 \%$, 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 $A = 2,4 \dots 4,0$ и записать условие аэродинамического существования стрелы как:

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

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

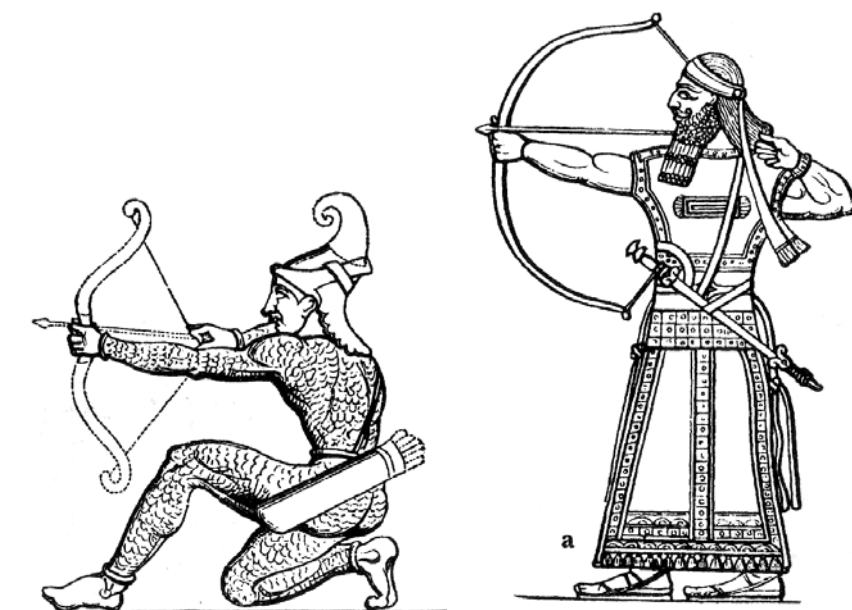


Рис. 3.3. Разные способы натяжения лука по Г. Вейсу [Вейс]: слева: с. 171, рис. 221; справа: с. 99, рис. 146

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.

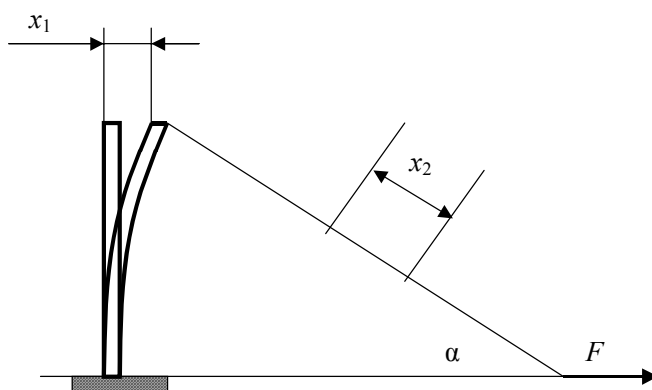


Рис. 3.4. Расчетная схема механики лука

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 ℓ – 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 B).

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]¹⁰.

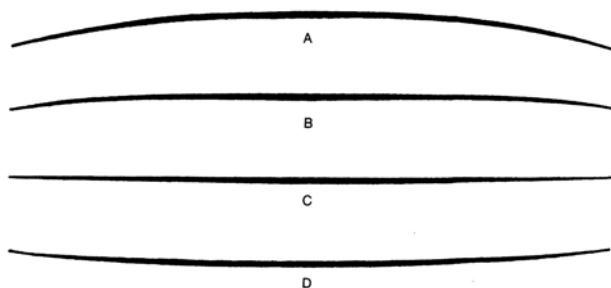
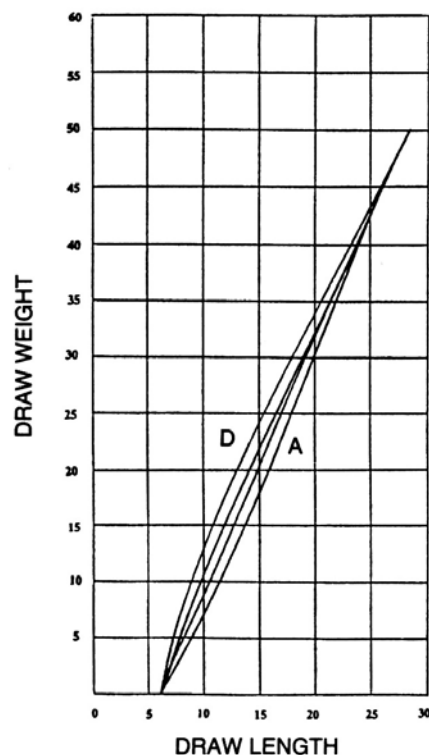


Рис. 3.5. F-x диаграмма для некоторых форм луков [Baker]



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

¹⁰ 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° , 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° , 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 пальцами¹¹ 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-

¹¹ 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.

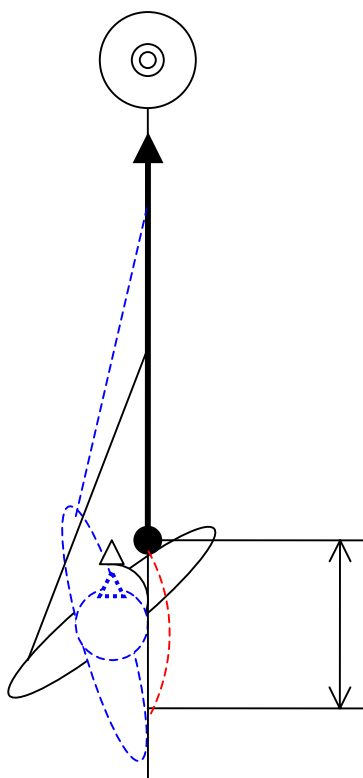


Рис. 3.6. Амплитуда тетивы x при натяжении поворотом корпуса (показана двойной стрелкой по хвостовику стрелы)

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.

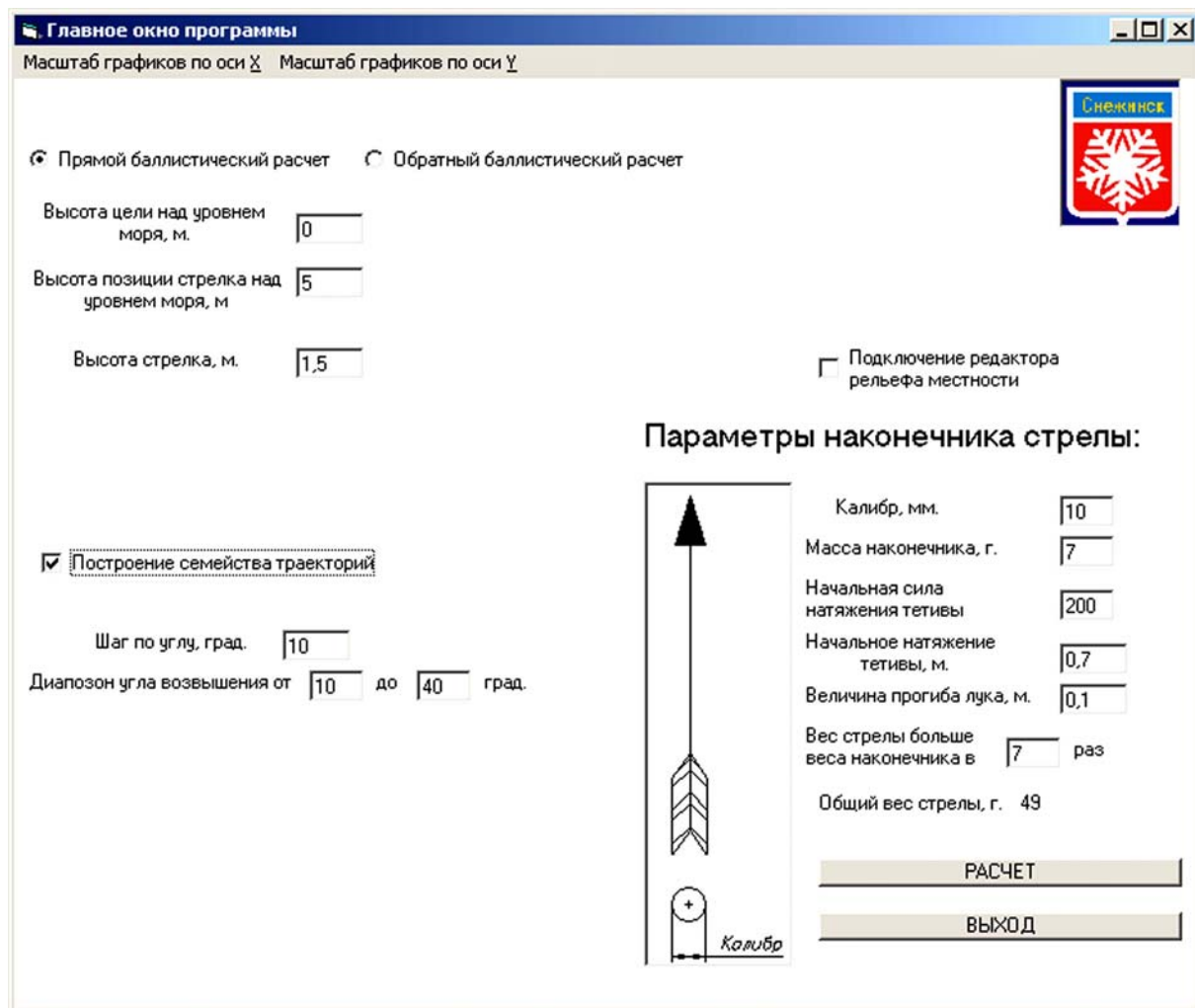


Рис. 3.7. Главное окно программы Archer

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.

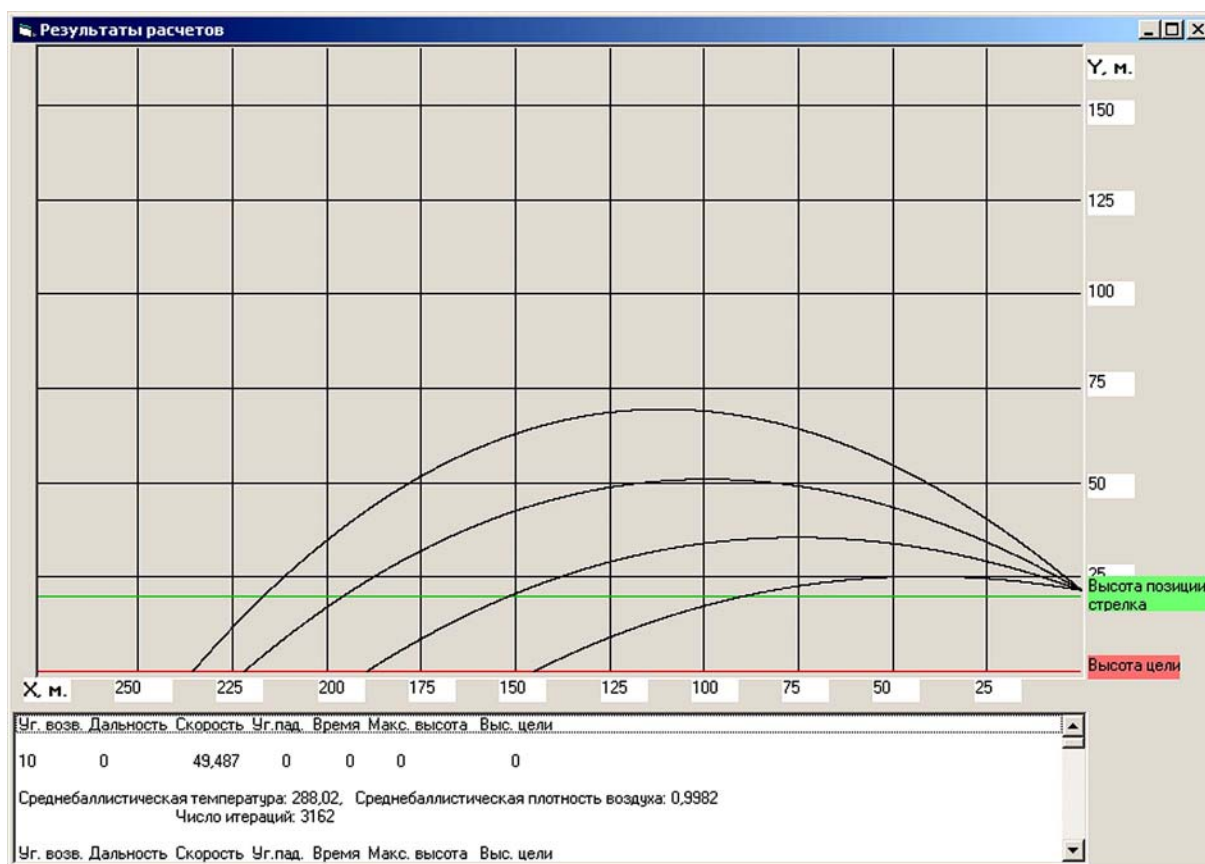


Рис. 3.8. Окно результатов программы Archer

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.

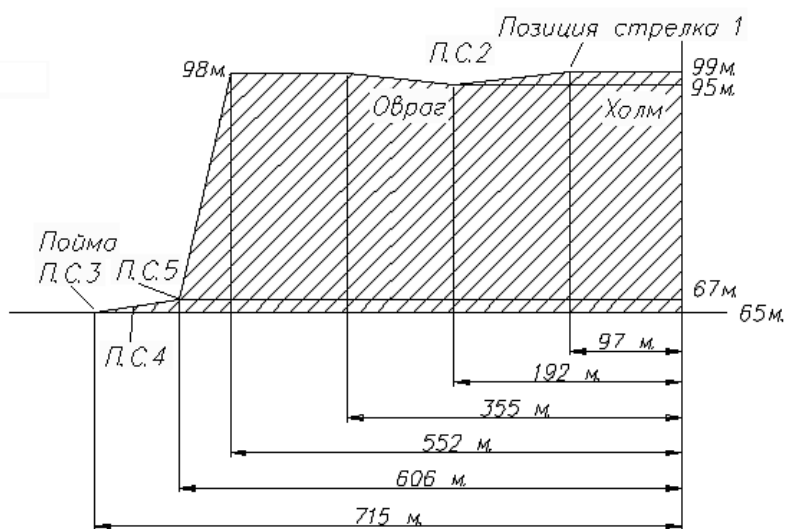
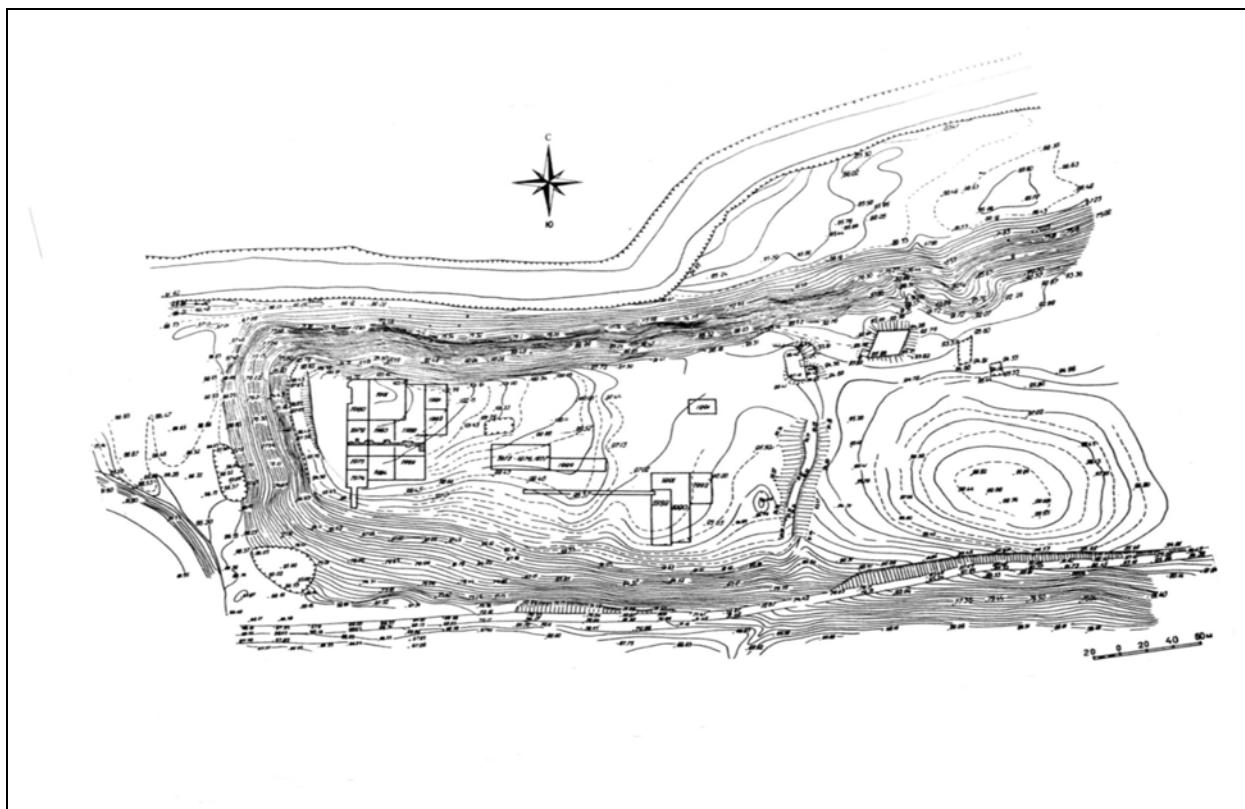


Рис. 3.9. Схематический продольный профиль площадки городища Иднакар

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° , давая возвышение по высоте цели, лучник точно попадает в цель. При угле прицеливания 40° 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 ($1,7 \cdot \text{ctg } 40^\circ$).

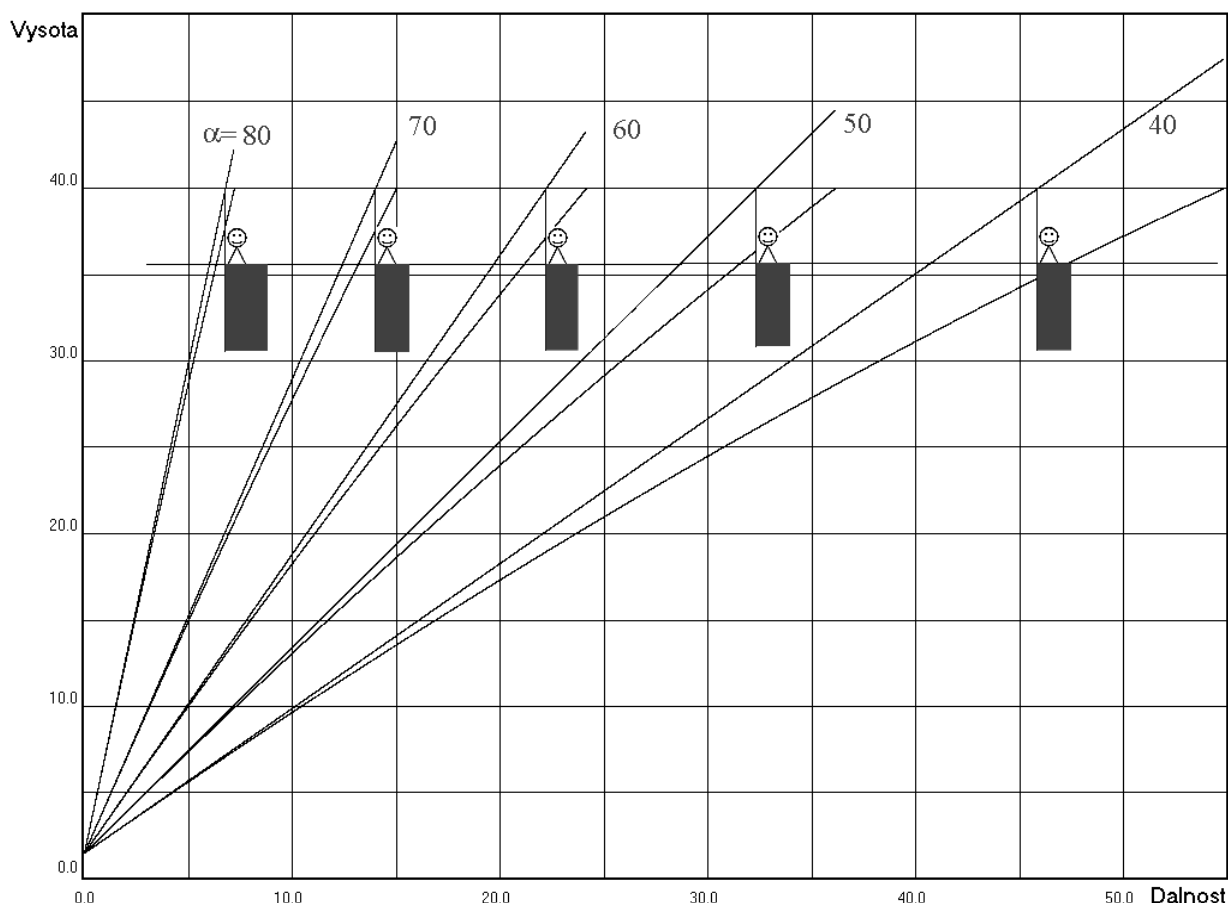


Рис. 3.10. Результаты виртуального обстрела Иднакара с поймы

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: $\arctg((5,0 + 1,5 - 3,4)/100) = 1,8^\circ$.

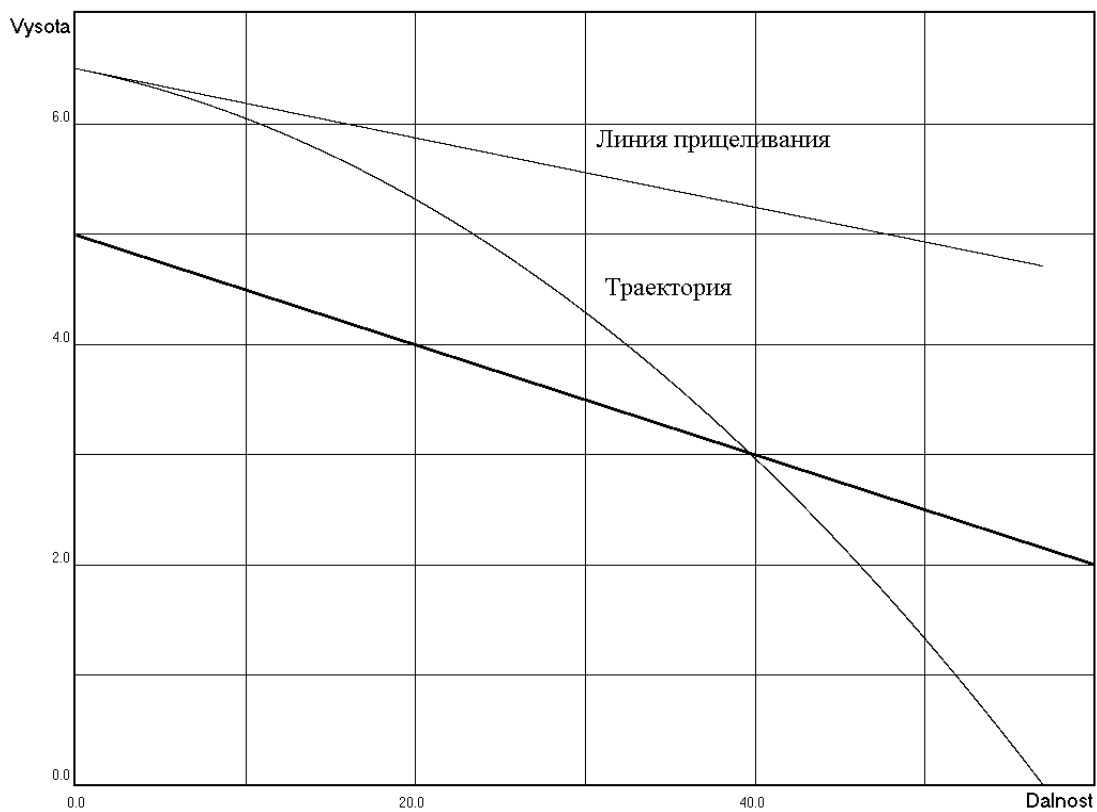


Рис. 3.11. Результаты виртуального обстрела Иднакара с холма

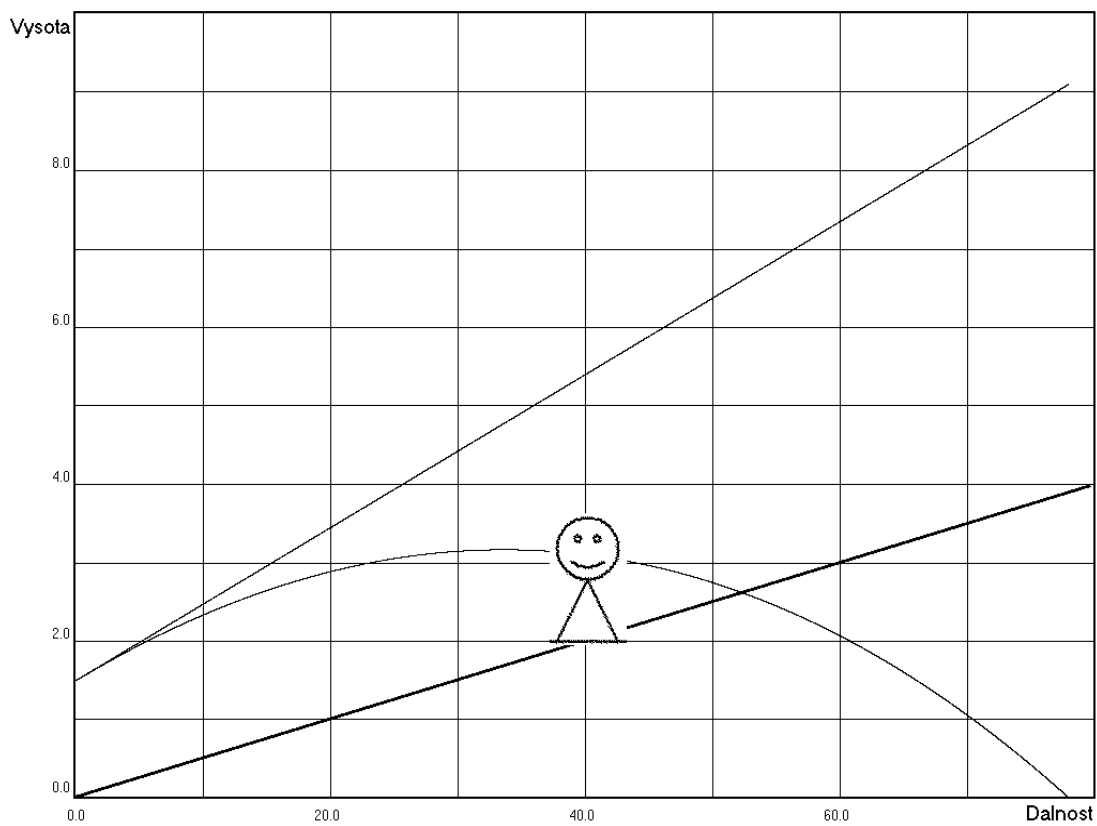


Рис. 3.12. Результаты виртуального обстрела Иднакара от первого вала

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.

