

УДК 669.15:539.3

И. Н. БУДИЛОВ, Б. И. ГУРЬЕВ, Л. С. КУТУШЕВА, Ю. В. ЛУКАЩУК

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ СВАЕБОЙНОГО ТРУБЧАТОГО ДИЗЕЛЬ-МОЛОТА

В этой работе на основе численного моделирования определены поля пластических напряжений и деформаций при динамическом нагружении сваебойного трубчатого дизель-молота. Эти результаты позволяют оптимизировать конструкцию сваебойного трубчатого дизель-молота. *Численные методы механики деформированного твердого тела; трубчатый дизель-молот; динамическое нагружение, метод конечных элементов (МКЭ)*

Ярко выраженная тенденция к повышению производительности и эффективности всех видов строительных работ отражается и на требованиях к сваебойным молотам. Молоты дизельные предназначены для забивки в грунт свай массой 1,2 ... 10 т при температуре окружающей среды от плюс 40°С до минус 40°С. Однако возможности дальнейшего повышения эффективности молота путем увеличения энергии удара для молота с регламентированной массой ударной части практически исчерпаны. Дальнейшее повышение энергии удара возможно путем увеличения скорости ударной части в момент удара (что ограничивается прочностью забиваемой сваи) или путем увеличения высоты подскока ударной части (что приводит к снижению частоты ударов). Эти ограничения и определяют основное направление повышения эффективности сваебойных работ — повышение единичной мощности сваебойного молота. Единичная мощность дизель-молота может быть повышена двумя способами — увеличением массы ударной части и повышением частоты ударов.

Трубчатые дизель-молоты с ударным распыливанием топлива и со свободным падением ударной части широко применяются во всем мире. Молоты этого типа обеспечивают совокупное воздействие на сваю удара и силы от взрыва топлива в камере сгорания, что существенно увеличивает эффективность сваебойных работ.

Целью данной работы является проведение анализа прочностной надежности элемен-

тов конструкции трубчатого дизель-молота при динамическом нагружении.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА МОДЕЛИРОВАНИЯ

В трубчатом молоте основной рабочей частью является поршень, который движется в трубе-цилиндре и ударяет по шаботу, закрывающему цилиндр снизу. Шабот передает удар поршня на сваю и является наиболее нагруженной деталью, работающей при значительной температуре. При ударе поршня о шабот топливо распыляется в камере сгорания, а затем воспламеняется от высокого давления смеси. Образующаяся при взрыве энергия отбрасывает поршень вновь вверх.

Благодаря распылению топлива ударом дизельные молоты обладают особо большой ударной силой, за счет чего на вбиваемый материал действуют три вида энергии: компрессия, удар, взрыв, которые соединяются в эффективную общую энергию.

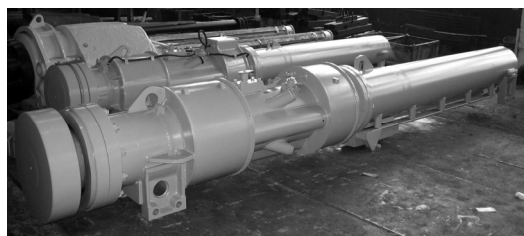


Рис. 1. Молот сваебойный дизельный

Благодаря энергии компрессии ударная часть и наголовник прижимаются к верхней части сваи. Следующий за этим удар направлен на вбиваемый материал, а ударная энер-

гия и вслед за этим действующая энергия взрыва вгоняют сваю.

На рис. 1 представлен внешний вид трубчатого дизель-молота, а на рис. 2 — составляющие его части: верхний поршень, шабот, наголовник и свая.

