

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛОТО-РЕЗАНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

М. А. Кислов

ГБУЗ МО «Бюро СМЭ», Москва

Кафедра судебной медицины ФУВ ГБУЗ МО МОНИКИ им. М. Ф. Владимирского, Москва

Аннотация: В статье рассматривается применение математического моделирования методом конечных элементов для прогнозирования разрушения плоских костей при воздействии колюще-режущего орудия при внедрении и извлечении клинка ножа в кость. Проведенное моделирование показало, что концентрация эквивалентных напряжений на вершине зависит от величины прикладываемых сил и четко соответствует моделируемому наклону лезвия клинка, что полностью подтверждает полученные автором данные при макроскопическом исследовании колото-резаных повреждений плоских костей.

Ключевые слова: колото-резаные, математическое моделирование, нож, повреждение, метод конечных элементов

MODELING OF STAB INJURIES BY THE METHOD OF FINITE ELEMENT ANALYSIS

M. A. Kislov

Abstract: The article discusses the use of mathematical modeling by the finite element method to predict the destruction of the flat bones, when exposed to a bladed weapon for introduction and extraction of the blade of the knife into the bone. The simulation showed that the concentration of equivalent stress on top depends on the magnitude of the applied forces, and clearly corresponds to the simulated tilt of the blade, which is fully confirmed by the data obtained in the macroscopic study of stab injuries of the flat bones.

Keywords: stab, mathematical modeling, knife, damage, finite element method

<http://dx.doi.org/10.19048/2411-8729-2017-3-3-18-24>

◇ ВВЕДЕНИЕ

Работ, посвященных проблеме колото-резаных ранений, довольно много. Судебные медики рассматривали морфологические особенности колото-резаных повреждений различных тканей человека. Описано много признаков, морфологических особенностей повреждений, позволяющих идентифицировать орудие, направление удара. Изучены и широко освещены особенности повреждений кожного покрова, причиненных различными орудиями, даже с учетом преграды, через которую проходит нож [1; 2; 8].

Между тем при всестороннем изучении ран кожного покрова вниманием специалистов почему-то обойдены подлежащие костные структуры. Кроме того, следует признать, что в работах прошлого столетия морфология повреждений плоских костей отражена в соответствии с уровнем знаний, который был актуален на тот период времени [3]. В настоящий момент автору представляется необходимым более детально и глубоко остановиться на этом вопросе – уже с позиций технических дисциплин, внедренных в медицину. В частности, автор предлагает рассмотреть колото-резаные повреждения плоских костей с позиции теории резания материалов.

◇ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Произвести моделирование колото-резаной травмы методом конечно-элементного анализа (*англ.* Finite Element Analysis, FEA).

2. Изучить на экспертном материале морфологические свойства колото-резаных повреждений в зависимости от условий нанесения повреждений.

◇ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе применялись: визуальный, стереоскопический, сравнительный методы исследования. Моделирование взаимодействия колюще-режущего орудия и плоской кости выполнено в среде Autodesk Inventor

Professional 2012 (зарегистрированная лицензионная версия для преподавателей).

Аналізу подвергнуто 59 408 судебно-медицинских экспертиз трупов с насильственной смертью (из них 160 экспертиз выполнено лично) с 2009 по 2013 год. В структуре насильственной смерти за рассматриваемый период колото-резаные повреждения встречались в 1896 наблюдениях, что составило 3,2%. Было проведено 520 собственных экспериментальных колото-резаных повреждений плоских костей.

В формировании колото-резаных повреждений, напряжений (и их изменения) в материале, возникающих в области режущих кромок клинка (главной и дополнительных), а также поведения следовоспринимающего объекта в процессе резания мы использовали метод конечно-элементного анализа (*англ.* Finite Element Analysis, FEA), широко применяемый при решении задач в таких областях физики, как механика деформируемого твердого тела, электро- и магнитостатика, а также ряде других.

