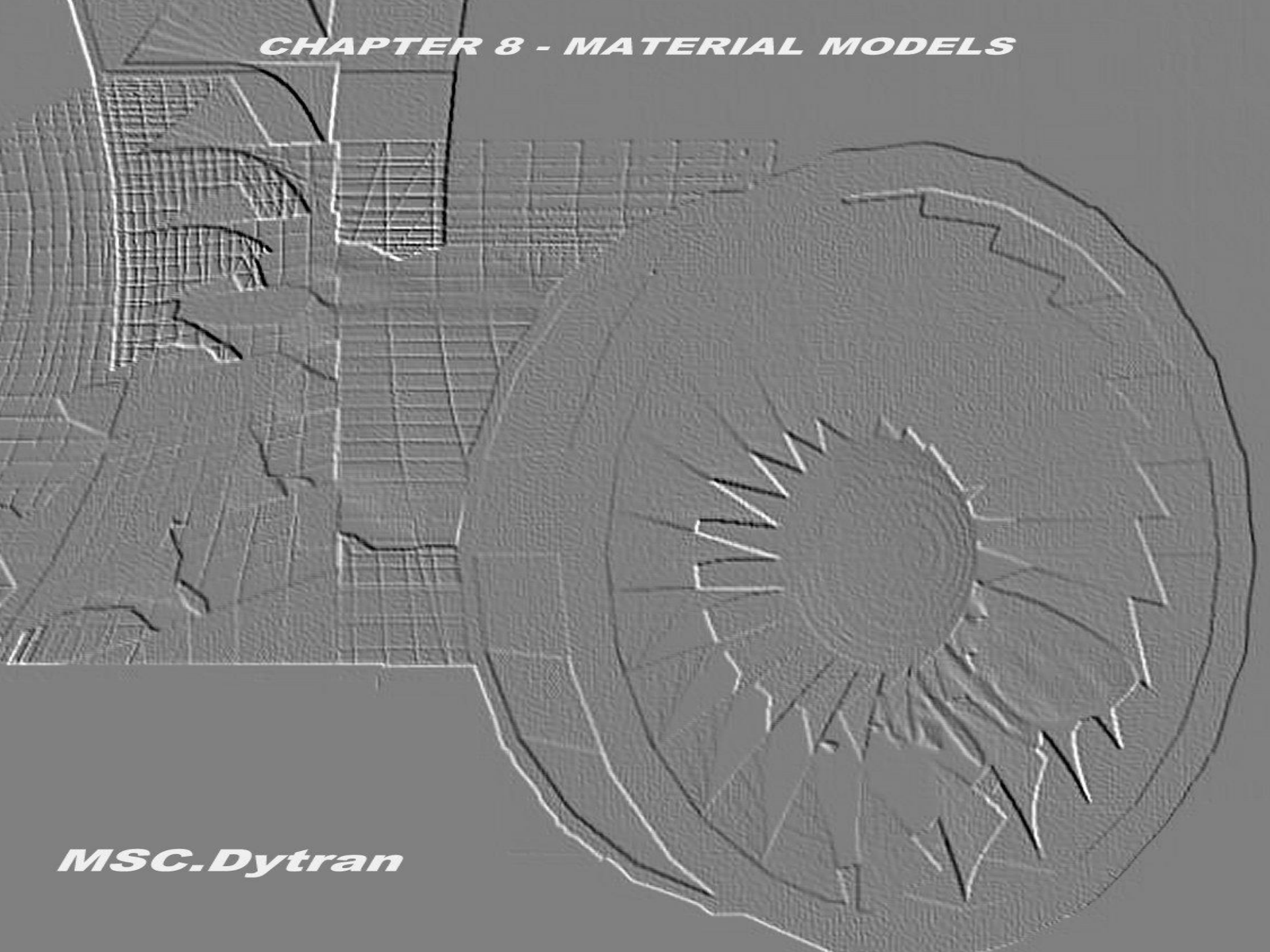


***CHAPTER 8 - MATERIAL MODELS***



***MSC.Dytran***

## СОДЕРЖАНИЕ

- Задание (описание) материалов**
- Уравнение состояния**
- Модели сдвиговых свойств**
- Модели текучести (предельного состояния)**
- Модель нарушения сплошности материала (модель “разрыва”)**
- Модели разрушения**

## “ТИПЫ” МАТЕРИАЛОВ

- ❑ Операторы задания *лагранжевых* элементов ссылаются на операторы описания *свойств*, которые “переадресуют” ссылку на оператор описания *материалов*

CQUAD4,71,100,1,2,3,4

PSHELL,100,300,0.1

DMATER,300,7852.,210.E9,0.3

- ❑ Доступны следующие модели материалов:

