Численное моделирование больших деформаций песчаного основания центрально и внецентренно нагруженного жестким штампом

Болдырев Г.Г., И.М.Малышев

Устойчивость метода конечных элементов

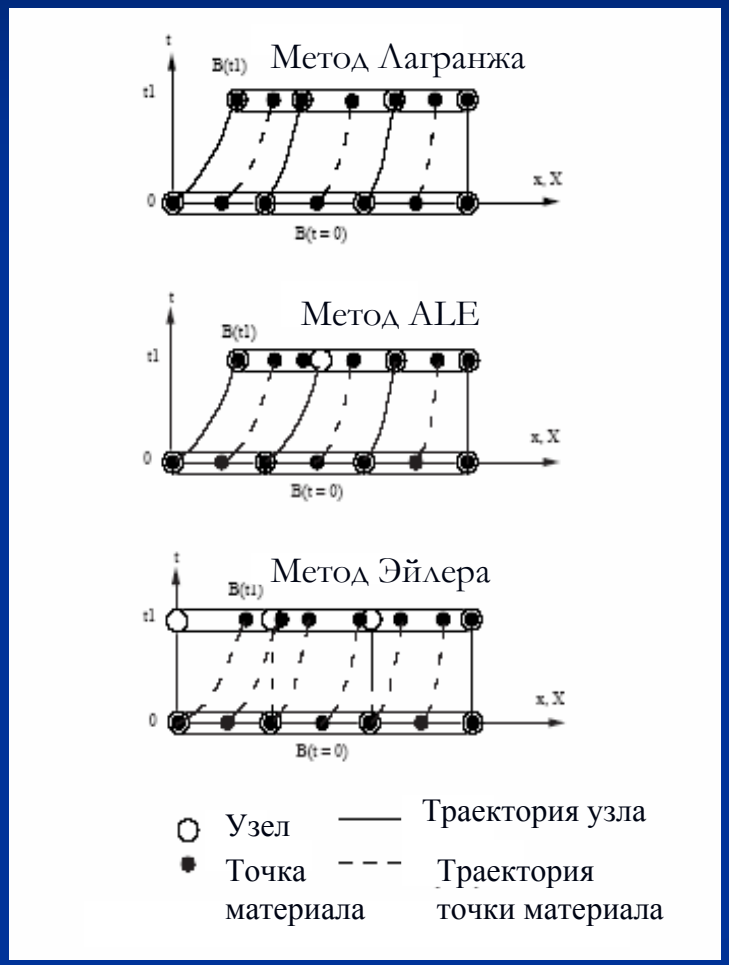
1. Стандартный метод конечных элементов показывает колебания (неустойчивость) в решении при определении полей напряжений или замыкание в полях перемещений в несжимаемых или дилатируемых средах.

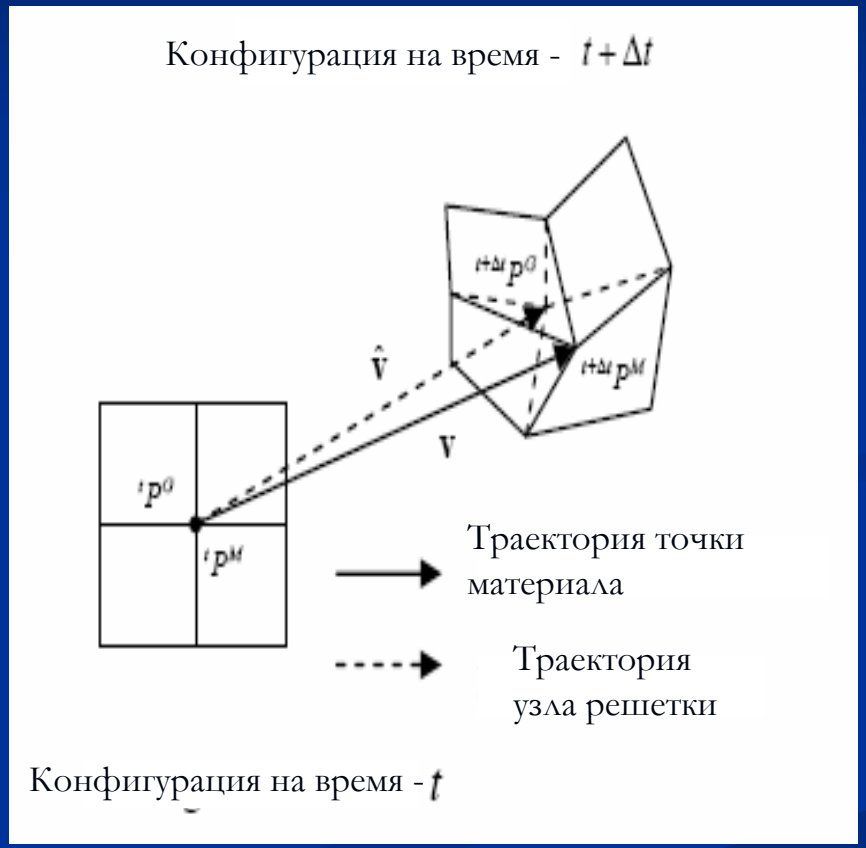
2. Неустойчивость решения сопровождается искажением сети конечных элементов при больших деформациях

Возможности программ ANSYS и LS-DYNA по моделированию поведения грунтов

№	Метод	ANSYS		LS-DYNA	
		DP	CAP	DP	CAP
1	EFEM (явный FEM)	-	-	+ плохо	+ плохо
2	EFEM + динамическая релаксация	-	-	+ плохо	+ плохо
3	EFEM + массовое шкалирование	-	-	+ плохо	+ плохо
4	IFEM (неявный FEM)	+	+	+ отлично	-
5	ALE (однокомпонентный лагранжево-эйлеровый подход), формулировка объемного элемента #5	-	-	+	+
6	ALE (многокомпонентный лагранжево-эйлеровый подход), формулировка объемного элемента #11	-	-	-	+ отлично
7	EFG	-	-	+ 3D	+ 3D, 2D
8	SPH	-	-	-	+ 3D, 2D
9	EFEM + фиктивная масса	-	-	+	-

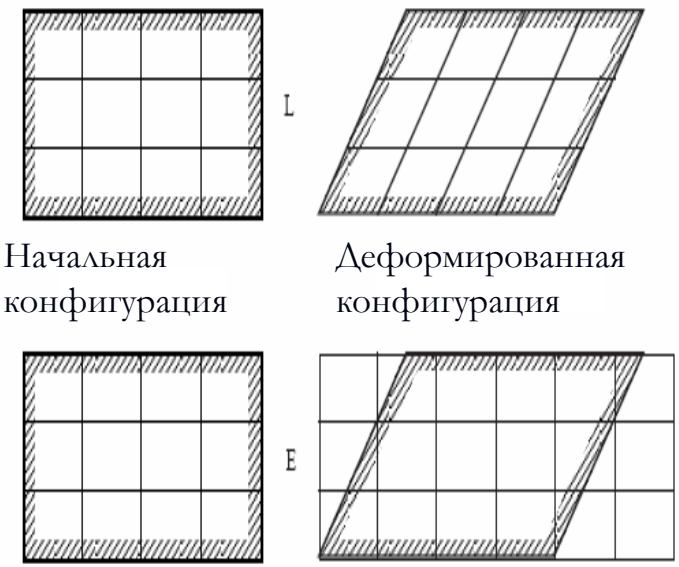
Методы описания движения





Движение сети и материала в ALE методе

Метод Лагранжа и метод Эйлера



Деформация тела по Лагранжу и Эйлеру

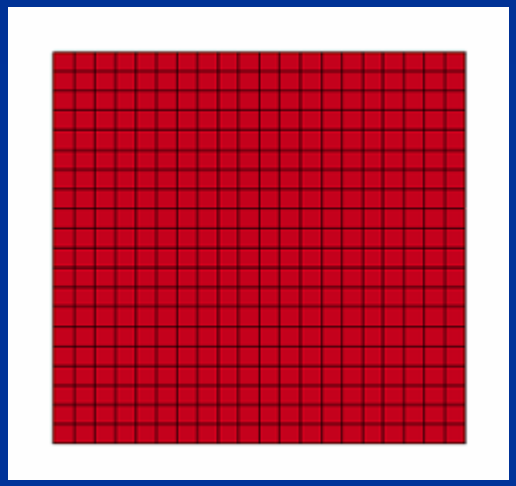
$$v(X,t)=\frac{\partial\phi(X,t)}{\partial t}=1+X(t-1)$$

$\boldsymbol{\phi}(\mathbf{X},t)$ - функция координат деформируемого тела

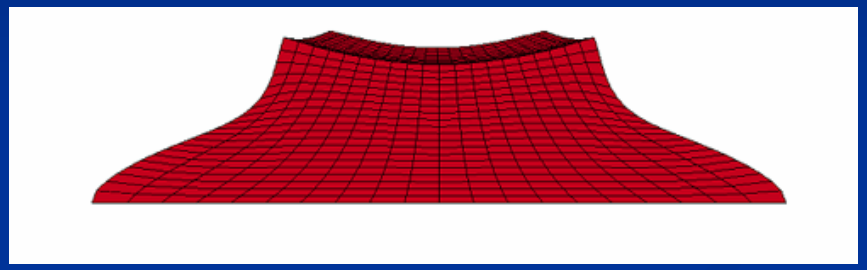
$$\bar{v}(x,t)=1+\frac{(x-t)(t-1)}{\frac{1}{2}t^2-t+1}=\frac{1-x+xt-\frac{1}{2}t^2}{\frac{1}{2}t^2-t+1}$$

Скорости функции координат Лагранжа или Эйлера

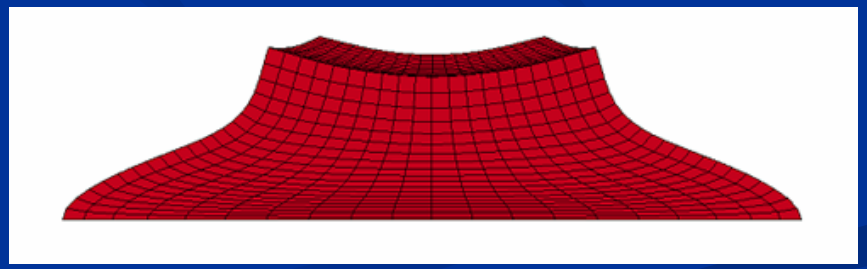
Искажение сети при деформации



Начальная сетка

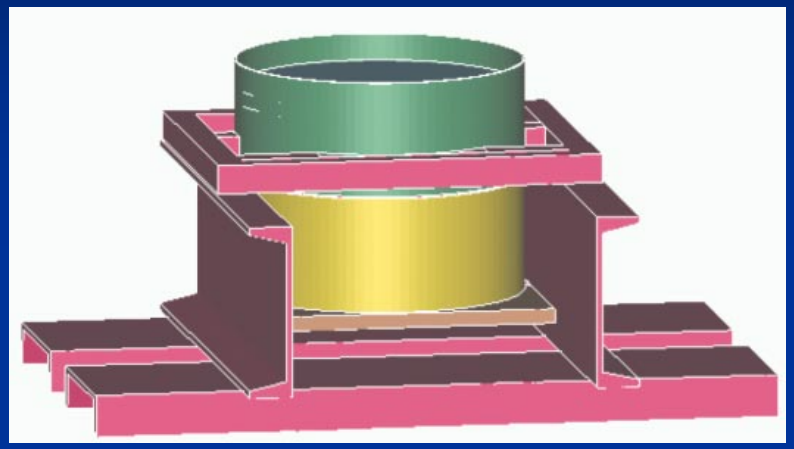


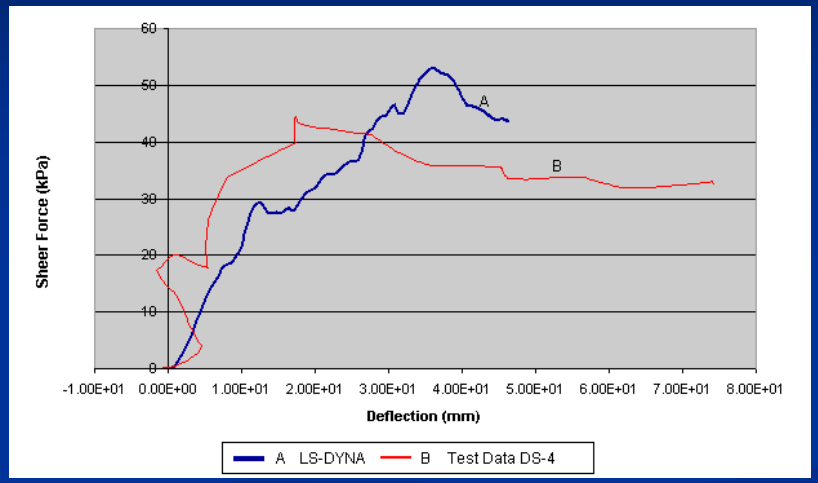
Метод Лагранжа

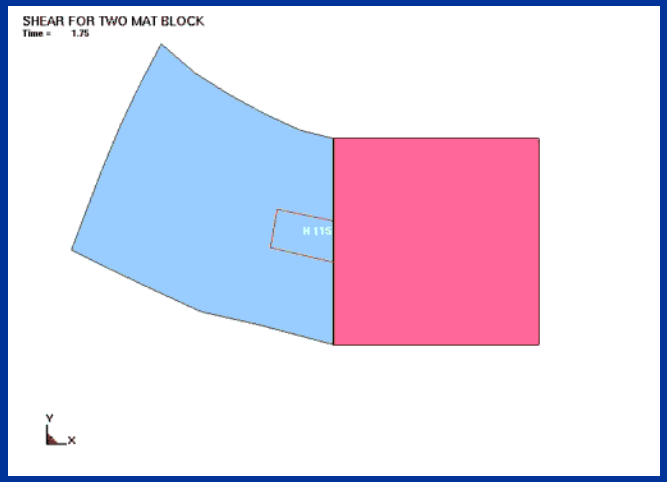


Метод Лагранжа-Ейлера (ALE)