Потребность в решении подобных задач возникает в системах автоматизированного конструирования (САЕ) для моделирования поведения изделия в цифровом виде, не прибегая к изготовлению самого изделия или его макета. Типичными примерами процессов, моделирование которых на компьютере позволяет значительно сократить расходы на испытания, являются продувка в аэродинамической трубе и аварийные испытания (крэш-тесты). Конечно-элементный анализ основан на использовании математического метода конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела в науке «сопротивление материалов», теплообмена, гидро- и электродинамики.

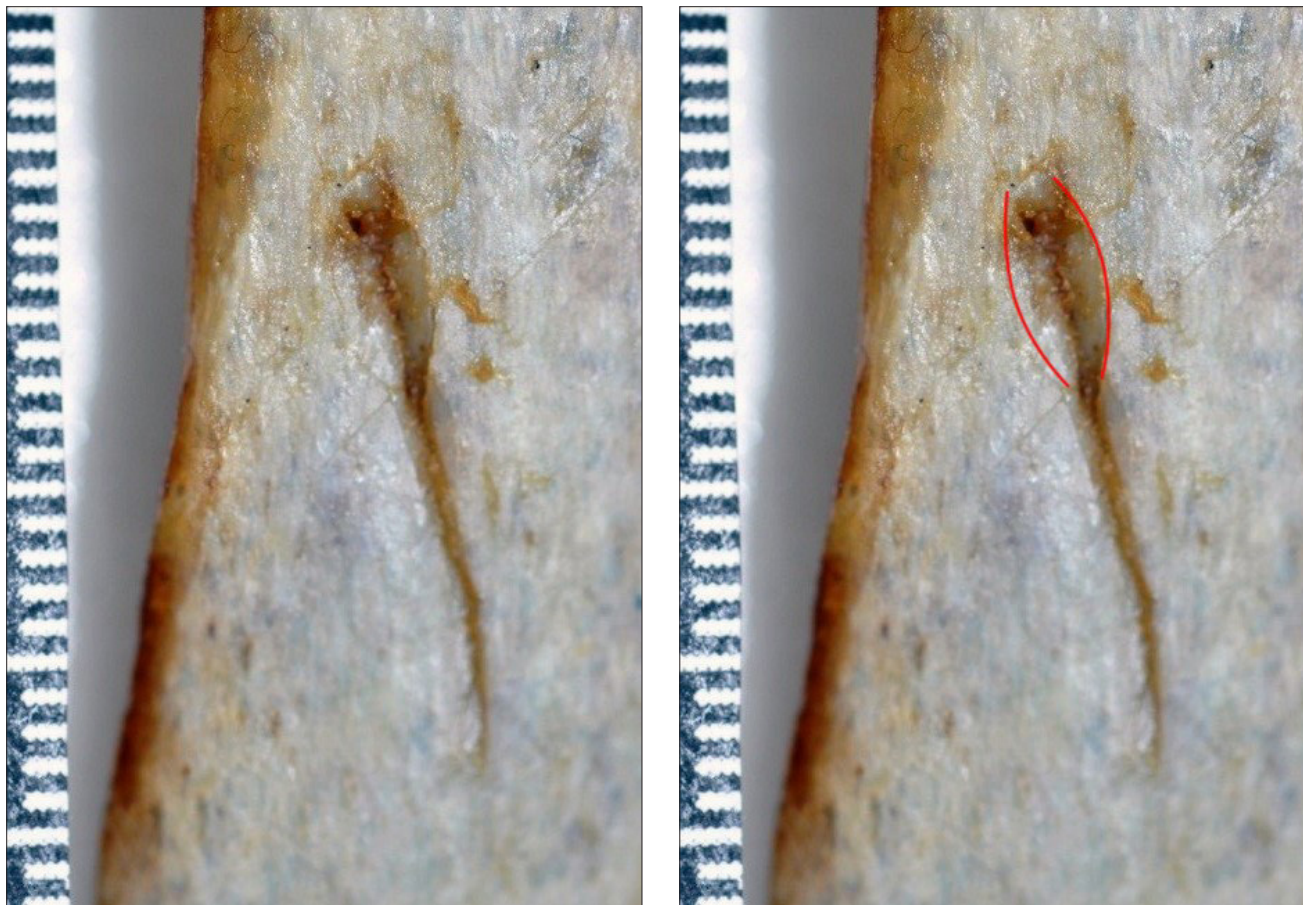


Рис. 1. Скошенность стенок при перпендикулярном внедрении ножа относительно плоскости ребра (вид со стороны НКП)

Суть метода следует из его названия. Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции (аппроксимация, или приближение – научный метод, состоящий в замене одних объектов другими, в том или ином смысле близкими к исходным, но более простыми). В простейшем случае это полином (многочлен) первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны.

Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ.

Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид (разреженность соответствует системе со слабыми связями), что существенно упрощает ее решение. С развитием вычислительных средств возможности метода постоянно расширяются, также расширяется и класс решаемых задач. Практиче-

ски все современные расчеты на прочность проводят, используя МКЭ.

Для дальнейшей оценки механики разрушения плоской кости нами использованы данные теоретической механики.