4. ПРИНЦИПЫ И ВОЗМОЖНОСТИ РЕЛЯЦИОННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ О СТРЕЛАХ

4.1. Ограниченность типологии А.Ф. Медведева и ее клонов

Сегодня среди археологов общепринятой является типология метательного оружия и стрел, предложенная около сорока лет назад А.Ф. Медведевым [Медведев]. Однако, на наш взгляд, она не является оптимальной и в современных условиях должна быть пересмотрена. С другой стороны, принципы создания массива информации о множестве наконечников, описанных этим автором, не могут быть использованы в качестве основы архитектуры современной базы данных, рассчитанной на применение научного аналитического аппарата. Попробуем обосновать свою точку зрения, рассматривая работу А.Ф. Медведева в качестве ближайшего аналога (прототипа), критикуя который мы изложим свое видение вопроса.

Итак, уже в момент своего создания названная типология не отражала весь ассортимент имеющихся наконечников. Например, названный автор разделил наконечники по форме насада на два **отдела**: втульчатые и черешковые. Ко второму отделу он отнес наконечники с плоским или шиловидным черешком, забивавшимся при закреплении наконечника в торец древка [Медведев, С. 54]. Однако широко известные, в том числе по описанию А.Ф. Медведева костяные наконечники, которые имеют контактную площадку для крепления к древку, срезанную “на ус”, не являются ни черешковыми, ни втульчатыми и остаются “за бортом” этой классификации. Зачастую такие наконечники имеют насечки на плоскости, обращенной к древку для увеличения коэффициента трения (См., например, в цитированном издании Табл. 22, № 30 и Табл. 30д, № 111), а мы вводим для такого насада название “фрикционный”.

В то же самое время А.Ф. Медведев указывает: “По характеру поперечного сечения пера или острия все наконечники (втульчатые и черешковые) делятся на три основные **группы**: трехлопастные, плоские и граненые (броневойные)” [Медведев, С. 54]. Нетрудно заметить, что вне такого деления остаются круглые в сечении костяные втульчатые наконечники. Кроме того, здесь в один ряд типологизирующих признаков поставлены совершенно разные параметры – в одном случае линейный измеряемый параметр: форма наконечника (плоский или граненый), а в другом случае качественный параметр, которым является назначение наконечника (броневойный). Ведь шиловидный наконечник, способный пробивать доспехи, может быть вовсе не граненым, а круглым в сечении.

Наконец, обратившись к сводному указателю к таблицам [Медведев, С. 109–116], никакого деления наконечников на задекларированные отделы мы не увидим. Нет здесь и деления на объявленные **группы** – вместо них мы видим лишь колонку “вид”.

Вдобавок ко всему, А.Ф. Медведев приводит изображения и описания костяных наконечников [Медведев, Табл. 14, № 35–38; Табл. 19, № 44, 45 и др.], а в колонке “тип”, построенной им сводной таблицы, читаем: “кость”. Читатель остается в недоумении относительно избранного автором признака для типологизирования – ведь во всех остальных записях таблицы материал изделий в качестве типологизирующего признака не упоминается. Совершенно не ясно, образуют ли костяные наконечники, относящиеся к различным **отделам** и **группам** (видам), по мнению А.Ф. Медведева, свой особенный **тип**? Таким образом, для археолога, имеющего в обнаруженном и исследуемом им вещевом материале костяные наконечники втульчатые круглого сечения, или экземпляры с фрикционным насадом, типология А.Ф. Медведева бесполезна по причине ее неприменимости.

Нумерация предложенных типов в своде А.Ф.Медведева никак не связана ни с отделом, ни с группой, к которой относится наконечник. Иными словами, перечень объектов является линейным и одноуровневым, и номер типа не кодирует информацию о параметрах изделия – эти параметры формы, относимые к конкретному номеру из сотни имеющихся, необходимо заучивать.

Таким образом, рассматриваемое сочинение не содержит классификации в общепринятом смысле слова (по принципу: отдел > вид (группа) > тип), и по сути своей книга эта является лишь перечнем артефактов. Значит, для решения задач компьютерной обработки баз данных о наконечниках эта линейная “типология” непригодна, да она и создавалась без расчета на такое использование.

Конечно, предложенный А.Ф. Медведевым метод “типологизирования” на основе внешних признаков изделий, может быть использован (и используется) для фиксации полевого археологического материала, для создания описаний коллекций и изготовления подписей к музейным экспонатам. Однако причина столь длительного использования явно несовершенного свода артефактов кроется прежде всего в том, что никакой другой широко известной типологии просто нет, а, с другой стороны, “типология” А.Ф.Медведева худо-бедно дает археологам возможность коммуникации. Ведь если один археолог сообщает коллегам, что им найдены наконечники типа № 63, то аудитории, заучившей свод Медведева, становится понятно, что речь идет о плоском черешковом лавролистном наконечнике. Таким образом, этот перечень артефактов вполне функционален в условиях существующей коммуникативной компетенции археологов.

Но отвечает ли этот перечень вызовам нашего времени, и может ли он использоваться при современных требованиях к профессиональной компетенции археолога и историка?

Конечно, более двадцати лет после книги А.Ф. Медведева, Ю.С. Худяковым была опубликована работа, в которой предлагались несколько иные принципы организации базы данных [Худяков]. Однако в пределах одной книги нами были обнаружены принципиально разные способы классифицирования, которые были использованы автором для анализа вещевого материала разной культурной принадлежности (табл. 4.1 и 4.2).

Таблица 4.1. Принцип организации базы данных о наконечниках стрел кыргызов XIII–XIV вв. [Худяков, С. 9–14]

Иерархический уровень	Идентифицирующий признак уровня	Перечень значений признака
Класс	Материал	Железо Кость
Отдел	Насад	Черешковый Втульчатый
Группа	Устройство рабочей части?	1.Трехлопастные 2.Плоские 3.Ромбические 4.Четырехгранные
Тип (для группы трехлопастных)	???	1.Удлиненно-ромбические 2.Удлиненно-шестиугольные 3.Овально-крылатые

Таблица 4.2. Принцип организации базы данных о наконечниках стрел кыштымов в первой половине II тыс. н.э. [Худяков, С. 30–32]

Иерархический уровень	Идентифицирующий признак уровня	Перечень значений признака
Класс	Материал	Железо Кость
Отдел	Насад	Черешковый Втульчатый
Группа (для черешковых)	Устройство рабочей части?	1.Трехлопастные 2.Двухлопастные 3.Четырехгранные 4.Ромбические 5.Прямоугольные
Тип (для группы трехлопастных)	???	1.Удлиненно-шестиугольные 2.Асимметрично-ромбические 3.Овально-крылатые

Сравнивая приводимые таблицы, нетрудно убедиться, что они построены на различных способах нумерации одних и тех же групп и типов: в первом случае группу № 2 образуют плоские наконечники, а во втором – двухлопастные, в первом случае тип № 1 группы трехлопастных образуют удлиненно-ромбические экземпляры, а во втором – удлиненно-шестиугольные и т.д. Кроме того, костяные наконечники со скошенной контактной площадкой не являются по определению черешковыми, так как не забиваются в торец древка, и древко

не окружает насад. Однако Ю.С.Худяков по непонятным причинам включает их в отдел черешковых (хотя на рис. 60 в своей книге он приводит изображения костяных наконечников, и на контактных площадках у них ясно различимы насечки для увеличения силы трения с древком).

В силу отмеченных особенностей не представляется возможным уяснить систему построения Ю.С. Худяковым базы данных о множестве исследованных им наконечников. Видимо, автор и не ставил перед собой задачи создать универсальную базу данных, а лишь систематизировал для целей публикации имеющийся у него массив информации применительно к той или иной археологической культуре.

Таким образом, можно отметить следующее:

1. Свод А.Ф. Медведева создан на основе рассмотрения нескольких тысяч артефактов, и, несомненно, в нем был овеществлен громадный живой труд. Однако за прошедшие десятилетия были обнаружены и опубликованы новые тысячи наконечников стрел, и это обстоятельство уже само по себе порождает законный интерес к типологии, которая нуждается во внимательной оценке с точки зрения ее полноты¹. С другой стороны, повсеместное внедрение вычислительной техники позволяет сегодня обрабатывать большие базы данных и искать механизмы взаимной корреляции признаков артефактов, получая информацию, недоступную иными способами. Но для этого исходные данные об объектах, включаемых в базу данных, надо формализовать, то есть ввести по каждому из объектов значения его признаков по некоему универсальному перечню признаков.

2. Круг задач современного исследователя не ограничивается описанием артефактов по той или иной модели. Так, появившиеся за рубежом (и в небольшом количестве в нашей стране) публикации археологов, историков войн и вооружений, баллистиков, криминалистов и т.д. убеждают нас в том, что наконечник стрелы является не только археологическим артефактом, который можно описать и выложить в музейную витрину. Нет, наконечник несет информацию о параметрах стрелы в сборе, в свою очередь, габариты стрелы коррелированы с параметрами лука, и последний может быть реконструирован, а параметры метательного оружия позволяют оценивать характеристики фортификаций, для обороны (или захвата) которых это оружие было использовано. Для решения новых исследовательских задач создано соответствующее программное обеспечение расчета баллистических характеристик стрел, а интерфейсы программ требуют ввести вполне определенные параметры наконечника. Но эти параметры в рассмотренных сводах не отражены, и, как правило, не находят пока своего отражения в полевых отчетах археологов, ибо археолог пока не понимает, какие именно из зафиксированных им параметров будут использованы для исторической рекон-

¹ Отсылаем читателя к публикации, в которой содержится довольно подробное описание множества типологий стрел, предложенных отечественными авторами [Руденко, С. 64–71].

струкции. Тем не менее, и при существующем объеме фиксации и способе публикации некоторые из неизвестных параметров наконечников могут быть восстановлены историком путем натурального моделирования или способом вычисления неизвестного через известное. Но здесь нельзя обойтись без того, чтобы описывать (и реконструировать) различные объекты, извлеченные и опубликованные разными раскопщиками по универсальному шаблону **значимых** признаков.

4.2. Архитектура и принципы построения базы данных

Итак, логикой развития современной науки продиктована задача создания реляционных баз данных, которые позволяют выявлять отношения (реляции) между различными признаками объектов. Реляционные базы данных, построенные по иерархическому принципу, предоставляют исследователю возможность табличного представления данных и выборки объектов по совокупности признаков. Для создания такой базы необходимо во-первых, обосновать выбор параметров наконечников, которые образуют соответствующие поля таблицы. Поэтому оправданным представляется избрать перечень принципиально важных признаков, значения которых необходимы для исследования баллистических характеристик наконечников и влияют на технический результат применения того или иного изделия.

Во-вторых, перед нами встает задача избрания способа отражения того или иного признака. Здесь логичным видится такой подход: если признак принимает лишь несколько значений, то кодированию может подвергаться область этих значений, образующая качественный параметр (например, одной литерой обозначается все множество изделий, рассчитанных на нанесение проникающих ранений и т.п.). А там, где диапазон значений широк, как, например, при описании количественных параметров изделия (его габаритов и массы) логично использовать цифры.

Избранный нами подход логически приводит к тому, что сводная информация в объеме значимых признаков артефакта может быть отражена либо в таблице, либо краткой формулой, в которой буквы латинского алфавита чередуются с цифрами, причем описание параметров производится от носика наконечника к его насаду.

1. Наиболее очевидным признаком наконечника является его материал. Такой параметр материала, как удельный вес используется в баллистических расчетах. Поэтому предлагаем обозначать материал литерами:

- W (от Wood для утолщений на концах древков и иных деревянных устройств, утяжеляющих головную часть стрелы);
- S (от Stone для кремневых и каменных наконечников);
- O (от Osseous для костяных наконечников);
- C (от Cuprum для бронзовых, латунных, медных и наконечников из медсодержащих сплавов);

• F (от Ferrum, для наконечников из материалов, в состав которых входит железо).

Кроме того, для баллистического расчета требуется знать массу наконечника. Полагаем обозначать ее в граммах. Тогда, например: “O12”, увиденное в формуле, следует прочесть, как “Костяной наконечник массой 12 г”. Разумеется, деревянное утолщение на конце древка имеет массу, которую без разрушения изделия следует определить аналитически.

2. Как мы показали в соответствующих работах [Коробейников, Митюков (1)] всякая стрела, предназначенная для поражения живой силы вследствие особенностей рабочей части наконечника (степени заостренности, величины сечения, удаления миделя от носика) может нанести либо поверхностные повреждения, либо проникающее ранение, приводящее, как правило, к летальным последствиям.

Имея в руках несколько образцов наконечников, легко убедиться в том, что при условии приложения к ним одинаковой силы они входят в цель на разную глубину: достаточно попытаться их задавливать, например, в пенопласт или пластилин – наконечники с притупленной передней кромкой требуют заметно большего усилия. Использование “тупоконечных” наконечников, видимо, можно объяснить и тем, что в случае промаха по цели, при попадании в деревянные части оборонительных сооружений или щиты обороняющихся заостренные наконечники настолько плотно заседают в них, что извлечение стрелы в целости для ее повторного использования маловероятно – если просто тянуть за древко, оно соскочит с черешка, а расшатывание стрелы разрушит узел крепления. Вспомним одноразовое в пределах одного боя метательное копьё Римских воинов – *Pilum*, ударник которого специально делали из незакаленного железа; при попадании в преграду он сгибался и не давал возможности бросить копьё обратно. Но после боя победитель имел возможность эти копьё собрать и с помощью кузнеца приготовить для следующего использования. Таким образом, например, агрессор, планирующий стремительный штурм деревянного оборонительного сооружения, вполне может раздать своим стрелкам перед боем “тупоконечные” стрелы (которые не способны войти в дерево иначе, как вдоль волокон), для возможного их сбора после боя для повторного использования. Следовательно, наличие таких образцов может помочь в деле реконструкции тактики участников боя. Хотя, разумеется, какие-либо статистические выкладки по “типам” стрел, обнаруженных археологом, не могут быть приняты во внимание с учетом выказанного предположения о возможности повторного их использования; мы никогда не узнаем, сколько и каких стрел было повторно использовано в ходе боя или подобрано и унесено уцелевшими воинами после боя.

Таким образом, параметр проникающей способности (но не останавливающего действия!) наконечника принимает несколько значений. Полагаем возможным обозначать его литерами латинского алфавита: P (от английского

Penetrative – проникающий) и Н (от Hammer – ударник), а двурогие срезни, которые имеют острия, уменьшающие вероятность рикошета, но в то же время имеют ограниченную глубину проникновения, обозначать литерой Y, которая имеет внешнее сходство с таким наконечником. Соответственно, длину рабочей части обозначаем в миллиметрах. Например “Н45” следует прочитать, как “Наконечник, способный причинять поверхностные повреждения (наконечник ударного действия) с длиной от носика до насада 45 мм”. Логичным представляется указывать здесь же через слэш и значение раствора рабочей части в градусах для наконечников Y-типа.

3. Сечение рабочей части наконечника, измеряемое как площадь геометрической фигуры, можно свести к четырем типам, которые обозначаются литерами:

- R (от Round – округлое, т.е. собственно круг и близкие к нему по форме многоугольники, площадь которых допустимо вычислять как площадь круга соответствующего диаметра);

- L (от Low-profile – уплощенный: растянутый прямоугольник, ромб с большой диагональю, двояковыпуклая линза, овал и иные уплощенные формы, близкие к пластинчатой, площадь сечения которых допустимо вычислять как произведение толщины пластины на ее ширину);

- T (Triangular – треугольник);

- Q (Quadrate – квадрат).

Соответственно, площадь сечения, которую необходимо знать для расчета сил торможения стрелы в среде, полагаем обозначать цифрами, которые обозначают величину в мм².

4. Способ насада полагаем свести к трем типам:

- A (Втульчатый; здесь предлагаемая литера несколько похожа на втульчатый наконечник в разрезе);

- V (Черешковый, здесь литера несколько похожа на черешок);

- N (Фрикционный насад костяных наконечников, здесь предлагаемая литера похожа на сопряжение контактных площадок наконечника и древка).

Представляется целесообразным через дробь указывать здесь же и диаметр упора и диаметр насада там, где он определяется однозначно, например, в области упора, для более точных оценок вероятной толщины древка и указывать длину насада. Там, где насад обломлен или сильно корродирован, помечаем конструктивный параметр знаком вопроса. Соответственно, глубина втулки может быть обозначена в миллиметрах, а длину черешка там, где нет упора для торца древка, видимо, следует определять, моделируя узел крепления таким образом, чтобы материал древка окружал насад, при условии, что диаметр древка ограничен (или близок к пределу) 10 мм.

Для уточняющего описания внешнего вида наконечников полагаем целесообразным сохранить существующие вербальные характеристики: лавролистный, шиловидный, долотовидный и т.п.

И тогда составленную по описанному принципу формулу F16-N35-L80-V8/4/30 следует прочесть так:

- F16 – железный наконечник массой 16 г;
- N35 – предназначенный для поверхностных ранений с длиной до насада 35 мм;
- L80 – представляющий собой пластину, которая имеет площадь сечения 80 мм²;
- V8/4/30 – с черешковым насадом, который имеет диаметр упора 8 мм, и максимальный диаметр черешка 4 мм, а длину 30 мм.

Изложим предлагаемую классификацию в виде таблицы 4.3. Для того чтобы получить инструмент для создания осмысленной реляционной базы данных, поместим в таблицу лишь наиболее вероятные области значений выделяемых признаков: так, например, каменный наконечник, представляющий собой пластину или ретушированный отщеп, вряд ли может оказаться втульчатый, и маловероятно, что его сечение в рабочей части и в области насада будет отлично от уплощенного и представлять разные геометрические фигуры. Трудно предположить и костяной наконечник в виде широкой тонкой пластины, ведь кость является относительно хрупким и многослойным материалом с различными прочностными характеристиками слоев.

Таблица 4.3. Существенные признаки наконечников стрел

Признак и область его значений					
Материал: W, S, O, C, F	Wood	Stone	Osseous	Cuprum	Ferrum
Назначение: P, H, Y	P, H	P, H	P	P, H	P, H, Y
Сечение: R, L, T, Q	?	L	R, T, Q	R, L, T, Q	R, L, T, Q
Насад: A, V, N	?	V, N	A, V, N	A, V	A, V

С другой стороны, металлы дают возможность изготовления и втульчатого и черешкового компактного насада, и фрикционный узел крепления для металлического наконечника не нужен.

Из таблицы 4.3 видно, что всевозможные сочетания признаков дают в сумме около полусотни вариантов (или типов по образцу: O–P–R–A; C–H–T–V и т.д. с соответствующими цифровыми показателями в промежутках между литерами). Однако мы не считаем необходимым и возможным присваивать этим буквенным кодам какие-либо номера; во-первых, после инструментальных измерений параметров наконечника между буквами появляются цифры (см. выше), что придает каждому артефакту, описанному таким образом, индивидуальность, которая “противоречит” типологии, а во-вторых, у нас нет уверенности, что перечень минимально необходимых параметров и ассортимент их возможных сочетаний определены нами догматически раз и навсегда. Следовательно, наша типология остается открытой системой, которая благодаря заложенному в нее принципу резервности мо-

жет быть улучшаема, и с ее помощью могут быть описаны артефакты, параметры которых образуют неизвестные доселе сочетания.





Кроме безграничной резервности предлагаемый способ кодирования, в отличие от рассмотренного аналога, является абсолютно универсальным. Так, с его помощью можно описать наконечники, которые имеют практическое применение (то есть, предназначены для стрельбы) для целей войны и охоты (за исключением, пожалуй, многозубых гарпунных наконечников). Классификация включает артефакты, которые изготовлены из всех известных доселе материалов (кроме драгоценных).

Предлагаемый способ позволяет осуществлять выборки из базы данных по тому или иному признаку, или по их совокупности.

4.3. Новые возможности с использованием реляционной базы

Рассмотрим возможности предлагаемого метода на конкретных примерах. Для этого исследуем несколько наконечников, обнаруженных в ходе раскопок Золотаревского городища в Пензенской области, которое в свое время было захвачено войском татаро-монголов². Изложим непосредственно воспринимаемые параметры исследуемых образцов в табличном виде (табл. 4.4) и в форме диаграммы.

Таблица 4.4. Кодированные параметры серии наконечников

Номер образца	1	2	3	4
Внешний вид				
Материал, код	F	F	F	F
Масса, г.	4,6	7,5	8,8	10,4
Назначение, код	P	P	P	H
Длина раб. части, мм.	27	54	55	54
Сечение в миделе, код	Q (ромб)	Q	L	L
Площадь, мм. ²	$\frac{1}{2} \times 7 \times 9 = 28$	$5 \times 6 = 30$	$14 \times 3 = 42$	$22 \times 2 = 44$
Тип насада, код	V	V	V	V
Диаметр упора, мм.	6	6	8	8
Диаметр/длина, мм.	3/28	4/?	5/47	5/40

² Образцы для исследования предоставлены автором раскопок, д-ром ист. наук, проф. Г.Н. Белорыбкиным, за что выражаем ему искреннюю признательность.

На приводимой диаграмме (рис. 4.1) видно, что исследуемое множество наконечников образует два подмножества по признаку длины рабочей части – у первого наконечника она вдвое короче, чем у остальных. И по признаку площади сечения наконечники образуют два подмножества: величиной близкой к 30 либо 45 мм². Диаметр насада изучаемых образцов в месте упора лежит в интервале 3–5 мм. Однако такой разброс данных может быть обусловлен коррозией металла наименьшего наконечника и в момент изготовления диаметр его насада был близок к 4 мм.

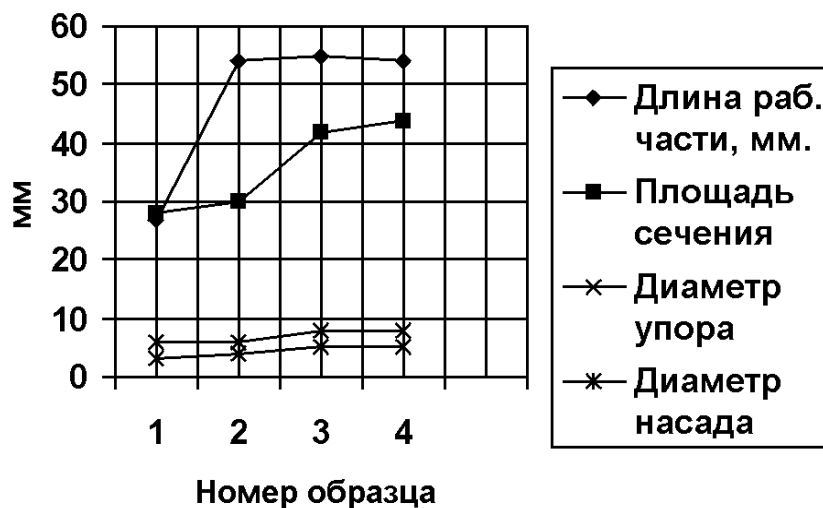


Рис. 4.1. Проектные параметры серии наконечников

Поэтому, скорее всего, по признаку диаметра насада следует выделить два подмножества. Иными словами, образцы исследуемой серии имели два стандартных размера насада, что могло требовать изготовления древков с посадочными отверстиями двух диаметров. Однако описание замеченных нами подмножеств не является самоцелью. Ведь мы приняли в качестве исходной парадигмы необходимость оценивать наконечники не по их качественным параметрам, а именно по тому техническому результату, который получает лучник, используя их для снаряжения своих стрел. Поэтому, попытаемся выявить принципиальные сходства и различия изучаемых наконечников с точки зрения их полетных и боевых характеристик.

Анализ построенной базы данных позволяет отметить следующее:

1. Сходство конструктивных параметров образцов № 3 и 4 сразу же бросается в глаза; мы видим тождественность значений по полям “Длина рабочей части”, “Площадь сечения в миделе”, “Диаметр упора” и “Диаметр насада”. Можно предполагать, что и по весу они входили в одну стандартизованную серию, а некоторую разницу массы образцов, зафиксированную нами – 8,8 г у № 3 против 10,4 г, можно объяснить разной степенью их корродированности. Иными словами, такие наконечники можно было использовать с одним и тем же стандартным древком; это древко должно было иметь в сво-

ем торце посадочное отверстие под черешок глубиной около 40 мм и диаметром около 4 мм.