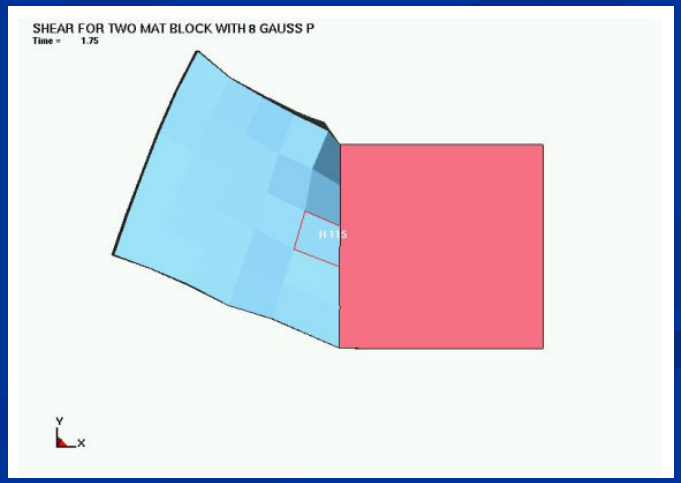
United States Department of Transportation - Federal Highway Administration . Модель материала № 147







Одна точка интегрирования



Восемь точек интегрирования

Решение Commend S. [1]

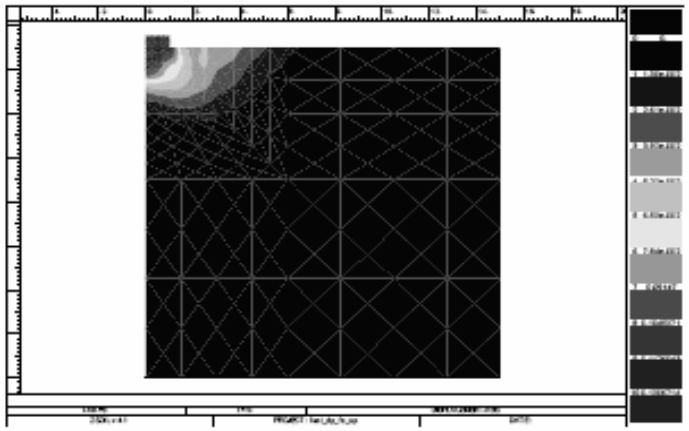


Figure 3-56: Displacement intensities , $\psi = 0^o$ (Q4, $\alpha^e = 1$)

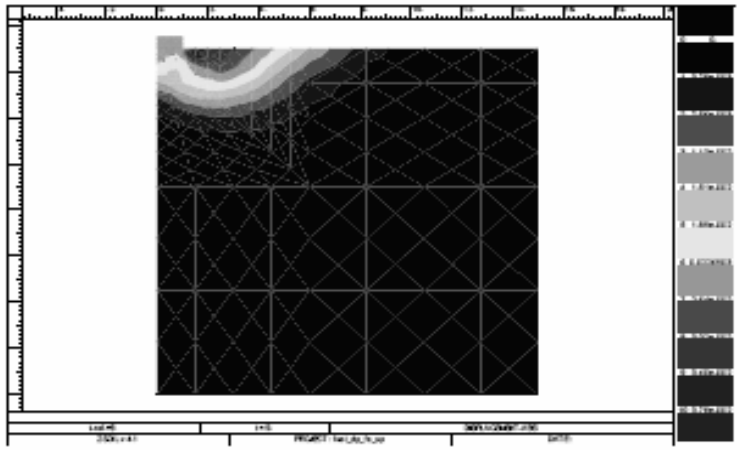


Figure 3-57: Displacement intensities , $\psi = 20^o$ (Q4, $\alpha^e = 1$)

Лоток размером 3х3х2,5 м

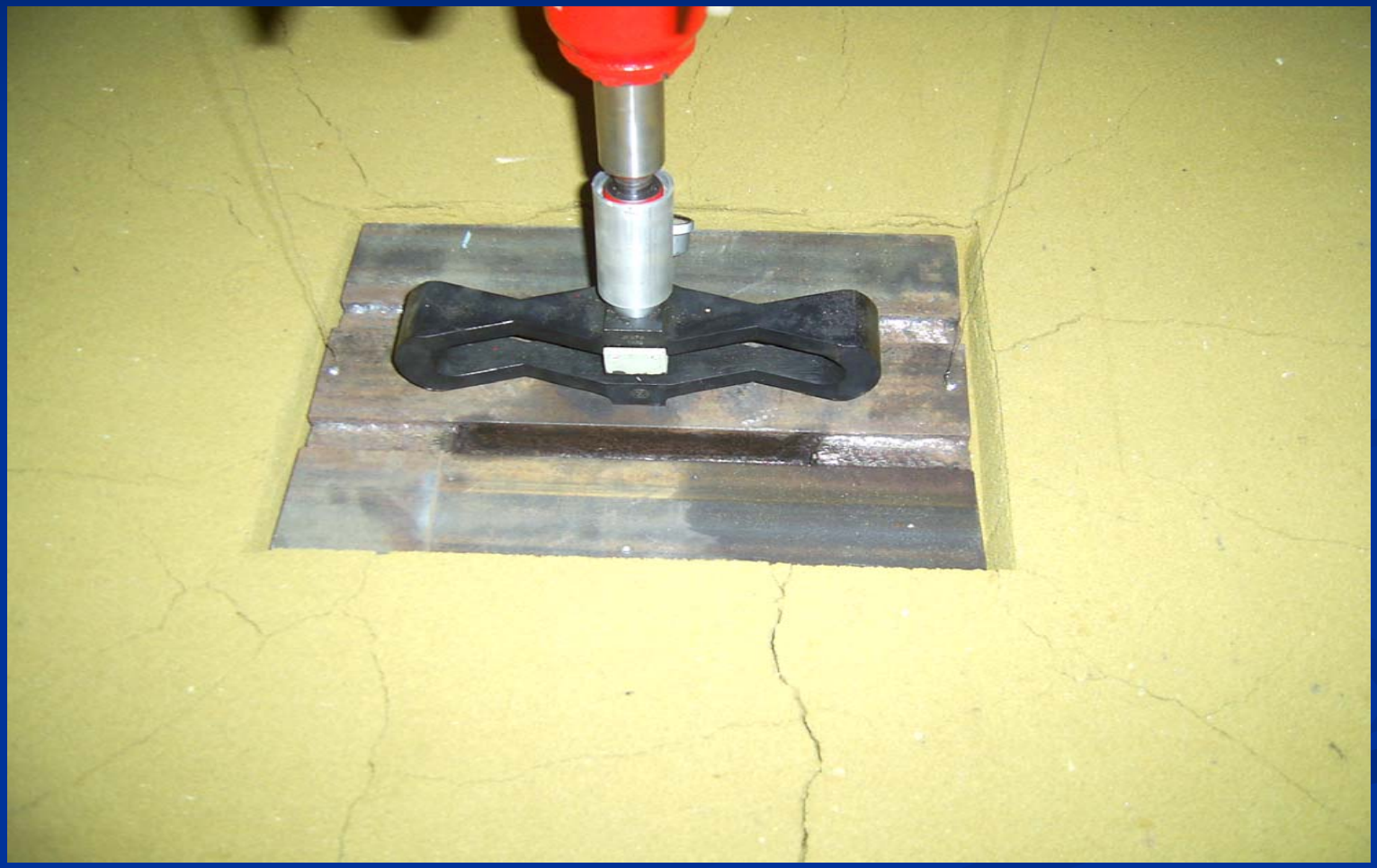
Большой стенд плоской деформации

Автоматизированный стенд плоской деформации

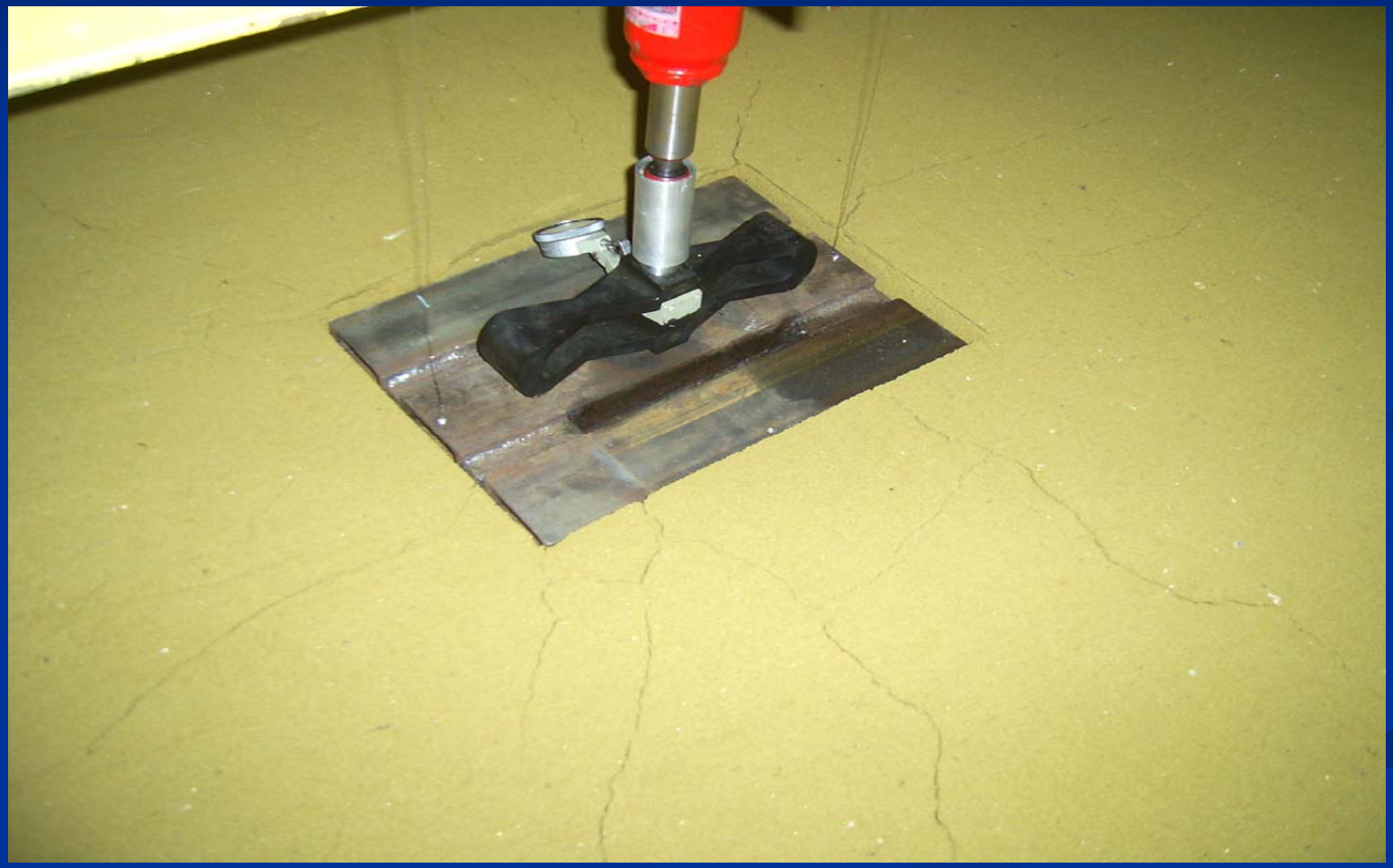
Измерение деформации поверхности основания

