

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕРЕПНО-МОЗГОВОЙ ТРАВМЫ

К. Н. Крупин

Медицинский университет «Реавиз», Самара

Аннотация: В статье рассматривается возможность математического моделирования черепно-мозговой травмы при ударе тупым предметом в затылочную область незакрепленной головы и падения навзничь.

Ключевые слова: математическое моделирование, черепно-мозговая травма, конечно-элементный анализ

MATHEMATICAL MODELLING OF CRANIOCEREBRAL TRAUMA

K. N. Krupin

Abstract: Possibility of mathematical modelling of a craniocerebral trauma at blow by a blunt object to the occipital area of the loose head and falling backwards is considered.

Keywords: mathematical modelling, craniocerebral trauma, finite-element analysis

<http://dx.doi.org/10.19048/2411-8729-2018-4-1-13-16>

◇ ВВЕДЕНИЕ

Черепно-мозговая травма – одна из частых патологий, возникающих при внешнем воздействии на человека. В литературе этому виду травмы посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов. Тем не менее механизмы образования травмы головного мозга зачастую вызывают у исследователей множество вопросов и различных толкований [1–3]. Особенно это касается возможности образования травматических «противоударных» очагов повреждения головного мозга при падении навзничь [4–5].

Нами было сделано предположение, что возникновение очагов «противоударных» повреждений головного мозга связано с образованием очага сдвиговых деформаций в веществе головного мозга при инерционной травме.

Цель исследования: установить методом математического моделирования особенности распределения силовых напряжений, возникающих при формировании травмы головного мозга при ударе в затылочную область и при падении навзничь, и на основании полученных данных установить теоретическое обоснование механизма образования травмы головного мозга.

◇ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с поставленными задачами методом конечных элементов было произведено математическое моделирование процесса ударного взаимодействия бетонного блока с затылочной областью головы и падения на бетонный блок затылочной областью головы. Нами была упрощена модель головы до вытянутого сфероида размерами 125×105×90 мм и толщиной 30 мм, внутри которого находится головной мозг, окруженный слоем ликвора толщиной 1 мм. В нижней части модели асимметрично в сфероиде выполнено отверстие, соответствующее большому затылочному отверстию. Через отверстие от модели вещества головного мозга сформирован цилиндр с фаской, имитирующий продолговатый мозг. Бетонный блок смоделирован в виде параллелепипеда с размерами 60×60×40 мм. Для решения указанной задачи применяли метод конечно-элементного анализа [6–15].

При помощи программной оболочки ANSYS R19.0 получены математические 3D-модели черепа, ликвора, головного мозга и бетонного блока с использованием Solid конечных элементов. Модуль упругости компактного вещества, являвшегося материалом черепа, – 19,2 ГПа,

модуль Юнга – 20 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3. Модуль упругости мозгового вещества – 10,36 ГПа, модуль Юнга – 300 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3. Модули упругости воды, являвшейся материалом ликвора, и бетона – 10,34 ГПа и 23 ГПа соответственно, остальные параметры были взяты из библиотеки Explicit Materials программы ANSYS R19.0.

В ходе экспериментального исследования создавались три условия взаимодействия:

– незакрепленная модель головы «затылочной областью» свободно падает на бетонный блок перпендикулярно поверхности блока со скоростью 0,2 м/с;

– в «затылочную область» закрепленной модели головы бьет бетонный блок перпендикулярно поверхности блока со скоростью 0,2 м/с. Созданная модель закреплена связями с ограничением перемещений по осям x, y, z в области «большого затылочного отверстия»;

– в «затылочную область» закрепленной модели головы бьет бетонный блок перпендикулярно поверхности блока со скоростью 2 м/с. Созданная модель закреплена связями с ограничением перемещений по осям x, y, z в области «большого затылочного отверстия».

◇ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенное методом конечных элементов математическое моделирование процесса формирования травмы головного мозга показало следующее.