Кроме того, обладая сходной массой, эти наконечники для обеспечения своего баланса в полете требовали древков со сходными массовыми характеристиками. Следовательно, их полетные характеристики могли быть сходными, и будучи выпущенными из одного лука (получив равный импульс), они летели бы по близким траекториям.

Оба рассматриваемых образца отличаются лишь назначением – заостренный носик у № 3 способствует более глубокому проникновению в тело цели. Однако равные значения площади сечения указывают на то, что при попадании в живую ткань обе стрелы вызывали образование временной пульсирующей полости равной площади. Только у образца № 4 максимальное поперечное сечение расположено у самого носика, то есть стрела с таким наконечником моментально передает свою кинетическую энергию и тормозится в поверхностном слое. Иными словами, в предположении единой пусковой установки оба рассмотренных наконечника образовывали боекомплект, давая командиру стрелкового подразделения возможность выбора того или иного снаряда в зависимости от его субъективных целей стрельбы на поражение или, напротив, нелетального останавливающего действия. Соответственно, поставленные перед боем задачи возможно было решать при организации боепитания (заполнения колчанов) снарядами необходимого типа.

2. Образец № 2 имеет сходство с образцами № 3 и 4 по длине рабочей части – во всех случаях она близка 55 мм. Проще всего объяснить это сходство наличием единого производственного стандарта, которым была установлена длина рабочей части до насада. Эта длина в 55 мм, видимо, является для исследуемого множества образцов не случайной, а модульной величиной, так как полная длина наименьшего наконечника № 1 также составляет 55 мм. Образцы № 1 и 2 имеют близкие величины сечения в миделе, и это максимальное сечение у обоих из них расположено на расстоянии около 20 мм от носика. Следовательно, они обладали сходным эффектом воздействия на цель. Однако масса наконечника № 1 составляет 4,6 г, а № 2 с учетом утраченной части черешка, не менее 8 г.

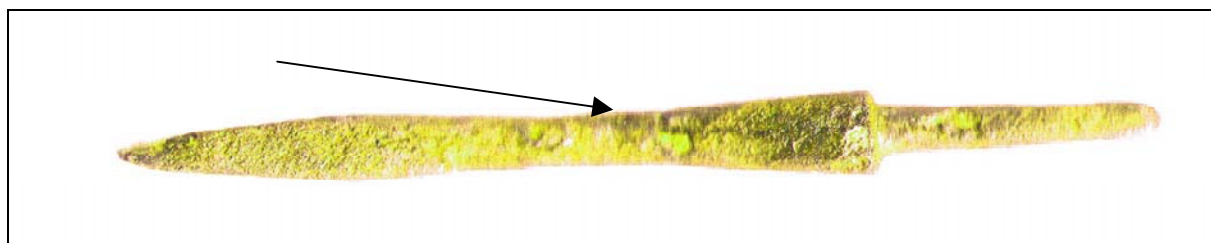


Рис. 4.2. Слоистая структура металла наконечника № 2; направление слоев показано стрелкой

На боковых поверхностях наконечника № 2 можно видеть (рис. 4.2), что структура его слоиста: логично полагать, что кузнец либо сварил воедино несколько обломков металла, либо взял два наконечника, близких по форме к № 1 и соединил их, наварив на носик одного черешок другого. При этом форма рабочей части образовавшегося изделия могла быть изменена с четырехгранной призмы (такое было у заготовок) на более простую долотовидную (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Пунктиром показана линия передней кромки наконечника № 2 до его доработки, стрелкой – наваренная часть (?), пунктирными стрелками – поверхности трения в ране

Наиболее реальным мотивом такой доработки нам видится желание увеличить массу наконечника простейшим способом – долотовидная режущая кромка не требует тщательности исполнения. Напротив, все поверхности четырехгранной призматической рабочей поверхности желательно иметь симметричными относительно продольной оси по соображениям баллистики цели. Кроме того, когда наконечник с долотовидной передней кромкой проникает в рану, две его поверхности (обратной стреловидности) сужаются к насаду (см. табл. 4.4, наконечник № 2) и силы трения на них почти не воздействуют. То есть мастеру требуется обеспечить при изготовлении изделия симметрию только двух трущихся плоскостей, расходящихся к насаду (на рис. 4.3 они указаны пунктирными стрелками). Но если четыре плоскости наконечника не симметричны и имеют прямую стреловидность, то среда, в которую они проникают, будет воздействовать на них по-разному, и стрела, отклоняясь от прямолинейного движения, быстро затормозится в материале защитного вооружения или раневом канале. Следовательно, четырехгранный призматический наконечник (в рассматриваемой серии это № 1) требует высокой квалификации исполнителя, способного обеспечить осевую симметрию плоскостей.

А зачем требовалось увеличение массы наконечника наваркой? Видимо затем, чтобы при известном проектном соотношении массы наконечника и древка получить возможность увеличить общую массу стрелы, а значит и ее кинетическую энергию.

3. В исследуемой серии мы видим три типа стрел по признаку их массы: легкую № 1, утяжеленную № 2 и тяжелые № 3 и 4. График, приводимый нами на рис. 4.4, дает возможность видеть, что значения масс распределены по линейному закону. Принцип построения этой закономерности нам пока не ясен, однако столь явно выраженное линейное распределение показателей представляется не случайным.



Рис. 4.4. Массы серии наконечников образуют линейную зависимость

4. Исследуемые наконечники являются черешковыми, и в месте соединения рабочей части с насадом все они имеют кольцеобразный упор для торца древка. По диаметру этого упора исследуемые образцы делятся на два подмножества: № 1 и 2 имеют упоры диаметром 6 мм, а тяжелые наконечники № 3 и 4 – диаметром 8 мм. Поэтому корреляция величины диаметра упора и массы снаряда представляется вполне логичной – ведь в момент удара в цель наконечник “останавливается”, а древко продолжает “двигаться” по инерции, воздействуя на упор, и увеличение контактной площадки сопряженных (но подвижных элементов) наконечника и древка уменьшает удельную нагрузку на дерево, которое на торце древка работает на смятие вдоль волокон. Кроме того, вполне логично видеть на наконечниках большей массы и более длинные черешки: в момент удара насад “раскалывает” древко поперек волокон, и большой черешок не только уменьшает удельную нагрузку на стенки посадочного отверстия, но и переносит контактную площадку (торец насада) в глубину древка, туда, где его материал менее ослаблен сверлиной. Отмеченные закономерности позволяют, на наш взгляд, реконструировать несохранившиеся черешки по сохранившейся рабочей части и наоборот.

Можно ли говорить, что для исследуемых наконечников зафиксированный диаметр упора соответствовал наружному диаметру несохранившегося древка?

Поставленный вопрос открывает поле применения нескольких исследовательских подходов. Во-первых, зная величину кинетической энергии стрелы в момент встречи с целью, которая необходима для нанесения проникающих ранений и показатели сопротивления смятию и скалыванию, известные для разных пород дерева (например, из Строительных Норм и Правил – СНиП) можно попытаться оценить минимальный диаметр древка, которое бы выдерживало нагрузку в момент удара. Однако правомерность применения данного подхода вызывает сомнения хотя бы уже потому, что древко по

крайней мере на глубину посадочного отверстия обматывалось ниткой, и прочностные характеристики такого крепления неизвестны.

В основу второго исследовательского подхода могут быть положены аэродинамические характеристики стрелы: известно, что стрела тратит свою энергию и тормозится в полете в основном не за счет наконечника (здесь он у нее обтекаем) а за счет трения древка о воздух. Соответственно, чем тоньше и короче древко, тем меньше его поверхность, меньше сила трения и т.д. Однако габариты стрелы связаны с массой наконечника, а также с габаритами и параметрами пусковой установки. Взаимные корреляции параметров описываются системами уравнений, которые положены в основу пакетов прикладных программ Osseus [Коробейников, Митюков (2)] и Archer [Коробейников, Митюков (3)], применение которых мы иллюстрируем. Кроме того, вопрос о диаметре древка может быть рассмотрен с позиций раневой баллистики; логично полагать, что для наконечников, рассчитанных на глубокое проникновение диаметр упора, скорее всего является индикатором диаметра древка (см. рассматриваемые образцы № 1 и 2 у которых упор ни в одной из проекций не выступает за габариты рабочей части). Ведь в противном случае древко, с сечением большим, чем диаметр раневого канала пробитого наконечником, просто застрянет в этом канале. Конечно, у проникающего наконечника № 3 в боковой проекции упор превышает толщину пластинчатой рабочей части, но ведь и сама длина рабочей части тут значительна (55 мм), и эта длина чуть не вчетверо превышает ширину наконечника в миделе. Иными словами, до того, как древко начнет “затираться” в раневом канале (например, в отверстии пробитого им доспеха), снаряд уже будет заглублен на величину, достаточную для летальных повреждений внутренних органов. То есть, для длинного наконечника диаметр древка, теоретически может превышать диаметр упора. Тяжелый наконечник № 4, рассчитанный по нашему мнению на причинение поверхностных повреждений, также имеет упор, диаметр которого превышает толщину пластинчатой рабочей части. Однако здесь проникновения древка за наконечником в рану не требуется и диаметр древка (при необходимости иметь тяжелое древко, соответствующее массе наконечника) также может превышать диаметр упора.

4.4. Демонстрация математического метода исследования

В литературе, посвященной истории метательного оружия, общим местом являются утверждения о том, что в одном колчане могли находиться уложенные наконечником вниз разные стрелы³ (будто в горячке боя, да на

³ “Стрелы в колчане укладывались оперением вверх. Поскольку в одном колчане находились стрелы с наконечниками различного назначения (бронбойные против шлемов, щитов и панцирей, срезни против вражеской конницы и незащищенных броней вражеских воинов и т.п.), то древки стрел у ушка красились в разные цвета, чтобы можно было быстро вынуть нужную стрелу” [Кирпичников, Медведев, С. 314].

скаку боец, не являющийся снайпером, выбирает подходящую стрелу, чтобы поразить противника именно в его защищенное или незащищенное место), что они были помечены полосками разного цвета⁴ (будто у бойца есть время ковыряться в колчане (который, кстати, часто носили за спиной?) и разглядывать полоски, и складывать назад ошибочно вынутую стрелу?), что стрелы соответствовали параметрам лука и физической силе стрелка⁵ (будто стрелы не изготавливались по стандарту миллионами штук, и, подобрав в бою неистраченный колчан убитого товарища или противника, лучник не сможет стрелять его стрелами и будет безоружен?) и т.п. Возможно, сказанное об ассортименте специально подготовленных снарядов может быть применимо к спортивной и охотничьей стрельбе, но относительно боевых луков такие утверждения могут допускать лишь люди безгранично далекие не только от военного дела и от тактики боевого применения стрелкового оружия, но и не имеющие представления о таких принципах производства вооружений, как стандартизация, унификация и взаимозаменяемость деталей и т.п.

Поэтому применение математических методов для изучения созданной базы данных о параметрах наконечников позволяет не только отказаться от общепризнанных (но, увы, голословных) постулатов, но и поставить новые исследовательские задачи, которые реконструируют не только недостающие параметры артефактов, но и воссоздают мотивы деятельности исторического субъекта.

Могли ли все наконечники исследуемой серии быть использованы для снаряжения стрел одинаковой длины?

Для ответа на этот вопрос введем параметры наконечников в расчетные формулы пакета программ Osseus. Зависимости, описываемые этими формулами, таковы:

На основании того, что по мнению исследователей масса стрелы в сборе в 5...7 раз превышает массу наконечника [Медведев, С. 51–52], следует, что

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

где l – длина древка; m – масса наконечника; d – диаметр древка; ρ – плотность дерева.

Интервалы полученных значений (в предположении, что все стрелы имели древко из березы, для которого $\rho = 0,6\text{--}0,8$ г/мм² и диаметр древка $d = 8$ мм) для всех исследованных образцов приводим в табл. 4.5.

⁴ “Существует предположение, что цветные полоски представляли собой метки, позволявшие воину отличать стрелы разных назначений” [Шокарев, С. 27].

“Древки стрел у оперения почти всегда окрашивали в разные цвета в зависимости от назначения наконечников. Лучник по окраске древка безошибочно вынимал нужную в соответствующей обстановке стрелу...” [Медведев, С. 20].

⁵ “Каждый лучник выбирал лук по своим силам, как и определял длину стрелы по своему росту и длине рук” [Кирпичников, Медведев, С. 313].

Таблица 4.5. Длина древка, вычисленная по массово-габаритному методу ($d = 8$ мм)

Номер образца	Длина древка min, мм	Длина древка max, мм
1	650	910
2	1060	1490
3	1250	1750
4	1470	2060

Из табл. 4.5 видно, что только для первого образца область значений длины древка является реальной; стрелы длиной более метра вообще маловероятны.

Анализ полученных данных позволяет выдвинуть следующие версии:

- Используемая зависимость, согласно которой масса стрелы в сборе в 5...7 раз превышает массу наконечника, не верна. Однако данные эти не могли быть получены иначе, как путем взвешивания отдельно древка и отдельно наконечника, следовательно, они объективны.

- Диаметр древков для образцов 2, 3, 4 значительно превышал диаметр упорной площадки, т.е. был больше 8 мм. Следовательно, эти стрелы имели длину меньшую, чем та, которую дал расчет.

Для проверки последнего предположения подставим в использованную формулу значение диаметра деревянной части в 10 мм. Полученные результаты отражены в табл. 4.6 и на диаграмме, помещенной на рис. 4.5.

Таблица 4.6. Длина древка по массово-габаритному методу

Номер образца	Длина древка min, мм	Длина древка max, мм
1	650	910
2	680	950
3	800	1120
4	940	1320

Примечание: для образцов № 2, 3, 4 $d = 10$ мм

Обратившись к диаграмме на рис. 4.5 видим, что максимум реконструируемой длины для самого легкого образца № 1 (910 мм) весьма близок к минимуму реконструируемой длины для самого тяжелого образца № 4 (940 мм), а значения для оставшихся образцов лежат в отмеченном интервале.

Области значений длины здесь настолько близки, что предположение о возможности стрельбы всеми этими наконечниками, насаженными на древко длиной 650–900 мм, становится вполне вероятным. Возможно, в реальности длина древка была меньше 900 мм, ибо для вычислений мы принимаем сечение древка постоянным, в первом приближении рассматривая его форму как цилиндр. Но реальное сечение древка могло быть веретенообразным, а удельный вес использованного дерева больше. Кроме того, мы считаем с помощью формулы только массу самого дерева и не учитываем массы возмож-

ного оперения и материала крепежного узла. Тем не менее, отмеченная закономерность позволяет заключить, что при прочих равных условиях все четыре наконечника исследуемой серии могли быть использованы с древком стандартной длины.

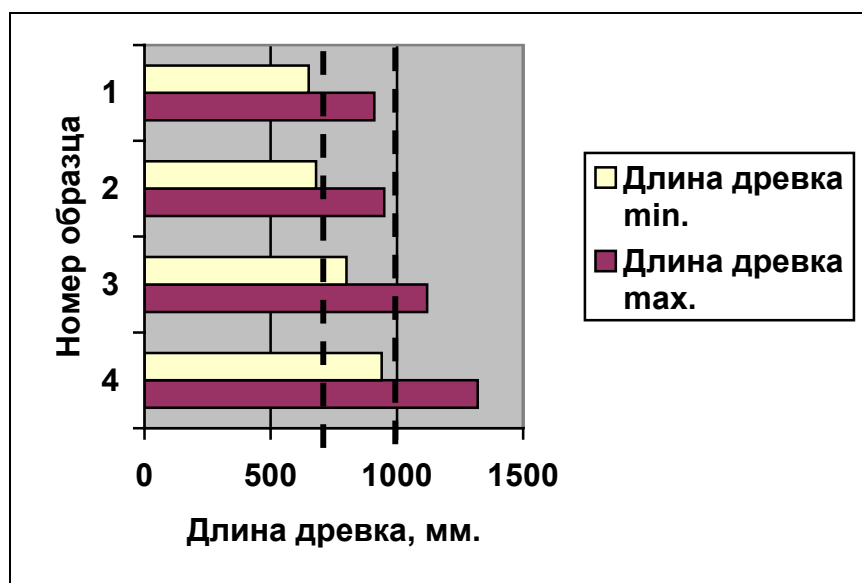


Рис. 4.5. Диаграмма областей значений длины древка, рассчитанной по массово-габаритному методу

Попробуем уточнить полученные данные о габаритах стрел с помощью аэродинамического подхода, также реализованного в пакете программ Osseus [Коробейников, Митюков (2)]. В основу метода положена выведенная баллистиками закономерность, согласно которой для устойчивого полета невращающегося снаряда с бесконечно малым оперением запас статической устойчивости должен составлять до 15 %.

Таблица 4.7. Длина древка, вычисленная по аэродинамическому методу

Номер образца	Длина древка min, мм	Длина древка max, мм
1	350	640
2	700	1290
3	720	1320
4	700	1290

Рассмотрев табл. 4.7, можно убедиться в том, что аэродинамические расчеты дают для множества наконечников области результатов, совпадающие по наличию закономерностей с теми, что получены с использованием массово-габаритного метода. И при аэродинамическом расчете максимум значения для первого образца (640 мм) весьма близок к минимуму значения для остальных образцов (~700 мм).

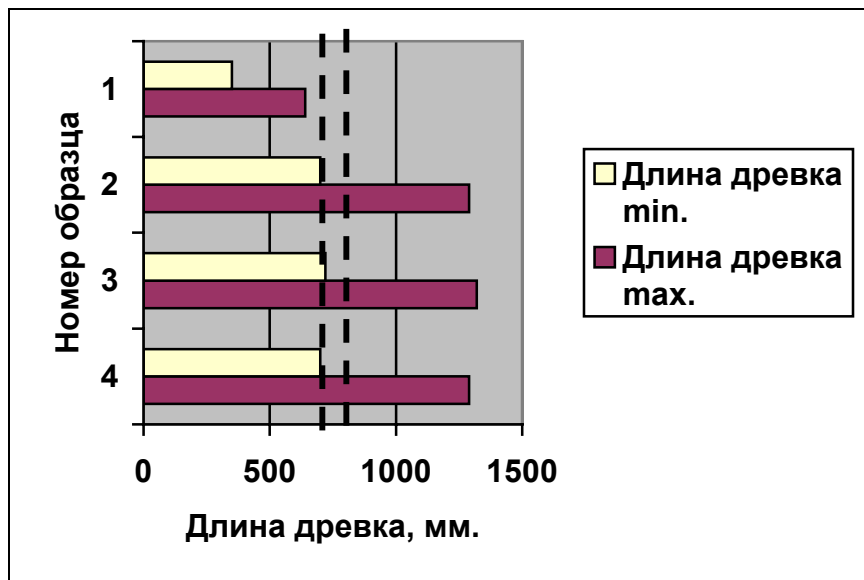


Рис. 4.6. Диаграмма областей значений длины древка, рассчитанной по аэродинамическому методу. Пунктиром показана область вероятных значений

На диаграмме, которую мы помещаем на рис. 4.6, видно, что область вероятной длины древка, рассчитанная по аэродинамическому методу для всех наконечников исследованной серии лежит в интервале 640–700 мм. Это подтверждает ранее сделанный вывод о том, что все из исследованных наконечников могли являться частью стрел, стандартизированных по длине.

А могли ли все эти стрелы быть носимы в одном колчане для того, чтобы в случае крайней нужды использоваться без разбора их принципиального отличия с точки зрения проникающей способности? Иными словами, можно ли было стрелять этими стрелами по одной траектории? Для ответа на этот вопрос прибегнем к программному продукту Archer [Коробейников, Митюков (3)], который основан на законах физики, описывающих полет тела по баллистической траектории. В качестве исходных данных примем, что сила натяжения тетивы во всех случаях составляет 200 Н (около 20 кг), амплитуда движения тетивы составляет 0,6 м, высота стрелка 1,5 м, а угол возвышения траектории 5°. Остальные данные об исследуемых наконечниках, вычисленные нами, возьмем из составленных ранее таблиц. Изложим полученные результаты в виде сводной табл. 4.8.

Глядя на приводимую табл. 4.8, отметим, что в предположении о близости длин древков, логичным становится и предположение о том, что для вхождения в серию по признаку длины самый легкий наконечник (№ 1) должен иметь наибольшее отношение своей массы к массе стрелы в сборе (колонка № 3). Сведения о дальности полета (колонка № 6) свидетельствуют, что при стрельбе с малым углом возвышения разброс по дальности составляет почти 25 м (рис. 4.7).

Таблица 4.8. Баллистические характеристики исследуемого множества наконечников вычисленные при помощи пакета программ Archer

1	2	3	4	5	6	7
Номер образца	Диаметр древка, мм	Отношение масс наконечника и стрелы	Масса стрелы в сборе, г.	Скорость дульная / у цели м/с	Дальность полета, м	Высота траектории, м
1	8	1/7	32,2	61,0 / 57,7	77	2,92
2	10	1/5	37,5	56,6 / 53,0	67	2,71
3	10	1/5	44	52,0 / 49,8	60	2,54
4	10	1/5	52	48,0 / 46,5	52,8	2,38



Рис. 4.7. Дальность полета стрел с исследуемыми наконечниками образует линейную зависимость

Кроме того, из приводимых данных следует, что несмотря на разницу максимальной дальности полета, все стрелы с исследуемыми наконечниками летят по траектории, наивысшая точка которой не превышает два человеческих роста (колонка № 7, табл. 4.8). Следовательно, любой из этих стрел возможно производить прицеливание на корпус выше цели (рис. 4.8, Фигура 1). Иными словами, закономерно полагать, что в пределах минимальной дистанции до 53 м эти разные стрелы летели по настильной траектории настолько сходной, что позволяло бы стрелку в горячке боя не корректировать ни амплитуду натяжения тетивы, ни угол возвышения, а при стандартных исходных данных стрельбы посылать снаряды со столь различными наконечниками в ростовую цель, поражая ее.

Кроме того, рассмотренный ассортимент стрел, если предполагать, что в бою они находились в одном колчане, дает возможность считать, что ими можно было поражать групповые цели. Так, лучник, вытянув стрелу из колчана наугад, накладывал ее на тетиву, идентифицируя при этом по внешнему виду наконечника. Видимо, он знал, что если в руках у него оказалась стрела

с наконечником № 1, то в случае промаха на настильном участке траектории он поразит данным снарядом ростовую цель (при прочих равных условиях стрельбы), которая расположена на дистанции 77 м, а если вынутая стрела оказывалась снаряженной наконечником № 3, то лучник мог надеяться на поражение цели на дистанции в 60 м и т.п. (рис. 4.8). Следовательно, ассортимент стрел (в одном колчане) теоретически позволял стрелку поражать эшелонированные боевые порядки на глубину до 20 м не меняя при этом настройки “пусковой установки”⁶; рассеивание попаданий по дальности, обеспеченное разностью метаемых снарядов, в этом случае играло положительную роль (к слову, в станковых пулеметах для достижения эффекта рассеивания в глубину используют специальное устройство).



Рис. 4.8. Семейство траекторий полета стрел исследуемого множества. Верхняя траектория – наконечник № 1, нижняя – № 4

Полученные нами значения дистанций образуют числовой ряд: 77–67–60–53.

Шаг дистанции рассеивания снаряда (кроме случая с легким наконечником № 1) составляет здесь 7 м, и вряд ли является простой случайностью. Возможно, этот параметр совпадает с величиной “тени цели” для определенного угла встречи.

Итак, анализ внешней баллистики объектов исследуемого множества позволяет считать, что их ассортимент был создан целенаправленно и они могли входить в единую систему вооружений.

А что может дать их анализ с точки зрения раневой баллистики? Вспомним, что величина кинетической энергии движущегося тела определяется как половина произведения его массы на квадрат скорости. Массы стрел в сборе и скорости их в точке падения (у цели) известны. Произведем необходимые вычисления (с помощью программы “Archer”, либо по данным табл. 4.8) и изложим их результаты в виде диаграммы (рис. 4.9).

⁶ Если стрелки стоят более чем в одну шеренгу, то они имеют мало возможностей для прицеливания и для произвольного изменения угла возвышения.

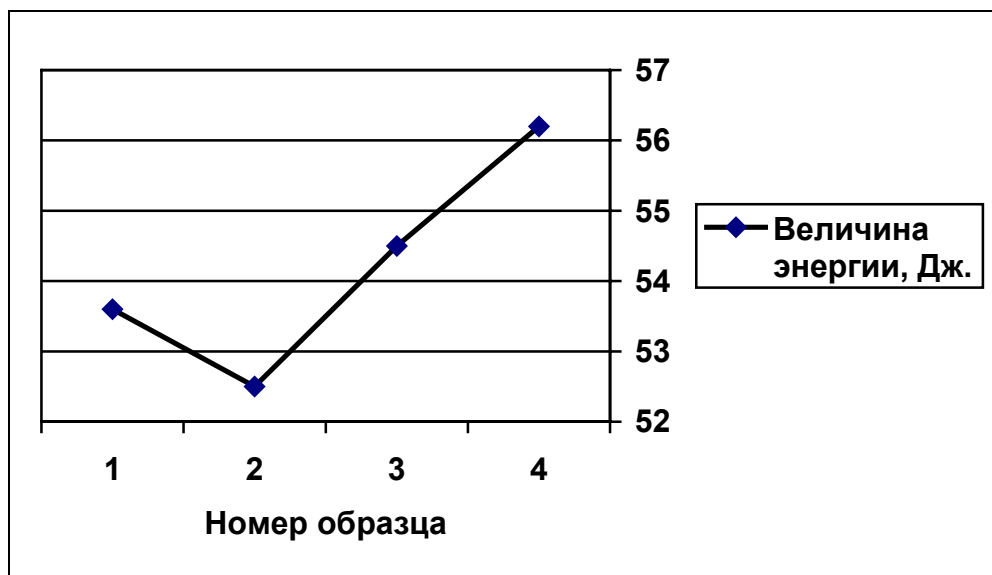


Рис. 4.9. Кинетическая энергия стрел с исследуемыми наконечниками, воздействующая на цель

Результаты вычислений показывают, что величины кинетической энергии в точке падения для всего множества исследованных объектов, несмотря на их формальное разнообразие, лежат в интервале 52–56 Дж. Отмеченная особенность, на наш взгляд, может служить еще одним аргументом в пользу тезиса о единстве происхождения и универсальности использования всех исследованных наконечников. “Тупоконечный” образец № 4 обладает наибольшей кинетической энергией, и вовсе не безобиден по сравнению с остроконечными образцами: эффект от его попадания вполне можно сравнить с ударом молотком по телу (доспеху). То есть и на максимальной дистанции стрела с таким наконечником вполне способна произвести останавливающее действие через проникающее ранение грудной клетки⁷.