Разрывы в песчаном основании

Деформация поверхности песчаного основания



Деформация поверхности песчаного основания



Призма выпора. Центральная нагрузка

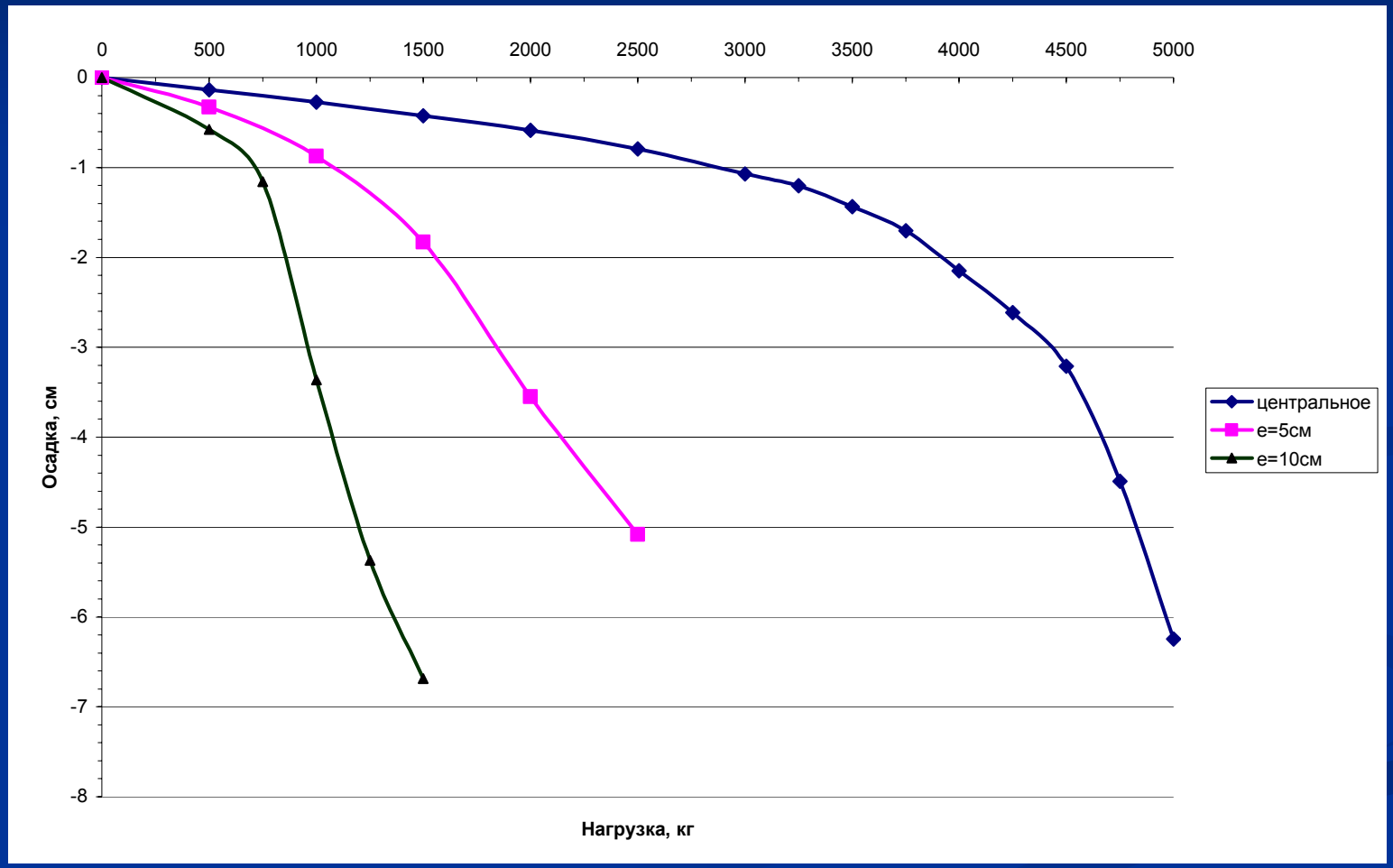
Призма выпора. Центральная нагрузка

Призма выпора. Центральная нагрузка

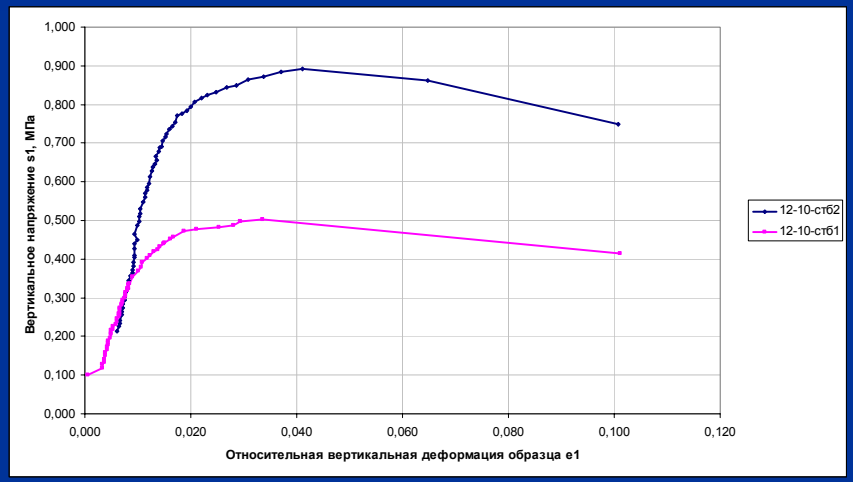
Призма выпора. Внецентренная нагрузка

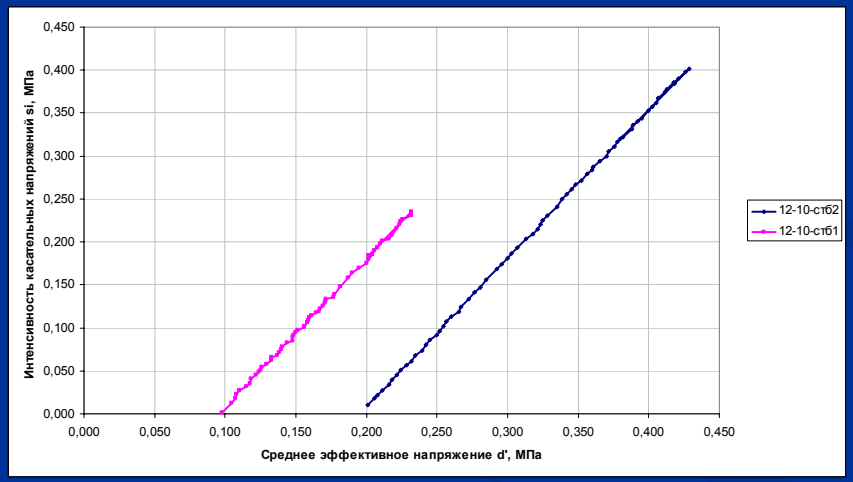
Призма выпора. Внецентренная нагрузка

Зависимость «осадка-нагрузка»



Трехосное сжатие песка

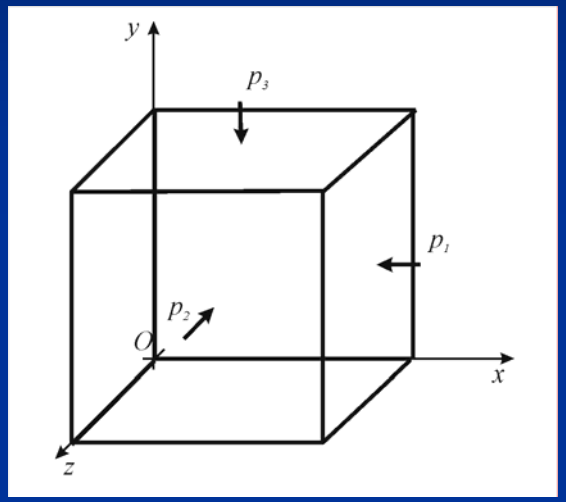




Графики зависимостей вертикального напряжения (МПа) от вертикальной деформации:
12-10 стб2 – боковое давление 100 кПа; 12-10 стб1 – боковое давление 200 кПа

Графики зависимостей интенсивности касательных напряжения (МПа) от среднего эффективного напряжения (МПа): 12-10 стб2 – боковое давление 100 кПа

Идентификация параметров



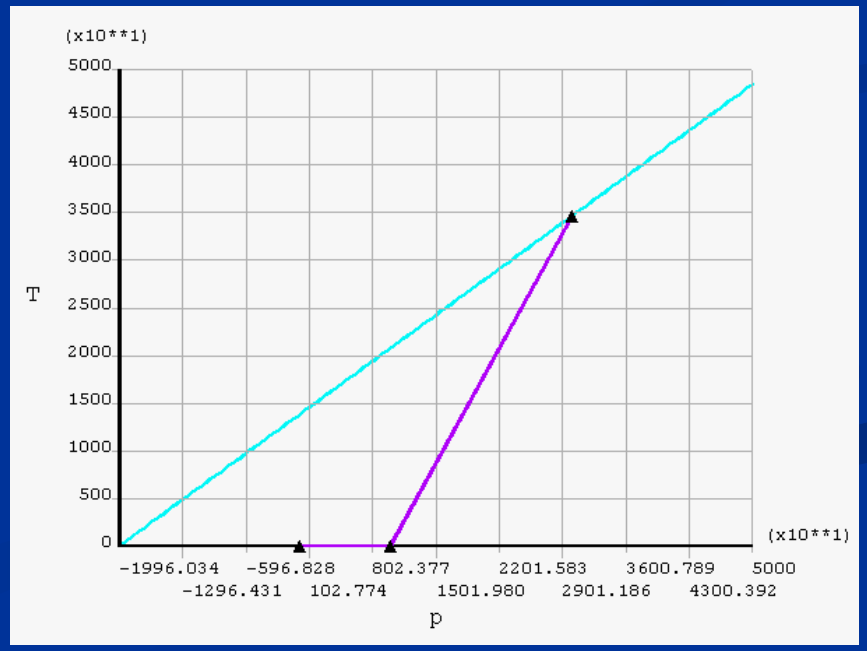
Условие прочности Друкера-Прагера

$$F = T + 3\beta\sigma_m - \sigma_y = 0$$

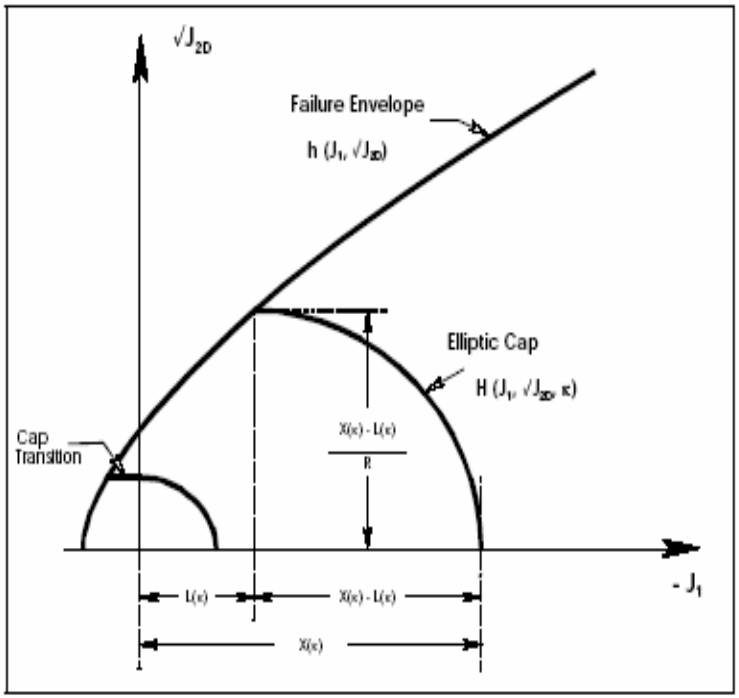
$$p_1 = p_2 = \begin{cases} \dfrac{P_1 t}{k} & \text{при } 0 \le t \le 1; \\ \dfrac{P_1}{k} & \text{при } 1 < t \le 2. \end{cases}$$

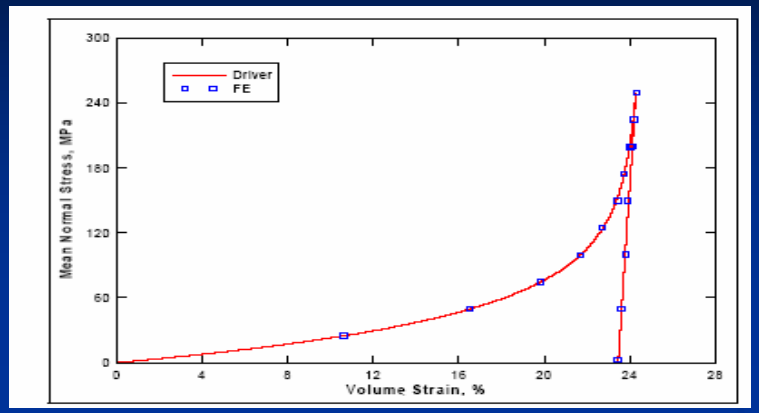
$$p_3 = \begin{cases} P_1 t & \text{при } 0 \le t \le 1 \\ P_1 + (P_2 - P_1)(t-1) & \text{при } 1 < t \le 2. \end{cases}$$

где k – параметр ; $P1$ и $P2$ – параметры процесса нагружения ; t – время.