Модель плоской кости (ребра) была выполнена в виде пластины с длиной граней 15 и 150 мм, толщиной 8 мм. Упрочнение, введенное нами при моделировании, – материал ребра нами рассматривался как изотропная среда. Прочностные характеристики: плотность кости $1,02 \text{ г/см}^3$ и коэффициент Пуассона 0,2, Модуль Юнга $1,38 \cdot 10^3 \text{ кг/мм}^2$.

Исследовались напряжения, образующиеся в нескольких направлениях в материале кости при внедрении клинка, которые затем суммировались для получения эквивалентного напряжения (напряжение по Мизесу).

Полученные данные математического моделирования сравнивались с экспериментальными колото-резаными повреждениями ребер. Экспериментальные вколы проводили с учетом переживаемости тканей в конце первых – начале вторых суток после наступления смерти. Глубина погружения клинка нами выбрана 5,4 см. Толщина клинка (по толщине средней части обуха) – 0,12 см. Ширина клинка на уровне погружения – 1,88 см. Вколы клинка ножа производили вдоль слоистости наружной компакты (угол отклонения до $29\text{--}30^\circ$). Средняя длина повреждений составила $(19,3 \pm 1,5)$ мм, наибольшая ширина со стороны наружной костной пластинки (далее – НКП) была равна $(2,0 \pm 0,8)$ мм, а ширина между углами тупого конца (по ребру повреждения) – $(1,0 \pm 0,1)$ мм.



Рис. 2. Скошенность стенки со стороны наклона ножа (вид со стороны НКП)



Рис. 3. Вторичный скол на наружной костной пластинке, образовавшийся при извлечении клинка с наклоном на левую сторону



Рис. 4. «Возвратная» трещина, отходящая от острого угла, образовавшаяся при извлечении клинка ножа с наклоном на правую сторону и с нажимом на лезвие



Рис. 5. Вторичный скол на наружной костной пластинке, образовавшийся при извлечении клинка