- DMAT – “обобщённая” модель материала
  - ✓ Материал с комплексным заданием всех свойств, включая текучесть, разрушение, нарушение сплошности (разрыв)
  - ✓ Может использоваться для описания только объёмных элементов
- MAT1 – упругий (эластичный) материал
  - ✓ Линейно-упругий материал для моделирования балок и оболочек
- DMATEL – упругий (эластичный) материал
  - ✓ Линейно-упругий материал для моделирования мембран и объёмных тел
- DMATER – упруго-пластичный материал с разрушением
  - ✓ Линейно упругий и линейно-пластичный материал для моделирования балок и оболочек

## “ТИПЫ” МАТЕРИАЛОВ

- **MAT8 + MAT8A** – ортотропные материалы, в том числе с разрушением
  - ✓ Ортотропные материалы для моделирования оболочек (включая композитные)
- **SHEETMAT** – анизотропный упруго-пластичный материал с разрушением для оболочек
  - ✓ Используется для моделирования конструкций из металлического листа, полученного прокаткой. Модель разработана проф. Раймондом Крейгом (Raymond Krieg)
- **DMATOR** – ортотропный линейно-упругий материал с разрушением
  - ✓ Ортотропный материал для моделирования объёмных элементов (в том числе из композиционных материалов)
- **DYMAT14** – материал для моделирования грунтов и вспененных материалов
  - ✓ Нелинейный материал с возможностью большого объёмного сжатия и упруго-пластический при деформациях сдвига
- **DYMAT24** – упруго-пластический материал с разрушением
  - ✓ Нелинейный упруго-пластический материал с изотропным упрочнением и кусочно-линейной зависимостью напряжения от деформации. Применяется для моделирования оболочек, балок и для *лагранжевых* объёмных элементов

## “ТИПЫ” МАТЕРИАЛОВ

- **DYMAT25 – модель материала со специальной зависимостью кинематического упрочнения**
  - ✓ Материал может использоваться для моделирования структур из камня, бетона и грунта
- **DYMAT26 – ортотропный материал с возможностью большого объёмного сжатия**
  - ✓ Материал может использоваться только для *лагранжевых* объёмных элементов
- **RUBBER1 – резиноподобный материал**
  - ✓ Почти несжимаемый гиперэластичный материал. Может применяться только для лагранжевых объёмных элементов
- **FOAM1 – изотропный материал с возможностью большого сжатия**
  - ✓ Материал с нулевым значением коэффициента Пуассона
- **FOAM2 – изотропный “пенноподобный” материал с гистерезисом**
  - ✓ Форма “петли” материала задаётся пользователем, а коэффициент Пуассона имеет нулевое значение

## “ПРИМЕНИМОСТЬ” МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

- ❑ **Балки**
  - MAT1 – упругий (эластичный) материал
  - DMATER - упруго-пластичный материал с разрушением
  - DYMAT24 - упруго-пластический материал с разрушением
- ❑ **Оболочки**
  - MAT1 – упругий (эластичный) материал
  - DMATER – упруго-пластичный материал с разрушением
  - MAT8 и MAT8A – ортотропные материалы, в том числе с разрушением
  - SHEETMAT – анизотропный упруго-пластичный материал
  - DYMAT24 – упруго-пластический материал с разрушением
- ❑ **Мембраны**
  - DMATEL - упругий (эластичный) материал

## “ПРИМЕНИМОСТЬ” МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

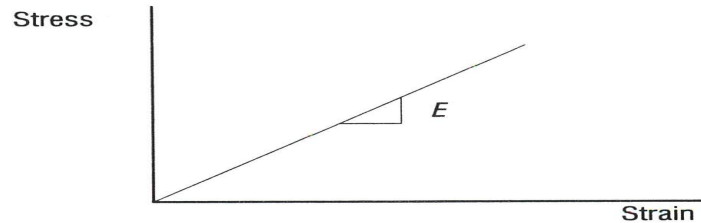
### □ Объёмные элементы

- DMAT – “обобщённая” модель материала
- DMATEL - упругий (эластичный) материал
- DMATOR - ортотропный линейно-упругий материал с разрушением
- DYMAT14 -материал для моделирования грунтов и вспененных материалов
- DYMAT24 - упруго-пластический материал с разрушением
- DYMAT25 - модель материала со специальной зависимостью кинематического упрочнения
- DYMAT26 - ортотропный материал с возможностью большого объёмного сжатия
- RUBBER1 - резиноподобный материал
- FOAM1 - изотропный материал с возможностью большого сжатия
- FOAM2 - изотропный “пеноподобный” материал с гистерезисом

## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **MAT1**

- ❑ Упругий (эластичный) материал
- ❑ Применим для моделирования оболочек и балок
- ❑ Пример:

1	2	3	4	5	6
MAT1	MID	E	G	NU	RHO
MAT1	17	3.+7		0.33	4.28

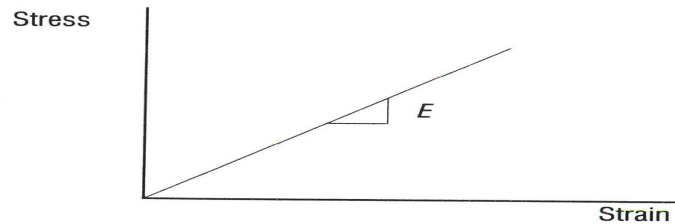




## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **DMATEL**

- ❑ Упругий (эластичный) материал
- ❑ Применим для моделирования мембран и лагранжевых объёмных элементов
- ❑ Пример:

1	2	3	4	5	6	7
DMATEL	MID	RHO	E	NU	G	K
DMATEL	11	7850.0	210.E9	0.3		

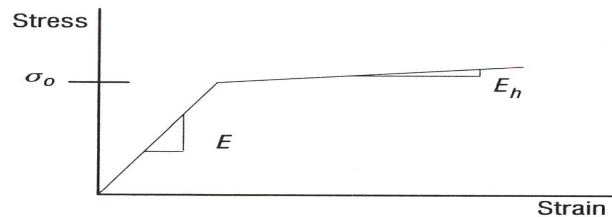


## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **DMATEP**

- ❑ Упруго-пластичный материал с разрушением
- ❑ Применим для моделирования балок и оболочек
- ❑ Пример:

Номер оператора, описывающего модель текучести

1	2	3	4	5	6	7	8	9
DMATEP	MID	RHO	E	Nu	G	K	YID	FID
DMATEP	11	7850.0	210.E9	0.3			100	101



Номер оператора, описывающего модель разрушения

## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ **MAT8** И **MAT8A**

- ❑ Линейно упругий ортотропный материал (MAT8A - с разрушением)
- ❑ Применим для моделирования композиционных материалов
- ❑ Применим только для оболочек
- ❑ Пример:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MAT8	MID	E1	E2	N12	G12	G1,Z	G2,Z	RHO	
MAT8	171	30.+6	1.+6	0.3	2.+6	3.+6	1.5+6	0.056	

- Модели разрушения (для материала MAT8A):
  - ✓ Модель Tsai-Hill
  - ✓ Модель Tsai-Wu
  - ✓ Модифицированная модель Tsai-Wu
  - ✓ Модель “максимума напряжения”
  - ✓ Модель Chang-Chang
  - ✓ Модель пользователя

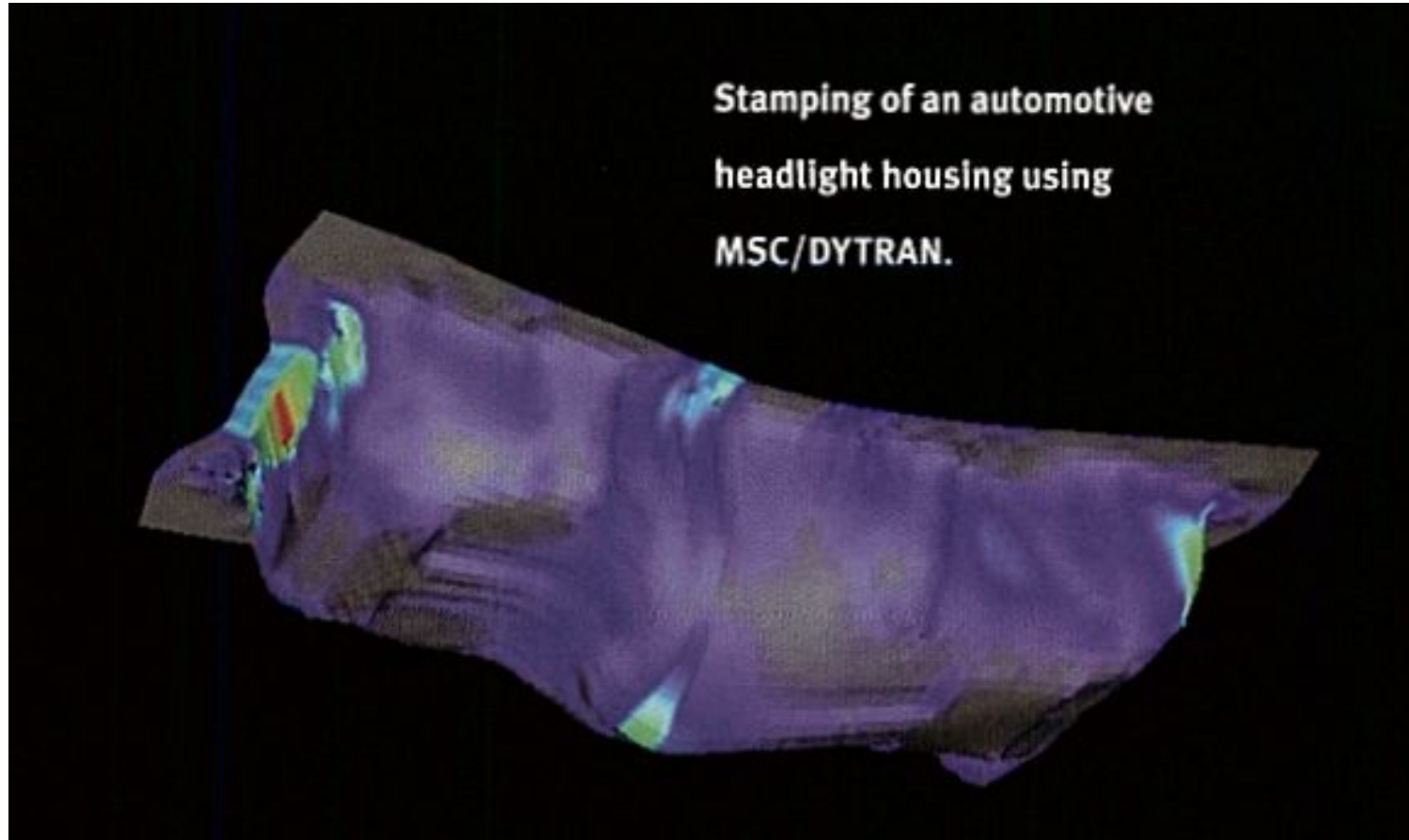
## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА SHEETMAT