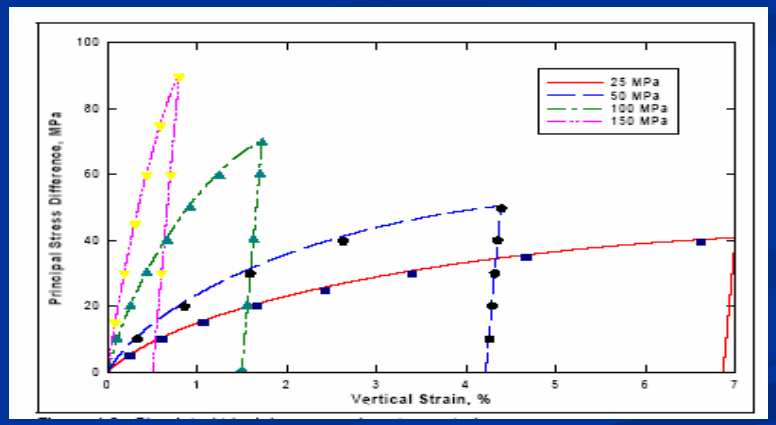


CAP модель





Гидростатическое сжатие



Девиаторное нагружение

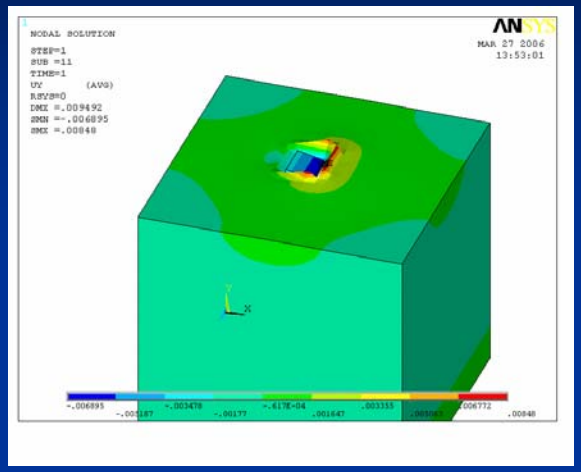
$$h(J_1, \sqrt{J_{2D}}) = \sqrt{J_{2D}} - \left[A - C\exp(BJ_1)\right] \quad \text{if } J_1 > L(\kappa)$$

$$H(J_1, \sqrt{J_{2D}}, \kappa) = \sqrt{J_{2D}} - \frac{1}{R}\left\{[X(\kappa) - L(\kappa)]^2 - [J_1 - L(\kappa)]^2\right\}^{0.5} \quad \text{if } J_1 < L(\kappa)$$

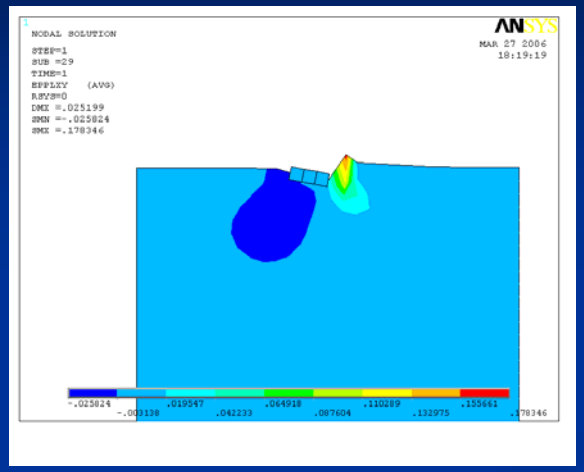
$$K(J_1, \varepsilon_{kk}^p) = \frac{K_i}{1 - K_1}\left[1 - K_1 \exp(K_2 \varepsilon_{kk}^p)\right]$$

$$G(J_{2D}, \varepsilon_{kk}^p) = \frac{G_i}{1 - G_1}\left[1 - G_1 \exp(G_2 \varepsilon_{kk}^p)\right]$$

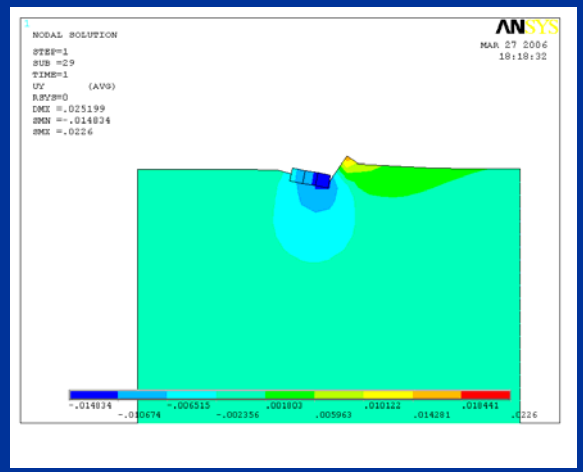
Внецентренная нагрузка. ANSYS. Модель Друкера-Прагера



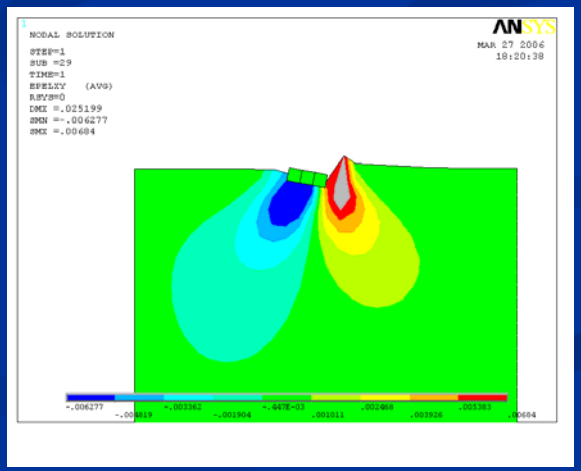
Осадка штампа



Упругие деформации сдвига

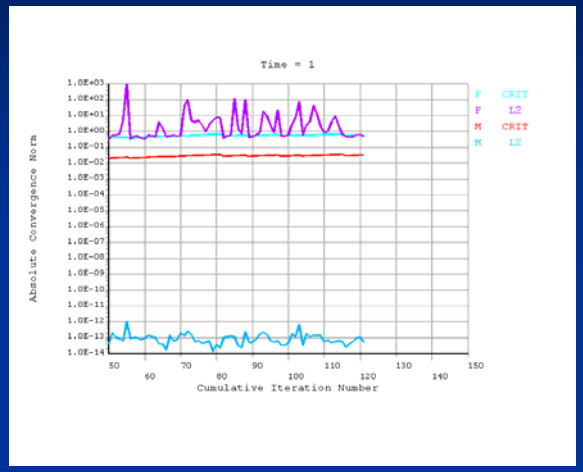


Вертикальная деформация

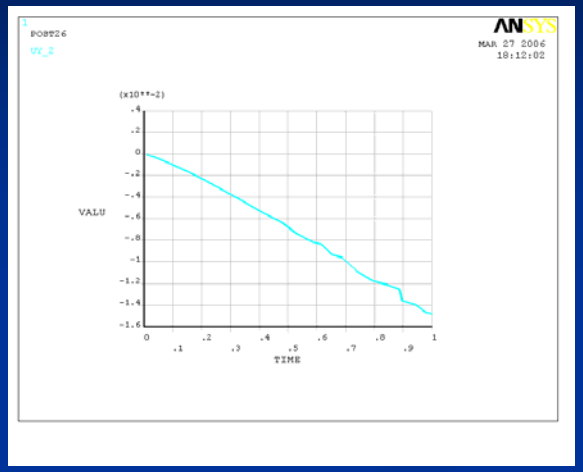


Пластические деформации сдвига

Внецентренная нагрузка. ANSYS. Модель Друкера-Прагера

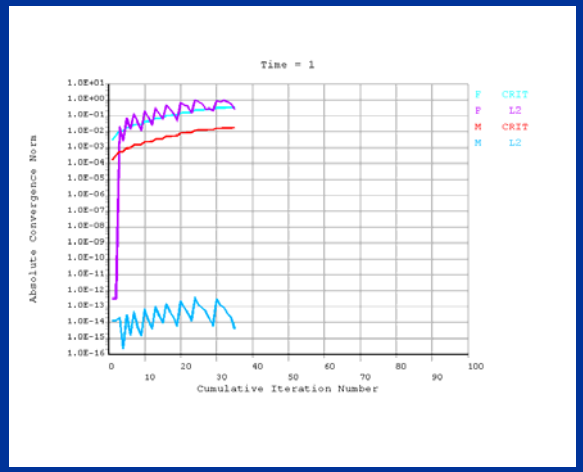


Нагрузка на штамп
0 – 60 кН

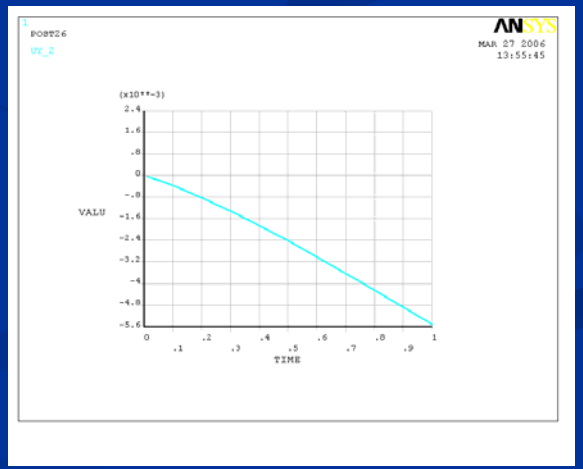


Сходимость решения

Зависимость «Осадка-нагрузка»