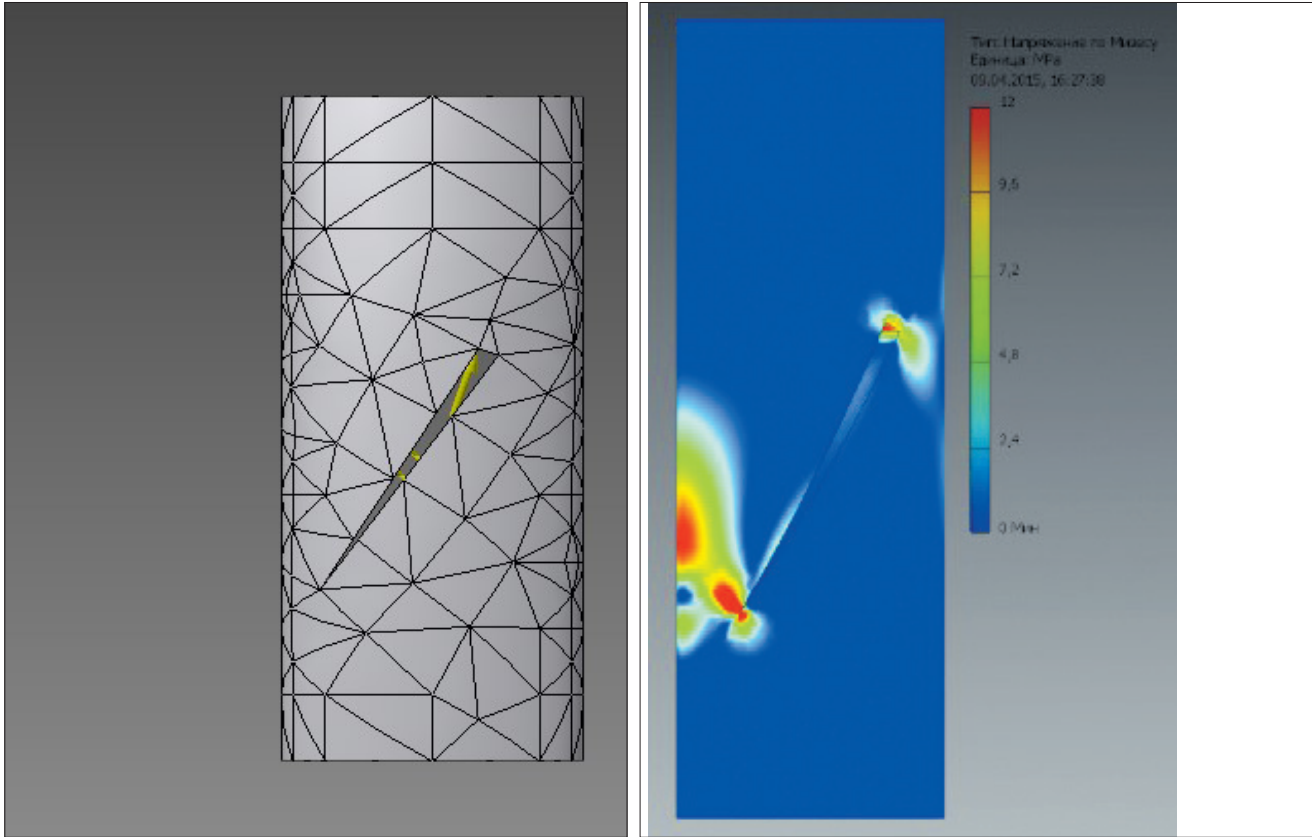


Рис. 6. Модель ребра с повреждением: концентрация напряжений соответствует вершинам, наибольшая концентрация напряжений соответствует действию лезвия