Заключение

Авторы отдают себе отчет в том, что рассмотренное множество наконечников является настолько малым, что вряд ли произведет впечатление на деятелей академической науки.

Однако это множество было привлечено исключительно для демонстрации принципов создания и возможностей анализа базы данных с помощью некоторых методов, свойственных математике. Как представляется, привлечение этого множества явилось достаточным условием для поставленной цели. Разумеется, выводы авторов могут и должны быть проверены исследователями вооружений.

⁷ См. стр. 10–11 настоящего издания.

5. СТРЕЛА ИЗ МОГИЛЬНИКА ПЫШТАЙН

Курганные насыпи одного из Пыштайских могильников были зафиксированы специалистами еще в 1889 г., но первые раскопки рассматриваемого здесь памятника проведены В.А. Обориным лишь в 1964 г. В ходе этих раскопок было вскрыто 362 м² и выявлено 15 погребений. В погребениях были найдены серебряные и бронзовые украшения, стеклянные и янтарные бусы, костяные наконечники стрел, предметы пермского звериного стиля, саманидские и иранские монеты. По характеру находок объект был атрибутирован как могильник ломоватовской культуры и, в связи с неоднозначностью вещевого материала, датирован в широком интервале VI–X вв.

В настоящее время могильник входит в Гайнский куст открытых археологических памятников; рядом с ним расположены могильники Пыштайн I и III, селища Пыштайн I–III и селище Данилово I.

Погребения на могильнике находятся в известковых ложах, которые перекрыты слоем почвы толщиной около 30 см.

Интересующее нас погребение № 38 расположено в квадратах З-И/119-120 и зафиксировано на уровне –0,55...–0,60 м. Погребение было ограблено в древности. Могильная яма имеет форму, близкую к овальной, и вытянута по оси юго-запад – северо-восток. Приблизительные размеры ее по осям 0,85 × 2,28 м. Погребение заглублено в известковый слой на глубину 0,26–0,35 м, дно ямы не ровное, кости перемешаны и сконцентрированы в северо-восточной части ямы. Вещевой комплекс представлен двумя железными наконечниками стрел, накладкой-псевдопряжкой, перекидной накладкой с растительным орнаментом, фрагментом браслета, бусиной-пронизкой, накладкой-шпеньком и, возможно, сильно фрагментированным перстнем и фрагментом монетовидной подвески. Исходя из анализа вещевого комплекса, данное погребение может быть датировано IX в. н.э. [Мингалев].

5.1. Натурная реконструкция и типологизирование наконечника

Наконечник стрелы, который привлек наше внимание (рис. 5.1), был обнаружен среди костей, и по его месторасположению в могиле нельзя установить, был ли он частью инвентаря, сопровождавшего покойного в загробный мир, либо же он находился в теле усопшего, явившись причиной гибели. У того же погребения, на краю могильной ямы, выдолбленной в известняке, был найден еще один наконечник, габариты и масса которого намного больше. Он может быть атрибутирован, как лавролистный черешковый и, на наш взгляд, его рабочая часть, имея длину не менее 7 см, явно указывает на то,

что он мог причинять проникающие ранения (его изображение не приводим из соображений экономии места).

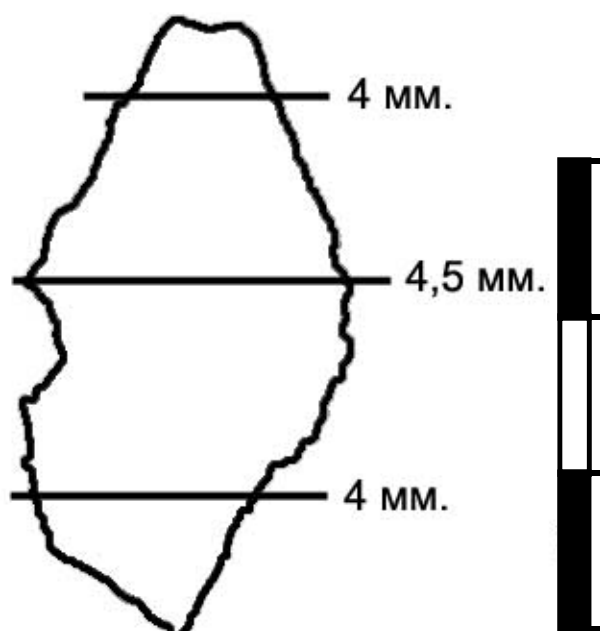


Рис. 5.1. Габариты исследуемого наконечника; цифрами показана максимальная толщина сечения (по В.В. Мингалеву)

Но для ответа на вопрос о возможных вариантах того, как и зачем рассматриваемый нами наконечник (рис. 5.1) попал в могилу, необходимо сначала выяснить, мог ли такой наконечник быть причиной гибели человека теоретически, то есть способен ли он наносить летальные повреждения организма? Тогда, в свою очередь, перед исследователем встает неизбежный вопрос о том, каковы были параметры этого наконечника в тот момент, когда он оказался в захоронении. Иными словами, для анализа параметров объекта исследования мы должны его сперва реконструировать, то есть создать объект исследования с восстановленными проектными характеристиками. Разумеется, нам нет нужды отковывать такой же точно наконечник, снаряжать им стрелу и пускать ее из лука по живой мишени; в нашей исследовательской деятельности мы можем абстрагироваться от некоторых качеств объекта, например, воссоздать его форму в ином материале, чтобы получить данные о массе наконечника определенной формы, а также рассматривать различные варианты применения наконечника, прибегая к доводам логики и просчитывая модели боевого применения с помощью специального программного обеспечения.

Итак, реконструкция первоначального вида наконечника является первым шагом для его исследования. Наконечник сильно корродирован, однако его кромки видны, и они почти прямолинейны. Если полагать, что изменения габаритов изделия вследствие окисления произошло равномерно по всей его поверхности, то логичной становится реконструкция габаритов путем мысленного продолжения линий сохранившихся кромок (рис. 5.2).

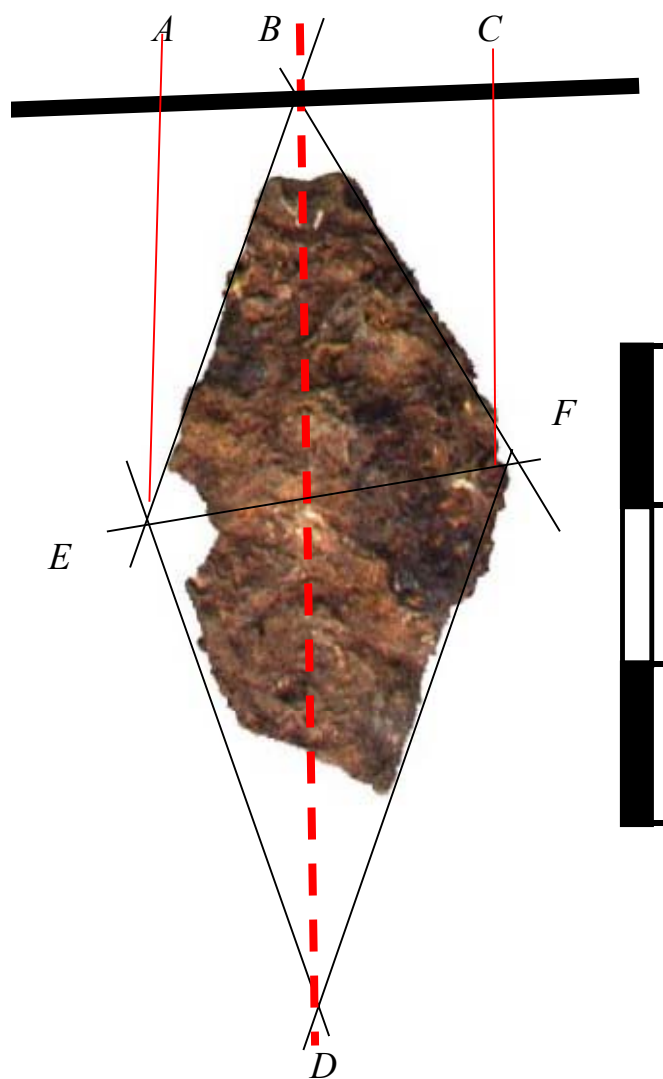


Рис. 5.2. Восстановление габаритов наконечника

Становится видно, что форма наконечника близка к ромбовидной. Если мысленно увеличить габарит на величину окисления (разрушения) поверхности, можно закономерно полагать, что сравнительно длинные и тонкие черешок и носик, обладавшие большей площадью на единицу объема, чем остальные части наконечника, отгнили в первую очередь.

Если полагать, что несохранившийся насад был черешковым без упора, то рассматриваемый наконечник близок к типу № 63 по типологии А.Ф. Медведева – он является лавролистным, с плоским черешком. Аналогичные наконечники содержатся в материалах погребения № 26 Поломского могильника (близкого культурно и хронологически) и др., а период их распространения датируется в широком интервале I–XIV вв. [Медведев, С.74, Табл. 14-9, Табл. 21-11] (см. наш рис. 5.3). Впрочем, мы не настаиваем ни на предложенной форме черешка, ни на нумерации наконечника по каталогу Медведева, ибо, во-первых, наличие номера ничего не дает исследователю, а во-вторых, наш наконечник не может быть классифицирован по типологии Медведева

(как мы покажем далее), и, наконец, форма (но не тип!) насада не имеет принципиального значения для нашего исследования, так как она не оказывает влияния на технический результат применения наконечника.

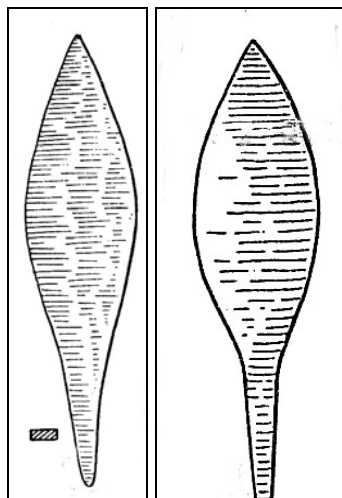


Рис. 5.3. Наконечники стрел тип 63 по А.Ф.Медведеву.

Слева – Табл. 14-9; Справа – Табл. 21-11

ходе для идентификации принимается форма эталонного (то есть, в данном случае, симметричного) изделия, а некоторые отклонения от нее могут быть объяснимы огрехами производства либо степенью сохранности. Следовательно, несколько асимметричное изделие в соответствии с принятым подходом будет отнесено к существующему типу 63. Возможно, руководствуясь именно необходимостью определить асимметричные наконечники в соответствии с существующей типологией, археологи (и работающие с ними художники) несколько подправляли габариты обнаруженных наконечников на изображениях, которые включали в книги и поэтому асимметричные наконечники не были опубликованы и исследованы ранее? К слову, приводимые нами изображения совершенно точно отражают параметры исследованных артефактов – они получены путем сканирования и художник к ним руку не прикладывал.

Однако, если, отойдя от формальной классификации, мы приступим к анализу существенных признаков изделия, то станет ясно, что одинаковые по форме изделия (или, по крайней мере изделия, имеющие незначительные отличия формы и относимые к одному типу), применяемые в аналогичных условиях, могут приводить к разному техническому результату. Наиболее значимым техническим результатом применения стрелы является поражение цели. Следовательно, мы должны установить, как воздействует на цель стрела с симметричным (рис. 5.3) и несимметричным (рис. 5.2) наконечником. Прибегнем к **логическому моделированию** процесса раневой баллистики. Итак, в случае симметричного наконечника прямолинейное движение стрелы при попадании в цель сохраняется, ведь центр массы стрелы с симметричным на-

конечником и центр давления поверхности наконечника на вещество цели находятся на одной оси. Напротив, стрела с асимметричной режущей кромкой движется прямолинейно в ране лишь некоторое время, а потом она разворачивается. Происходит это потому, что ее передние кромки при одинаковой толщине имеют разную величину проекции на плоскость цели. (На рис. 5.4 плоскость цели, перпендикулярная продольной оси стрелы, показана в виде жирной линии). В самом деле, на рис. 5.2 видно, что $[AB] < [BC]$, то есть плечо $[AB]$, имея меньшую площадь, испытывает меньшее сопротивление среды и по этой причине заглубляется больше.

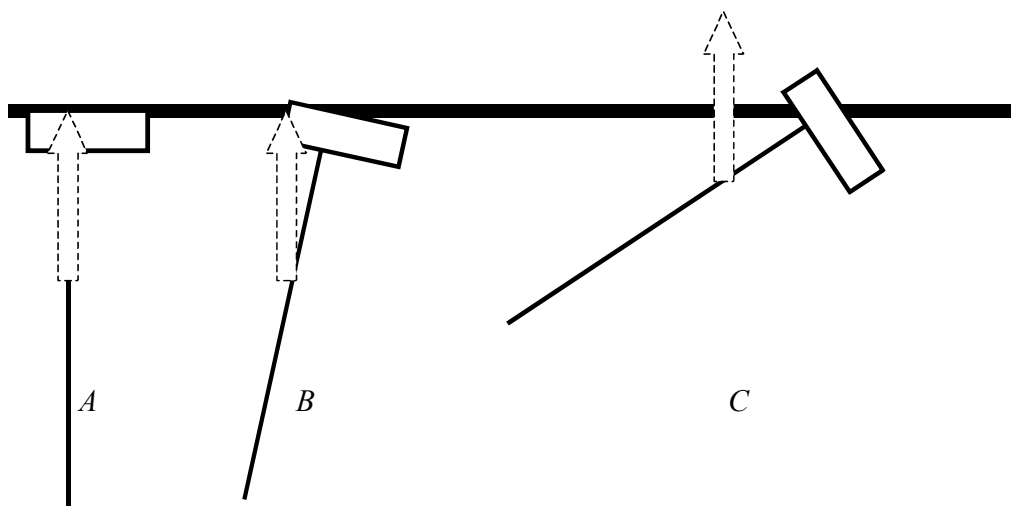


Рис. 5.4. Модель раневой баллистики стрелы с асимметричным наконечником

На рис. 5.4, A видно, что до попадания в цель стрела летит прямолинейно – вектор движения центра массы снаряда (показан пунктирной стрелкой) совпадает с продольной осью и в нашем случае перпендикулярен плоскости цели (показана жирной линией). К слову, асимметрия наконечника мало сказывается на аэродинамике стрелы; как показали исследования, даже самый большой наконечник дает 5–10% от суммарного сопротивления стрелы, а в условии, когда центр тяжести и центр давления воздуха на стрелу находятся на одной оси, подъемная сила не создается ни стрелой, ни ее наконечником [Коробейников, Митюков (4), С. 101].

На рис. 5.4, B видно, что при попадании в цель короткое плечо наконечника, испытывая меньшее сопротивление материала цели, внедряется глубже (весь наконечник показан для наглядности в виде прямоугольника). По этой причине вектор движения центра массы отклоняется от продольной оси стрелы. Это приводит к тому, что стрела поворачивается в ране и не проникает глубоко (рис. 5.4, C).

Таким образом, баллистическая модель убеждает нас в том, что стрела с рассматриваемым наконечником была способна наносить исключительно поверхностные повреждения и предположение о том, что она могла быть причиной гибели, становится маловероятным.

Почему этот вывод является принципиально важным? Как мы уже показали в предыдущих работах [Коробейников, Митюков (1)] с точки зрения технического результата весь ассортимент стрел, предназначенных для поражения людей (и животных), может быть разделен всего на два подмножества – это стрелы, способные причинять исключительно поверхностные повреждения (как правило нелетальные), которые временно выводят из строя, и снаряды, рассчитанные на причинение проникающих (как правило, смертельных) ранений. Стрела с наконечником нелетального типа (образно говоря “тупая” стрела) в момент попадания мгновенно передает свою кинетическую энергию цели, образуя в тканях у ее поверхности так называемую временную пульсирующую область, в которой энергия распространяется волнообразно (подобно кругам по воде от брошенного камня). То есть в процесс образования болевого шока вовлекаются не только мышцы и органы, пораженные (проткнутые) стрелой, но и широкие окружающие области. Баллистики, криминалисты и военные говорят, что при этом снаряд произвел останавливающее действие: противник прекратил сопротивление. Индивид, остановленный таким образом, после минимального лечения (ушивания или простого бинтования поверхностной раны) может быть ресурсно использован – обращен в рабство. Иное дело стрела с проникающим наконечником. Хотя пульсирующая область образуется не одномоментно, а по мере проникновения вглубь цели, но она расположена вдоль раневого канала и “ударяет” по внутренним органам, а разрывы стрелой внутренних органов и кровоизлияния не могут быть устранены без квалифицированного хирургического вмешательства (последующего ушивания) в асептических условиях с применением сложного инструментария. Поэтому с большой вероятностью такие раны могут вызывать (а в условиях средневековья определенно вызывали) летальные последствия. Следовательно, мы имеем возможность реконструировать мотивы древнего оружейника: для того чтобы создать обширную поверхностную пульсирующую область, он мог изготовить наконечник с расширяющейся рабочей частью – так называемый тип срезня. Однако в случае со стрелой из могильника Пыштайн он создал совершенно оригинальное изделие, которое ударяет цель не только передними кромками наконечника, но и одной из боковых поверхностей, расширяя таким образом зону воздействия на цель, создавая широкую пульсирующую область и производя мгновенное останавливающее действие. При этом расход металла на каждый асимметричный наконечник неизмеримо меньше, чем на расширяющийся наконечник типа срезня с равной площадью ударной поверхности. Кроме того, такой наконечник более устойчив в полете, ведь широкие кромки срезня при малейшем отклонении хвостовой части стрелы в полете создают подъемную силу, и снаряд сходит с расчетной траектории. И, наконец, как мы покажем далее, более массивный срезень потребовал бы и более массивного древка, а, значит, и большей энергии при запуске снаряда.

Таким образом, понимание механизмов поражения позволяет классифицировать и изучать метательные снаряды на основании их существенных признаков в рамках гуманистического подхода. В самом деле, для нашего организма, по большому счету, не важно, в какой форме мы вводим в него пищу, например, огурцы. Технический результат питания не чувствителен к сорту, форме, пупырышкам и весу экземпляра. Для нас важно лишь одно – пригоден ли огурец к употреблению внутрь, либо годится лишь для наружного потребления в качестве косметической маски.

Итак, является ли описанный нами асимметричный наконечник новым “типом”, не отраженным в общепринятой классификации? Так, например, плоские асимметрично-ромбические наконечники, обнаруженные в средневековых памятниках Приобья, упоминает Ю.С. Худяков [Худяков, С. 74], однако их описаний и рисунков он не приводит, поэтому трудно понять, о чем идет речь и поиск аналогов здесь затруднен.

Формально асимметричные наконечники присутствуют в перечне артефактов, исследованных А.Ф. Медведевым (рис. 5.5). По его мнению, такие наконечники образуют особый тип № 28 благодаря тому, что имеют по одному невозвратному шипу. Если провести их осевые линии, становится видна асимметрия наконечника (рис. 5.5, слева), для которого проекция режущей кромки на плоскость цели $AB > BC$. Однако если восстановить линии передней кромки другого наконечника (рис. 5.5, справа), то становится ясно, что он симметричен относительно своей продольной оси ($AB = BC$), и, вероятно, приобрел свою форму вследствие обламывания одного из шипов. Кроме того, наконечник типа 28 (рис. 5.5, слева) существенно отличается от рассматриваемого экземпляра из могильника Пыштайн: для первого отношение длины рабочей части от носика до миделя составляет три к единице ($BE:AC = 3,1$), а для второго один к одному (рис. 5.2; $BE = AC$). Иными словами, первый наконечник имеет втрое меньшее удельное лобовое сопротивление, и при попадании в цель он внедрится в нее раньше, чем его асимметрия начнет сказываться на движении в раневом канале.

Видимо, ответ на вопрос о типологической новизне исследуемого наконечника из могильника Пыштайн должен быть утвердительным. Но можно ли его внести в существующую классификацию? А.Ф. Медведев предложил классификацию, в которой ровно 100 типов стрел, и созданная им система является линейной; внесенные в нее записи не образуют сквозной иерархии по типу-класс-подкласс-вид-подвид и т.п. Иными словами, поиск аналога в ней осуществляется простым перебором всей базы данных, что значительно затрудняет обращение к этой базе данных. Рассмотренный нами наконечник близок по форме к № 63, но если на основе описанных особенностей мы присвоим ему новый № 101, это вряд ли будет логично, так как по своим конструктивным особенностям он не связан с наконечником, описанным под № 100. Мы показали выше, что свод А.Ф. Медведева не является ни типоло-

гией, ни классификацией. Это всего лишь список обнаруженных на тот момент наконечников. Тем не менее, в целях идентификации рассматриваемого наконечника в рамках общепринятой на сегодня системы считаем оправданным присвоить ему номер 63¹ по типологии А.Ф. Медведева, подразумевая под значком прим-один указание на асимметричность рабочей части.

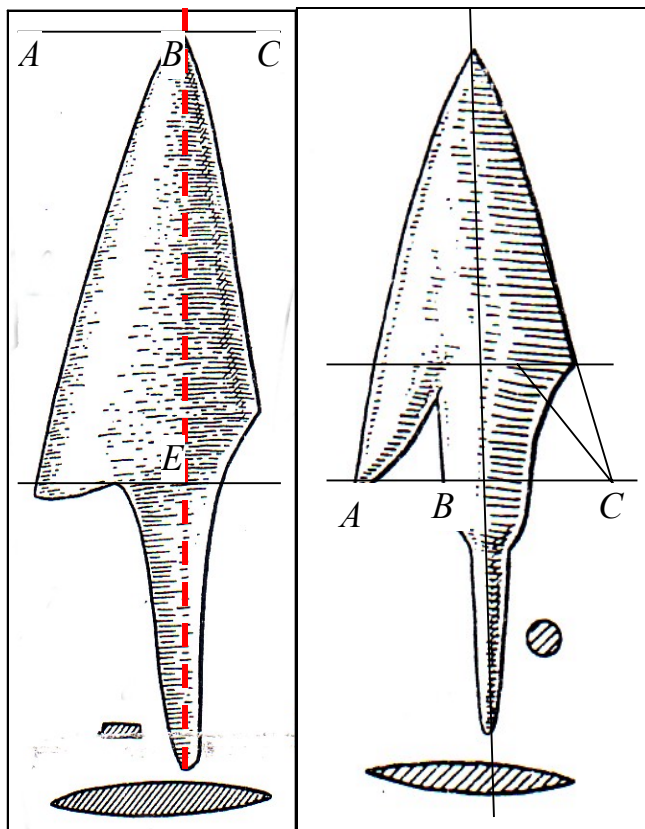


Рис. 5.5. Наконечники стрел тип 28 по А.Ф.Медведеву: слева – Табл.1 8-8; справа – Табл. 30А-24

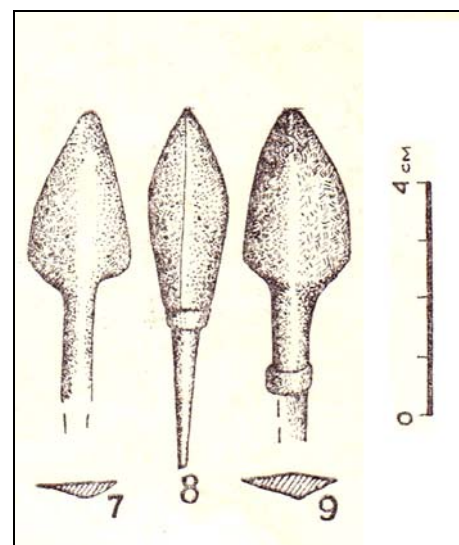


Рис. 5.6. Наконечники с асимметричной рабочей частью из Каневского могильника; Ломоватовская археологическая культура [Генинг, Голдина, Табл. 29]

Наконечники с асимметричной рабочей частью уже обнаруживались в вещевом материале памятников ломоватовской археологической культуры в Верхнем Прикамье. По крайней мере несколько из таких образцов были найдены В.Ф. Генингом в 1953 г. при раскопках Каневского могильника, расположенного к северо-востоку от г. Кудымкар (рис. 5.6). Описывая такие наконечники авторы раскопок не отмечают их асимметричности, а лишь относят их к Отделу Б (Черешковые), Типу V – “подтреугольные, короткие с выпуклыми сторонами. Иногда при переходе к черешку имеется узелок” [Генинг, Голдина, С. 42]. Иными словами, асимметричность рабочей части наконечника не являлась до настоящего времени признаком, привлекающим внимание исследователей не только ломоватовской культуры, но и вообще исследователей древних вооружений. По крайней мере, признак асимметричности не рассматривался в качестве условия, достаточного для выделения таких наконечников в особый тип (вид, отдел и т.п.).