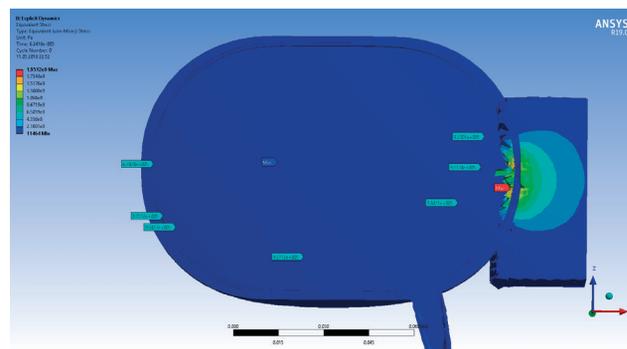


Рис. 1. Изображение зон эквивалентного напряжения по Мизесу в веществе головного мозга и бетонном блоке при падении навзничь

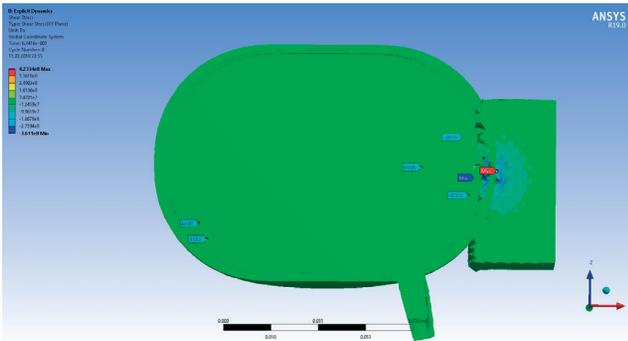


Рис. 2. Изображение зон сдвигового напряжения в веществе головного мозга и бетонном блоке при падении навзничь

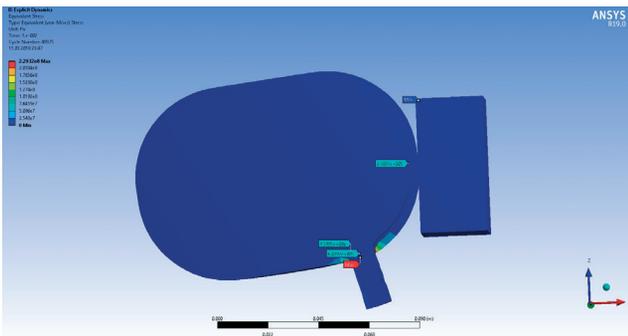


Рис. 3. Изображение зон эквивалентного напряжения по Мизесу в веществе головного мозга и бетонном блоке при ударе в затылочную область головы на скорости 0,2 м/с

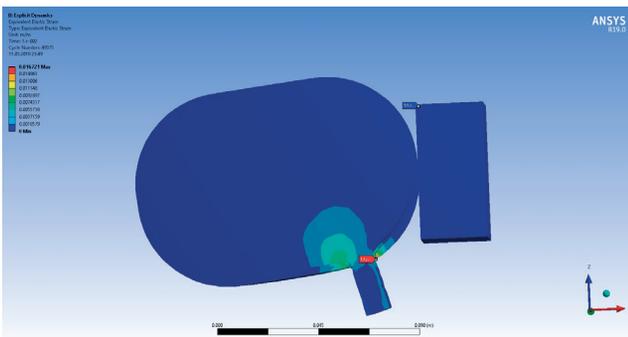


Рис. 4. Изображение зон эквивалентного растяжения в веществе головного мозга и бетонном блоке при ударе в затылочную область головы на скорости 0,2 м/с

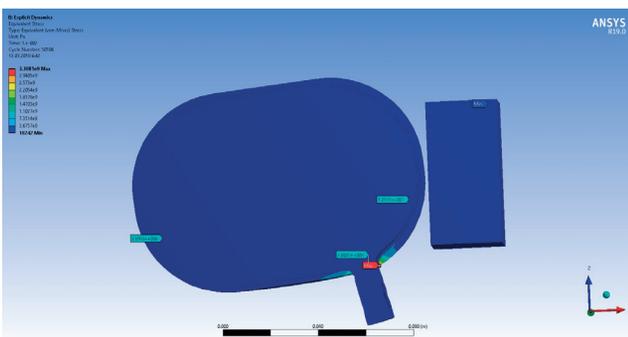


Рис. 5. Изображение зон эквивалентного напряжения по Мизесу в веществе головного мозга и бетонном блоке при ударе в затылочную область головы на скорости 2 м/с

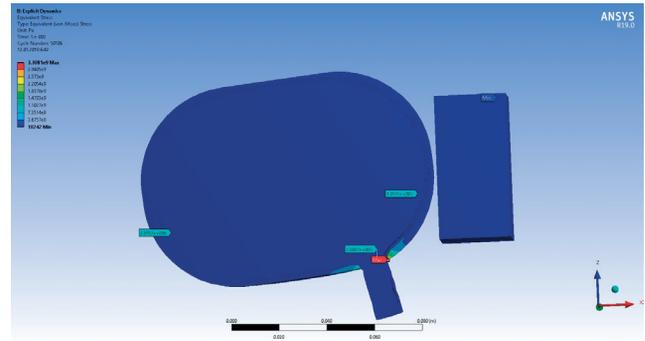


Рис. 6. Изображение зон сдвигового напряжения в веществе головного мозга и бетонном блоке при ударе в затылочную область головы на скорости 2 м/с