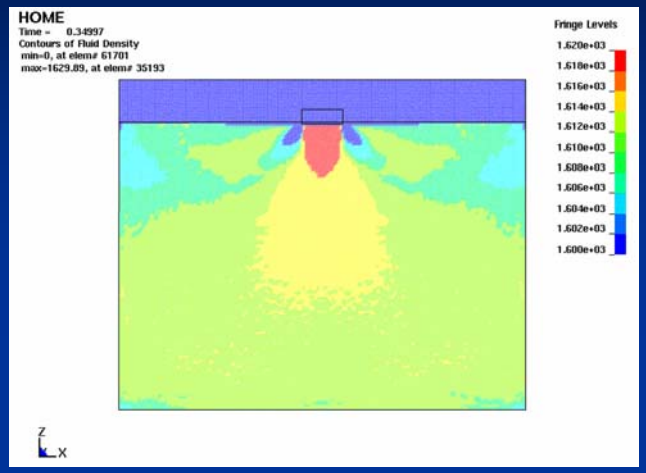
Нагрузка на штамп
0 – 120 кН

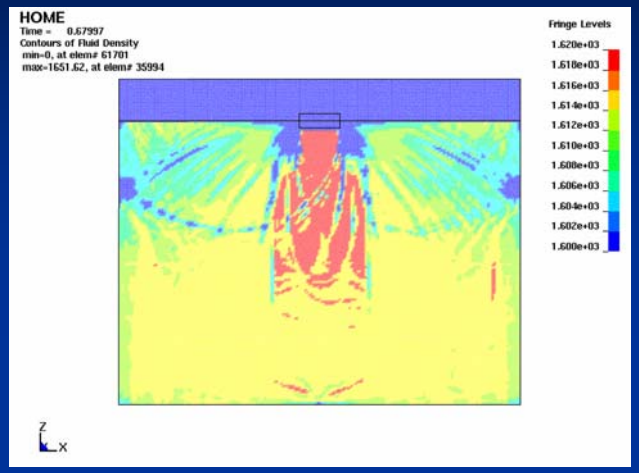


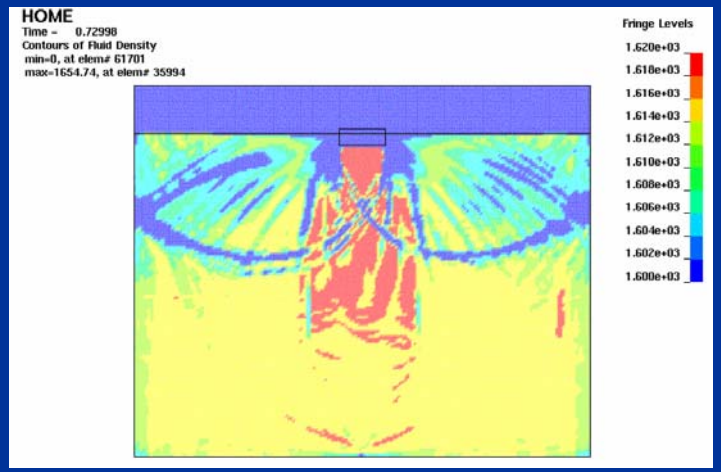
Центрально нагруженный штамп. LS-DYNA

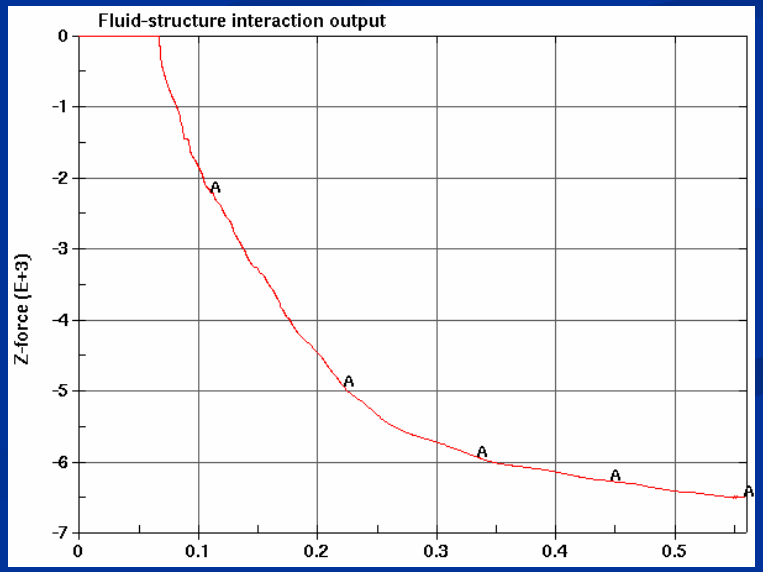
Плоская деформация

Изменение плотности песка

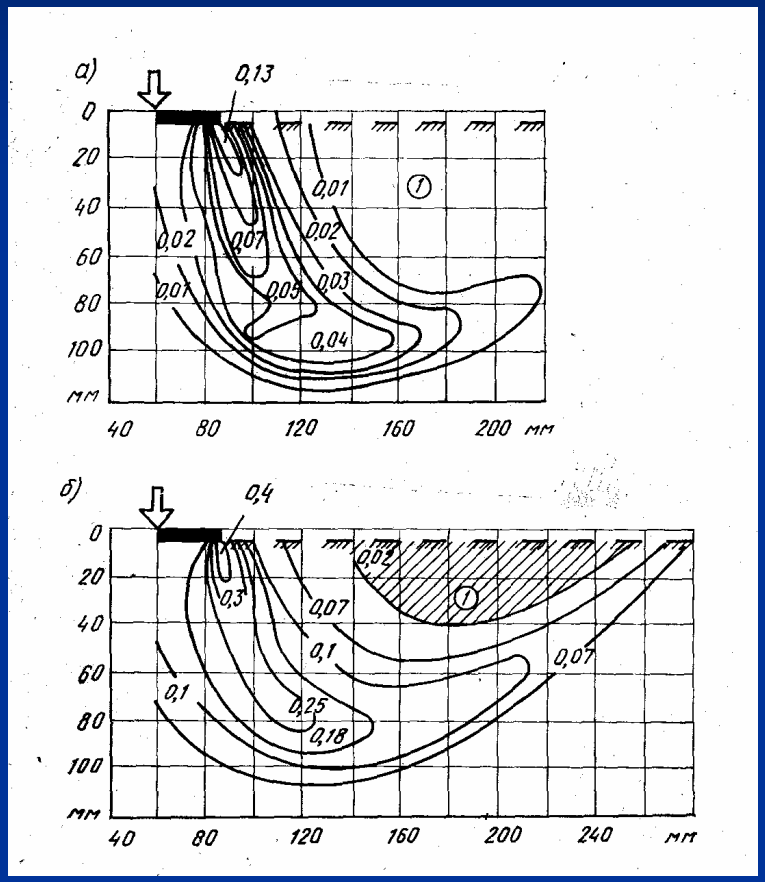


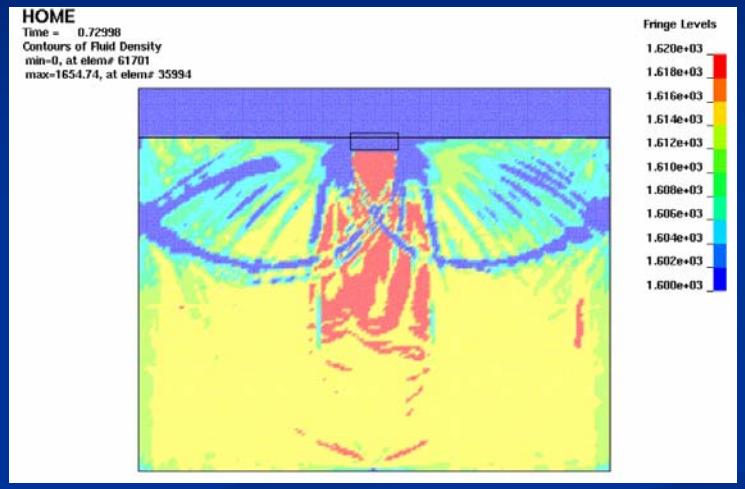


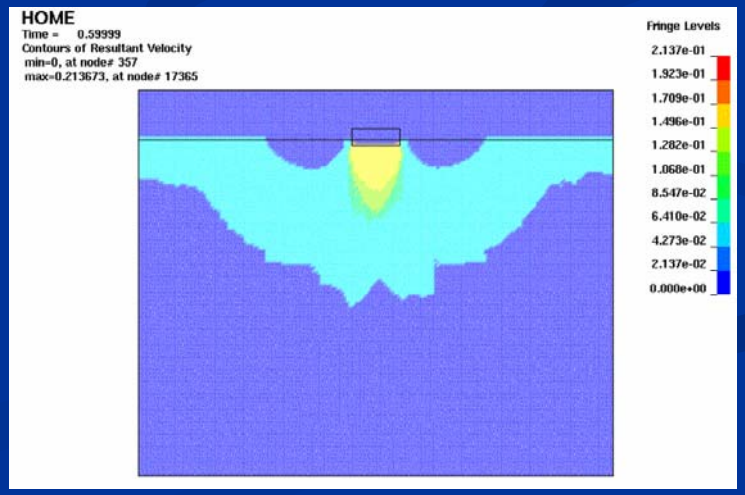




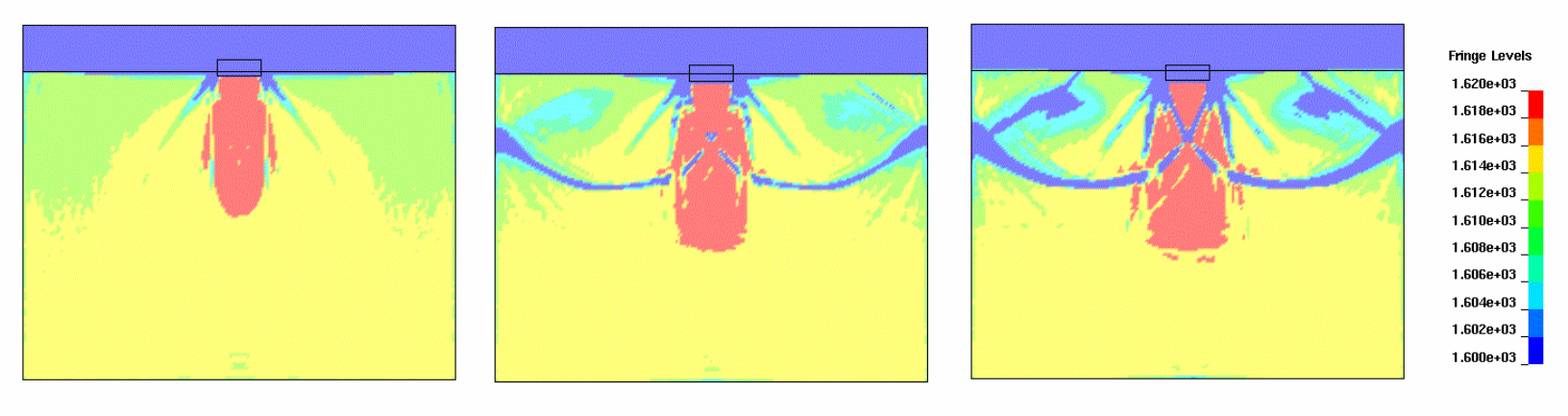
Опыт и численное решение

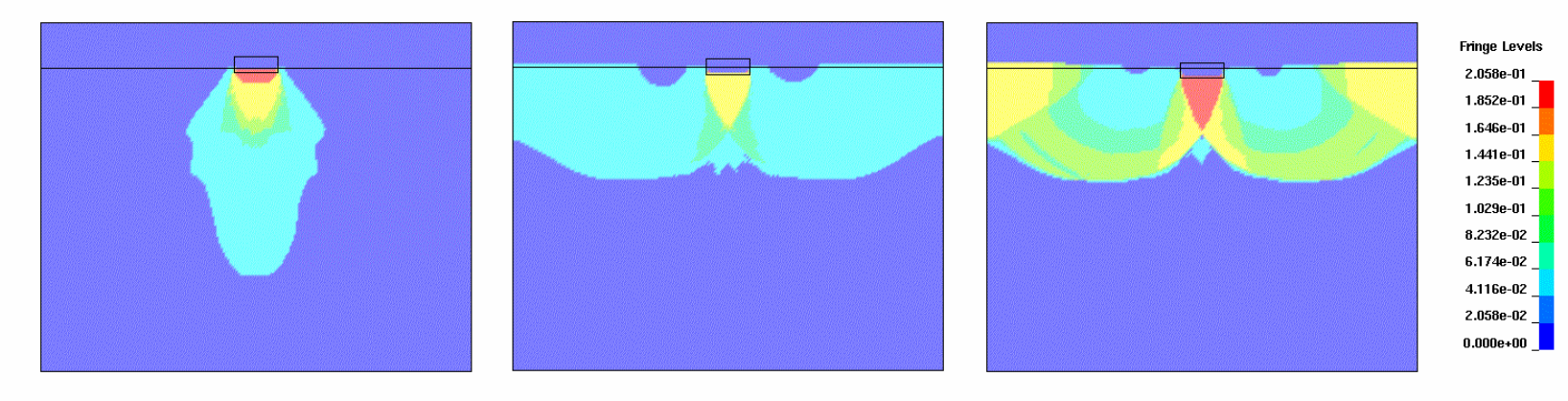




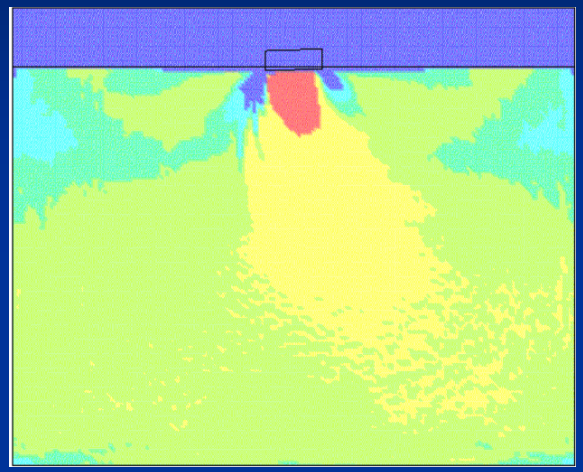


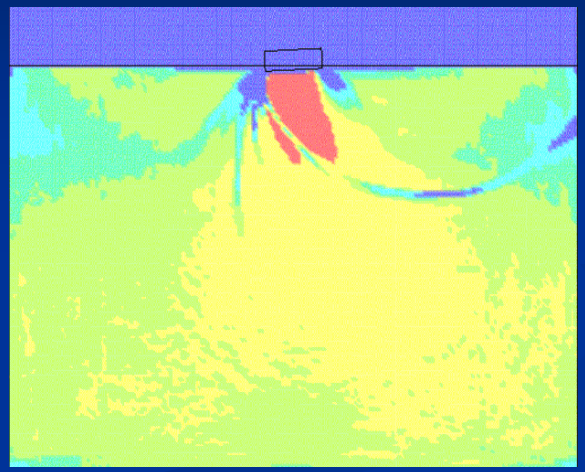
Разрушение и упрочнение песка

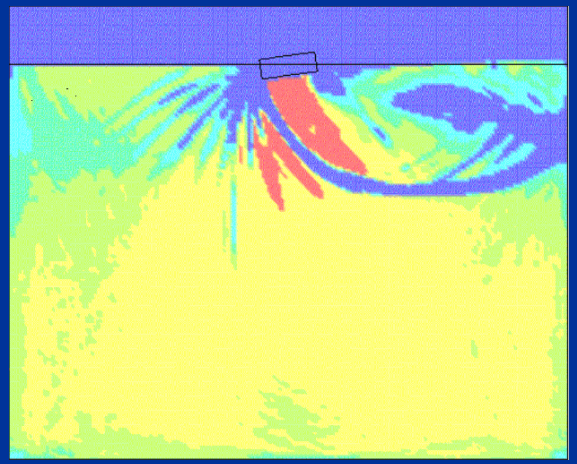


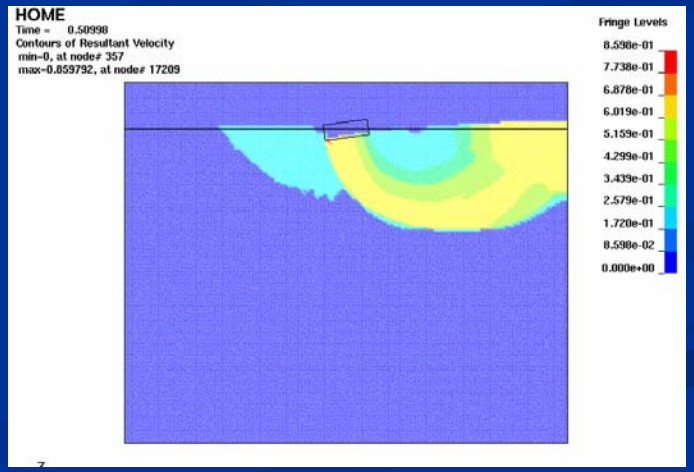


Изменение плотности песка

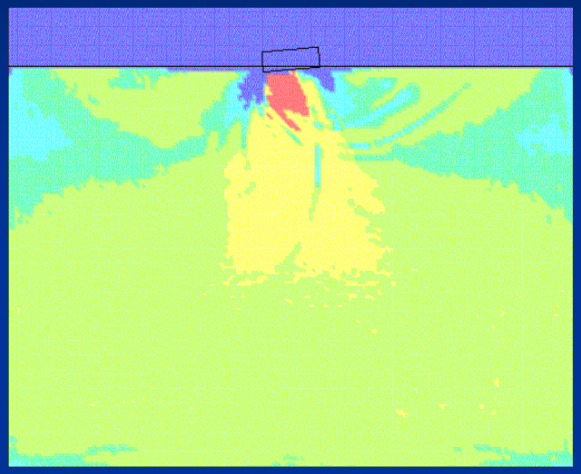