5.2. Реконструкция стрелы в сборе

Для реконструкции стрелы в сборе нам необходим минимальный набор исходных данных. Во-первых, определим оценочно массу наконечника. Взвешивание его в современном состоянии ничего не дает, ибо вес археологического артефакта образовался в результате двух процессов: он увеличился вследствие соединения металла с кислородом (образования ржавчины), но в то же самое время он уменьшился из-за отслаивания ржавчины и разрушения кромок изделия. Толщина слоя ржавчины неизвестна, поэтому попытаемся определить вес изделия до его разрушения аналитически. Для простоты расчета условимся считать форму наконечника ромбической. Тогда площадь его проекции S на плоскость будет равна половине произведения длин диагоналей, которые измерениями на рис. 5.2 определены нами как 55 и 22 мм. Подстановкой значений получаем $S = 1/2 \cdot 55 \cdot 22 = 605 \text{ мм}^2$. В сечении наконечник похож на двояковыпуклую линзу или ромб. При толщине изделия вместе со слоем ржавчины 4 мм (см. рис. 5.1), прибегнув к соответствующим формулам, имеем возможность вычислить объем наконечника, а, зная плотность железа, вычислить массу изделия.

Однако есть, на наш взгляд, и более простой способ: изготовим модель наконечника. Для этого нарисуем его очертания на бумаге мягким карандашом и выльем на бумагу расплавленный воск. После застывания воска отделяем его от бумаги и по отпечатку карандашных линий на нем обрезаем до габаритов изучаемого изделия. Затем, строгая ножом его поверхности, доводим толщину изделия до проектной: по аналогии с хорошо сохранившимися образцами (правда, симметричными) это около 2 мм и заостряем кромки (см. рис. 5.1 и 5.2). Взвешивая восковую модель, получаем $m = 1,25 \text{ г}$. Вычисляем ее объем V по формуле:

$$V = m / \rho,$$

где плотность воска $\rho = 0,96 \text{ г/см}^3$:

$$V = 1,25 / 0,96 = 1,3 \text{ см}^3.$$

Вычисляем массу реконструируемого наконечника M , зная значение плотности железа $7,9 \text{ г/см}^3$:

$$M = 1,3 \text{ см}^3 \cdot 7,9 \text{ г/см}^3 = 10,27 \text{ г}.$$

Таким образом, полагаем закономерным считать, что вес наконечника, определенный описанным способом, был близок к 10 г (рис. 5.7).

Следующий параметр, необходимый для дальнейших расчетов, это толщина древка. Исходные данные о толщине несохранившегося древка получаем, обратившись к аналогам: по данным А.М. Белавина диаметр древков стрел, обнаруженных при исследовании захоронений Рождественского комплекса Родановской археологической культуры на средней Каме (X–XIV вв.), находится в

диапазоне 7–10 мм [Белавин, С. 163]. По указанию А.Ф. Медведева, диаметр древков известных древнерусских стрел также составляет 7–10 мм, а длина 75–100 см [Медведев, С. 50]. Рассматривая в качестве прототипа экземпляры, изображенные на рис. 5.6 и измерением по рис. 5.7, получаем, что максимальная ширина насада могла быть близка к одному сантиметру. Следовательно, полагаем обоснованным принять за диаметр древка реконструируемой стрелы значение в 10 мм.

Можем ли мы делать обоснованные предположения о плотности материала древка? В соответствии с указаниями А.М. Белавина, сделанными на основании соответствующих экспертиз, которые были произведены кафедрой ботаники Пермского Госпедуниверситета, древки стрел Роджественского комплекса были изготовлены из древесины хвойной породы [Белавин, С. 163]. Поэтому в качестве материала древка реконструируемой нами стрелы примем древесину ели или сосны, которая имеет плотность в диапазоне 0,4–0,7 г/см³.

Имея набор минимально необходимых параметров, мы получаем возможность реконструировать габариты стрелы по ее наконечнику, применяя созданный нами пакет программ Osseus [Коробейников, Митюков (2)]. Данное программное обеспечение реализует несколько аналитических подходов, которые мы продемонстрируем ниже для читателя, вооруженного калькулятором:

Массово-габаритный подход. Как было показано в предыдущих главах, длина древка определяется по формуле:

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

и для рассматриваемого наконечника область значений длины древка при подстановке переменных в формулу составит:

$$l = \frac{4 \cdot (5 \dots 9) m_n}{\pi d^2 \rho} = \frac{4 \cdot (5 \dots 9) \cdot 10}{\pi \cdot 1^2 \cdot (0,4 \dots 0,7)} = 115 \dots 162 \text{ см.}$$

Мы видим, что для баланса нашего наконечника потребовалось бы еловое древко запредельной длины. Однако если подставить в формулу значения плотности, известные, например, для дубовой древесины (0,7–1,0 г/см³), то область значений длины древка составит 74...104 см., и нижний ее предел вполне соответствует общепризнанному мнению о длине стрел.



Рис. 5.7. Восковая модель наконечника из могильника Пыштайн II

Аэродинамический подход. Вычисление длины стрелы по описанному выше аэродинамическому подходу дает области значений длины древка для березы и ели 93...170 см, а для дуба 72...144 см. Иными словами, нижняя граница области значений длины для дубового древка может быть принята в качестве наиболее вероятной (разумеется, лишь в предположении об отсутствии оперения, которое основано на результатах расчетов по массово-габаритному методу). Но росли ли дубы на данной территории в то время? Или мастер использовал древесину иной породы с высоким показателем удельного веса? Это вопросы для дальнейшего исследования.

Оценка габаритов и энергии стрелы по антропометрическим данным лучника. Рассматриваемая нами стрела обнаружена в мужском погребении. Что дает нам предположение о том, что погребенный сам использовал (или планировал использовать) эту стрелу? Известно, что величина энергии передаваемой стреле зависит от силы и амплитуды натяжения лука, умноженных на коэффициент его полезного действия. Амплитуда тетивы здесь определяется антропометрически. Измерения костных останков в захоронении № 38 могильника Пыштайн показали, что рост погребенного составлял 1720 мм, длина его ключицы была 141 мм, а плечевой кости 329 мм [Мингалев].

Таким образом, верхнюю границу значений амплитуды тетивы использованного им лука в условиях максимальной силы натяжения следует принять в области 60 см. Следовательно, использованная им стрела была несколько длиннее 60 см, что согласуется с данными, которые получены вышеописанными методами. Чтобы получить общую длину стрелы, надо сложить три показателя: длину наконечника, стрелку первоначального прогиба лука с тетивой и амплитуду перемещения тетивы при ее натяжении.

Разумеется, и здесь величина амплитуды тетивы может быть скорректирована путем моделирования с рулеткой на людях, антропометрические данные которых близко соответствуют реконструированным параметрам древних воинов, полученным по измерениям остеологического материала конкретной археологической культуры или даже отдельно взятого могильника.

Заключение

Исследование артефакта в соответствии с предложенной методикой позволяет реконструировать не только наконечник, но и стрелу в сборе, получить некоторые данные о параметрах лука, из которого эта стрела могла быть выпущена, и сделать обоснованные предположения об ее баллистических характеристиках. Кроме того, логичным становится вывод о том, что обнаруженная в захоронении стрела была частью похоронного обряда; проделанный анализ стрелы позволяет заключить, что ее длина соответствует антропометрическим данным погребенного, и могла им использоваться.

Следовательно, появляются основания для утверждения, что нами описан тот тип стрел нелетального действия, который до настоящего времени

еще не становился предметом изучения археологов и историков вооружений. Возможно, использование именно таких стрел было оправданно в межродовых конфликтах малой интенсивности и соответствует реалиям оперативной обстановки на территории распространения и в период ломоватовской культуры, памятники которой расположены “кустами” вдоль рек. Так, от центра Гайнского куста, где расположены исследуемый могильник Пыштайн II и Харинское и Мазунинское (Даниловское) городища, до центра ближайшей агломерации поселений – Косинского куста, где расположены Пармайловские городища т.е. приблизительно от современного поселка Гайны до поселка Юкseeво расстояние по прямой составляет около 50 км, а на “ничейной полосе”, ширина которой не менее 30 км, расположено городище Карашор (приблизительно по границе современного Гайнского и Кочевского р-нов). Такая особенность топографии поселений (и окружающих их зон ресурсного использования) позволяет предполагать, что население агломераций не имело повода для конфликтного взаимодействия в целях передела территории: какая-либо эксплуатация дальних участков, расположенных вне дистанции дневного перехода, вряд ли могла быть рентабельной. Тем не менее, конфликты “частного” характера исключать нельзя: может быть возникали случаи, когда один ловец бобров хотел проучить другого и бил его нелетальной стрелой? В конце концов, в пользу низкого уровня вооруженности населения может свидетельствовать и отмеченное Р.Д. Голдиной отсутствие укрепленных поселений в ломоватовской группе памятников, заселенных после образования других агломераций ломоватовской культуры [Голдина, С. 163]. Впрочем, озвученные нами предположения относительно уровня интенсивности конфликтов нуждаются в проверке с привлечением массового археологического материала и сплошной археологической разведки территории в целях обнаружения неизвестных памятников в промежутках между “кустами.” Таким образом, предложенные нами логические построения призваны привлечь внимание археологов к проблематике нелетального оружия.

6. БРОНЕБОЙНЫЕ ПРОНИКАТЕЛИ МАЛЫХ ЭНЕРГИЙ

Изучение вопроса о применении метательных снарядов в ретроспективе является одним из способов получения объективной информации для исторической реконструкции. Имея в руках те или иные археологические артефакты, например, наконечники стрел, и обладая знанием о типичных мотивах и вероятных способах их применения, можно восстановить ход исторических событий и сделать обоснованные предположения о характерных чертах и мотивах конкретного исторического субъекта. Кроме того, если говорить о наконечниках стрел, то они, наряду с фрагментами керамики, представляют собой едва ли не самый массовый материал находок, получаемых археологами. Вместе с тем, даже систематизация этого вида артефактов в целях его описания, каталогизирования, экспонирования и т.п. представляет собой пока неразрешимую задачу: едва ли не каждый археолог-исследователь оружия в России готов предложить собственную схему классификации наконечников стрел по параметрам, которые ему представляются наиболее привлекательными, и в такой ситуации не только машинная обработка массивов информации, но и простая коммуникация исследователей весьма затруднены. Тем не менее, наконечники стрел постоянно становятся темой многочисленных публикаций, клубы исторических реконструкторов проводят ролевые игры с применением метательного оружия. За рубежом издается масса научной и популярной литературы об изготовлении реплик исторических луков и стрел по тем или иным проектным параметрам, а на рынке имеются многочисленные предложения о продаже готовых предметов вооружения. Видимо, скоро мы станем свидетелями того, как мода на историческое оружие распространится и среди наших соотечественников. Уже сегодня внимание историка привлекает историческая проблематика баллистики цели, а именно способность стрел пробивать защитное вооружение, или их бронепробиваемость. По нашему мнению, применительно к стрелам, под бронепробиваемостью стрелы (или ее наконечника) следует понимать способность преодолевать защитное вооружение и проникать в защищаемое (заброневое) пространство, внедряясь в живую ткань на глубину, достаточную для нанесения организму воина летальных повреждений, или для производства останавливающего действия. Вопрос о глубине такого проникновения остается дискуссионным: в одних случаях достаточным считается проникновение в тело всего наконечника, в других – проникновение на глубину нескольких “калибров” (т.е. миледей?). По мнению криминалистов-баллистиков “для нанесения проникающего ранения на глубину, обеспечивающую поражение жизненно важных органов, «стрелы» должны обладать кинетической энергией не менее 15 Дж”, а

стрелы, имеющие массу в диапазоне 15–40 г, будут обладать кинетической энергией на границе поражения, если их скорость не менее 45–25 м/с [Холодное и метательное оружие]. С другой стороны, на практике смертельной (вследствие инфекции) иногда может быть и небольшая царапина, произведенная стрелой; видимо, недаром, одно из старейших средневековых руководств по стрельбе из лука было названо *Toxophilus* [Ascham]. Тем не менее, археологические свидетельства говорят нам, что для достижения технического результата, то есть пробивая доспех и входя в заброневое пространство, стрела должна обладать энергией в десятки джоулей [Коробейников, Митюков (1)]. Таким образом, физическая модель процесса бронепробивания может быть описана неравенством, одна часть которого выражает энергию снаряда в момент встречи с целью (вычисляется как половина произведения массы снаряда на квадрат его скорости), а вторая часть содержит сумму прогнозируемых потерь этой энергии на преодоление защитного вооружения (того или иного слоя цели). О пробитии брони можно говорить в случае, когда остаточная кинетическая энергия снаряда больше суммы его энергозатрат. Но за простой логической формулировкой кроется ворох неразрешенных доселе вопросов. Наверное, главным из них на сегодня является вопрос о методе познания и ассортименте исследовательских подходов, ведь вопросы баллистики и бронепробиваемости огнестрельных снарядов как современных, так и исторических решаются сегодня с привлечением ресурсов производителей снарядов и брони, то есть крупнейших промышленных корпораций и исследовательских учреждений, как частных, так и государственных. В свою очередь, полученные в этой области результаты и сами исследовательские методики не могут быть достоянием гласности, так как в соответствии с национальным законодательством во многих случаях не подлежат опубликованию в открытой печати. В то же время историческая баллистика стрел не сулит материального барыша, и считается, что она не оказывает влияния на безопасность государства. Поэтому она сплошь и рядом остается уделом одиночек-энтузиастов, не получающих финансирования и в лучшем случае объединенных в клубы по интересам.

6.1. Некоторые концептуальные аналоги

Для условий нашей страны характерным является положение, когда поиски необходимого финансирования исследований по исторической баллистике объективно вынуждают буквально “за уши” притягивать эти работы к той или иной оборонной тематике. На наш взгляд, наиболее показательным является пример археолога Ю.С. Худякова. Более десяти лет назад он выступил в качестве соавтора книги “Баллистика. От стрел до ракет” [Ведерников, Худяков]. По нашему мнению, данное сочинение явно распадается на две самостоятельные части – археологическую и баллистическую. Археологическая часть (это Глава 1, видимо, написанная названным археологом) содер-

жит фрагментарные ссылки на различные исследовательские подходы к типологизированию стрел известные на то время [Ведерников, Худяков, С. 60–65], а также сводные таблицы, иллюстрирующие состав археологических находок наконечников стрел разных народов Южной и Западной Сибири. В перечень опубликованных параметров включены форма наконечника, стреловидность его передней кромки в градусах, длина и ширина пера (?), удлинение (??) носика, размах и количество лопастей, площадь пера и количество стрел данного типа на одного стрелка (???) [Ведерников, Худяков, С. 53–56]¹. Автор делит описанные им стрелы на две функциональные группы – бронбойные (по его мнению, это стрелы “с жестким монолитным профилем”) и те, что предназначены для поражения незащищенных целей (по его мнению, это наконечники “со свободным хрупким профилем”) [Ведерников, Худяков, С. 57], которые способны наносить болезненные и кровоточащие широкие раны. Указывает он и на возможность существования стрел двойного назначения [Ведерников, Худяков, С. 63].

Данная работа, на наш взгляд, содержит рациональное зерно, сосредоточенное в двух утверждениях автора:

1. Для стрельбы по одной и той же цели могли применяться разные наконечники [Ведерников, Худяков, С. 61].

2. Истинность функциональных свойств, приписываемых отдельным типам наконечников, должна быть доказана только экспериментально [Ведерников, Худяков, С. 63].

Баллистическая часть публикации открывается второй главой, которая, судя по ее названию, долженствует описывать “методический подход механики сплошных сред к исследованию поликлиновых проникателей”². Квинтессенция данной главы содержится во фразе, с которой мы полностью согласны: “Практика – критерий истины. Грамотно поставленный опыт – критерий правильности приведенных расчетов вне зависимости от расчетного метода” [Ведерников, Худяков, С. 95]. Посмотрим, какие же опыты были поставлены авторами публикации?

Из текста следует, что изготовленная ими модель стрелы была обдута в сверхзвуковой аэродинамической трубе при скорости потока от 4 М [Ведерников, Худяков, С. 105] до 6 М [Ведерников, Худяков, С. 123]³. Более сорока

¹ Следует сразу же заметить, что мы не найдем в данной публикации всех параметров, которые необходимы для баллистического расчета стрелы, например, массы наконечника, нет и никаких суждений относительно параметров древка, в котором, как известно, заключается значительная часть массы (и энергии) снаряда.

² Видимо, глава написана исследователем-баллистиком, который использует собственный термин для обозначения наконечников стрел: проникатели.

³ Напомним, что литерой М в физике обозначают число Маха, которое соответствует отношению скорости полета тела к скорости звука, равном 331,43 м/с. Соответственно, скорость 4 М – это 1325,72 м/с. С такой скоростью летают лишь пушечные снаряды и ракеты, но никак не стрелы, выпущенные из лука.

страниц текста главы содержат формулы и графики, построенные в результате названных экспериментов, но какое отношение все это имеет к внешней баллистике стрел? Проникающие свойства поликлиновых проникателей проверялись авторами в ходе обстрела снарядом диаметром 23 мм плит из алюминиевого сплава толщиной 30–40 мм, которые устанавливались на расстоянии 1,5–2,0 м от дульного среза метательной установки [Ведерников, Худяков, С. 145]⁴. Разумеется, ни таких стрел, ни такой брони, пробиваемой стрелами, в древности не бывало. В другом месте читаем, что использованная “баллистическая установка для пуска стрел” представляла собой изделие ПТРС-14,5 [Ведерников, Худяков, С. 98]⁵.

Следующая глава озаглавлена как “Уточнение баллистических свойств поликлиновых стрел с использованием физико-математических методик”. Она содержит интересный вывод: “Выяснилось, что минимальное сопротивление среды и наибольшая проникающая способность присущи⁶ проникателям с многолопастным сечением: трех-, четырехгранным и трех-, четырехлопастным” [Ведерников, Худяков, С. 159]. Вспомним, что это как раз те наконечники “со свободным хрупким профилем”, которые в первой главе противопоставлялись бронебойным наконечникам и преподносились, как предназначенные для поражения исключительно незащищенных целей, т.к. они способны наносить болезненные и кровоточащие широкие раны [Ведерников, Худяков, С. 57].

Заслуживает отдельного внимания параграф работы, озаглавленный: “Экспериментальные исследования класса полипластинчатых наконечников древних стрел, выделенного математическим классифицированием”. Здесь читаем о том, как “аэродинамические модели **древних стрел** были испытаны в аэродинамической трубе при числах $M = 2...3...4$ ” [Ведерников, Худяков, С. 177]. Но какое отношение имеет этот эксперимент по сверхзвуковому обдуву и его результаты к **древним стрелам**? Далее авторы приводят некоторые расчетные оценки баллистических характеристик стрел на траектории полета. Какие же исходные данные принимаются ими для расчетов траектории? А вот, например: “суммарную массу стрелы мы берем равной двум массам наконечников стрел...” [Ведерников, Худяков, С. 181]. Но откуда берется это соотношение? И этот вопрос остается без ответа.

Материал этого издания, видимо, был набран из рассекреченных отчетов по противоспутниковому кинетическому оружию Новосибирского Академгородка и не имеет ни малейшего отношения ни к истории, ни к баллистике стрел. Мы, конечно же, могли бы пройти мимо этой книжки. Если бы не два обстоятельства. Первое: попробуйте заговорить с археологом или историком

⁴ Умеющий читать да поймет, что экспериментаторы обстреливали броню из пушки.

⁵ Противотанковое ружье Симонова образца 1941 г. калибра 14,5 мм и начальной скоростью пули 1012 м/с.

⁶ Видимо, на названных сверхзвуковых скоростях и для относительно толстой гомогенной брони из алюминия?

метательного оружия о проблематике внешней баллистики, и более чем вероятно, ваш собеседник назовет Ю.С. Худякова в качестве ведущего эксперта в данной области. Наш интерес к внешней баллистике древних стрел порождает недоумение многих историков и археологов: дескать, о чем тут еще говорить, ведь Худяков уже все написал и все рассчитал. Но, как мы видели, далеко не все. А из устоявшегося имиджа Ю.С. Худякова вытекает и второе обстоятельство, позволяющее ему бесконечно тиражировать некоторые тексты, имеющие вид исследований по типологии и баллистике стрел (например, [Худяков]). О соответствии таких сочинений заявляемой проблематике можно судить хотя бы по приводимому нами фрагменту текста, опубликованного в 2005 г. [Борисенко, Ведерников, Худяков, С. 63] (рис. 6.1).

ния стрелы (в калибрах миделя). На основании экспериментов выведена приближенная формула глубины проникания для асимметричного бойка [1, с. 195–258]:

$$L_k = l_0 / 2 \alpha \rho_{02} / \rho_{01} l_n [1 + \alpha_0 (\rho_{01} V_0^2 / H_1)],$$

где l_0 – длина бойка, ρ_{01} и ρ_{02} – плотности преграды бойка, V_0 – скорость удара, α_0 – коэффициент сопротивления бойка, H_1 – твердость преграды по Бринеллю. В диапазоне скоростей удара древними стрелами эта формула удовлетворительно описывает проникающую способность бойков со звездообразным поперечным сечением.

О других броневых характеристиках поликлиновых стрел с круговым звездоподобными миделями (наибольшими поперечниками) можно судить по сравнительным экспериментальным результатам. Так, при наличии углов нутации поликлиновые стрелы обладают лучшей проникающей способностью, чем асимметричные эквиваленты. При наклонном ударе стали по стали со скоростью 1625 м/с четырехклиновый и асимметричный корпуса диаметром 2,3 см при ударе под углом 45° от нормали к преграде выбили соответственно объемы 24,6 и 19,2 см³. При косом соударении невращающихся бойков отличие значительно и составило 28 %. При вращении относительно продольной оси даже с малыми числами оборотов происходит поломка клиньев и за счет этого резкое уменьшение проникающей способности поликлиновых ударников [3, с. 143–145].

При наклонном пробитии алюминиевых преград звездообразными бойками с разной стреловидностью передних кромок клиньев замечено существенное повышение их антирикошетных свойств в сравнении с асимметричными эквивалентами. Так, на преграде из АМГ-6 толщиной 20 см при скорости 1350 м/с с углом подхода 55° от нормали к ней все звездообразные ударники обеспечили сквозное пробитие. Асимметричный эквивалент остался в преграде с направлением проникания вдоль поверхности плиты. При угле подхода 65° от нормали получено сквозное пробитие только звездообразным бойком с отрицательной стреловидностью ($X = -45^\circ$) и тупыми передними кромками. Для остальных корпусов наблюдался рикошет. Улучшением антирикошетных характеристик обязаны своим долголетием в военной практике древние стрелы с некруговым поперечным сечением. Эту весьма важную особенность поликлиновых стрел необходимо учитывать при компьютерном проектировании рациональных современных средств индивидуальной защиты личного состава.

Рис. 6.1. Фрагмент работы Ю.С. Худякова

Здесь мы видим не только загадочные и неизвестные исторической науке наконечники звездообразного сечения (которые к тому же и не симметричны???), но и приснопамятные космические скорости стрел с пушечным калибром 23 мм, и брони толщиной в 20 см⁷. Сентенция заканчивается совершенно умильной

⁷ Публикацию предваряет указание, что данное исследование “Прочностных характеристик средневековых доспехов воинов Западной и Южной Сибири” выполнено по гранту РФФИ (!!).

для всякого военного рекомендацией учитывать экспериментальные данные автора при проектировании средств индивидуальной, то есть переносимой на себе индивидом противоснарядной (!) бронезащиты личного состава.

Однако в полемическом задоре мы не должны проходить мимо концептуальных естественнонаучных публикаций, в которых принимал участие названный археолог. В качестве таковой нам представляется большая статья, опубликованная им совместно с сотрудниками двух Новосибирских институтов [Коробейников, Худяков]. Как явствует из названия и введения статьи, ее авторы поставили перед собой задачу смоделировать процесс пробивания стрелой защитного вооружения номадов Центральной Азии, а затем провести сравнительный анализ различных доспехов. Для этого было использовано соответствующее программное обеспечение. Однако, на наш взгляд, концептуальные построения авторов были далеки от исторических реалий. Так, например, они сообщают, что ими “проверяется возможность разрушения фрагментов защитного вооружения при прямом попадании стрелы в центральную часть одной из пластин защитного вооружения (наихудшие условия по отношению к защитным свойствам панциря)” [Коробейников, Худяков, С. 197]. В то же время, простая логика подсказывает, что с точки зрения уровня защиты пластинчатого панциря попадание стрелы в центр пластины является наиболее оптимистичным сценарием: гораздо выше вероятность пробития пластинчатого доспеха при попадании в край пластины или в сочленение пластин. Авторы говорят, что “математическое моделирование процесса разрушения фрагмента защитного панциря осуществляется с помощью решения динамической задачи о совместном деформировании панциря и тела человека... Показано, что при ударе стрелы разрушение пластины происходит вследствие ее изгиба при зарождении трещины на противоположной от воздействия стрелы стороне пластины” [Коробейников, Худяков]... “...Модель панциря, одетого⁸ на тело человека представляет трехслойную область”. Далее читаем, что первый из моделированных слоев является собой защитный панцирь, второй слой – мягкие ткани тела человека, а третий слой – ребра [Коробейников, Худяков, С. 198]. Весьма странно, что упомянутые исследователи защитного вооружения полагают, будто панцири надевались на голое тело. Неужели они ничего не слышали о поддоспешной одежде, и по этой причине не вводят в свою модель амортизирующий слой стеганой боевой рубахи или дублета⁹?