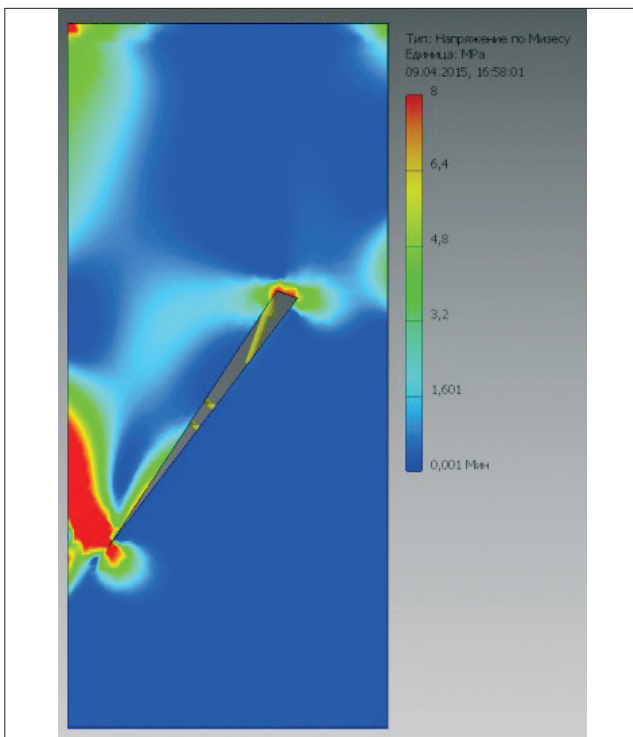


Рис. 7. Распределение напряжений по Мизесу в модели ребра при несимметричном нагружении, имитирующем наклон клинка на левую сторону

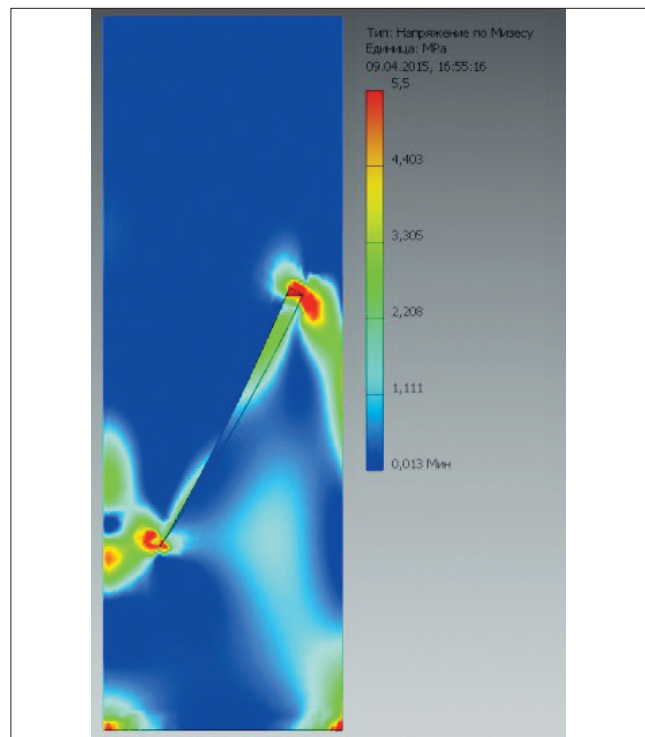


Рис. 8. Распределение напряжений по Мизесу в модели ребра при несимметричном нагружении, имитирующем наклон клинка на правую сторону