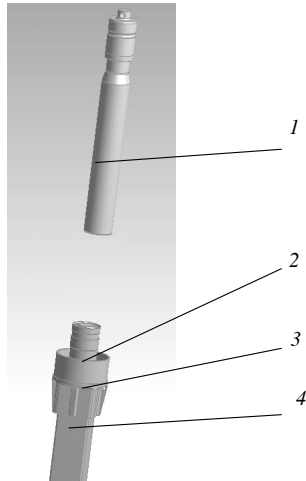


Рис. 2. Элементы трубчатого молота: 1 — поршень; 2 — шабот; 3 — наголовник; 4 — свая

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Основные уравнения расчетной модели, предназначенной для описания процесса ударного взаимодействия деформируемых тел, базируются на математическом аппарате механики сплошной среды (МСС) [9]. Полная система дифференциальных уравнений МСС, описывающих нестационарный процесс нагружения, применительно к рассматриваемой задаче имеет вид:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla_i v^i = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = F_i + \nabla_j \sigma_i^j, \quad (2)$$

$$\frac{dU}{dt} = \sigma^{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} + \nabla_i q^i, \quad (3)$$

$$\frac{du_i}{dt} = v_i, \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i), \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i u_j + \nabla_j u_i + \nabla_i u_k \nabla_j u^k), \quad (6)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, T). \quad (7)$$

где t — текущее время, ρ — плотность среды, v_i — компоненты вектора массовых скоростей, F_i — компоненты вектора массовых сил, σ_{ij} — компоненты тензора напряжений, $\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}$ — компоненты тензоров деформаций и скоростей деформаций, q^i — вектор тепловых потоков, u_i — перемещения, T — температура.

Система исходных уравнений в обязательном порядке включает основные общие для всех сплошных сред дифференциальные уравнения механики, выражающие фундаментальные законы сохранения массы (1), импульса (2), энергии (3), а также общие для всех сред кинематические соотношения (4) и (5) и геометрические соотношения (6), связывающие деформационные перемещения с относительными деформациями. Индивидуальные особенности рассматриваемой среды в отношении оказания сопротивления деформированию учитываются физическими соотношениями (7), включаемыми в систему исходных уравнений согласно выбранной модели сплошной среды. Система должна также быть дополнена начальными и граничными условиями, соответствующими постановке конкретной задачи.

В общем виде, применительно к условиям поставленной задачи, решение системы уравнений аналитическими методами не представляется возможным. Решение задачи в данной постановке возможно только численными методами [1].

С этой целью применен вычислительный комплекс ANSYS/LS DYNA.

Модель среды конкретизирует общую формулировку физических соотношений $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, E)$, замыкающих систему уравнений МСС. Используемые в конечно-элементной вычислительной методике модели деформирования различных сред основаны на выделении из тензоров деформаций и напряжений отдельных компонентов — шарового тензора и тензора девиатора, отвечающих, соответственно, за изменение объема и формы: $D_\sigma = \sigma_{ij}^D = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} p \delta_{ij}$. В итоге определяющими соотношениями модели будут две независимых составляющих: уравнение состояния (УРС) — зависимость, связывающая три величины — давление, плотность и удельную внутреннюю энергию (или температуру), $p = p(\rho, E)$ как мера объемной сжимаемости и термических эффектов, и зависимость

девиаторных компонентов тензора напряжений от девиаторных компонентов тензоров деформаций и скоростей деформаций $D_\sigma = D_\sigma(D_\varepsilon, D_\dot{\varepsilon})$ как мера формоизменения.

Соотношения для компонентов девиатора тензора напряжений определяются композицией закона пластического течения Прандтля-Рейсса при пластическом деформировании и закона Гука для нагрузок, не превышающих предел пластического течения. Уравнения Прандтля-Рейсса формируются следующим образом [10]:

$$\frac{dD_{\sigma ij}}{dt} + 2G\dot{\lambda}D_{\sigma ij} = 2G(\dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt}g_{ij}), \quad (8)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{3}{2\sigma_T^2} \sigma^{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)},$$

где G — модуль сдвига, $\dot{\lambda}$ — скалярный множитель, определяемый удельной мощностью пластических деформаций, σ_T — предел текучести, $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)}$ — компоненты тензора скоростей пластических деформаций. В данной численной реализации представленной теории скалярный множитель явным образом не вычисляется, а применяется эквивалентная процедура приведения вектора полных напряжений в пространстве напряжений в «круг текучести».