Далее читаем, что: “Налетание стрелы на панцирь моделируется заданием ненулевой начальной скорости v_0 ” [Коробейников, Худяков, С. 206]. Каков же диапазон принятых исследователями расчетных скоростей? В табл. 1 [Коробейников, Худяков, С. 208] видим, что, по мнению авторов, стрелы

⁸ Мы намеренно сохраняем орфографию документа.

⁹ Данное обстоятельство мы объясняем тем, что работы производились по тематике, связанной с разработкой современных бронезилетов скрытого ношения.

внедряются в броню со скоростью от 0,9 до 1,7 м/с¹⁰. Здесь необходимо подчеркнуть, что данный диапазон скоростей противоестественен с точки зрения здравого смысла (горизонтальный полет тела тяжелее воздуха с такой скоростью при отсутствии подъемной силы невозможен); этот диапазон никак не соответствует принятому теми же авторами диапазону космических скоростей, о котором мы упоминали выше.

Поэтому приходится констатировать, что условия моделирования, произведенного группой Ю.С. Худякова, не соответствуют реальному применению доспехов и стрел. И в силу указанного обстоятельства произведенное исследование, несмотря на его явное наукообразие, для исторической науки, для изучения доспехов и стрел совершенно бесполезно¹¹.

6.2. О научном подходе к моделированию бронепробивания

Несмотря на неутешительный вывод, озвученный нами выше, считаем, что моделирование баллистики цели (бронепробивания) древних стрел с помощью системного пакета программ должно иметь перспективу. Здесь перед нами встают несколько взаимосвязанных проблем. Для того чтобы не загромождать наш текст, отошлем читателя к нашим предыдущим публикациям:

Во-первых, исследователям необходимы реальные расчетные параметры снаряда и цели. В этом направлении мы ведем работу, которая уже дала свои результаты – нами создано и апробировано программное обеспечение, которое позволяет более или менее точно реконструировать проектные и баллистические параметры стрелы в сборе по ее археологическим следам, то есть по наконечнику [Коробейников, Митюков (5)], [Коробейников, Митюков (2)].

Кроме того, в целях унификации исследовательских подходов к баллистике стрел и обеспечения возможности машинной обработки массивов данных о них, нами предложена система кодирования информации о стрелах, которая предусматривает отражение полного перечня параметров снаряда, которые влияют на технический результат [Коробейников, Мингалев].

Во-вторых, для строительства алгоритмов нам необходимы системы уравнений адекватно отражающих физические процессы взаимодействия стрелы и цели. Однако наиболее важной задачей, к осуществлению которой можно приступить немедленно, нам представляется логическое моделирование процесса бронепробивания.

¹⁰ Для образного представления переведем эти скорости в другие единицы и получим, что диапазон принятых скоростей, равных 3,2...6,1 км/ч. Покажите нам стрелу, которая летит со скоростью пешехода!?

¹¹ Несмотря на явную бесполезность произведенной работы, она получила финансирование от Российского Фонда Фундаментальных исследований и финансировалась грантом Министерства образования РФ.

6.3. Краткий перечень энергозатрат стрелы

В целях логического моделирования процесса пенетрации попытаемся детально определить состав энергозатрат стрелы, которые включаются в общий баланс баллистики цели. Конечно же, мы не можем здесь детально описывать или учитывать весь ассортимент принципов обеспечения бронестойкости, да и сама стойкость доспеха не исчерпывает боевых характеристик системы вооружения. Тем не менее, намеренно избегая ранжирования боевых характеристик, мы рассматриваем в первом приближении физический смысл процесса проникновения стрелы в цель¹².

1. Ударная волна. Видимо, первым фиксируемым свидетельством попадания стрелы в броню является звук от соударения. Стрела и цель распространяют колебания, которые мы способны воспринять органами слуха. Вероятно, какая-то часть энергии этих колебаний распространяется также и в ультра- и инфразвуковом диапазоне. Понятно, что при баллистических расчетах огнестрельных снарядов, которые имеют кинетическую энергию в миллионы джоулей, потерями энергии на формирование ударной (звуковой) волны пренебрегают, но для стрел, которые доносят до цели энергию величиной в десятки джоулей, эта величина может учитываться в общем балансе.

2. Упругая деформация. При ударе в цель стрела стремится переместить цель в направлении, противоположном вектору своего движения. Понятно, что если стрела ударяется в массивную (инерциальную) преграду – щит, кирасу и т.п., то она не может вывести цель из состояния равновесия. Иное дело пластинчатая броня или кольчуга – небольшой подвижный элемент имеет возможность перемещаться без разрушения, а энергия снаряда гасится поддоспешной одеждой. Степень упругости такого перемещения может зависеть от массы элемента доспеха, способа его скрепления с другими элементами, от толщины и материала поддоспешных амортизаторов, угла встречи и пр.

3. Пластичная деформация. Стрела прогибает преграду, причем в пластинчатом доспехе деформации подвергается лишь один из съемных элементов. При этом местное напряжение в точке удара распространяется на всю площадь смятой поверхности.

4. Пенетрация. Стрела проникает в материал доспеха, совершая его пробитие в узком смысле слова. Понятно, что величина лобового сопротивления цели стреле пропорциональна степени заостренности бойка и величине площади его поперечного сечения. Считается, что условием пенетрации является

¹² Средневековый хронист сообщает о пробитии слоев цели: "...The arrow pierced the blazon of William Dispencer, and through three folds of mail armor, and through the three pliues of his acqueton (a padded jacket), and into his body, so that he lay there dead of the blow..." Цит. по: [Soar, P. 71]. Хотя, на наш взгляд, указание на трехслойную кольчугу и трехслойный стеганный поддоспешный камзол в части количества слоев является здесь поэтическим преувеличением.

твёрдость носика наконечника, которая должна быть больше, чем твёрдость брони.

5. Стрела проходит через отверстие, образованное бойком, испытывая боковой поверхностью воздействие силы трения. Через отверстие “протискивается” наконечник (а при коротком наконечнике и часть древка), таким образом, толстая поддоспешная одежда увеличивает путь до человеческого тела, на протяжении которого на стрелу воздействует тормозящая сила.

6. Стрела производит местное уплотнение поддоспешной одежды – дублета.

7. Стрела производит пенетрацию дублета.

8. Стрела преодолевает силы трения боковой поверхностью в отверстии дублета.

9. Стрела внедряется в живую ткань. При этом сила трения поверхности стрелы в цели определяется как сумма сил трения в отверстии брони, в отверстии дублета и в раневом канале. Следовательно, для уменьшения затирания стрелы требуется иметь ее максимальное сечение (мидель) наиболее приближенным к носику.

6.4. Механизм пенетрации и типология стрел

Апеллируя исключительно к доводам здравого смысла мы полагаем целесообразным изучать и типологизировать стрелы с точки зрения их назначения. Иными словами, в основу классификации следует положить тот технический результат, ради достижения которого все эти стрелы были использованы. Но если в качестве технического результата применения боевых стрел нами признается поражение живой силы противника с пробитием защитного вооружения (там где оно применялось), то для реконструкции боевого применения той или иной стрелы мы должны получить убедительные доказательства того, что эта стрела в принципе была способна дать такой технический результат. В качестве источника доказательств, видимо, следует принимать квалифицированные свидетельства очевидцев и современников, а также данные современных расчетов и экспериментов.

Наверное, в качестве одного из самых древних свидетельств специалиста в области стрельбы из лука следует признать трактат анонимного арабского автора, который датируется приблизительно 1500 годом н.э. [Arab archery].

Автор трактата (доступного нам в английском переводе с арабского) подразделяет наконечники стрел на пять типов: по признаку поперечного сечения он делит их на треугольные, квадратные и круглые, а по признаку общего очертания на удлиненные (в тексте употреблен термин *elongated*), и колпачковые (в тексте используется термин *caplike*, что может быть переведено и как цокольные, насадные, притупленного профиля, с малой степенью заострения и т.п.). [Arab archery, P. 107].

1. Самые короткие “треугольные” наконечники, по его мнению,

“подходят для пробивания щитов и иного металлического защитного вооружения, за исключением шлемов и иных поверхностей, по которым возможно скольжение снаряда (т.е. рикошет?). Длинные наконечники треугольного сечения подходят для поражения металлических шлемов и иных рикошетирующих поверхностей. Также они хороши для пробития деревянных преград.

Для таких наконечников древко стрелы должно быть цилиндрическим, а его диаметр не должен выходить за габариты сечения наконечника. А третий тип наконечника треугольного сечения, который имеет треугольные кончик (черешок) и треугольный боек (видимо, равной длины с черешком), является многоцелевым.”

2. Квадратного очертания (видимо, квадратные в сечении) наконечники автор подразделяет на длинные и короткие.

“Экземпляры относимые к длинной разновидности снабжаются четырьмя выступающими зубцами (невозвратными шипами) и предназначены для поражения небронированного противника и для охоты на крупных хищников, таких как львы...

*Короткие и компактные (в оригинале употреблен термин *сотраст*, что может быть прочтено как сплошные, массивные) наконечники предназначены для пробития щитов, нагрудников и пластинчатых доспехов”.*

3. **Круглого очертания** (видимо, круглые в сечении) также подразделяются автором трактата на длинные и короткие. *“Короткие чрезвычайно удобны для пробивания щитов, тогда как длинные хороши для пробивания пластинчатых доспехов, нагрудников, а также преград из дерева и ему подобных материалов”.*

Удлиненные (elongated) наконечники автор подразделяет на короткие, длинные, и зазубренные (в тексте “barbed”). Все они имеют цилиндрическое отверстие, в которое вставляется древко (т.е. речь идет о втульчатых наконечниках).

“Стрелы этого вида имеют широкие острые лезвия подобно Византийским копьям и острые бородки (зубцы) с каждой стороны. Они подходят для поражения незащищенного противника и для охоты на хищников. Наконечники длинной разновидности имеют, как правило, около четырех пальцев в длину, длинное лезвие и тонкое цилиндрическое основание, в которое вставляется древко. Они подходят для охоты на крупных хищников таких, как львы и на быстрых животных, таких как олени. Наконечники короткой разновидности имеют короткие лезвия, из которых торчат весьма острые шипы. Они хороши для поражения незащищенного противника и для охоты на хищников”.

Простейшие **колпачковые** (caplike – цокольные, короткие?) наконечники стрел по описанию автора похожи на наконечники копий разных видов, и так же как копья они имеют отверстия (втулки) для насада. *“«Черешковый» способ крепления наконечника к древку состоит в просверливании отверстия глубины чуть меньшей, чем длина черешка стрелы..., забивании черешка в торец древка и укреплении обмоткой...”* [Arab archery, P. 107–109].

Мы видим, что системообразующими признаками для автора трактата является в одном случае поперечное сечение наконечника, а в другом случае его внешнее очертание, а именно, степень вытянутости (или заостренности?).

Какие же наконечники, по мнению средневекового автора, являются бронебойными? Мы видели выше, что в качестве таковых могут быть использованы наконечники любого сечения, а круглый наконечник, на котором нет невозвратных шипов, является по определению бронебойным. Вполне логичным видится указание автора на то, что бронебойные наконечники не могут иметь невозвратных шипов: преодолевая броню такие шипы неминуемо сомнутся или обломятся. Длина наконечника также не является показателем бронебойности: понятно, что для поражения живой ткани под доспехом требуется наконечник большей длины, чем для пробития щита – ведь в первом случае необходимо пробить еще и поддоспешную одежду.

Из текста следует, что автор трактата вполне осознанно описывает проблему рикошета снаряда: он рекомендует использовать короткие наконечники (видимо, наконечники с малой степенью заострения) для пробития щитов. Можно закономерно полагать, что если воины держат щиты в руках, то плоскость этих щитов при прямом выстреле по настильной траектории пробивается стрелой по нормали, либо с малым отклонением от нормали. В то же время, длинные наконечники (с большой степенью заострения), по его мнению, более подходят для пробития бронированных поверхностей со сравнительно малыми радиусами закругления – шлемов и нательных доспехов, с которых вероятен рикошет.

На наш взгляд, наиболее ценным является замечание средневекового автора относительно вероятности разрушения снаряда при попадании в бронированную цель. Он пишет:

“Стрелы со втулками, что были насажены на древки подобно копьям, не совсем хороши, ибо имеют склонность обламывать древко < при попадании в цель >. Они могут быть использованы только против небронированного противника и на охоте, когда лучника не заботит потеря стрелы. При стрельбе по твердым поверхностям, таким как щиты, не могут быть рекомендованы к использованию никакие другие наконечники стрел кроме тех, что имеют солидные¹³ черешки” [Arab archery, P. 110].

Из приведенного свидетельства однозначно следует, что признаками бронебойного предназначения стрелы в представлениях средневекового автора является ее черешковый насад и отсутствие невозвратных шипов.

Данное утверждение интересно в сравнении с синхронным свидетельством Роджера Аскама¹⁴ (Roger Ascham), которое имеет точную датировку –

¹³ Употребленный в оригинальном тексте английский термин Solid может иметь значения: сплошной, массивный, крепкий, значительный и т.п.

¹⁴ В русскоязычной литературе встречается написание Ашем, Эшем.

1545 г.: “Короткие наконечники лучше длинных, ибо <последние?> всегда испытывают риск разрушения при попадании¹⁵” [Soar, P. 21].

Тот же автор считает, что “наши английские наконечники более подходят для войны, чем вилкообразные¹⁶ или широкие. Во-первых, в силу своей легкости они летят гораздо быстрее и поэтому наносят болезненные раны. Я считаю, что если бы имеющиеся на них небольшие невозвратные шипы были бы вовсе удалены, то их скорость еще бы возросла” [Hardy, P. 137].

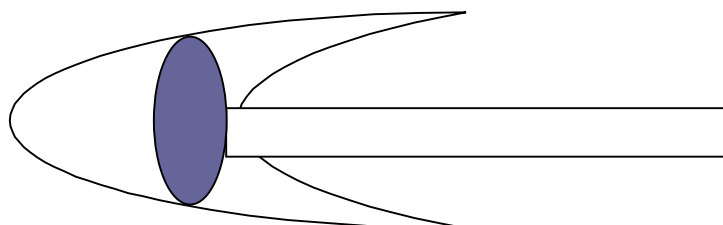


Рис. 6.2. Схематическое изображение наконечника с невозвратными шипами. Сплошной заливкой показано поперечное сечение

Видимо, базируясь на средневековой традиции, английские исследователи стрел разработали систему идентификации доисторических и средневековых артефактов, которая известна под названием Каталог Лондонского Музея (London Museum Catalogue – L.M.C., или типология Варда-Перкинса (Ward-Perkins) [Ward-Perkins]. Наконечники стрел здесь разделены на 21 категорию. В типологии выделены стрелы для пробивания кольчужных и пластинчатых доспехов. В качестве характерного признака этих бронебойных стрел выступает их форма без выступающих частей, которая позволяет беспрепятственно проникать в плотный материал. Иной тип представляют стрелы, предназначенные для проникновения в живые ткани, вызывающие кровотечения и поражающие жизненно важные органы. Они снабжены невозвратными шипами. Далее выделяются стрелы со втульчатым и черешковым насадом. Каждый из 21 варианта представляет собой фиксированное сочетание признаков назначения, способа насада, и внешнего очертания. Однако данная классификация не является иерархической, и работа с ней строится путем простого перебора базы данных и поиска наиболее близкого варианта.

В целях усовершенствования учетных принципов Лондонского музея О. Джессоп (Oliver Jessop) предложил собственную классификацию с эле-

¹⁵ В оригинальном тексте: “Shorte heads be better than longe because they (the long heads) are always in more jeopardye of breaking when they are on”. Но если поясняющая ремарка в скобках (the long heads) является вставкой издателя, то смысл фразы средневекового автора меняется на противоположный.

¹⁶ Употребленный автором термин Forked head, по нашему мнению, может однозначно обозначать разветвленный наконечник с сильно развитыми невозвратными шипами, которые имеют вид ласточкиного хвоста (рис. 6.2). Сечение такого наконечника в середине линзовидное.

ментами иерархии признаков [Jessop]. Здесь каждый артефакт кодируется буквенно-цифровым сочетанием. Литера обозначает класс, а цифра тип в классе. Так, черешковые наконечники обозначены литерой Т (от tang – хвостовик), боевые литерой М (от military), охотничьи литерой Н (от hunting), многоцелевые МР (multipurpose), а тренировочные литерой Р (practice). После литеры следует номер типа, а общее количество сочетаний равняется 28 [Soar, P. 211–212]. Несомненным достоинством данной системы является ее резервность – количество буквенно-цифровых сочетаний, в отличие от типологии L.M.C. не является изначально заданным и конечным. Однако в классификации Джессопа в качестве типообразующего признака в одном случае избран способ насада, а в другом – гипотетическое назначение наконечника. Кроме того, нам совершенно непонятно, как в этой системе может быть закодирован втульчатый насад, или боевые черешковые наконечники, свидетельство о которых мы приводили выше? Явным недостатком данной классификации является и то, что она основана исключительно на археологическом материале, который был получен на Британских островах и датируется X–XVI вв. Следовательно, эта классификация является узколокальной во времени и пространстве и артефакты, относимые к иным культурам и периодам, не могут быть ею идентифицированы.

6.5. Фрикционная гипотеза пенетрации и ассортимент наконечников

Несомненный интерес для исторической баллистики стрел представляют экспериментальные данные, полученные современными энтузиастами в результате стрельбы из лука по мишеням, которые реконструируют средневековое защитное вооружение. Достоинством таких экспериментов является то, что в них воссоздаются близкие к реальным условия взаимодействия снаряда и цели: масса и скорость снаряда, его форма и угол встречи с преградой, прочностные характеристики и мера инертности преграды и т.д. (рис. 6.3).

В.Т. Томпсон (W.T. Thompson) предложил формулу для расчета проникающей способности конических наконечников при ударе в пластину брони по нормали:

$$W = \pi R^2 h_0 \left[\frac{1}{2} \sigma_y + \rho \frac{(VR)^2}{L} \right],$$

где W – работа снаряда; $2R$ – диаметр снаряда (мидель); h_0 – толщина брони; σ – предел упругости брони; ρ – плотность брони; V – глубина проникновения; R/L – степень заостренности наконечника.

Видно, что величина необходимой работы проникновения пропорциональна толщине и прочности преграды. В соответствии с этим уравнением для минимизации работы на пробитие следует применить длинный узкий наконечник с минимальным диаметром и минимальным отношением диаметра $2R$

к длине L . Такой наконечник уменьшает объем разрушаемой брони – понятно, что этот объем находится в прямой зависимости от величины поперечного сечения проникающего. Вдобавок, узкий боек позволяет получить высокое удельное давление на единицу площади. Однако предлагаемая формула не учитывает упругой и пластичной деформации, а также пренебрегает силами трения снаряда в пробитом канале. Следует полагать, что хрупкие материалы подвержены пенетрации при малой деформации, и, следовательно, будут пробиты при меньшей энергии, чем та, что можно вычислить с применением предложенной формулы. Явным недостатком формулы видится и то, что она выведена исключительно для снарядов круглого сечения [Jones (2), P. 206–207].

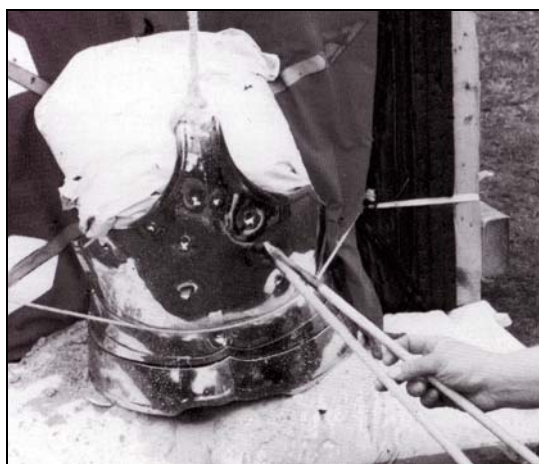


Рис. 6.3. Нижняя часть сборного доспеха, надетая на манекен¹⁷. Видны конические вмятины в месте попадания стрел, круглые отверстия и сами стрелы с длинными шиловидными бронебойными наконечниками, которые имеют втульчатый насад¹⁸ [Soar, P. 112]

Кроме того, по нашему мнению, отклонение угла встречи стрелы с броней от нормального (т.е. от угла в 90°) на практике является скорее правилом, чем исключением. Вследствие так называемого “парадокса лука”¹⁹, рыскания вследствие ветрового воздействия и тангажа, связанного с подъемной силой стрелы, продольная ось стрелы и вектор ее движения часто не совпадают. Таким образом, моделирование реальных условий рикошета является актуальной задачей.

Конечно же, мы имеем эмпирическую формулу Демара (Jacques De Marre), полученную конструкторами артиллерийских систем в XIX в.:

$$W \frac{(V \cos \theta)^2}{d^3} \geq C \left(\frac{t}{d} \right)^\alpha,$$

¹⁷ Это т.н. набрюшник или “брюхо” по терминологии В. Бехайма (нем. Bauchraifen, англ. great brayette, фр. brasconiere) [Бехайм, С. 83, 99]

¹⁸ В английской традиции такие наконечники называют bodkin.

¹⁹ Так как рукоять лука, на которую наложена стрела, имеет некоторую толщину, а вектор движения тетивы проходит через середину рукояти, то векторы движения тетивы и стрелы не совпадают. Кроме того, в момент удара тетивы по хвостовику стрелы, вследствие инертности наконечника древко начинает волнообразно изгибаться, что приводит к рысканию стрелы в полете.

где W – вес снаряда; V – скорость снаряда; θ – угол встречи с броней; d – диаметр снаряда; t – толщина плиты; C – эмпирическая постоянная; α – эмпирическая постоянная. Приведенная формула показывает, что при отклонении угла встречи от нормали растет и критическая скорость снаряда, необходимая для пробития брони.

Британские исследователи стрел сообщают, что в целом бóльшая проникающая способность шиловидных наконечников (видимо, в сравнении с теми, что мы приводим на рис. 6.2?) была установлена ими экспериментально: в соответствии с приведенными формулами для них требуется меньшая скорость пробивания [Jones (2), P. 207]. Однако, на наш взгляд, при отсутствии полных данных об условиях экспериментов этот вывод можно принять безоговорочно лишь для черешковых удлинённых наконечников, которые попадают в цель под прямым углом. Несомненно, экспериментальные стрелы, производимые нашими современниками в условиях реальных скоростей и энергий, позволяют глубже понять механизм взаимодействия стрелы и цели и подтверждают эмпирические данные средневековых источников. Наиболее показательной в этом плане является картина, приводимая нами на рис. 6.4, иллюстрирующая разрушение короткого втульчатого наконечника при попадании в преграду. Масса такого наконечника незначительна в общей массе снаряда, следовательно, после внедрения наконечника в металл сравнительно массивное древко продолжает свое движение по инерции, обламывая стенку втулки и узел крепления, таким образом, разрушается возникшим изгибающим напряжением. Вследствие схода наконечника с древка кинетическая энергия отделившегося древка исключается из общего баланса, она уже не работает на пробитие преграды. Как мы видим на приводимом рисунке, пробитие брони здесь не достигнуто; снаряд вошел в заброневое пространство на половину своей длины, или приблизительно на два диаметра. В этом случае трудно предполагать, что была пробита поддоспешная одежда и снаряд произвел проникающее ранение, поразив жизненно важные органы²⁰.

П. Джонс сообщает о серии экспериментов, в ходе которых обстреливались листы металла, которые по своей твердости, толщине и качеству выделки близко соответствовали материалу средневековых доспехов. Испытательные стрелы были снабжены длинными коваными втульчатыми шиловидными наконечниками длиной около 130 мм и диаметром около 10 мм (если судить по масштабу рисунка в тексте статьи). Указана их твердость по Викерсу – HV 350. Дистанция стрельбы составила десять метров, стрелы выпускались из тисового лука с силой натяжения 70 фунтов (31,7 кг) и амплитудой тетивы 28 дюймов (71,1 см).

²⁰ Можно предположить, что использование разрушающихся наконечников имело некоторые резоны: по крайней мере, они делали невозможным обратный огонь подобранными снарядами.

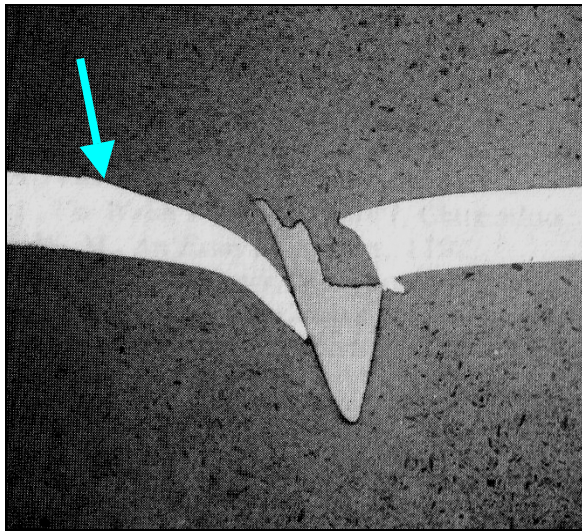


Рис. 6.4. Механизм перфорации плоской поверхности стрелой при отклонении от нормали 60° . Видны: точка попадания (указана стрелкой), канавка скольжения длиной не менее 3-х диаметров стрелы, прогиб металла брони, наклеп на кромке выходного отверстия и наконечник, который потерял древко вследствие разрушения втулки. Носик наконечника смялся в направлении, противоположном вектору движения [Jones (2), P. 207]

Масса стрел находилась в диапазоне 55–65 г, а скорость 37–39 м/с. Было установлено, что:

- броня толщиной 3 мм не пробивается ни при каких условиях,
- броня толщиной 2 мм пробивается по нормали, стрела входит в мишень на 11 мм, а при отклонении от нормали в 20° броня не пробивается,
- броня толщиной 1 мм пробивается: при ударе по нормали стрела входит в отверстие на 51 мм, а при отклонении от нормали на 20° лишь на 43 мм,
- при отклонении от нормали в 40° стрела не пробивает мишеней, а ломается в месте насада [Jones (1), P. 115–116].