- ❑ Ортотропный упруго-пластичный материал с разрушением
- ❑ Применяется для моделирования конструкций из металлического листа, полученного прокаткой
- ❑ Разработан проф. Раймондом Крейгом (Raymond Krieg) из университета штата Теннесси (США)
- ❑ Применим только для оболочек

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SHEETMAT	MID	RHO	EXX	EYY	EZZ	GXY	GYZ	GXZ	+CONT1
SHEETMAT	1	2.7E-6	72E6						+CONT1
+CONT1	NUXY	NUYZ	NUXZ	ELASTIC		XMAT	YMAT	ZMAT	+CONT2
+CONT1	0.33			ISO		1.0	0.0	0.0	+CONT2
+CONT2	a	b	c	n	k	m			+CONT3
+CONT2	0.0	570E3	0.017	0.359	0.014	0.389			+CONT3
+CONT3	TYPEYLD	R0	R45	R90					+CONT4
+CONT3	PLANANI	0.73	0.51	0.69					+CONT4
+CONT4	TYPEHRD								+CONT5
+CONT4	ISO								+CONT5
+CONT5	C1	C2	C3	C4	C5				+CONT6
+CONT5	0.244	-0.195	0.857	3.439	-11.92				+CONT6
+CONT6		D2	D3	D4	D5				
+CONT6		-0.417	-1.567	-4.849	-6.061				

Вектор, определяющий направление прокатки металлического листа

## ПРИМЕР: МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТАМПОВКИ КОРПУСА АВТОМОБИЛЬНОЙ ФАРЫ С ПОМОЩЬЮ MSC.Dytran



## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **DMAT**

❑ “Обобщённая” модель материала, для описания которой используются:

- Уравнение состояния (операторы EOSxx)
- Модель сдвиговых свойств (операторы SHRxx)
- Модель текучести (операторы YLDxx)
- Модель нарушения сплошности (операторы PMINxx)
- Модель разрушения (операторы FAILxx)

❑ Применим только для объёмных элементов

❑ Пример:

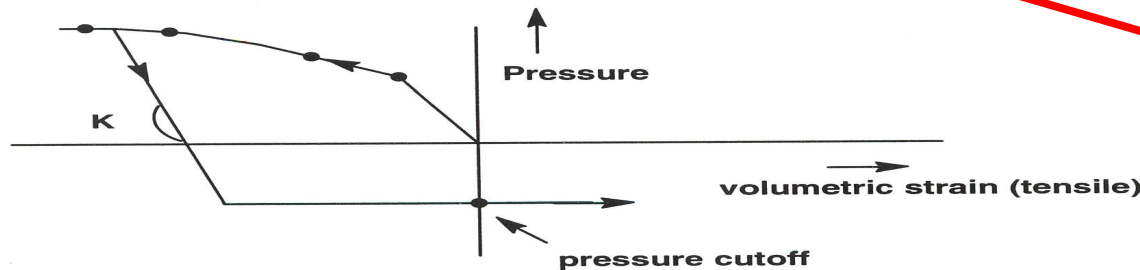
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DMAT	MID	RHO	EID	SID	YID	FID	PID	CID	+CCNT1
DMAT	22	3000.	100	109	307	308	402		+CCNT1



## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **ДУМАТ14**

- ❑ **Материал для моделирования грунтов и вспененных материалов**
- ❑ **Применим только для лагранжевых объёмных элементов**
- ❑ **Пример:**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DYMAT14	MID	RHO	G	K	TABLE	TYPE	VALUE	CUTOFF	
DYMAT14	3	0.01.	5.	3.	111	CRUSH	-100.	PFRAC	+
	Ao	A1	A2	YIELD	POISSON				
+	1.	0.	0.	<b>YSURF</b>	FREE				+
	HGTYPE	HGCOEFF	BULKTYPE	BULKQ	BULKL				
+	FBV2	0.11	DYNA	1.4	0.05				



Тип поверхности предельного состояния

$$\begin{aligned}
 \text{YSURF} & : \sigma_y = \sqrt{3 (A_0 + A_1 p + A_2 p^2)} \\
 \text{YSTRESS} & : \sigma_y = \text{MIN} (A_0 + A_1 p, A_2)
 \end{aligned}$$

Величина “pressure cutoff” зависит от типа поверхности предельного состояния

## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **ДУМАТ24**

- ❑ **Нелинейный упруго-пластический материал с изотропным упрочнением и кусочно-линейной зависимостью напряжения от деформации**
- ❑ **Возможно моделирование разрушения**
- ❑ **Применим для моделирования балок, оболочек, для объёмных элементов**
- ❑ **Пример:**

Таблица  $\sigma=f(\epsilon)$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DYMAT24	MID	RHO	E	NU	TABLE	TYPE	TABY		+CONT1
DYMAT24	17	7850.	210.E9	0.3	39	ENG			+CONT1
+CONT1	YIELD	EH	EPSF	D	P				+CONT2
+CONT1			0.37	40.5	5				+CONT2
+CONT2			BULKTYP	BULKQ	BULKL				
+CONT2			DYNA	1.4	0.05				



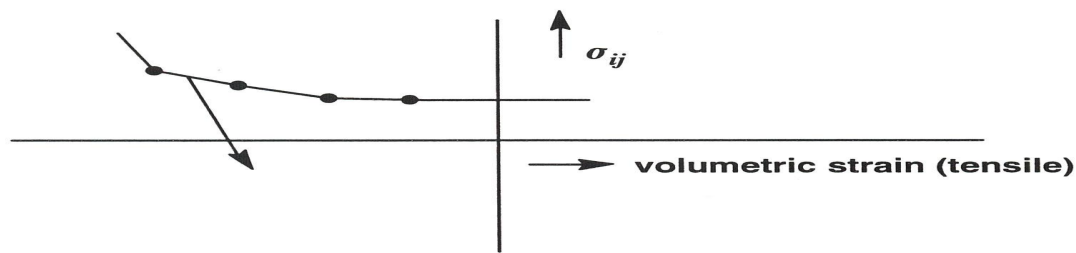
## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **DYMAT26**

- ❑ Ортотропный материал с возможностью большого объёмного сжатия
- ❑ Применим только для *лагранжевых* объёмных элементов

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DYMAT26	MID	RHO	E	NU	YIELD	RELV	TYPE	OPTIO	
DYMAT26	5	1800.	180.e9	0.3	180.e6	0.1	CRUSH	VECT	
	TIDXX	TIDYY	TIDZZ	TIDXY	TIDYZ	TIDZX	TIDSR		
+	10	11	12	13	14	15	16		+
	EXX	EYY	EZZ	GXY	GYZ	GZX			
+	60.e9	70.e9	60.e9	20.e9	10.e9	20.e9			+
	NUYX	NUZX	NUZY						
+	0.0	0.0	0.0						+
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2			
+	0.	0.	1.	1.	1.	0.			+
			BULKTYP	BULKQ	BULKL				
+			DYNA	1.4	0.05				

Характеристики “скомпактированного” материала

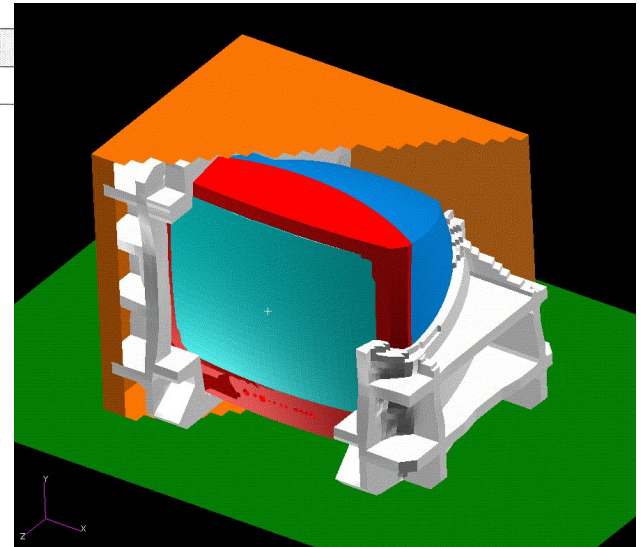
Характеристики материала во “вспененном” состоянии



## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА **FOAM1**

- ❑ Изотропный материал с возможностью большого сжатия и нулевым значением коэффициента Пуассона. Подходит для моделирования полипропилена
- ❑ Пригоден только для *лагранжевых* объёмных элементов
- ❑ Пример: задаётся модуль сдвига (**G**) или объёмный модуль (**K**)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FOAM1	MID	RHO	G	K	TABLE	TYPE			+CONT1
FOAM1	3	0.01		3.	111	CRUSH			+CONT1
+CONT1			BULK TYP	BULK Q	BULK L				
+CONT1			DYNA	1.4	0.05				



## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА FOAM2

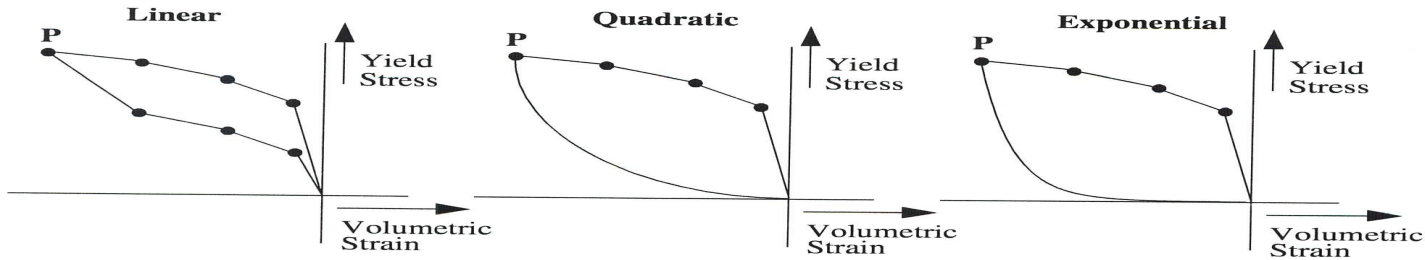
- ❑ Изотропный “пенopodobный” материал с гистерезисом
- ❑ Форма “петли” гистерезиса задаётся пользователем, значение коэффициента Пуассона равно нулю
- ❑ Применим для лагранжевых объёмных элементов
- ❑ Пример: задаётся модуль сдвига (G) или объёмный модуль (K)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FOAM2	MID	RHO	G	K	TABLE	TYPE	VALUE	CUTOFF	+CONT1
FOAM2	3	0.01		3.	111	CRUSH	-100.	SFRAC	+CONT1
+CONT1	TABY	ALPHA	UNLOAD						
+CONT1	112	0.4	LINEAR						
			BULK TYP	BULK Q	BULK L				
			DYNA	1.4	0.05				

Коэффициент диссипации энергии

Вид характеристики материала при “разгрузке”

Характеристика материала при сжатии

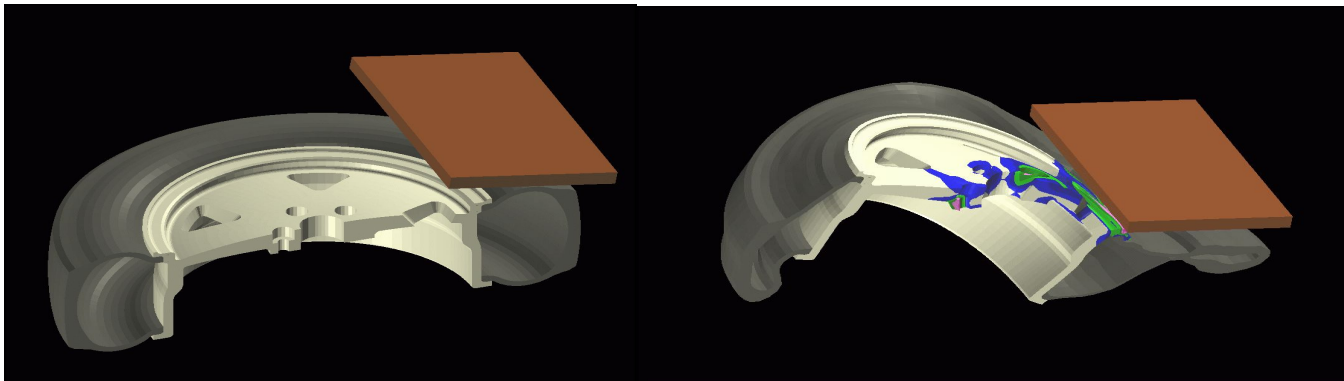


## ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА RUBBER1

- ❑ Почти несжимаемый резиноподобный материал
- ❑ Энергия деформации вычисляется в соответствии с моделью Муни-Ривлина (Mooney-Rivlin)
- ❑ Применим только для лагранжевых объёмных элементов