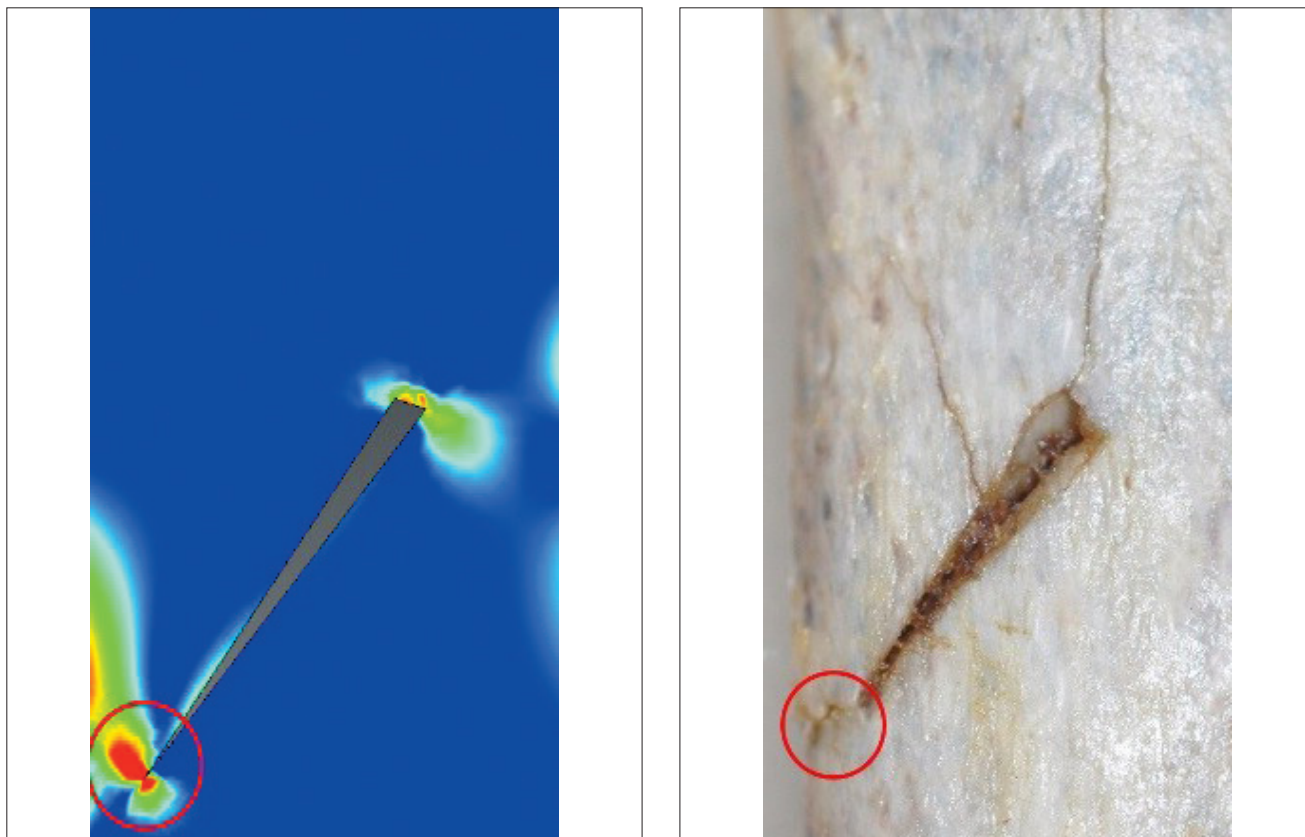


Рис. 9. Схожесть места прогнозируемого разрушения в конечно-элементной модели (наибольшая концентрация пиковых напряжений) и нативного экспериментального нарушения целостности кости

Условия формирования повреждений костей при колюще-режущем воздействии мы рассматривали как статическое нагружение объекта индентором (поступательное движение руки с ножом со скоростью до 10 м/с).

◇ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование повреждений плоских костей позволило определить:

■ 1. Направление удара.

При перпендикулярном воздействии к плоскости по обоим краям повреждения регистрировались смятия компакты в виде мелких площадок, ограниченных трещинами (рис. 1).

При вхождении клинка ножа в кость под углом смятие компакты наблюдалось преимущественно со стороны наклона орудия. Плоскость площадки смятия своим свободным краем была наклонена во внутрь повреждения и соответствовала направлению погружения клинка. Как следствие такой остаточной деформации, одна из стенок повреждения имела признаки скошенного края, а противоположная стенка – нависающего (рис. 2).

Трещины в этих случаях формировались по механизму изгиба и фактически имели морфологию террас, ограничиваясь своим распространением вдоль места действия касательного усилия.

■ 2. Направление извлечения клинка.

При извлечении клинка ножа из повреждения с бóльшим наклоном (углом более 10°) на одну из сторон, чем при погружении, на кости образовались вторичные сколы компактного вещества, при этом в зоне вкола отмечался

дефект костной ткани с краями, образованными смятой компактой с обеих сторон.

При извлечении с наклоном на обух трещина, отграничивающая вторичный скол, брала начало от зоны смятия компакты на уровне действия зоны острия ножа (рис. 3).

При извлечении клинка ножа с нажимом на лезвие образовалась «возвратная» трещина, отходящая от острого угла повреждения (рис. 4).