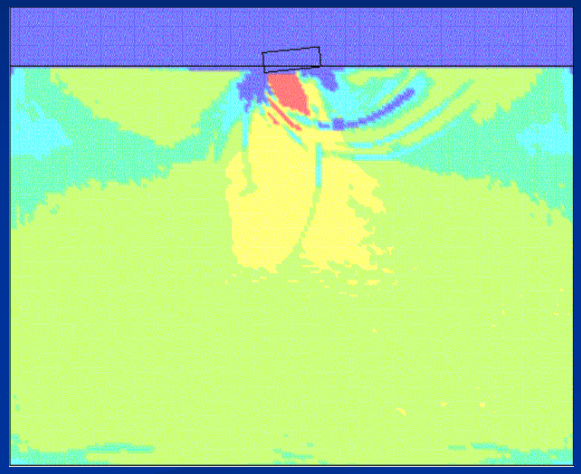


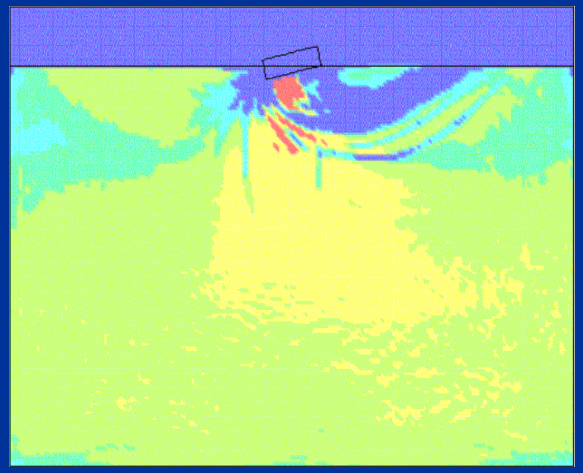


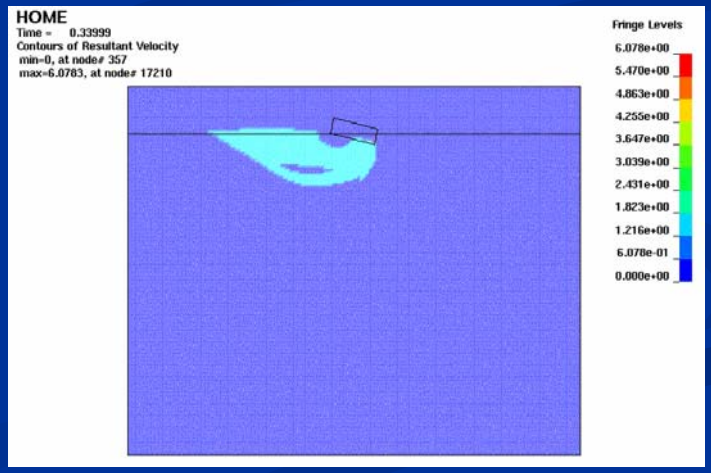


Изменение плотности песка

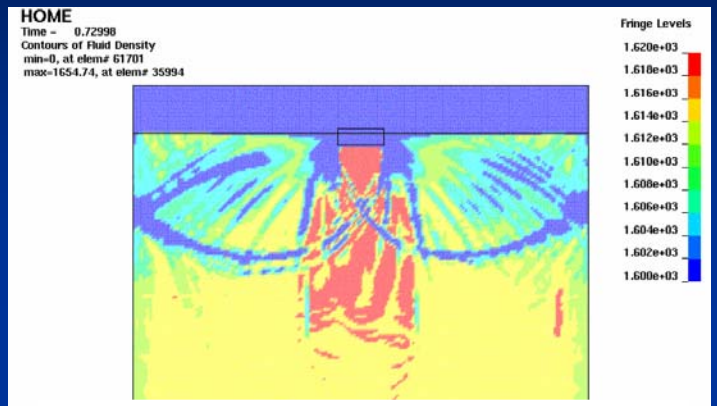




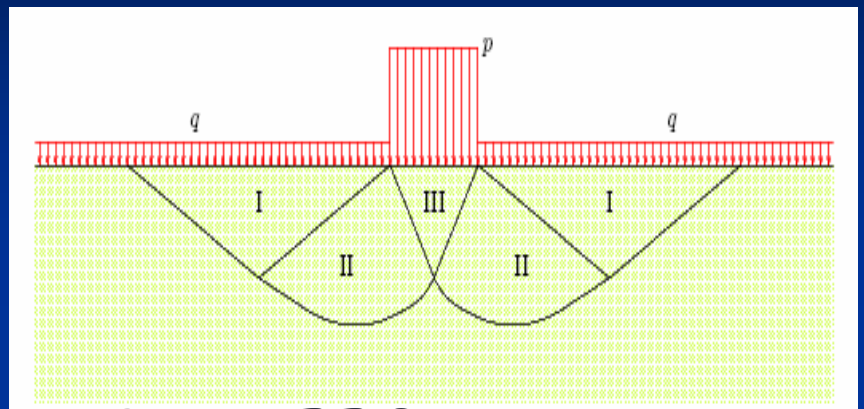




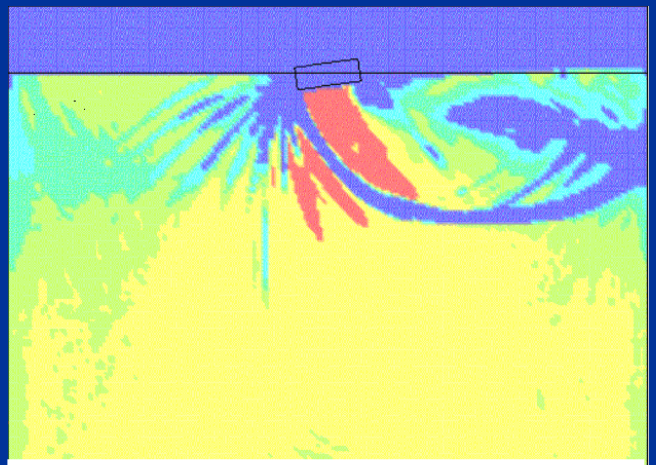
Влияние эксцентриситета нагрузки



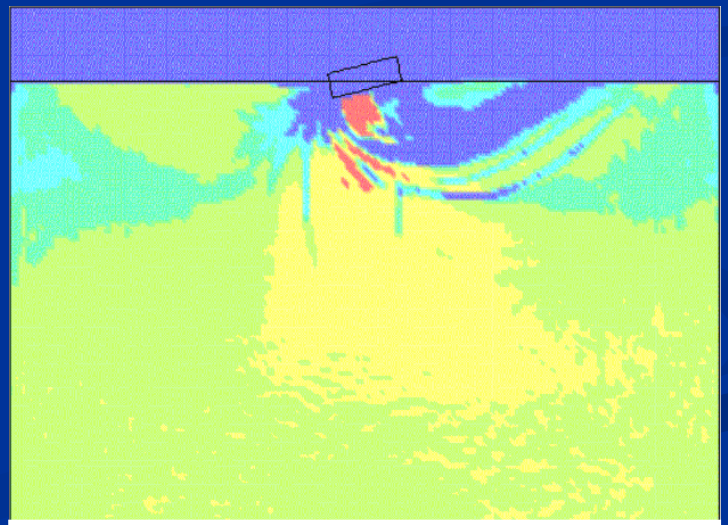
Центральная нагрузка



Решение В.В.Соколовского



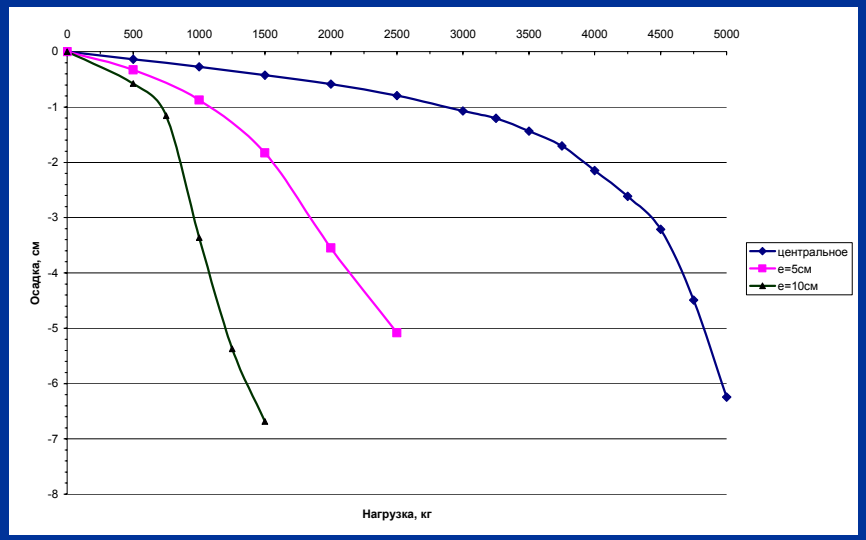
Эксцентриситет 5 см



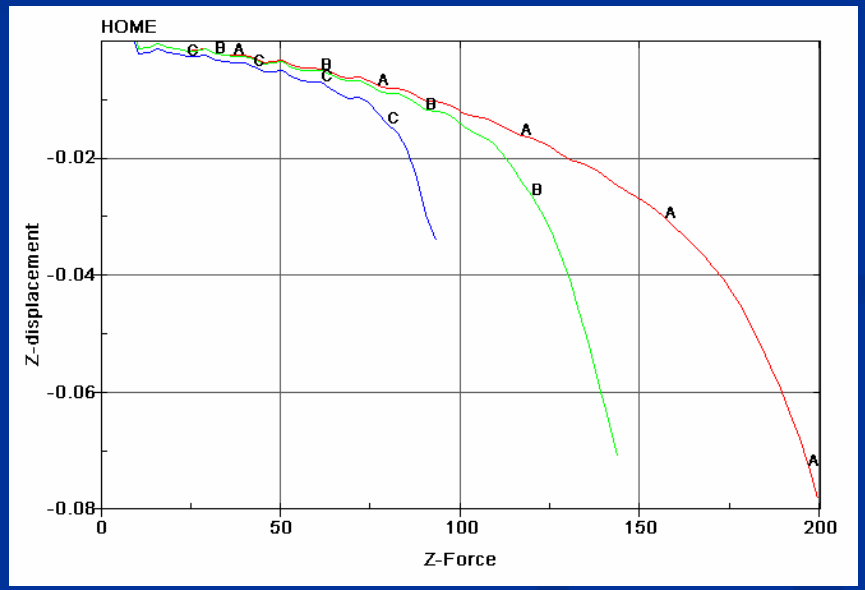
Эксцентриситет 10 см

Графики зависимости вертикального перемещения плиты от вертикальной нагрузки

Опыт



Численное решение

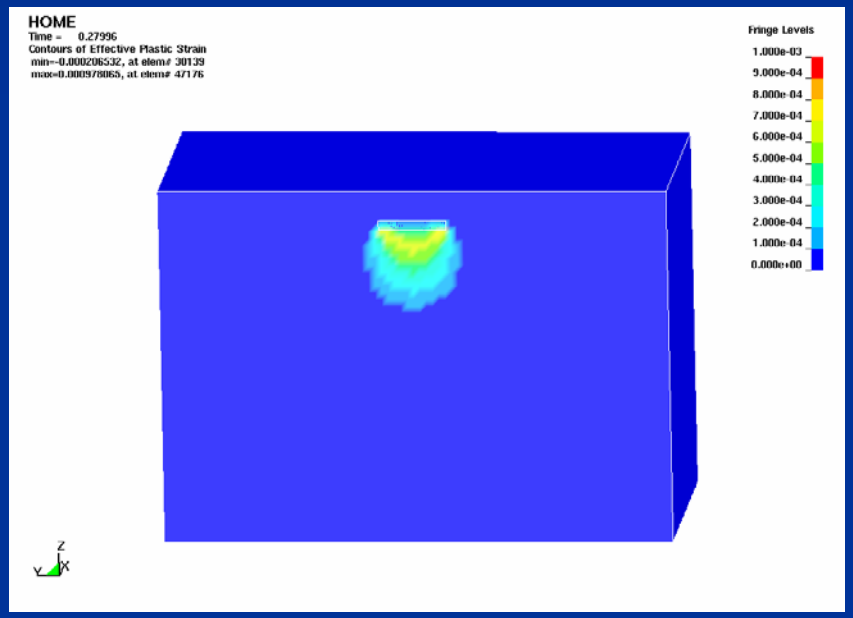


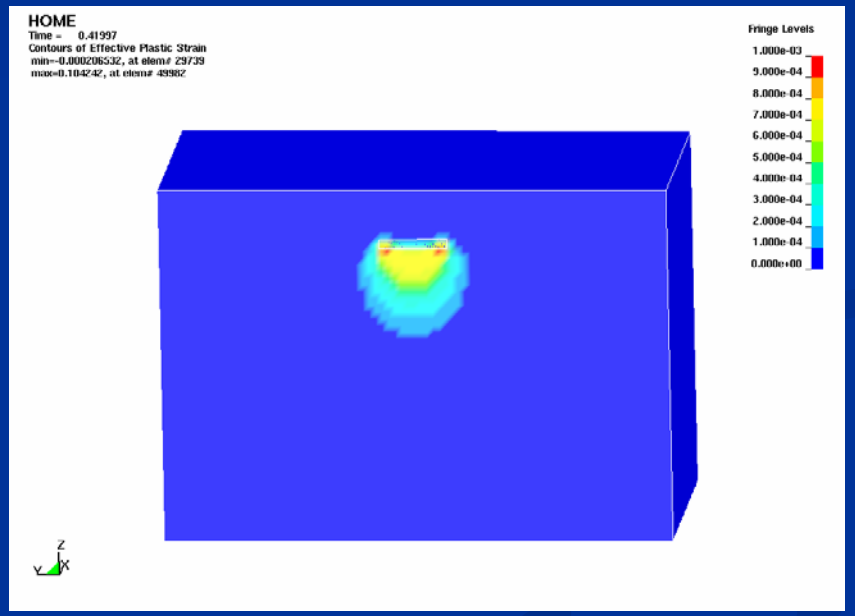
A; B; C – эксцентриситет 0, 5 и 10 см соответственно