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RUBBER1	MID	RHO	A	B	NU				+CONT1
RUBBER1	3	1000.	0.34	0.27	0.495				+CONT1
+CONT1			BULK TYP	BULK Q	BULK L				
+CONT1									

$0 \leq \mu < 0,5$



## УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

- ❑ Уравнения состояния определяют зависимость давления в материале от изменения его относительного объёма
- ❑ **EOSGAM** – уравнение состояния идеального газа (адиабатический закон)

$$p = (\gamma - 1) \cdot \rho \cdot E,$$

где  $p$  – давление;

$\gamma$  – газовая постоянная;

$\rho$  – “текущая” плотность материала;

$E$  – удельная внутренняя энергия вещества

## УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

□ **EOSPOL** – полиномиальное уравнение состояния: давление – степенная функция плотности и внутренней энергии вещества

- При сжатии ( $\mu \geq 0$ ):

$$p = a_1\mu + a_2\mu^2 + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_2\mu^2 + b_3\mu^3) \cdot \rho \cdot E,$$

- При растяжении ( $\mu < 0$ ):

$$p = a_1\mu + (b_0 + b_1\mu) \cdot \rho \cdot E,$$

где  $p$  – давление;

$$\mu = \rho/\rho_0 - 1;$$

$\rho$  – “текущая” плотность материала;

$\rho_0$  – плотность материала в “исходном” состоянии;

$E$  – удельная внутренняя энергия вещества;

$a_i, b_i$  – коэффициенты

## УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

### □ **EOSTAIT** – уравнение состояния, описывающее модель кавитации Тэта (Tait cavitation model)

- При отсутствии кавитации ( $\rho > \rho_c$ ):

$$\rho = a_0 + a_1(\eta \cdot \gamma - 1),$$

- При наличии кавитации ( $\rho \leq \rho_c$ ):

$$\rho = \rho_c,$$

где  $\rho$  – давление;

- $\eta = \rho/\rho_0$ ;
- $\gamma$  – постоянная;
- $\rho$  – “текущая” плотность материала;
- $\rho_0$  – плотность материала в “исходном” состоянии;
- $\rho_0^*$  – “критическое” значение плотности вещества – “порог” кавитации

## УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

- **EOSJWL** - уравнение состояния JWL (Jones-Wilkins-Lee) – уравнение, описывающее ударную волну в ВВ

$$p = A(1 - \omega\eta/R_1)e^{-R_1/\eta} + B(1 - \omega\eta/R_2)e^{-R_2/\eta} + \omega\eta\rho_0 e,$$

где  $p$  – давление;

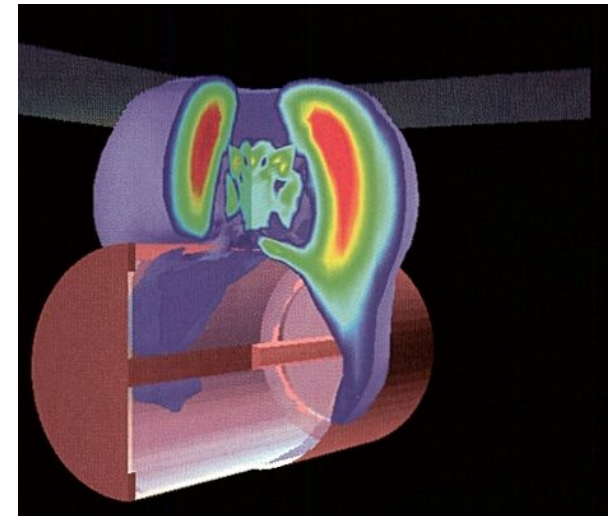
$E$  – удельная внутренняя энергия вещества;

$\rho_0$  – плотность материала в “исходном” состоянии;

$\rho$  – “текущая” плотность материала;

$\eta = \rho/\rho_0$ ;

$A, B, R_1, R_2, \omega$  - постоянные коэффициенты



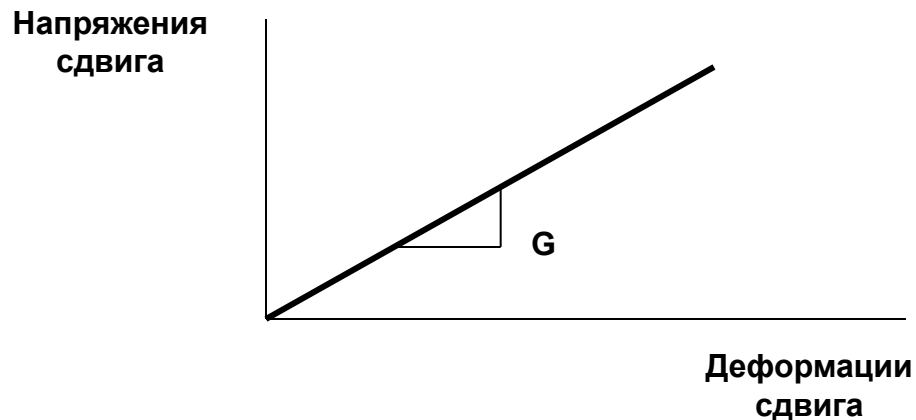
Модель состояния **EOSIG** позволяет учитывать отличие свойств “исходного” ВВ и продуктов детонации, моделировать перенос массы, энергии и т.п. Модель состояния **EOSIG** базируется на уравнениях состояния, подобных уравнению состояния **EOSJWL**