Отдельную задачу представляет собой моделирование грунта [2, 4, 5].

Грунт представляет собой дисперсную среду — смесь минеральных частиц, воды и воздуха. Минеральные частицы образуют пористый скелет, поры которого заполнены водой и воздухом. Основными механическими свойствами грунтовых сред, которые необходимо учитывать при математическом моделировании компрессионного воздействия на грунтовые массивы, являются: наличие внутреннего трения, необратимость объемных и сдвиговых деформаций, пластическое течение и разрушение скелета грунта. В работе используется модель упругопластической сжимаемой среды, учитывающая нелинейные процессы сдвигового и объемного деформирования.

Критерий пластичности Мизеса в самом общем случае для грунтов при наличии внутреннего трения имеет вид [8]:

$$\frac{D_{\sigma ij} D_{\sigma ij}}{2} = \frac{Y^2(p)}{3}, \quad (9)$$

где Y — динамический предел текучести. Среда, подчиненная такому закону, может нахо-

диться в двух состояниях — упругом и пластическом. Наличие внутреннего трения у грунтов обуславливает то, что предел текучести Y непостоянен и зависит от давления. Эффекты дилатансии — появление объемных деформаций в условиях чистого сдвига — в модели не учитываются.

В основе большинства критериев сдвиговой прочности грунтов лежит комбинация закона сухого трения Кулона, т. е. зависимости максимальных сдвиговых напряжений от давления, а также классических теорий прочности Мизеса и Треска. В данной работе критерием пластичности, при котором упругопластическая среда переходит из упругого состояния в пластическое, выбирается критерий, предложенный в работах [5, 8, 10, 11, 12]. Предел сдвиговой прочности для грунтов является функцией давления (рис. 3) и определяется зависимостью:

$$Y(p) = Y_0 + \frac{\mu p}{1 + \mu p / (Y_{pl} - Y_0)}, \quad (10)$$

где Y_0 — сцепление грунта, т. е. прочность при нулевом давлении, Y_{pl} — предельное значение сдвиговой прочности, μ — коэффициент трения.

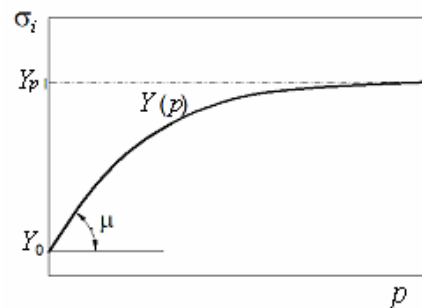


Рис. 3. Зависимость предела сдвиговой прочности от давления

Параметры Y_0 , μ могут быть пересчитаны по методикам, изложенным в [3], на основании нормативных значений прочностных характеристик грунтов — сцепления C_n и угла внутреннего трения ϕ_n , входящих в линейное уравнение закона Кулона-Мора:

$$|\tau_n| = C_n + \text{tg } \phi_n \cdot \sigma_n, \quad (11)$$

где τ_n — касательное напряжение, σ_n — нормальное напряжение. Механические характеристики C_n и ϕ_n определяются по результатам лабораторных испытаний грунтов на приборах одно- и многоплоскостного среза или в стабилометрах [3].

Поверхность текучести, построенная по уравнению (10), и поверхность, построенная по линейному уравнению Кулона-Мора (11), различны по форме и представляют собой в первом случае гладкую поверхность плавного сопряжения конуса и цилиндра, а во втором — шестигранную призму. Поэтому пересчет констант может быть выполнен лишь приближенно, так как между этими двумя поверхностями существует бесконечное множество аппроксимаций. Для упрощения принимаем, что предел сдвиговой прочности Y_{pl} в уравнении (10) является достаточно большой величиной. Тогда уравнение (10) для сдвиговой прочности грунта принимает вид:

$$Y(p) = Y_0 + \mu p.$$

Предлагается вариант аппроксимации, условно показанный на рис. 4 пунктирной линией. В этом случае формулы для пересчета коэффициентов уравнения (10) по нормативным коэффициентам имеют вид:

$$\mu = \frac{6 \sin \varphi_n}{3 + \sin \varphi_n}, \quad Y_0 = \frac{6 C_n \cos \varphi_n}{3 + \sin \varphi_n}.$$