При ударном взаимодействии незакрепленной модели головы «затылочной областью» при свободном падении на бетонный блок перпендикулярно поверхности блока со скоростью 0,2 м/с формируются зоны эквивалентного напряжения (участок зеленого цвета) по Мизесу, более выраженные в месте приложения травмирующей силы с максимальным распространением на бетонный блок (рис. 1).

При анализе распределения эквивалентного напряжения по Мизесу отмечена концентрация напряжения в области «коры головного мозга» на противоположной стороне от места приложения травмирующей силы и вдоль «основания черепа», преимущественно за счет сдвиговых напряжений (рис. 2).

При ударном воздействии бетонного блока в «затылочную область» закрепленной модели головы перпендикулярно поверхности блока со скоростью 0,2 м/с в области «большого затылочного отверстия» и прилежащих тканях «головного мозга» формируются зоны эквивалентного напряжения (участок зеленого цвета) по Мизесу (рис. 3).

Максимальные зоны напряжения мозговой ткани формируются в области большого затылочного отверстия и впереди от него за счет деформации растяжения (рис. 4).

При ударном воздействии бетонного блока в «затылочную область» закрепленной модели головы перпендикулярно поверхности блока со скоростью 2 м/с в области «большого затылочного отверстия» и прилежащих тканях «головного мозга» формируются зоны эквивалентного напряжения (участок зеленого цвета) по Мизесу (рис. 5), а также в области «коры головного мозга» в проекции места приложения травмирующей силы. Обращает на себя внимание, что увеличение скорости действия травмирующего предмета в 10 раз увеличивает эквивалентное напряжение в мозговой ткани в месте приложения травмирующей силы примерно в 50 раз.

Тем не менее в области «большого затылочного отверстия» и прилежащей мозговой ткани определяются максимальные величины эквивалентного напряжения, преимущественно за счет сдвиговых деформаций (рис. 6).

При этом виде взаимодействия распределения не отмечена концентрация эквивалентного напряжения по Мизесу в области «коры головного мозга» на противоположной стороне от места приложения травмирующей силы.

♦ ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ и трактовка данных математического моделирования показывает, что ударное взаимодействие головы и бетонного блока при падении навзничь и ударе в затылочную область имеет принципиально разный механизм образования повреждения головного мозга и имеет специфические проявления.

При падении и ударном взаимодействии незакрепленной головы затылочной областью при свободном падении на бетонный блок перпендикулярно поверхности блока формируются зоны напряжения в веществе головного мозга, соответствующие месту приложения травмирующей силы, а также в равной степени на противоположной стороне от места приложения травмирующей силы и в области стволового отдела головного мозга, преимущественно за счет сдвиговых напряжений.

При ударном взаимодействии бетонного блока в затылочную область закрепленной головы перпендикулярно поверхности блока в области большого затылочного отверстия и прилежащих тканях головного мозга формируются зоны эквивалентного напряжения по Мизесу, соответствующие спинальной травме с преимущественным поражением передних отделов продолговатого мозга за счет деформации растяжения. При увеличении скорости взаимодействия значительно возрастает величина эквивалентного напряжения в веществе головного мозга с преимущественным поражением продолговатого мозга и коры головного мозга в месте приложения травмирующей силы. При таком виде травмирующего воздействия не отмечена концентрация эквивалентного напряжения по Мизесу в области коры головного мозга на противоположной стороне от места приложения травмирующей силы.

◇ ВЫВОДЫ

Образование повреждений вещества головного мозга при черепно-мозговой травме объясняется совокупностью факторов, которыми являются: механизм взаимодействия головы и травмирующего предмета, большая энергия импульса воздействия, особое распределение силовых напряжений, обуславливающее сдвиг в области стволового отдела головного мозга.

При падении навзничь, преимущественно за счет сдвиговых напряжений, формируются области повреждения в веществе головного мозга, соответствующие месту приложения травмирующей силы, а также в равной степени на противоположной стороне от места приложения травмирующей силы и в области стволового отдела головного мозга.