Аналогичная картина наблюдается при нанесении повреждения под одним углом и извлечении под другим, без отклонения клинка ножа к обуху или к лезвию (с отвесным встречным углом) (рис. 5). Когда наклон клинка незначительный, происходит обтирание края повреждения.

Далее нами было предпринято математическое моделирование КЭА с целью оценки и подтверждения макроскопических данных.

Результат моделирования напряжений (оценка по Мизесу) и деформаций представлен в виде участков изменения цвета исследуемой физической системы, которые и суть поля силовых напряжений. Цветовая шкала отображает рост величины напряжений. Так, синий цвет указывает на отсутствие напряжений, а зона красного цвета – это зона максимальных («критических») силовых напряжений, при достижении которых будет происходить разрушение материала.

Созданная модель ребра закреплялась у одного из концов. В центре модели, под углом около 40° к длиннику, выполнено треугольной формы окно, соответствующее действию лезвия клинка. На стенки окна приложено симметричное давление величиной 1 МПа. Выполнено разбиение на сетку, величина наименьшего элемента 0,05 мм, средний размер элемента 0,1 мм. Полученные

результаты показывали высокую точность и схожесть с нативными экспериментальными повреждениями (рис. 6).

Следующим этапом моделирования выполнено несимметричное нагружение модели, подразумевающее внедрение клинка с наклоном на правую сторону. Для этого на левую стенку моделируемого повреждения приложено давление величиной 0,5 МПа, на правую – 1,5 МПа, на стенку, соответствующую действию обуха, – 1 МПа. В результате проведенных расчетов получены следующие данные (рис. 7).

Далее предпринято моделирование несимметричного нагружения модели, подразумевающее внедрение клинка с наклоном на левую сторону. Для этого на правую стенку моделируемого повреждения приложено давление величиной 0,5 МПа, на левую – 1,5 МПа, на стенку, соответствующую действию обуха, – 1 МПа. В результате проведенных расчетов получены следующие данные (рис. 8).

Полученные результаты показывают высокую точность и схожесть с нативными экспериментальными повреждениями (рис. 9).

◇ ВЫВОДЫ

Проведенное моделирование показало, что концентрация эквивалентных напряжений на вершине зависит от величины прилагаемых сил и четко соответствует моделируемому наклону лезвия клинка, что полностью подтверждает полученные нами данные при макроскопическом исследовании колото-резаных повреждений плоских костей [6; 7].

Использование в судебной медицине математического моделирования методом конечных элементов в перспективе позволит достоверно прогнозировать процесс разрушения биологических объектов при различных видах механического воздействия [4; 5].

Все вышеизложенное стимулирует осмысление уже имеющегося опыта и поиск новых решений данной проблемы для более широких возможностей внедрения в судебную медицину технических дисциплин для диагностических и идентификационных медико-криминалистических экспертиз по установлению орудия причинения колото-резаных повреждений плоских костей, способов их нанесения.

◇ ЛИТЕРАТУРА

1. Андрейко Л. А. Изменение морфологии колото-резаных ран в зависимости от количества и комбинаций слоев прилегающей одежды / Автореф. дис. ... канд. мед. наук. – М., 2009. – 18 с.
2. Власюк И. В. Морфологическая характеристика колото-резаных повреждений кожи, причиненных ножом с зубчатым обухом / Власюк И.В., Евдокимов П.В. // Судебно-медицинская экспертиза. М, 2013. – Т. 56. – № 5. – С. 16–18.
3. Загрядская А. П. Определение орудия травмы при судебно-медицинском исследовании колото-резаного орудия. – Москва, 1967. – 152 с.
4. Леонов С. В. Моделирование механизма образования колото-резаных ран методом конечных элементов /

Леонов С.В., Власюк И.В., Крупин К.Н. // Судебно-медицинская экспертиза. М, 2013. – Т. 56. – № 6. – С. 14–16, 47.