Центрально нагруженный штамп. LS-DYNA

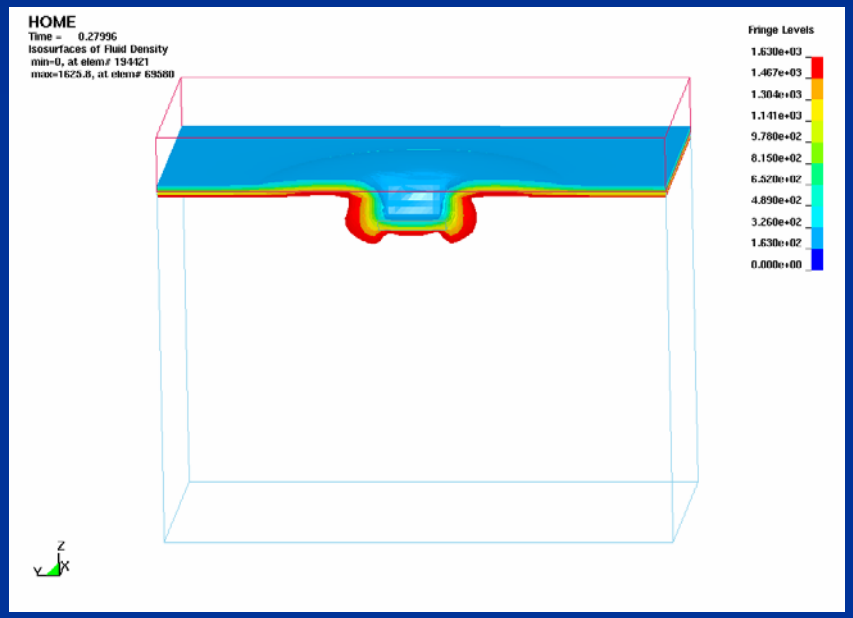
Пространственная деформация

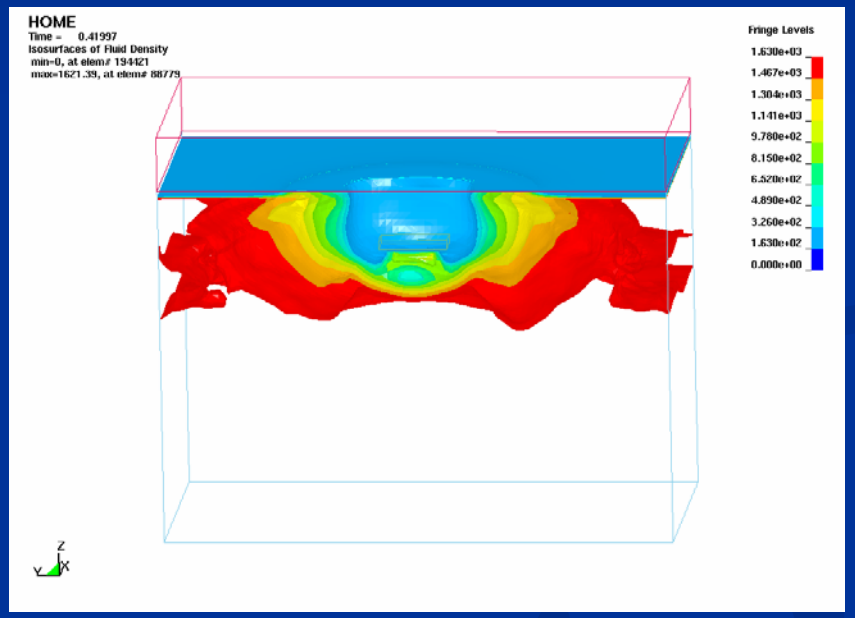
Объемная деформация



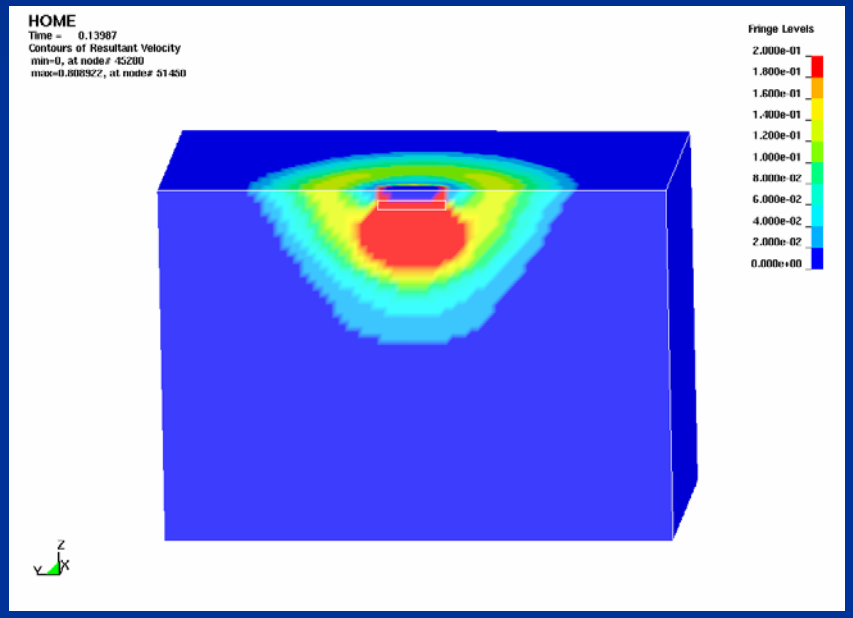


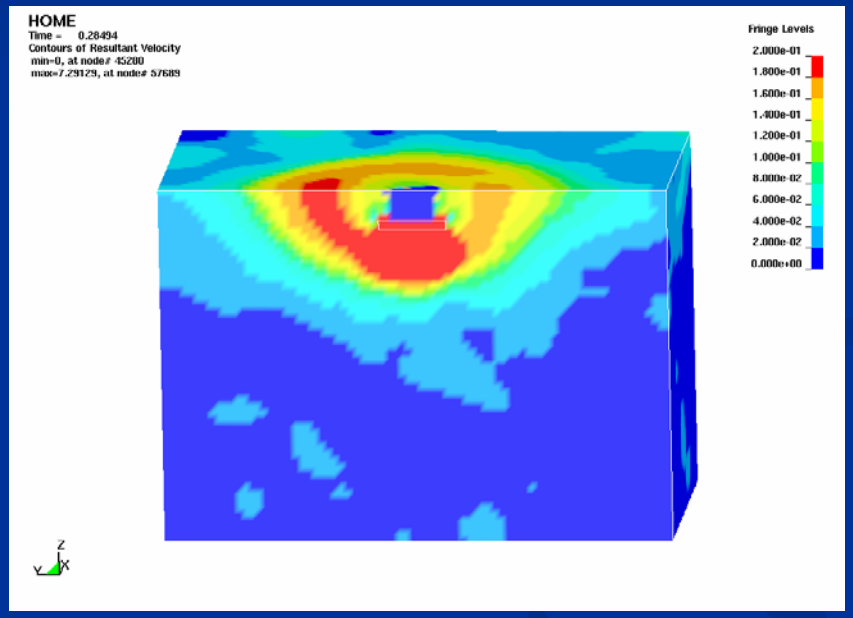
Изменение плотности песка



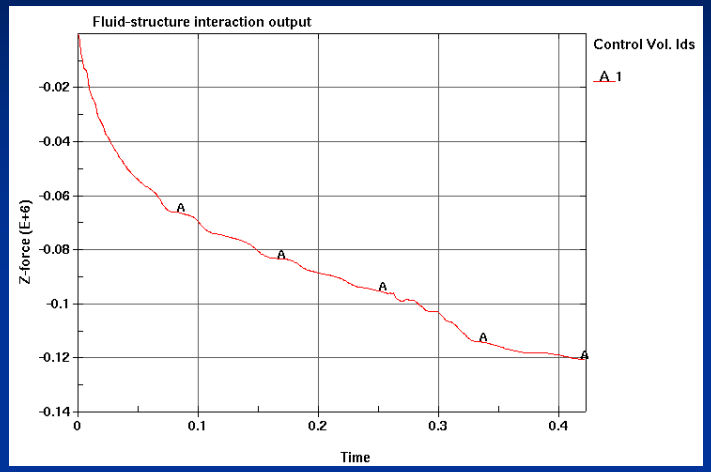


Скорость деформации

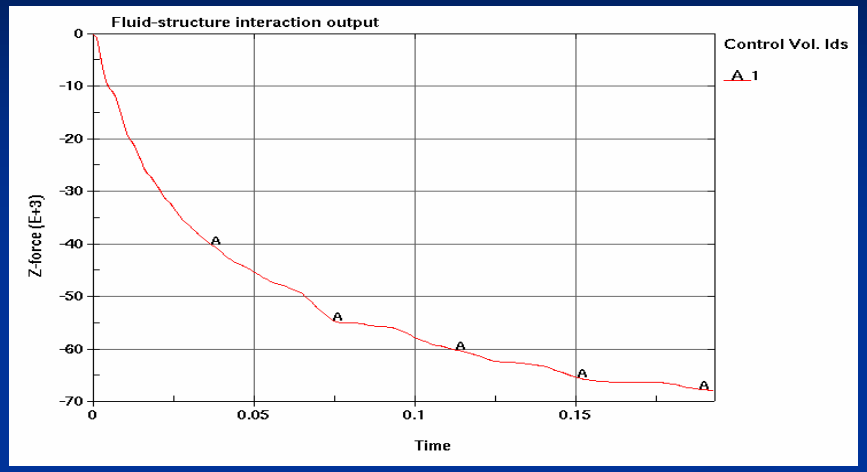




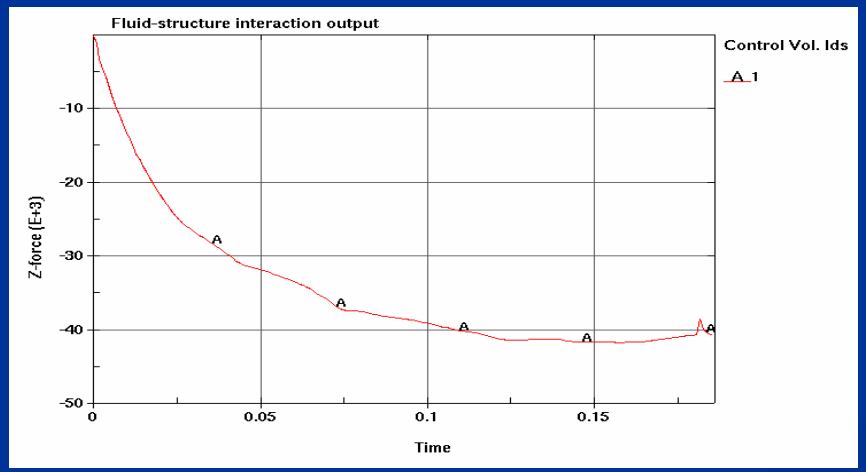
Зависимость «нагрузка-осадка»



Центральная нагрузка



Эксцентриситет 5 см

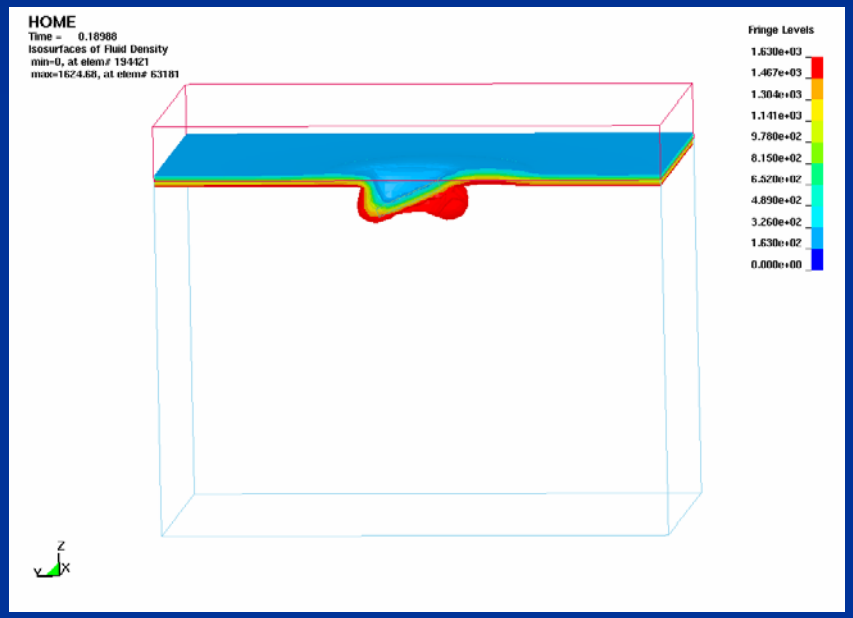


Эксцентриситет 10 см

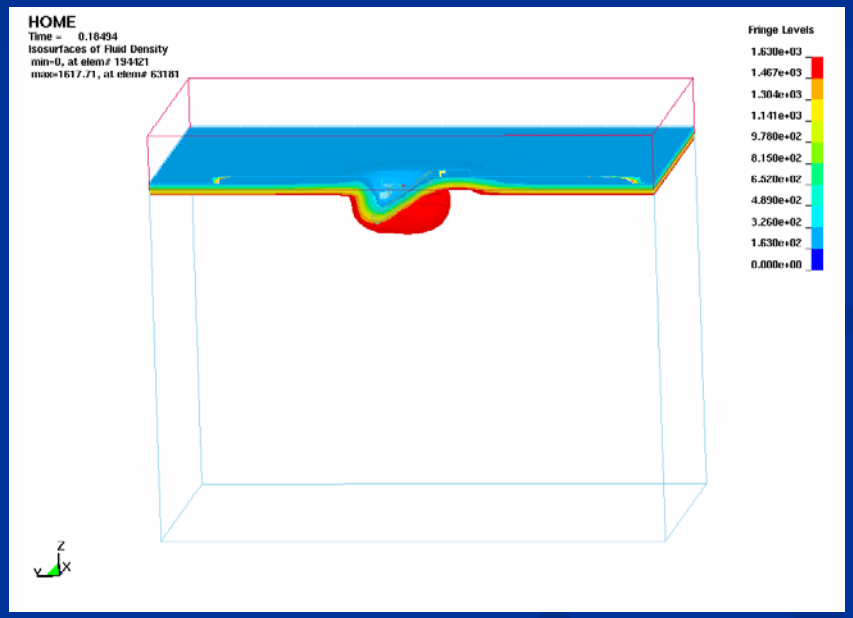
Внецентренно нагруженный штамп

Пространственная деформация

Изменение плотности песка

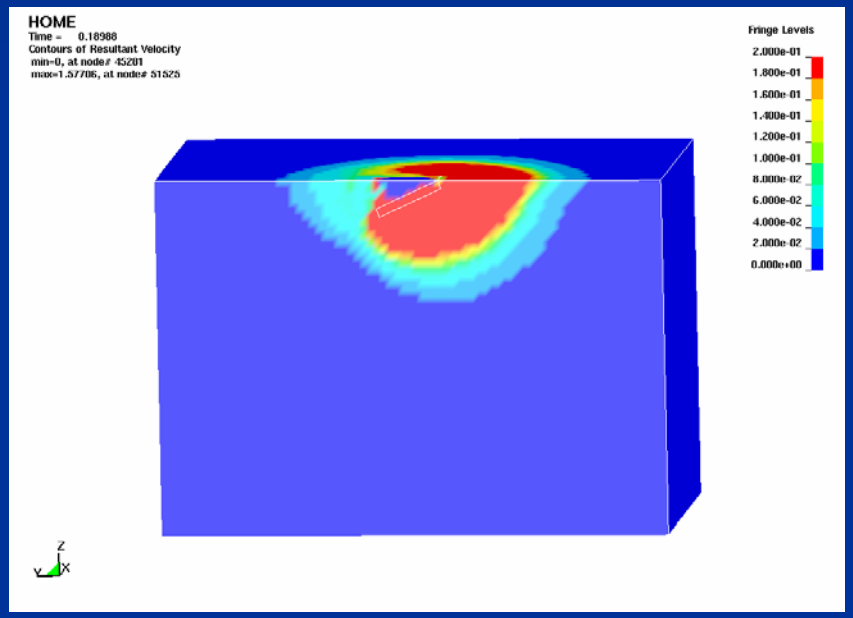


Эксцентриситет нагрузки 5 см

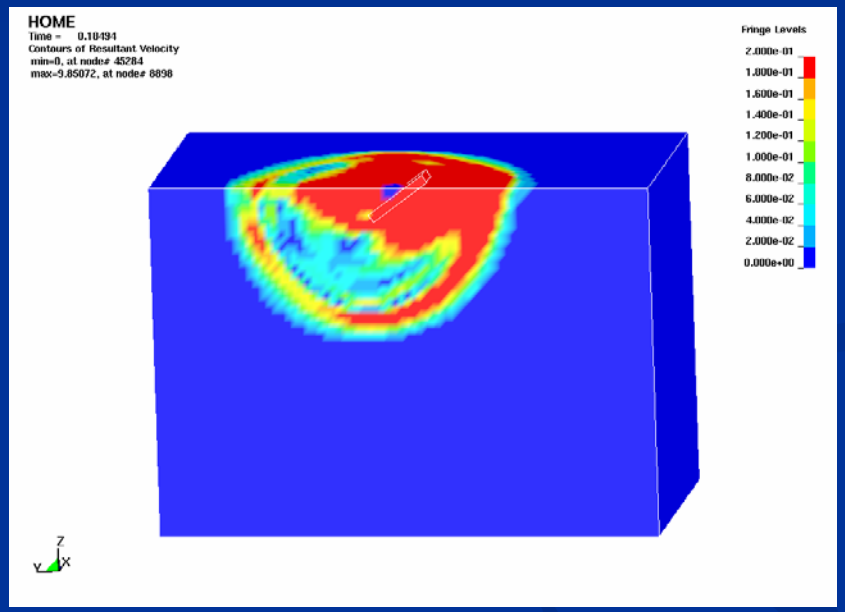


Эксцентриситет нагрузки 10 см

Изменение скорости деформации



Эксцентриситет нагрузки 5 см



Эксцентриситет нагрузки 10 см

Литература

1. Commend S. Stabilized Finite Elements in Geomechanics. Dr.es.Sc.Techn. at the Ecole Politechnique Federale de Lausanne, 2001.
2. 2. Di Y., Sato T. Cjmputational Modelling of Large Deformation of Saturated Soils Using an ALE Finite Element Method. Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 47 C, 2004.