При ударном воздействии в затылочную область закрепленной головы перпендикулярно поверхности травмирующего предмета в области большого затылочного отверстия и прилежащих тканях головного мозга формируются области повреждений, соответствующие спинальной травме с преимущественным поражением передних отделов продолговатого мозга за счет деформации растяжения без образования очагов «противоударных повреждений».

Повреждение вещества головного мозга на противоположной стороне от места приложения травмирующей силы может формироваться не по классической схеме «сжатие – разрыв», а по схеме «разнонаправленный сдвиг».

В ходе исследования с использованием математического моделирования методом конечных элементов была установлена возможность определения механизма образования травмы головного мозга при ударе тупым предметом в затылочную область и свободном падении навзничь.

Полученные в результате проведенных исследований данные не только расширяют многообразие известных механизмов разрушения вещества головного мозга, но и дают клиническому врачу и эксперту возможность по наличию данных о месте и способе приложения травмирующей силы устанавливать локализацию и характер травмы вещества головного мозга.

◇ ЛИТЕРАТУРА

1. Клиническое руководство по черепно-мозговой травме / под ред. А. Н. Коновалова, Л. Б. Лихтермана, А. А. Потапова. – М., 2001. – Т. 1. – 653 с.
2. Судебно-медицинская оценка тяжести вреда здоровью при черепно-мозговых травмах: методические рекомендации / Б. В. Гайдар, А. Н. Белых, А. Ю. Емельянов [и др.]. – М.: ГВКГ им. Н. Н. Бурденко, 2007.
3. Крупин К. Н., Кислов М. А. Особенности определения тяжести вреда здоровью, причиненного живому человеку с сотрясением головного мозга // Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: реабилитация, врач и здоровье. 2017. Т. 27. № 3. С. 38–40.
4. Оценка механизма черепно-мозговой травмы при воздействии силы в затылочную область: методические рекомендации 1636/01–04 от 16.12.1993 г. / А. И. Зорькин и др. – М.: МЗ РСФСР, 1993.
5. Ромодановский О. А. Повреждения головы при самопроизвольном падении человека навзничь (критерии судебно-медицинской диагностики) / Под ред. Г. А. Пашиняна. – М.: Робин, 1998. – 152 с.
6. Кислов М. А., Леонов С. В., Использование метода конечных элементов для прогнозирования разрушения колото-резаных повреждений плоских костей // Медицинская экспертиза и право, 2016. – № 3. – С. 22–24.
7. Кислов, М. А. Определение условий причинения колото-резаной травмы по макроскопической картине повреждений лопатки / М. А. Кислов // Эксперт-криминалист. – М., 2016. – № 4. – С. 7–10.
8. Кислов М. А. Моделирование колото-резаных повреждений методом конечно-элементного анализа // Судебная медицина. – М., 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 18–25. <http://dx.doi.org/10.19048/2411-8729-2017-3-3-18-24>
9. Кислов М. А. Морфология и механика разрушения костной ткани под действием колюще-режущих орудий / Автореф. дис. ... док. мед. наук. – Москва, 2016.
10. Кислов М. А., Леонов С. В. Механизм разрушения костной ткани при острой травме // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – Москва, 2016. – Т. 15. – № 3. – С. 521–525.
11. Пинчук П. В., Крупин К. Н., Панфилов Д. А. Математическое моделирование травмирующего воздействия на большеберцовую кость для оценки характера перелома // Мед.экспертиза и право. – 2016. – № 5. – С. 37–39.
12. Пинчук П. В., Крупин К. Н., Панфилов Д. А. Математическое моделирование сложноподвижной кости для оценки характера перелома // Медицинская экспертиза и право. 2016. – № 6. – С. 42–46.
13. Леонов С. В., Пинчук П. В., Крупин К. Н., Шакирьянова Ю. П. Современные и перспективные методы визуализации и моделирования при реконструкции обстоятельств происшествия // В книге: Избранные вопросы судебно-медицинской экспертизы Хабаровск, 2016. – С. 134–146.
14. Леонов С. В., Пинчук П. В., Крупин К. Н., Панфилов Д. А. Математическое моделирование травмирующего воздействия на большеберцовую кость для оценки условий образования перелома // Судебно-медицинская экспертиза. – 2017. – Т. 60. – № 2. – С. 11–13.
15. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