Замеченное смятие носика наконечника может показаться тривиальным, однако, на наш взгляд, прочность снаряда в этой точке имеет определяющее значение именно при косом ударе, когда смятый кончик образует на броне поверхность скольжения, и благодаря скольжению снаряда по броне его энергия “размазывается” по большой площади. Таким образом, при косом ударе смятый носик не может “зацепиться” за броню за счет внедрения в нее, а силы поверхностного трения для сцепления с броней также недостаточно. Иными словами, носик лишь царапает броню и снаряд рикошетирует.

Известно, что величина сухого трения пропорциональна давлению поверхностей друг на друга. С другой стороны, коэффициент трения зависит от температуры тел и значительно уменьшается с ростом скорости между трущимися телами. Лишь при малых скоростях и температурах его можно считать равным коэффициенту трения покоя. При косом ударе огнестрельных снарядов о броню мы имеем дело с громадными скоростями движения: при полете по баллистической траектории скорость составляет несколько сот метров в секунду. При ударе пуль и снарядов выделяется значительная тепловая энергия, достаточная для расплавления металлов (стоит лишь вспомнить про свинцовые брызги). Поэтому вполне естественно, что при моделировании баллистики цели огнестрельных снарядов исследователи пренебрегают силами трения, которые действуют на границе взаимодействующих поверхностей.

Иное дело стрелы, выпущенные из лука: скорость их движения ограничена десятками метров в секунду, выделение тепловой энергии при ударе ничтожно. Таким образом, логичным становится вывод о том, что силы трения при косом ударе должны быть включены в общий баланс. Это позволяет наметить пути формулирования фрикционной гипотезы пенетрации. Известно, что если силы, приложенные к телу, стремятся его сдвинуть по опорной поверхности, то в месте соприкосновения помимо нормальной составляющей реакции N возникает касательная составляющая, направленная против движения действительного или возможного, которая и является силой трения T . Для движущегося тела $T < fN$, где f – коэффициент трения скольжения (для трения в паре сталь по стали он равен 0,15).

Углом трения φ называют угол между полной реакцией поверхности (с учетом силы трения) и нормальной реакцией поверхности (в случае со стрелами величина N зависит от угла встречи с поверхностью цели). Для условия, что тело не скользит по поверхности, этот угол называют предельным углом трения. Известно, что $\varphi = \text{arctg } f$. Таким образом, в предположении отсутствия упругой и пластичной деформации можно в качестве задачи на будущее вывести уравнение рикошета, связывающее воедино угол падения снаряда и его энергию.

Таким образом, мы видим, что трение наконечника о броню доспеха в условиях косого удара может играть положительную роль в уменьшении рикошета. Но увеличение поверхностного трения шиповидного наконечника возникает при его деформации; поверхность трения образуется, когда кончик, смятый в сторону, противоположную вектору движения, скользит по броне. Разумеется, деформация острия в этом случае резко уменьшает величину удельного давления снаряда на цель, и уменьшает вероятность ее пробития. К тому же, владелец защитного вооружения увеличивает вероятность рикошета путем полировки металлической поверхности. Поэтому, в предположении действия сил трения оптимальный снаряд должен иметь кончик, который представляет собой готовую поверхность скольжения, имеющую некоторую протяженность, но в то же время эта поверхность должна быть несминаемой и достаточно острой, чтобы обеспечить удельное давление, необходимое для пробития. Представляется вероятным, что столь противоречивые требования к наконечнику могут быть реализованы в устройстве, которое имеет широкую рабочую часть с дугообразной режущей кромкой. Такое лезвие в момент удара работает как топор или сабля: плоскость цели представляет собой касательную к поверхности трения. Если мысленно моделировать соударение брони и наконечника (“ребром на плоскость”), выполненного в виде сектора с угловой величиной в 45° , то при отклонении от нормали до 45° возможность полного рикошета и даже скольжения по поверхности должна быть проверена экспериментально. Но можем ли мы свято верить в данные экспериментов?

В научной и популярной литературе циркулируют многочисленные утверждения, способные поразить воображение читателя. Что стоят указания ис-

ториков о том, что²¹ “в связи с внедрением пластинчатой брони английские лучники стали использовать шиловидные бронебойные наконечники (bodkin). Причем на такой наконечник помещался кусочек воска. Наконечник, подготовленный указанным способом, был менее подвержен скольжению по поверхности металла и вся энергия стрелы концентрировалась в точке попадания. Эксперименты показали, что стрелы с шиловидным наконечником, выпущенные из лука с силой натяжения 75 фунтов (~34 кг), внедряются в стальную плиту на глубину до четверти дюйма (~6 мм). В ходе экспериментального обстрела подлинных образцов старинных доспехов можно было видеть, что стрела высекает искры в момент удара. Броня пробивалась, а стрела продолжала движение и внедрялась в дерево на глубину до восьми дюймов (~200 мм)” [Hurley, P. 22]. Как можно прокомментировать приведенный пассаж?

1. Первое, что бросается в глаза, так это путаница в терминах для обозначения бронебойной защиты – автор говорит о некоей “plate mail”. Однако, известно, что термином plate armor обозначаются доспехи из пластин (от английского plate – пластинка), а термин mail обозначает кольчугу, то есть доспех из колец. Однако из контекста можно догадаться, что речь идет все-таки о пластинчатой броне.

2. Воск, вследствие своей вязкости (липкости) может служить уменьшению рикошета с гладкой поверхности; в этом легко убедиться, если провести сначала металлом по любой гладкой поверхности, например, чистой вилкой по тарелке, а потом прилепить на ту же вилку шарик застывшего воска. В этом случае вязкий и легко деформируемый воск, помещенный на наконечник стрелы, играет ту же роль, что и сминаемые баллистические колпачки современных бронебойных снарядов. Но если в момент удара снаряда в цель мы видим искры, значит, никакой демпфирующей среды между металлами при этом нет, а сами металлы разогреваются по крайней мере до температуры красного свечения, то есть до многих сотен градусов. Если выделение большой тепловой энергии, достаточной для искрообразования все-таки происходит, значит, воск, несомненно, переходит в жидкое состояние, вязкость его резко падает, и он играет роль смазки, облегчая проникновение снаряда в пробоину. Таким образом, условия эксперимента остаются неясными: если воск помещается на кончике рабочей части, то он уменьшает рикошет, но гасит искры, а если кончик рабочей части выступает из воска, то он высекает искры, а воск при этом не оказывает влияния на рикошет, но может служить смазкой.

²¹ Приводим авторский абзац в оригинале и без малейших изъятий: “When plate mail came into use, the English developed a bodkin point to achieve maximum penetration. It was the English practice to place a bit of wax on the bodkin. A bodkin so treated was less liable to glance from the metal surface; full energy was thus concentrated at the point of impact. Experiments have shown that a 75-pound bow, using bodkin arrows, will penetrate steel plate to a depth of ¼ of an inch. In tests made on ancient armor, sparks flew when the bodkin made contact. The armor was pierced; the arrow continued on to penetrate 8 inches of wood” [Jones (1), P. 22].

3. На основании указания о силе лука в 75 фунтов невозможно судить о величине дульной энергии стрелы: она определяется как произведение силы натяжения на амплитуду натяжения на КПД данного лука. Однако два последних сомножителя остаются неизвестными. Дистанция стрельбы также не указывается. Значит невозможно судить о потерях энергии на сопротивление воздуха и совершенно неясно, какую энергию стрела имеет в момент встречи с целью.

4. Качество выделки стали, применявшейся для изготовления испытанных образцов доспехов, неизвестно²², однако абсолютные показатели толщины пробитых материалов представляются нам явно фантастическими – пробить 6 мм стали, а потом еще и 200 мм дерева под силу разве что пуле современного автомата, которая имеет энергию полторы–две тысячи джоулей, но никак не стреле лука, энергия которой теоретически не может превысить пары сотен джоулей (см. об этом главу 1 настоящего издания).

Несомненно, все тезисы, подобные вышеприведенным, нуждаются в строгой экспериментальной проверке в целях разработки гипотезы о фрикционном механизме пенетрации брони проникателями малых энергий.

6.6. Срезень – бронебойное оружие массовой армии?

Представляется вероятным, что фрикционная гипотеза пенетрации в случае ее развития может объяснить использование средневековыми воинами широких наконечников с притупленной кромкой в виде тупого треугольника или дуги сравнительно большого радиуса – так называемых *срезней*. В предыдущих работах мы отмечали особенность таких наконечников: при попадании в живую ткань они почти моментально тормозятся и отдают свою кинетическую энергию. Следовательно, если величина этой энергии сравнительно невелика (например, при натяжении лука не на полную амплитуду), то такие стрелы в соответствии с волей стрелка могут наносить небронированным индивидам (например, нонкомбатантам) лишь поверхностные ранения (нелетальные повреждения) и производить останавливающее действие. Однако же,

²² Современные средства индивидуальной бронезащиты используют пластины, как правило, толщиной до 6 мм. Считается, что они обеспечивают необходимую защиту от пуль индивидуального ручного автоматического оружия. Конечно, качество современных броневых материалов несравнимо со средневековыми. Но броню большей толщины солдат переносить не может, даже при условии его перевозки транспортными средствами. Поэтому весьма странным представляется поведение средневекового рыцаря, который носил (возил на лошади) толстую броню, пробиваемую стрелами навылет. Зачем он вообще ее носил? Кроме того, П. Джонс [Jones (1)], изучивший для своих экспериментов массив данных о доспехах отмечает, что наибольшая толщина материала (3 мм) была встречена им на шлемах. Мы должны отдавать себе отчет в том, что доспех воина это не бортовая броня корабля, и прочность доспеха обеспечивается не только и не столько его толщиной, а рациональной формой, которая противостоит воздействиям, подобно скорлупе яйца, и к тому же специально разрабатывается для максимального рикошета.

такие наконечники повсеместно распространены в колчаных наборах там, где они сочетаются с находками металлического защитного вооружения (например, в воинских захоронениях Восточной Сибири), и где с большой долей вероятности можно предположить необходимость применения этими захороненными воинами адекватных средств поражения против бронированных целей (т.е. таких же воинов). Однако в настоящее время в отечественной литературе отчего-то повсеместно бытует мнение о том, что срезни использовались исключительно против небронированных целей. Мнение это основано на свидетельствах некоторых средневековых авторов (например, Плано Карпини и т.п.) о том, что для поражения незащищенного противника (например, монголы) использовали стрелы с широкими наконечниками. Вместе с тем, срезни представляют собой, пожалуй, наиболее характерный тип наконечника с черешковым насадом, который, как мы видели, является необходимой чертой устройства бронебойного метательного снаряда.

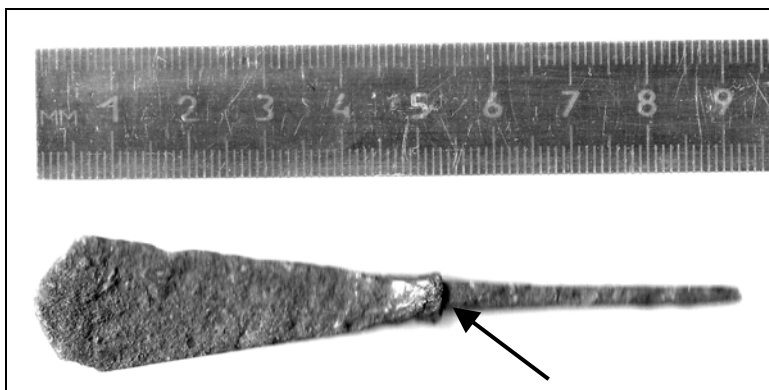


Рис. 6.5. Наконечник стрелы – срезень. Кончик черешка обломлен. Стрелкой показан черешковый упор

Именно черешок воспринимает изгибающее напряжение в месте насада и распространяет изгибающее напряжение на всю глубину своего закрепления в древке. А глубина эта весьма значительна, и во многих случаях она близка к длине рабочей части наконечника, в то время, как глубина втулки в наконечнике по определению всегда меньше длины рабочей части, а ее диаметр меньше диаметра древка. Кроме того, срезень, в отличие от шиловидного наконечника, расширяется в головной части. Следовательно, в момент удара бóльшая масса снаряда находится у поверхности цели. Значит, при прочих равных условиях стрела с наконечником-срезнем испытывает и меньшие изгибающие напряжения; менее вероятен облом ее наконечника, и бóльшая масса стрелы участвует в пробитии преграды.

В отечественной литературе принято называть срезнями чуть ли не все наконечники с расширяющейся рабочей частью, которая имеет либо притупленный, либо вогнутый профиль (обратную стреловидность). Однако, на наш взгляд, эти устройства имеют различное назначение, и их все-таки следует разводить в два разных класса: если срезень с притупленной кромкой может быть рассчитан преимущественно на нанесение поверхностных поврежде-

ний, то экземпляры с обратной стреловидностью или двурогие вполне соответствуют назначению проникающих или бронебойных. Поясним этот тезис.

Исследователи-оружиеведы прошлого приводят изображение Y-образных наконечников арбалетных болтов [Бехайм, С. 304–305; Рис. 491-c,d], указывая, что они “были популярны благодаря своему эффективному воздействию при охоте на серн”, а также применялись при охоте на крупную дичь (рис. 6.6). Конечно же, если с некоторой долей цинизма считать незащищенного броней человека “крупной дичью”, то такое указание находится в рамках общепринятой на сегодня концепции. Однако материалы средневековых оружейных собраний [Бехайм, С. 395, Рис. 603] дают нам образцы наконечников (правда, это наконечники турнирных копий – рис. 6.7), которые использовались исключительно для воздействия на бронированные цели.

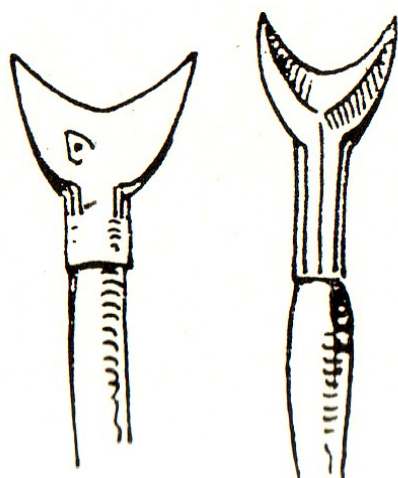


Рис. 6.6. Y-образный наконечник стрелы



Рис. 6.7. Наконечник турнирного копья

Здесь мы видим три заостренных ударника-рога. Если создатели копий имели своей целью уменьшение пробивной способности снарядов в целях предотвращения травматизма, то они снабдили бы их наконечниками по типу тех гуманизаторов, которые хорошо известны участникам современных ролевых игр. К тому же, другие копья, применявшиеся в тех же условиях, имеют лишь по одному острию. Поэтому логично считать, что описанная форма применялась в целях уменьшения скольжения наконечника по броне (рикошета). В самом деле: при фронтальном ударе все три рога стремятся разъехаться в разные стороны и наконечник остается неподвижен (равнодействующая векторов движения равна нулю), а при косом ударе (при отклонении от нормали) велика вероятность того, что хоть один из рогов будет направлен по нормали (то есть по перпендикуляру) к поверхности цели²³.

²³ Напомним, что в условиях турнира броня хотя и пробивалась иногда, но участники не преследовали такой цели: сила воздействия на броню была ограничена пределом прочности древка оружия, для которого применялись непрочные сорта дерева.

Интересные данные о назначении Y-образных срезней может дать их металлографический анализ. Например, Ю.Ю. Моргунов описывает обнаруженный им “двурогий срезень с упором”, который “отличался особым качеством исполнения”. “Его основа была откована из сырцово-стали, а на режущий край с большим мастерством были наварены пластинки из высокоуглеродистой стали” [Моргунов, С. 143–145]. Логично полагать, что упрочнению путем наварки лезвия подверглась рабочая часть изделия, предназначенного для пробития брони²⁴. Как работает такой наконечник?

При фронтальном ударе в цель сразу двумя рогами рикошет маловероятен: острия стремятся “разъехаться” в противоположные стороны и снаряд “прилипает” к поверхности (рис. 6.8, *слева*). При отклонении от нормали в преграду ударяется один из рогов. Если при этом проекция центра тяжести стрелы на поверхность цели (показана стрелкой) близка к проекции продольной оси одного из рогов²⁵, то этот рог входит в цель по нормали (рис. 6.8, *в центре*). Если же снаряд налетает на цель со значительным отклонением от нормали и центр его тяжести не соосен вектору реакции (показан пунктирной стрелкой), то вероятен рикошет и удар по цели древком (рис. 6.8, *справа*).

Посмотрим на изображение упомянутого наконечника с наваренными рогами (рис. 6.9; [Моргунов, Рис. 71-3, С. 144]. Измерением на рисунке нетрудно установить, что угол раствора рогов близок 40°, то есть данный наконечник не рикошетит при углах встречи до 20°. Мы видели выше, по экспериментальным данным П. Джонса, именно такое отклонение от нормали для бронебойного наконечника является критической величиной; отклонение на 20° препятствует пенетрации брони в 2 мм, в случае пробития тонкой брони то же отклонение приводит к значительному уменьшению величины проникновения в заброневое пространство²⁶.

К сожалению, точный масштаб изображения наконечника из цитируемой нами публикации Ю.Ю. Моргунова неизвестен, и можно лишь предполагать, что длина рогов данного наконечника соответствует потенциальной глубине проникновения в заброневое пространство. Названный раскопщик не

²⁴ Правда, суждения самого автора раскопок насчет этого наконечника явно парадоксальны: “Большой проникающей способностью обладали двурогие срезни с упором, которые, судя по этнографическим параллелям с XI до XIV вв., иногда употреблялись и для стрельбы по водоплавающей птице” [С. 145]. Читатель остается в недоумении относительно назначения такой стрелы: зачем для стрельбы по птице нужна большая проникающая способность, и какими этнографическими источниками мог быть зафиксирован способ применения стрел в XI-XIV вв.? К слову, этнографические источники фиксировали у коренных народов Российского Севера, а также у Североамериканских индейцев применение тупой стрелы с деревянным утолщением или перекрестием на месте наконечника.

²⁵ По этой оси располагается вектор сопротивления материала цели.

²⁶ Напомним, что по данным опытов проникновение уменьшается примерно на одну пятую часть с 51 до 43 мм, что может сыграть решающую роль в плане поражения внутренних органов противника.

приводит и значения массы наконечника; информация об этом параметре в сочетании со знанием максимального угла отклонения вектора движения стрелы позволила бы сделать обоснованные предположения относительно координаты ее центра тяжести.

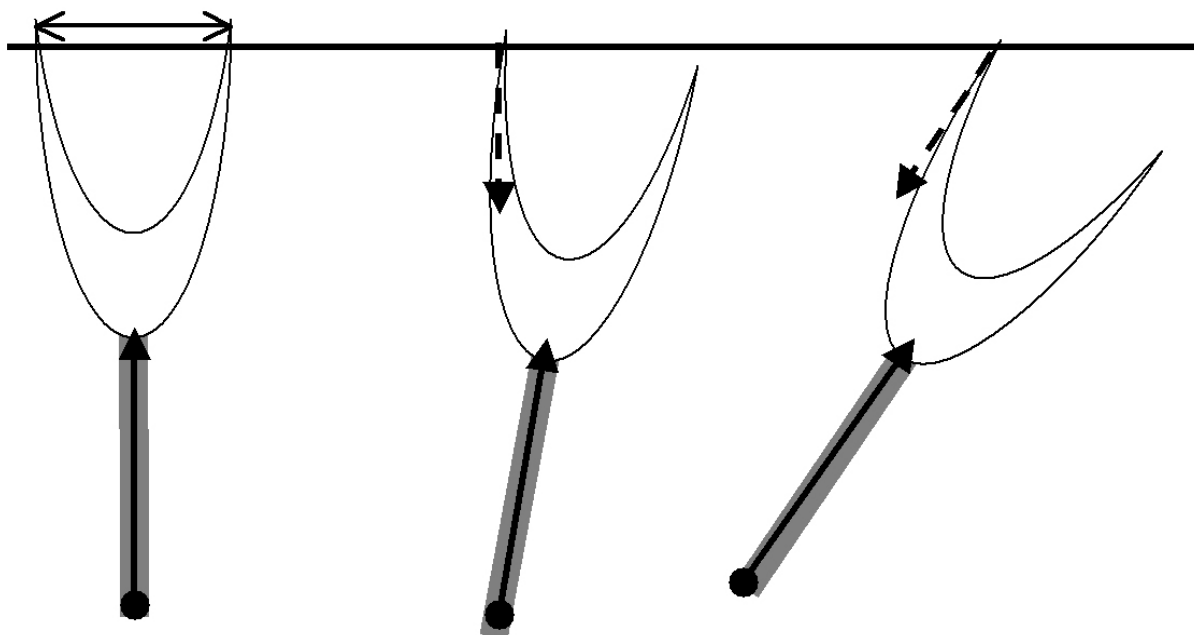


Рис. 6.8. Схема пенетрации Y-образным наконечником

Таким образом, на наш взгляд, всестороннее изучение высказанного предположения о броневой предназначении (в том числе двуругих) срезней может оказаться плодотворным.

Шиловидный наконечник представляет собой тело вращения и его сечение в любой из продольных плоскостей одинаково. Вместе с тем, срезень (в том числе и двуругий) в одной из продольных своих плоскостей дает то же сечение, что и шиловидный наконечник. Следовательно, если от нормального угла встречи отклонена та его плоскость, что имеет большее сечение (он падает “плоскостью на плоскость”), то в плане противодействия рикошету он работает так же, как и шиловидный наконечник, имея перед последним то преимущество, что его режущая кромка шире (либо прочность двух рогов больше), а значит при прочих равных условиях рабочий орган прочнее и менее подвержен деформации (смятию). Конечно, срезень, имеющий два разительно отличных сечения в своих продольных плоскостях, может упасть на цель и так, и эдак.



Рис. 6.9. Y-образный наконечник с наваренными рогами

Возможно, наше предположение о фрикционном механизме пенетрации металлического доспеха не найдет пока экспериментального подтверждения, и бронебойная функция срезня при падении его “ребром на плоскость” останется под сомнением. Однако способность к бронепробиванию при падении “острием на плоскость” представляется несомненной. На наш взгляд, лучник просто не знает какой из плоскостей продольного сечения его наконечник упадет на цель, и не может контролировать этот процесс (стрела может повернуться в полете). Таким образом, если считать, что срезень является бронебойным относительно только одной из перпендикулярных плоскостей продольного сечения, а вероятность падения на цель как “нужной”, так и “не-нужной” плоскостью равна, то для надежного поражения бронированной цели следует лишь увеличить расход посылаемых по ней снарядов. Кроме того, логично ожидать появления в боезапасе лучника и снарядов промежуточного облика, которые сочетают положительные качества как шиловидного наконечника, так и срезня. Такой наконечник широко известен по археологическим данным и описан в литературе под названием лавролистного или листовидного (табл. 6.1).

Таблица 6.1. Пенетрация различными видами наконечников

Тип наконечника	Вероятность рикошета от брони по нормали	Вероятность рикошета при отклонении от нормали
Шиловидный, Р	Относительно низкая	Высокая при смятии носика
Срезень, Н	Зависит от угла встречи?	Зависит от угла встречи?
Двурогий, У	Относительно низкая	До 20° относительно низкая
Листовидный, Р	Средняя в любой плоскости	Средняя в любой плоскости

Мы рассматриваем здесь лишь экстремы возможного сценария соударения: снаряд либо пробивает броню, либо полностью рикошетирует от нее.

В том случае, если пробитие брони достигнуто, плоский наконечник (в нашем случае это срезень или листовидный) образует в ней узкое отверстие, длина которого намного превышает диаметр древка стрелы. При этом длина рабочей (проникающей) части наконечника может оказаться недостаточной для поражения внутренних органов противника (см., например, экземпляр на рис. 6.5). Но если энергия снаряда не исчерпана и его движение в броне продолжается (например, при фронтальном ударе), то черешковый упор, выполненный в виде своеобразной шайбы (показан стрелкой), раздвигает прямые и длинные кромки отверстия, ослабленные разрывом, они легко отгибаются и сам упор, а за ним и древко стрелы входят вовнутрь. При дальнейшем движении древко соприкасается со стенками отверстия всего в двух точках и его затирание минимально. В то же самое время, шиловидный наконечник и его древко находятся в условиях кругового обжатия броней и испытывают постоянное сопротивление трения аналогично тому, что испытывает подкалиберный снаряд противотанковой пушки. Далее необходимо отметить, что в

сравнении с другими наконечниками, вследствие сосредоточенности массы на кончике срезня, последний (при прочих равных условиях) даже при обламывании древка заносит в заброневое пространство наибольшую энергию (определяемую как произведение массы на глубину проникновения в тело). Логично считать, что он производит при этом максимальное останавливающее действие (табл. 6.2). А кроме того, задние кромки рабочей части срезня, вследствие своей обратной стреловидности и в силу схлопывания раневого канала играют в теле жертвы роль невозвратных шипов.