5. Леонов С. В. Судебно-медицинская оценка морфологии колото-резаных ран, сформированных клинками ножей с различными дефектами острия / Леонов С.В., Власюк И.В., Крупин К.Н. // Медицинская экспертиза и право. М, 2012. – № 1. – С. 37–39.
6. Кислов М. А. Идентификация колюще-режущих орудий в случаях повреждений плоских костей / М. А. Кислов // Эксперт-криминалист. М, 2016. – № 2. – С. 6–9.
7. Кислов М. А. Использование метода конечных элементов для прогнозирования разрушения колото-резаных повреждений плоских костей / М. А. Кислов, С. В. Леонов // Медицинская экспертиза и право. М, 2016. – № 3. – С. 22–24.
8. Шакирьянова Ю. В. Судебно-медицинская оценка влияния скола лезвия клинка на морфологию колото-резаного повреждения / Автореф. дис. ... канд. мед. наук. – М., 2013. – 22 с.

◇ REFERENCES

1. Andreiko L. A. Izmenenie morfologii koloto-rezanyh ran v zavisimosti ot kolichestva i kombinatsij sloev prilizhaschei odezhdy / Avtoref. dis. ... kand. med. nauk. – M., 2009. – 18. (In Russian)
2. Vlasyuk I. V. Morfologicheskaya karakteristika koloto-rezanyh povrezhdenij kozhi, prichinennyh nozhom s zubchatym obuhom / Vlasyuk I.V., Evdokimov P.V. // Sudebno-meditsinskaya ekspertiza. M, 2013. – T. 56. – № 5. – 16–18. (In Russian)
3. Zagryadskaya A. P. Opredelenie orudiya travmy pri sudebno-meditsinskom issledovanii koloto-rezanogo orudiya. – Moskva, 1967. – 152. (In Russian)
4. Leonov S. V. Modelirovanie mehanizma obrazovaniya koloto-rezanyh ran metodom konechnykh elementov / Leonov S.V., Vlasyuk I.V., Krupin K.N. // Sudebno-meditsinskaya ekspertiza. M, 2013. – T. 56. – № 6. – 14–16, 47. (In Russian)
5. Leonov S. V. Sudebno-meditsinskaya otsenka morfologii koloto-rezanyh ran, sformirovannykh klinkami nozhei s razlichnymi defektami ostriya / Leonov S.V., Vlasyuk I.V., Krupin K.N. // Meditsinskaya ekspertiza i pravo. M, 2012. – № 1. – 37–39. (In Russian)
6. Kislov M. A. Identifikatsia kolyusche-rezhuschih orudij v sluchayah povrezhdenij ploskih kostei / M. A. Kislov // Ekspert-kriminalist. M, 2016. – № 2. – 6–9. (In Russian)
7. Kislov M. A. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov dlya prognozirovaniya razrusheniya koloto-rezanyh povrezhdenij ploskih kostei / M. A. Kislov, S. V. Leonov // Meditsinskaya ekspertiza i pravo. M, 2016. – № 3. – 22–24. (In Russian)
8. Shakir'yanova Yu. V. Sudebno-meditsinskaya otsenka vliyaniya skosa lezviya klinka na morfologiyu koloto-rezanogo povrezhdeniya / Avtoref. dis. ... kand. med. nauk. – M., 2013. – 22. (In Russian)

Для корреспонденции

КИСЛОВ Максим Александрович – д.м.н., заведующий танатологическим отделом ГБУЗ МО «Бюро СМЭ», профессор кафедры судебной медицины ФУВ ГБУЗ МО МОНИКИ им. М. Ф. Владимирского; 111401, г. Москва, ул. 1-я Владимирская, д. 33, корп. 1, ГБУЗ МО «Бюро СМЭ» • kislov@sudmedmo.ru • {SPIN-код: 3620-8930, AuthorID: 724240, ORCID: 0000-0002-9303-7640}