◇ REFERENCES

1. Klinicheskoe rukovodstvo po cherepno-mozgovoј travme / A. N. Konovalov, L. B. Lihterman, A. A. Potapov. – M., 2001. – T. 1. – 653 s. (In Russian)
2. Sudebno-medicinskaja ocenka tjazhesti vreda zdorov'ju pri cherepno-mozgovykh travmah: metod. rekomendacii / B. V. Gajdar, A. N. Belyh, A. Ju. Emel'janov i dr. – M.: GVKG im. N. N. Burdenko, 2007. (In Russian)
3. Krupin K.N., Kislov M. A. Osobennosti opredelenija tjazhesti vreda zdorov'ju, prichinennogo zhivomu cheloveku s sotraseniem golovnogogo mozga // Vestnik medicinskogo instituta «REAVIZ»: reabilitacija, vrach i zdorov'e. 2017. T. 27. № 3. S. 38–40. (In Russian)
4. Ocenka mehanizma cherepno-mozgovoј travmy pri vozdeystvii sily v zatylochnuju oblast': metodicheskie rekomendacii 1636/01–04 ot 16.12.1993 g. / A. I. Zor'kin i dr. – M.: MZ RSFSR, 1993. (In Russian)
5. Romodanovskij O. A. Povrezhdenija golovy pri samoproizvol'nom padenii cheloveka navznich» (kriterii sudebno-medicinskoј diagnostiki) / Pod red. G. A. Pashinjana. – M.: Robin, 1998. – 152 s. (In Russian)
6. Kislov M.A., Leonov S.V., Ispol'zovanie metoda konechnykh jelementov dlja prognozirovanija razrushenija koloto-rezanykh povrezhdenij ploskih kostej. Medicinskaja jekspertiza i pravo. 2016. № 3. S. 22–24. (In Russian)
7. Kislov, M. A. Opredelenie uslovij prichinenija koloto-rezanoј travmy po makroskopicheskoј kartine povrezhdenij lopatki/ M. A. Kislov // Jekspert-kriminalist. – M., 2016. – № 4. – S. 7–10. (In Russian)
8. Kislov M. A. Modelirovanie koloto-rezanykh povrezhdenij metodom konechno-jelementnogo analiza // Sudebnaja medicina. – M, 2017. – T. 3.– № 3. – S. 18–25. <http://dx.doi.org/10.19048/2411-8729-2017-3-3-18-24>. (In Russian)
9. Kislov M. A. Morfologija i mehanika razrushenija kostnoj tkani pod deystviem koljushhe-rezhushhih orudij /Avtoref. dis. ... dok. med. nauk. – Moskva, 2016. (In Russian)
10. Kislov M.A., Leonov S. V. Mehanizm razrushenija kostnoj tkani pri ostroj travme // Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah. – Moskva, 2016. – T.15.– № 3. – S. 521–525. (In Russian)
11. Pinchuk P.V., Krupin K.N., Panfilov D. A. Matematicheskoe modelirovanie travmirujushhego vozdeystvija na bol'shebercovuju kost» dlja ocenki haraktera pereloma. Med.jekspertiza i pravo 2016. № 5. S. 37–39. (In Russian)
12. Pinchuk P.V., Krupin K.N., Panfilov D. A. Matematicheskoe modelirovanie slozhnonaprjazhennogo sostojanija bol'shebercovoј kosti dlja ocenki haraktera pereloma // Medicinskaja jekspertiza i pravo. 2016. № 6. S. 42–46. (In Russian)
13. Leonov S. V., Pinchuk P.V., Krupin K.N., Shakir'janova Ju.P. Sovremennye i perspektivnye metody vizirovanija i modelirovanija pri rekonstrukcii obstojatel'stv proisshestvija // V knige: Izbrannye voprosy sudebno-medicinskoј jekspertizy. – Habarovsk, 2016. – S. 134–146. (In Russian)
14. Leonov S.V., Pinchuk P.V., Krupin K.N., Panfilov D. A. Matematicheskoe modelirovanie travmirujushhego vozdeystvija na bol'shebercovuju kost» dlja ocenki uslovij obrazovanija pereloma // Sudebno-medicinskaja jekspertiza. 2017. – T. 60. № 2. – S. 11–13. (In Russian)
15. Segerlind L. Primenenie metoda konechnykh jelementov. M.: Mir, 1979. – 392 s. (In Russian)

Для корреспонденции:

КРУПИН Константин Николаевич – доцент кафедры клинической медицины медицинского университета «Реавиз» • 443001, г. Самара, ул. Чапаевская, д. 227 • konst.inn@gmail.com • {SPIN-код: 1761–8559, AuthorID: 870066, ORCID: 0000–0001–6999–8524}.