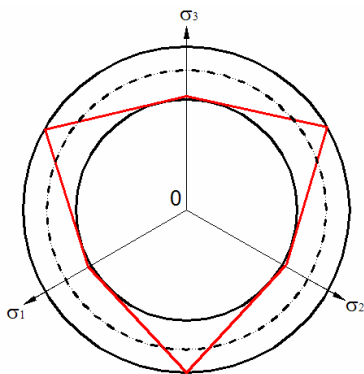


Рис. 4. Сечение предельных поверхностей Кулона-Мора и их различных аппроксимаций

Для ориентировочного получения значений предельной сдвиговой прочности может быть использована эмпирическая зависимость [3]

$$Y_{pl} = 50 \exp(-20,7W/1 + W),$$

где W — весовая влажность в долях единицы. Модуль сдвига G для грунтов в общем случае меняется в процессе деформирования. Однако отсутствие достоверных экспериментальных данных для выбранных типов грунтов затрудняет использование сложных моделей. В расчетах модуль сдвига принимался постоянным и вычислялся по рекомендуемым нормативным значениям [2] модуля деформации E и коэффициенту Пуассона ν .

При отсутствии прямых данных, для большинства песчаных грунтов и суглинков коэффициент Пуассона может быть вычислен через коэффициент пористости e_0 по эмпирической зависимости [3]:

$$\nu = \frac{0,15}{e_0} + 0,05.$$

На рис. 5 приведены схема расчетной модели испытаний и профиль прилагаемой нагрузки.

На рис. 6 показаны поля эквивалентных напряжений в грунте при расчетном моделировании штамповых испытаний.

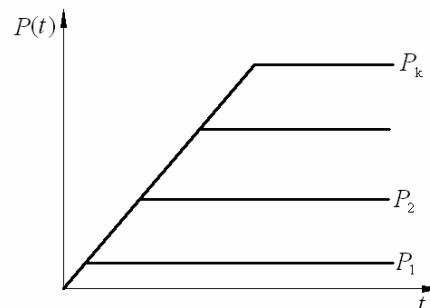
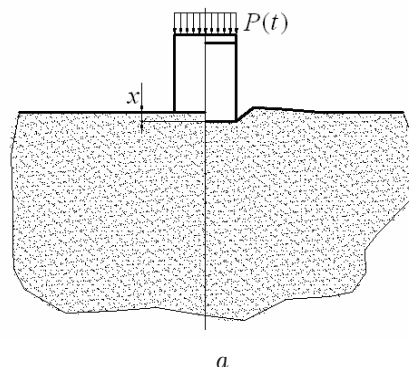


Рис. 5. Схема расчетной модели испытаний (а), профиль прилагаемой нагрузки (б)

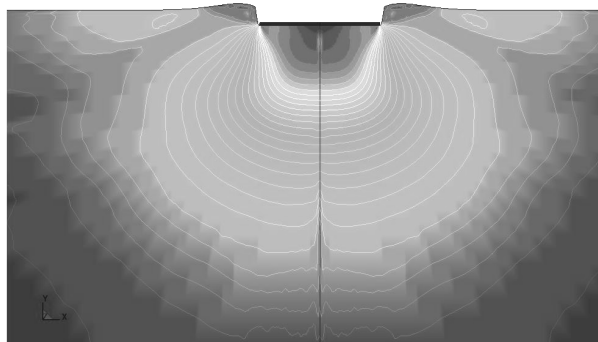


Рис. 6. Поле эквивалентных напряжений в грунте при расчетном моделировании штамповых испытаний

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В данной задаче геометрия взаимодействующих деталей (рис. 2) приближена к конструкции трубчатого молота. Главной особенностью является наличие грунта.