Таблица 6.2. Поражение различными видами наконечников

Тип наконечника	Возможность проникновения в пробитое отверстие доспеха	Возможность нелетальных ран (по цели без брони)
Шиловидный	Высокая	Нет
Срезень	Зависит от угла встречи	Есть
Двурогий	Ограничена длиной рога	Есть
Листовидный	Средняя в любой плоскости	???

Выводы

Мы рассмотрели свидетельства средневековых авторов относительно удобства поражения тех или иных целей (или поверхностей) теми или иными стрелами. Однако, принимая во внимание тактику применения луков в составе войсковых контингентов численностью в сотни и тысячи человек при эшелонированных боевых порядках при высокой плотности огня, считаем возможным утверждать, что слова средневековых авторов следует оценивать в качестве указаний на **вероятность** поражения той или иной цели тем или иным наконечником. Знание того, что тот или иной наконечник хорошо подходит для пробития, к примеру, стальных шлемов мало что дает конкретному солдату: во первых в бою, при беглом или залповом огне в составе роты по плотным боевым порядкам противника, при стрельбе с ходу или с лошади у солдата не бывает индивидуальной цели – цель его групповая, и прицеливаться в конкретный шлем он не может, а копаться в колчане, выбирая нужную стрелу, ему некогда (даже если он помнит, что нужная стрела у него есть). Во-вторых, вопросы боепитания всякого воинского подразделения решает его командир в соответствии с тактическими задачами предстоящего боя. Следовательно, если известно пред боем, что противник бронирован (известна степень защищенности и количество бронированных целей), то командир соответственно увеличивает долю бронебойных снарядов в боезапасе своих воинов, повышая, таким образом, действенность их огня. И здесь, на наш взгляд, можно говорить о прямой аналогии с соответствующими принципами планирования современного танкового боя. Кроме того, мы знаем, что носимый боезапас лучника включал в себя десятки стрел. Логично считать, что это были стрелы разного назначения, а точнее стрелы, дающие раз-

личную вероятность поражения бронезащиты и открытых частей тела воинов и лошадей, для случаев прямого или косого удара по броне, для случаев попадания в щиты или кирасы и т.п. Иными словами, вероятность поражения цели увеличивалась за счет ее обстрела множеством различных снарядов. Можно ли здесь обсуждать абсолютные числа? Средневековые европейские теоретики военного дела рекомендовали иметь в войске от двух-трех до девяти лучников на одного тяжеловооруженного (бронированного) всадника [Hardy, P. 121]. Данные о составе средневековых европейских армий, основанные на ведомостях выдачи денежного довольствия, свидетельствуют, что на одного рыцаря на практике приходилось не менее двух-трех лучников [Hardy, P. 59, 79]²⁷. Из хозяйственных документов тех лет известно, что для снабжения армии, численность которой составляла десятки тысяч человек, количество поставляемых стрел в рамках одной военной кампании измерялось миллионами [Hardy, P. 83], а в армейских интендантских запасах количество луков и стрел доходило до соотношения 1 к 96 [Hardy, P. 85].

Таким образом, можно считать, что максимальный расход боеприпасов на поражение одного рыцаря в пределах одного боя теоретически мог иметь порядок сотен стрел. Очевидно, что в этой массе стрел могли быть стрелы разного типа, и сочетание уязвимой поверхности с подходящей стрелой при достаточном угле встречи и необходимой энергии находилось в области теории вероятности. Вся эта туча разных стрел выпускалась в ассортименте одновременно с надеждой пробить если не шлем рыцаря, так нагрудник, а не нагрудник, так щит, а если ни то и не другое, так хотя бы изранить его лошадь. Аналогичную возможность в дуэльной ситуации имеет артиллерийский корабль: все его пушки могут вести сосредоточенный огонь по одной и той же цели, увеличивая вероятность ее поражения (если не поясной брони вражеского корабля, то его незащищенных надстроек и т.п.). Прибегая еще к одной аналогии из современного военного дела, напомним способ снаряжения лент скорострельных авиапулеметов: здесь пули разного назначения (бронбойные–зажигательные–осколочные) чередуются между собой, чтобы повысить вероятность поражения самолета противника в случае попадания в него.

Конечно, то, о чем мы говорили, представляет собой пока лишь примитивную вербальную модель: в самом начале мы намеренно отошли от конкретных параметров цели, рассматривая механизм пробивания некоей абстрактной тонкой бронепластины. Мы должны отдавать себе отчет и в том, что в отличие от воина, защищенного фортификационными сооружениями, всякая самоходная цель на поле боя имеет участки, в принципе неподдающиеся бронированию (аналогичные движителю и ходовой части), в свою очередь, броня имеет уязвимые места в точках крепления, а сами бронированные поверхности – заманы

²⁷ Например, войско Эдуарда I во время вторжения в Шотландию в 1298 г. состояло из более чем 10000 пеших лучников, причем три лучника приходились на одного конного воина [DeVries, P. 37].

для снарядов. Кроме того, бронепластины могли быть нашиваемы на внутреннюю поверхность одежды, да и само защитное вооружение во многих случаях не было металлическим, даже в условиях развитого металлургического производства и металлообработки – достаточно вспомнить льняные панцири античности, хлопчатобумажные доспехи китайских воинов, кожи и шкуры германцев и скандинавов²⁸. То есть, реальные условия пробития брони и рикошета с поверхностей имеют много вариантов. Тем не менее, считаем предложенный материал первым шагом на пути создания теории бронепробития малых энергий. Движение в этом направлении поможет понять логику развития вооружений; видимо, сплошные доспехи появились для увеличения рикошета, а огнестрельное оружие, в свою очередь, завоевало свои позиции потому, что пуля самого посредственного мушкета летела быстрее стрелы и при любых углах встречи не рикошетила от самого блестящего доспеха?

Хочется верить, что намеченное нами направление позволит преодолеть профессиональную инкапсуляцию историков и баллистик и вызовет дискуссию специалистов различных областей знания.

²⁸ Интересна точка зрения Якова I Английского на вес доспеха, как лимитирующий фактор его развития. Король полагал, что тяжеловооруженный рыцарь (видимо, в случае падения с седла или неадекватного поведения лошади) представляет опасность для собственных пехотинцев: “Armor was an admirable invention, for while it protected the wearer from being hurt, it effectually prevented, but it’s weight, the wearer causing injury to others” (Цит по: [Hurley, P. 22]). Кроме того, на наш взгляд, пехота в окружении рыцаря, на котором сосредоточили огонь лучники противника, подвергается повышенной вероятности поражения как теми стрелами, которые не попали в рыцаря, так и теми, что рикошетировали от него.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дорогой читатель, если вы добрались до конца этой книги, преодолев все формулы, гипотезы и “темные” места, то наша благодарность и восхищение вами будут вполне закономерны.

Что можно сказать в заключение? Отдельные результаты проделанной работы применительно к поставленным задачам были описаны нами в соответствующих главах, и повторять их здесь, наверное, нет необходимости. Стоит сказать лишь то, что успешность произведенных пионерских разработок не вызывает сомнения у авторов и рецензентов.

Но кроме формулирования актуальных задач исторической баллистики стрел и описания предложенных нами исследовательских подходов прочитанная вами книга, как представляется, может быть положена в качестве “первого камня” в строительство новой исследовательской парадигмы историка и археолога. Именно в этом нам видится ее общественная миссия и совокупный итог нашей деятельности.

Фраза из книги Ральфа Пейн-Галлуэя, вынесенная в эпиграф первой главы, относится к векам давно минувшим. Однако нам показалось, что она вполне адекватно отражает текущую ситуацию в области изучения исторической баллистики стрел в нашей стране. В самом деле: зайдите на любой сайт исторических реконструкторов или историков вооружений. Форумы, имеющиеся там, содержат множество публикаций, в том числе дискуссионного характера. Но вот что настораживает: область базы данных, состоящая в постоянном обороте, и базы правил восходят едва ли не к паре публикаций отечественных авторов почти полувековой давности.

Разумеется, современная научная (особенно “гуманитарная”) молодежь в массе своей в силу специфики своего социального опыта (или, вернее, в силу его отсутствия) имеет весьма туманное представление о физическом смысле явления выстрела из какого-либо оружия. И, конечно же, наша книга не может враз “просветить” всех, кто занимается историей, и при этом прочно забыл основы школьных курсов физики и геометрии, а о законах баллистики вообще никогда не слышал. Но мы надеемся, что полученные нами теоретические результаты убедительны в той степени, которая побудит историков и археологов вне зависимости от курса обучения или обладания научными степенями заняться самообразованием в области естественных и точных наук.

Представленная здесь работа имеет и практические следствия: наши пакеты прикладных программ не только получили Государственную регистра-

цию, но и были проверены в ходе исследовательской практики известных научных центров и по ним получены Акты внедрения.

Предложенные на ваш суд результаты открывают перед неограниченным кругом исследователей направления для экспериментальной проверки выводов, полученных аналитически. А в качестве ближайшей перспективы мы заявляем о выпуске книги, посвященной анализу фортификаций нескольких археологических памятников, с точки зрения исторической баллистики.

Разумеется, мы далеки от утверждения истины в последней инстанции, а потому будем крайне благодарны за любые отклики по данной работе.

Ваши критические замечания вы можете высылать авторам по адресу:

Россия, 426011, г. Ижевск, а/я 3925.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arab archery. An Arabic manuscript of about A.D. 1500 "A book on the excellence of the bow & arrow" and the description thereof. – Princeton: Princeton University Press, 1945. – 182 p.
2. Arrow velocity // Режим доступа: [<http://www.student.utwente.nl/~sagi>].
3. *Ascham Roger, Ford, Horace A.* Toxophilus. – London: Derrydale Press, 2000. – 172 p.
4. *Baker T.* Bow design and performance // The traditional bower's Bible. Vol. 1. – NY, 1992. – P. 43–116.
5. *DeVries K.R.* Medieval military technology. – Peterborough: Broadview Press, 2003. – 340 p.
6. *Hardy R.* Longbow: a social and military history. – New York, 1977. – 216 p.
7. *Hurley V.* Arrows against steel: the history of the bow. – New York: Maison/Charter, 1975. – 238 p.
8. *Jackson S.* Javascript Archery Ballistics Calculator V2.08 // Режим доступа: [<http://home.att.net/~sajackson/archery.html>].
9. *Jessop O.* A new artefact typology for the study of Medieval arrowheads // Medieval archaeology. – Vol. 40 (1996). – P. 192–205.
10. *Jones P. (1)* The metallography and relative effectiveness of arrowheads and armor during the Middle Ages // Materials characterization. Series Metallurgy. – 1992. – № 29. – P. 111–117.
11. *Jones P. (2)* The target // Hardy R. Longbow: a social and military history. – New York, 1977. – P. 204–208.
12. *Jurens W.R.* Exterior Ballistic with Microcomputer // Warship International. – 1984. – № 1. – P. 49–72.
13. *Kooi B.W.* Archery and mathematics modeling // Режим доступа: [<http://www.student.utwente.nl/~sagi/articles/has/archghh.html>].
14. *McEwen E., Miller R.L., Bergman C.A.* Early Bow Design and Construction // Scientific American. – 1991. – № 6.
15. *Soar H.D.H.* The crooked stick: a history of the bow. – Yardley: Westholme, 2005.
16. There more to an arrow than speed. // Режим доступа: [<http://crossbow.com/news.asp>].
17. *Thomas D.H.* Archaeology. Orlando (Florida), 1998. – 736 p.
18. *Ward-Perkins J.B.* London museum medieval catalogue 1940. – London: Anglia Publishing, 1993. – 319 p.
19. *Белавин А.М.* Комплекс метательного оружия из раскопок Рождественского археологического комплекса на р. Обва // Современный музей как важный ресурс развития города и региона: Материалы международной научно-практической конференции. – Казань, 2005. – С. 159–164.
20. *Белевич М.Ю.* Гидромеханика. Основы классической теории. – СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2005.
21. *Бехайм В.* Энциклопедия оружия / Пер. с нем.; Предисл. А.Н. Кирпичникова; Коммент и прилож. С.Е. Ерёменко, В.М. Милованов, М.Ю. Некрасов. – СПб.: АО "Санкт-Петербург оркестр", 1995. – 576 с.

22. *Борзяк Э.И. и др.* Анатомия человека. – М., 1993. – 554 с.
23. *Борисенко А.Ю., Ведерников Ю.А., Худяков Ю.С.* Анализ проникающих возможностей ударников и прочностных характеристик средневековых защитных доспехов воинов Западной и Южной Сибири // Интеграция археологических и этнографических исследований: Сборник научных трудов / Гл. ред. Н.А. Томилов. – Омск: Издательский дом “Наука”, 2005. – С. 61–64.
24. *Ведерников Ю.А., Худяков Ю.С., Омелаев А.И.* Баллистика. От стрел до ракет. – Новосибирск, 1995. – 236 с.
25. *Вейс Г.* История культуры: Костюм. Украшения. Предметы быта. Вооружение. Храмы и жилища. Обычаи и нравы. – М., 2002. – 960 с.
26. *Вентцель В.А.* Внешняя баллистика. – М.: Издание ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 1952.
27. *Генинг В.Ф., Голдина Р.Д.* Позднеломоватовские могильники в Коми-Пермяцком округе // Вопросы археологии Урала. – Вып. 9. – Свердловск, 1970. – С. 30–56.
28. *Голдина Р.Д.* Ломоватовская культура в Верхнем Прикамье. – Иркутск, 1985. – 280 с.
29. *Гордон Дж.* Луки и катапульты. Конструкции, или почему не ломаются вещи // Режим доступа: [<http://xlegio.enjoy.ru>].
30. *Горелик М.В.* Монгольские наконечники стрел // Режим доступа: [<http://steppe.hobi.ru/materials/gorelic-04.shtml>]
31. *Дворецкий И.Х.* Латинско-русский словарь. – М., 2002. – 846 с.
32. *Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н., Богодистов С.С.* Внешняя баллистика: Учебник для студентов вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.
33. *Иванова М.Г.* Иднакар: Древнеудмуртское городище IX–XIII вв.: Монография. – Ижевск, УдНИИ УрО РАН, 1998. – 294 с.
34. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
35. Кинетическая энергия стрелы у цели // Режим доступа: [<http://mail.alexander6.ru/pipermail/rpg-bazar/2002-september/010394.html>].
36. *Кирпичников А.Н., Медведев А.Ф.* Вооружение // Древняя Русь. Город, замок, село. – М., 1985. – С. 298–363.
37. *Коновалов А.А., Николаев Ю.В.* Внешняя баллистика. – М.: ЦНИИ информации, 1979. – 228 с.
38. *Коробейников А.В., Кроуфорд К.Р., Митюков Н.В., Мокроусов С.А.* Компьютерный расчет таблиц стрельбы метательных снарядов на дозвуковых скоростях // Археология и компьютерные технологии: представление и анализ археологических материалов: Мат. Всеросс. конф. (Глазов, 18–21 июля 2005 г.). – Ижевск: Изд-во НИСО УрО РАН, 2005. – С. 106–110.
39. *Коробейников А.В., Мингалёв В.В.* Стрела из могильника Пыштайн: неизвестный ранее тип? // Военная история: Если бы...: Материалы международной научной конференции (Екатеринбург-Ижевск, 11-12 марта 2006 г.). – В двух частях. Ч.1. Математические методы в исторических исследованиях. – Ижевск: Изд-во КИГИТ; Екатеринбург: Изд-во Гуманитарного университета, 2006. – С. 117–134.
40. *Коробейников А.В., Митюков Н.В. (1)* Проблематика баллистики цели по археологическим данным // Взаимодействие народов Евразии в эпоху великого переселения народов: Мат. межд. симпоз. (Ижевск, 22–24 июня 2005 г.). – Ижевск: Изд-во Удмуртский университет, 2006. – С. 338–347.
41. *Коробейников А.В., Митюков Н.В. (2)* Программа реконструкции проектных параметров стрелы по археологическим следам «Osseus v 1.0» // ГР в ВНИИЦ 02.02.2006 №

50200600112. – Отраслевой фонд алгоритмов и программ 31.01.2006 № 5624. – Заявл. 21.12.2005 № 03524577.01297-01 99 01.

Коробейников А.В., Митюков Н.В. Программа реконструкции проектных параметров стрелы по археологическим следам «Osseus v 1.0» // Компьютерные учебные программы и инновации. – 2007. – № 2.

Korobejnikov A.V., Mitjukov N.V. «Osseus v 1.0» // Computing teaching programs and innovation. – 2007. – № 2.

42. *Коробейников А.В., Митюков Н.В. (3), Мокроусов С.А.* Программа реконструкции баллистических характеристик лука и стрелы по параметрам костяного наконечника «Archer v 2.0» // ГР в ВНИИЦ 14.10.2005 № 50200501462. – Отраслевой фонд алгоритмов и программ 10.10.2005 № 5271. – Заявл. 11.09.2005 № 03524577.01141-01 99 01.

Коробейников А.В., Митюков Н.В., Мокроусов С.А. Программа реконструкции баллистических характеристик лука и стрелы по параметрам костяного наконечника «Archer v 2.0» // Компьютерные учебные программы и инновации. – 2006. – № 12.

Korobejnikov A.V., Mitjukov N.V., Mokrousov S.A. «Archer v 2.0» // Computing teaching programs and innovation. – 2006. – № 12.

43. *Коробейников А.В., Митюков Н.В. (4), Мокроусов С.А., Иванов П.Н.* О реконструкции параметров стрелы с костяным наконечником // Археология и компьютерные технологии: представление и анализ археологических материалов: Мат. Всеросс. конф. (Глазов, 18–21 июля 2005 г.). – Ижевск: Изд-во НИСО УрО РАН, 2005. – С. 100–105.

44. *Коробейников А.В., Митюков Н.В. (5), Мокроусов С.А., Иванов П.Н.* Программное обеспечение для реконструкции археологических артефактов // Вестник ИжГТУ [Текст]: периодический научно-теоретический журнал Ижевского государственного технического университета. – 2006. – №3. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2006. – С. 21–23.

45. *Коробейников С.Н., Худяков Ю.С., Шутов А.В.* Сравнительный анализ защитного вооружения номадов Центральной Азии методом математического моделирования // Вычислительные методы и программирование. – 2004. – Т. 5. – С. 197–213.

46. Криминалистическое исследование метательного оружия // Режим доступа: [http://arbalet.h1.ru/read_zakon_expertiza.php].

47. *Ландсберг Г.С.* Курс физики. Т. 1. – М., 1944. – 410 с.

48. *Лещинская Н.А.* Отчёт об исследованиях Еманаевского городища и могильника. – Устинов, 1986 // Архив ЛАИ УдГУ. – Ф. 2. – Д. 216.

49. Луки спортивные и стрелы к ним. Технические требования // Режим доступа: [www.archery.ru/article/6&text].

50. *Макаров Л.Д.* Древнерусские памятники среднего течения р. Пижмы // Проблемы средневековой археологии волжских финнов. Серия: Археология и этнография. – Вып. 23. – Йошкар-Ола, Изд-во МарНИИ, 1994. – С. 155-184.

51. *Медведев А.Ф.* Ручное метательное оружие VIII-XIV вв. // Свод Археологических Источников. – Вып. ЕИ-36. – М., 1966. – 184 с.

52. *Мингалёв В.В.* Отчёт о научно исследовательской работе. Археологические раскопки могильника Пыштайн II в Гайнском районе Коми-Пермяцкого автономного округа в 2005 году // Кабинет археологии и этнографии Пермского Государственного Университета.

53. *Мокроусов С.А., Митюков Н.В.* Программа определения баллистических характеристик снаряда // Информационные технологии в инновационных проектах: Тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск, 2003. – Ч. 2. – С. 57–59.

54. *Моргунов Ю.Ю.* Сампсониев Остров: Пограничная крепость на посульской окраине Южной Руси в XI–XIII вв. – М.: Наука, 2003. – 187 с.

55. Общетехнический справочник. – М.: Машиностроение, 1982. – 415 с.

56. *Окунев Б.Н.* Основы баллистики. – М.: Военное издательство Народного комиссариата обороны, 1943.
57. *Пейн-Голлуэй Р.* Книга арбалетов. История средневекового метательного оружия / Пер. с англ. Е.А.Каца. – М.: ЗАО Центрполиграф, 2006. – 415 с.
58. *Руденко К.А.* Железные наконечники стрел VIII–XV вв. из Волжской Булгарии. Исследование и каталог. – Казань: Изд-во “Закон”, 2003. – 512 с.
59. *Сихарулидзе Ю.Г.* Баллистика летальных аппаратов. – М.: Наука, 1982. – 352 с.
60. *Сунгатов Ф.А., Гарустович Г.Н., Юсупов Р.М.* Приуралье в эпоху Великого переселения народов. (Старо-Муштинский курганно-грунтовый могильник). – Уфа, 2004.
61. *Тихонов Е.Н.* Криминалистическая экспертиза холодного оружия: Учебное пособие. – Барнаул, 1987 // Режим доступа: [www.archery.ru/article/6&text=%D2%].
62. *Тутевич В.Н.* Теория спортивных метаний. – М.: Физкультура и спорт, 1969. – 312 с.
63. *Умняшкин В.А., Сазонов В.В., Филькин Н.М.* Тягово-скоростные свойства и топливная экономичность автомобиля. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1999. – 60 с.
64. *Федосьев В.И., Синярев Г.Б.* Введение в ракетную технику. – М.: Оборонгиз, 1961. – 506 с.
65. Холодное и метательное оружие: криминалистическая экспертиза / Всё об арбалетах: арбалетно-лучный портал // Режим доступа: [http://arbalet.h1.ru/read_zakon_expertiza.php].
66. *Храмов С.Н.* Методические указания к аэродинамическому расчету. – Ижевск: Изд-во ИМИ, 1981. – 23 с.
67. *Худяков Ю.С.* Вооружение кочевников Южной Сибири и Центральной Азии в эпоху развитого средневековья. – Новосибирск: Издательство института археологии и этнографии СО РАН, 1997. – 160 с.
68. *Чернозубов А.Д. и др.* Внешняя баллистика. Ч.1. – М.: Артиллерийская инженерная академия имени Ф.Э.Дзержинского, 1954.
69. *Черных Е.М.* Отчёт о спасательных работах на Боярском “Арай” могильникев каракулинском районе УР летом 2003 г. – Ижевск, Архив ЛАИ УдГУ, 2004.
70. *Шапиро Я.М.* Внешняя баллистика. – М.: Государственное издание оборонной промышленности, 1946.
71. *Шокарев Ю.В.* Луки и арбалеты. – М.: Изд-во АСТ, 2001. – 173 с.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КООРДИНАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ОТРАСЛЕВОЙ ФОНД АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО ОБ ОТРАСЛЕВОЙ
РЕГИСТРАЦИИ РАЗРАБОТКИ**

№ 5271

Настоящее свидетельство выдано на разработку:

**Программа реконструкции баллистических характеристик
лука и стрелы по характеристикам костяного наконечника
«Archer v2.0»**

зарегистрированную в Отраслевом фонде алгоритмов и программ.

Дата регистрации: 10 октября 2005 года

Авторы: Коробейников А.В., Митюков Н.В., Мокроусов С.А.



Директор  Е.Г. Калинин

Руководитель ОФАП  А.И. Галкина

Дата выдачи 21.10.2005



АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ДИНАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ОНД АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ

**СТВО ОБ ОТРАСЛЕВОЙ
РЕГИСТРАЦИИ РАЗРАБОТКИ**

№ 5624

Настоящее свидетельство выдано на разработку:

**Программа реконструкции проектных параметров стрелы
по археологическим следам «Osseus v1.0»**

зарегистрированную в Отраслевом фонде алгоритмов и программ.

Дата регистрации: 31 января 2006 года

Авторы: Коробейников А.В., Митюков Н.В.



Директор  Е.Г. Калинин

Руководитель ОФАП  А.И. Галкина

Дата выдачи 10.02.2006



Алексей Владимирович Коробейников (р. 1961)

Окончил исторический факультет Удмуртского государственного университета. Занимался стрелковым спортом: выполнил норматив первого разряда по стрельбе из пистолета по силуэтам. После службы в Советской Армии работал в отделе режима Ижевского механического завода, где занимался обеспечением сохранности огнестрельного оружия и боеприпасов. Затем получил специальное военное образование и проходил действительную службу в территориальных органах Госбезопасности в Воткинске. В настоящее время – капитан в отставке, пенсионер по инвалидности. Опубликовал шесть монографий

и свыше 130 статей по различным аспектам исторической реконструкции. Живет в Ижевске.

Многое из написанного им доступно по ссылке:

<http://www.udmurtology.narod.ru/library/korobeynikov>



Николай Витальевич Митюков (р. 1969).

Служил на должностях технического состава частей, обеспечивавших ПВО Ограниченного контингента Советских войск в Афганистане. После демобилизации с отличием окончил Ижевский государственный технический университет по специальности «Ракетостроение». Работал преподавателем кафедры «Тепловые двигатели и установки» и в Ижевской пиротехнической лаборатории (имеет международный сертификат пиротехника). Защитил кандидатскую диссертацию по специальностям: «Экспериментальная механика машин», «Двигатели

летательных аппаратов». В настоящее время – лейтенант запаса, проректор по науке Камского института гуманитарных и инженерных технологий. Опубликовал около двухсот научных работ по истории флота, моделированию боевых действий и вопросам боевого применения ракетно-артиллерийского вооружения (в т.ч. закрытые статьи и технические отчеты оборонной тематики, девять монографий, двенадцать свидетельств государственной регистрации на созданные оригинальные программные продукты). Награжден почетными грамотами ЦК ВЛКСМ и Министерства образования России. Живет и работает в Ижевске.

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 проникатели малых энергий.....	104
6.1. Некоторые концептуальные аналоги.....	105
6.2. О научном подходе к моделированию бронепробивания.....	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.