3. Di Y., Sato T. Remapping Scheme in ALE Method for Liquefaction Simulation. 16 th ASCE Engineering Mechanics Conference. July 16-18, 2003, University of Washington, Seattle.
4. Nazem M., Sheng D. Arbitrary Lagrangian-Euleran Method for Consolidstion Problems in Geomechanics. VIII International Conference on Computational Plasticity. COMPLAS VIII. Eds.: E.Onate, D.R.J.Owen, Barcelona, 2005.
5. Li S., Liu W.K. Numerical simulation of strain localization in inelastic solids using mesh-free methods. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000. No. 48, 1285-1309 pp.
6. Murakami A., Arimoto S., Setsuyasu T., Nishiyama T. Mesh-Free Method for Predicting the Behavior of Saturated Soil. In: Geomechanics. Testing, Modelling, and Simulation, 2005. 664-672 pp.

Литература (продолженеие)

- 6. Kohnke P. ANSYS. Theory Reference. – Southpointe, ANSYS, inc. 1998.
- 7. Болдырев Г.Г., Никитин Е.В. Деформация песка в основании полосового штампа. Основания, фундаменты и механика грунтов. № 1, 1987. с. 26-28.
- 8. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. – М.: 3-е изд. – 1960.
- 9. Chen W.F., Saleeb A.F. Constitutive equations for engineering materials. Vol. 1,2. 1987.