Модель подготавливалась в Design Modeler — удалялись лишние фаски и мелкие поверхности, по возможности объемы разбивались на простые шестигранники. Далее модель по частям передавалась в Prep 7 ANSYS, где создавалась сетка и записывались файлы для LS-DYNA. Полная модель собиралась и корректировалась в препроцессоре для LS-DYNA LS-PREPOST 2.1.

На рис. 7 показана твердотельная модель трубчатого молота.

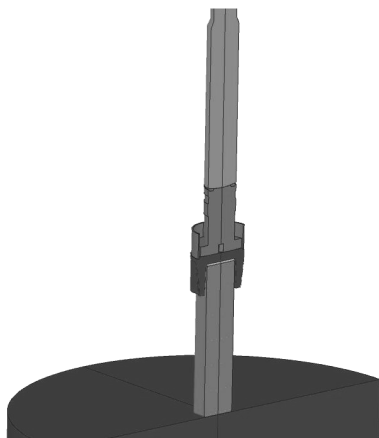


Рис. 7. Твердотельная модель трубчатого молота

При моделировании используется свойство симметрии. Грунт по границам закреплен жестко.

В расчете для всех частей использовался автоконтакт по типу «поверхность–поверхность».

В качестве начальных условий было принято свободное падение поршня в поле тяжести с высоты два метра.

В данной модели материал сваи моделировался более адекватно: железобетон–бетон марки 350 и стальная арматура диаметром 14 мм. Арматура и бетон сшиты общими узлами.

В качестве материала грунта был выбран плотный суглинок (модель с необратимой сжимаемостью, поверхность текучести совпадает с материалом 16 из базы данных LS DYNA).

Из-за сложной геометрии используемых деталей и, как следствие, различных размеров конечных элементов применяется масштабирование масс для исключения влияния силь-

но вырожденных элементов при минимальном шаге по времени 0,14 мкс, что приводит к значительному увеличению времени счета.

На рис. 8 показано деформированное состояние при внедрении сваи в грунт за один удар. В работе также получено распределение интенсивности напряжений в металлических частях модели (рис. 9).

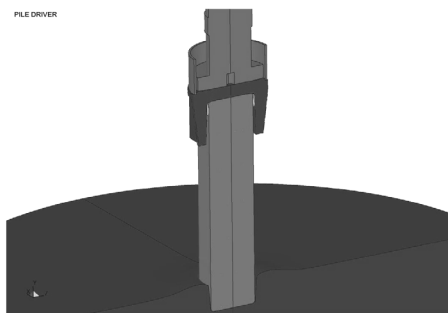


Рис. 8. Деформированное состояние при внедрении сваи в грунт

Ниже приведены результаты анализа динамических напряжений в элементах конструкции трубчатого дизель-молота в условиях динамического нагружения. При анализе динамических напряжений трубчатого дизель-молота моделировался удар поршня по шаботу.

На рис. 10 показана общая картина распределения интенсивности напряжений в конструкции при ударе без смещения. Видно, что общий уровень напряжений не превышает 136 МПа.

В работе также получено распределение интенсивности напряжений в шаботе (рис. 11). Четко видна зона концентрации напряжений в месте контакта.

В реальных условиях эксплуатации удар происходит со смещением. Поэтому также рассматривался в качестве основного случая нагружения удар шабота по наголовнику со смещением от оси на 10 мм. На рис. 12 показано распределение интенсивности напряжений в случае удара со смещением.

Установлено, что смещение цилиндра относительно оси приводит к изменению места расположения максимума напряжения и увеличивает его абсолютное значение.

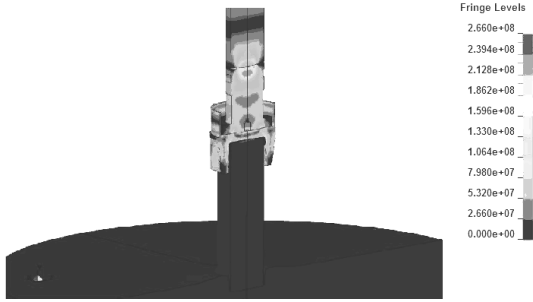


Рис. 9. Распределение интенсивности напряжений в металлических частях модели, Па

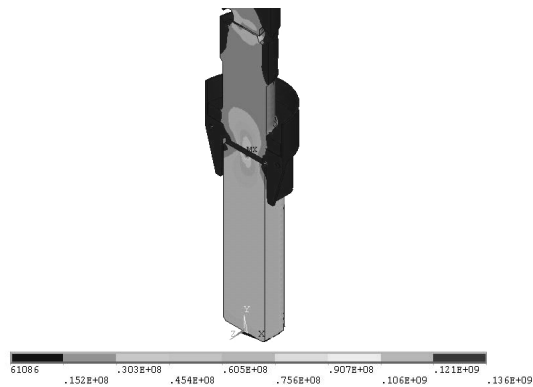


Рис. 10. Общая картина распределения интенсивности напряжений в конструкции трубчатого дизель-молота, Па

Одним из наиболее нагруженных элементов конструкции является наголовник.

На рис. 13 показано распределение интенсивности напряжений наголовника в разные моменты времени. Максимальные напряжения составляют 200 МПа. Положение максимума напряжений меняется во времени.

Во всех наголовниках наличие ребер, коробчатой формы приводит к концентрации напряжений в углах и на ребрах с большим перепадом напряжений, что способствует образованию трещин в условиях повторного

ударного нагружения. Результаты показывают, что с увеличением размера наголовника отмечается увеличение максимального уровня интенсивности напряжений.

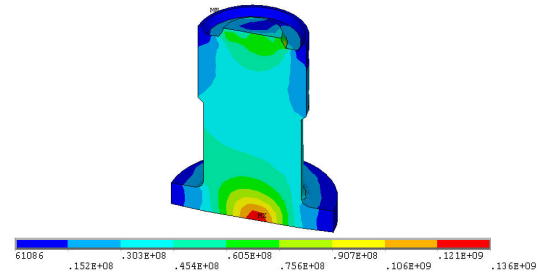


Рис. 11. Распределение интенсивности напряжений в работе, Па

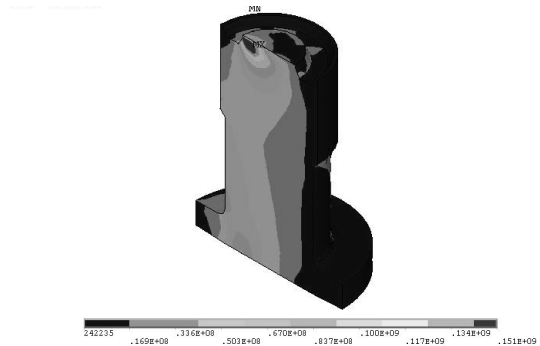


Рис. 12. Распределение интенсивности напряжений в работе в случае удара со смещением

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм и опробована методика расчета ударного взаимодействия деформируемых твердых тел на примере трубчатого дизель-молота с использованием программного комплекса ANSYS/LS-DYNA.

Разработана конечно-элементная модель, позволяющая анализировать изменение параметров напряженно-деформированного со-

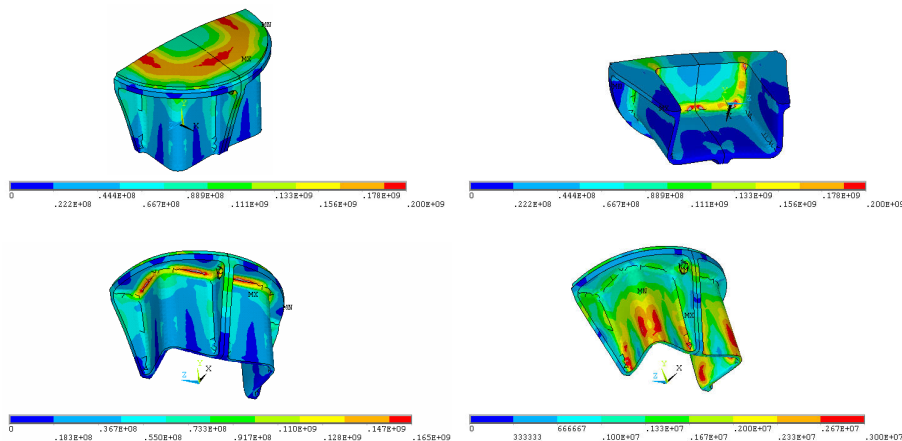


Рис. 13. Распределение интенсивности напряжений наголовника в различные моменты времени

стояния всех элементов конструкции по времени с учетом волнового характера нагружения и особенностей свойств материалов свай и грунта.

Смоделировано проникновение свай в грунт в зависимости от его свойств.

Определены уровни максимальных напряжений в элементах конструкции трубчатого дизель-молота. При этом отмечается высокая неоднородность поля напряжений в основании поршня и в наголовниках. Выявлены зоны концентрации напряжений, при прохождении волны в которых возникает повышенный уровень напряжений.

Результаты проведенных расчетов позволили выработать практические рекомендации по модернизации конструкции с целью увеличения ее прочностной надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабкин, А. В.** Численные методы в задачах физики взрыва и удара : учеб. для втузов / А. В. Бабкин, В. И. Колпаков, В. Н. Охитин, В. В. Селиванов. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 516 с.
2. **ГОСТ 12248-96.** Грунты. Методы лабораторного определения прочности и деформируемости, 1996.
3. **Дроговейко, И. З.** Разрушение мерзлых грунтов взрывом / И. З. Дроговейко. М. : Недра, 1981. 243 с.
4. **ГОСТ 20276-99.** Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости, 1999.
5. **Уилкинс, М. Л.** Расчет упругопластических течений / М. Л. Уилкинс // Новое в зарубежной механике, 1967.
6. **LS-DYNA Keyword user's manual.** July, 2006. Vers. 971. Livermore Software Technology Corporation, 2006.
7. **LS-DYNA Theoretical manual.** November, 2005. Livermore Software Technology Corporation, 2005.
8. **Баженов, В. Г.** Экспериментально-теоретический анализ нестационарных процессов взаимодействия деформируемых ударников с грунтовой средой / В. Г. Баженов, В. Л. Котов, С. В. Крылов [и др.]. // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 6. С. 190–197.
9. **Седов, Л. И.** Механика сплошной среды. Т. 1. / Л. И. Седов. М. : Наука, 1973. 536 с.
10. **Бабкин, А. В.** Прикладная механика сплошных сред. Т. 1. Основы механики сплошных сред / А. В. Бабкин, В. В. Селиванов. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. 368 с.
11. **Друккер, Д.** Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование / Д. Друккер, В. Прагер // Определяющие законы механики грунтов. М. : Мир, 1975.
12. **Рахматулин, Х. А.** Вопросы динамики грунтов / Х. А. Рахматулин, А. Я. Сагомонян, Н. А. Алексеев. М. : МГУ, 1964. 239 с.

ОБ АВТОРАХ



Будиллов Игорь Николаевич, проф. каф. сопр. материалов. Дипл. инж. по оборуд. и технол. сварочн. произв. (УАИ, 1978). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. макромехики нанострук. материалов, критериев разрушения.



Гурьев Борис Иванович, доц. каф. ОКМиМ. Дипл. инж. по технологии машиностроения, металлорежущ. станкам и инструментам (УАИ, 1961). Канд. техн. наук по машиноведению и деталям машин (ЧПИ, Челябинск, 1972). Иссл. в обл. геометрии зубчатых передач.



Кутушева Людмила Сергеевна, ст. преп. каф. ОКМиМ. Дипл. инж. технологии машиностроения, металлорежущ. станкам и инструментам (УАИ, 1971). Иссл. в обл. прочности и надежности элементов конструкций методами комп. моделирования.



Лукашук Юрий Валентинович, доц., каф. ОКМиМ. Дипл. инж.-мех. по автоматиз. машиностроит. пром-ти (УАИ, 1972). Канд. техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1981). Иссл. в обл. численных методов в мех. деформ. твердого тела.