## МОДЕЛИ СДВИГОВЫХ СВОЙСТВ

- ❑ Определяют реакцию материала на деформацию сдвига
- ❑ **SHREL** – линейно-упругая характеристика сдвиговых свойств
  - Напряжения сдвига пропорциональны произведению сдвиговых деформаций и модуля сдвига  $G$

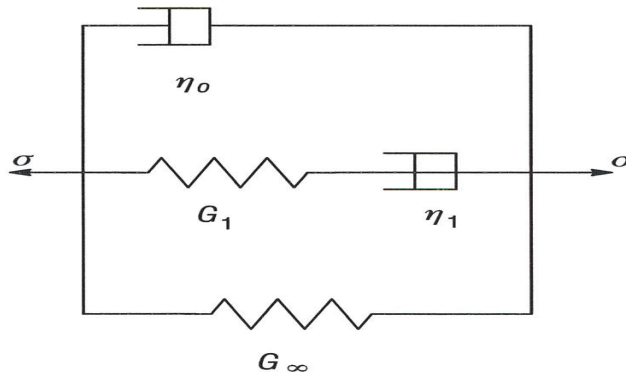
$$\tau = G \cdot \gamma$$



## МОДЕЛИ СДВИГОВЫХ СВОЙСТВ

### □ **SHRLVE** – изотропная, линейная вязко-упругая модель сдвиговых свойств

- Механический аналог модели SHRLVE – совокупность соединённых параллельно пружины, вязкого демпфера и элемента Максвелла



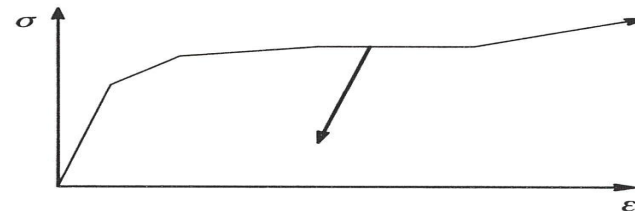
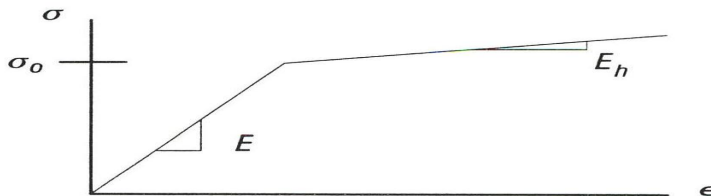
$$\beta = G_1 / \eta_1$$

$$G_1 = G_0 - G_\infty$$

- ✓  $G_0$  – “краткосрочный” модуль сдвига
- ✓  $G_\infty$  – “долгосрочный” модуль сдвига
- ✓  $\beta$  - коэффициент поглощения элемента Максвелла
- ✓  $\eta_0$  – коэффициент поглощения сдвиговых деформаций

## МОДЕЛИ ТЕКУЧЕСТИ (ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ)

- ❑ Модели предельного состояния описывают условия перехода вещества из упругого состояния в состояние текучести и характеристики материала, находящегося в этом состоянии
- ❑ **YLDHY** – гидродинамическая модель предельного состояния
  - Напряжение текучести тождественно равно нулю, т.е. материал не воспринимает сдвиговые нагрузки и ведёт себя как жидкость
- ❑ **YLDVM** – модель предельного состояния Мизеса
  - Модель нелинейного изотропного упрочнения с кусочно-линейной зависимостью напряжения от деформации
  - Используется для моделирования балок, оболочек и для объёмных элементов



## МОДЕЛИ ТЕКУЧЕСТИ (ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ)

- **YLDJ3** – модель предельного состояния Johnson-Cook’a

$$\sigma_y = (A + B \cdot \epsilon_p^n) \cdot [1 + C \cdot \ln(\epsilon/\epsilon_0)] \{1 - [(T-T_r)/(T_m-T_r)]^m\},$$

где  $\epsilon_p$  – “текущее” значение пластической деформации;

$\epsilon$  – “текущее” значение “скорости” деформации;

$\epsilon_0$  – параметр;

$T$  – температура;

$T_r$  – температура окружающей среды;

$T_m$  – температура плавления вещества;

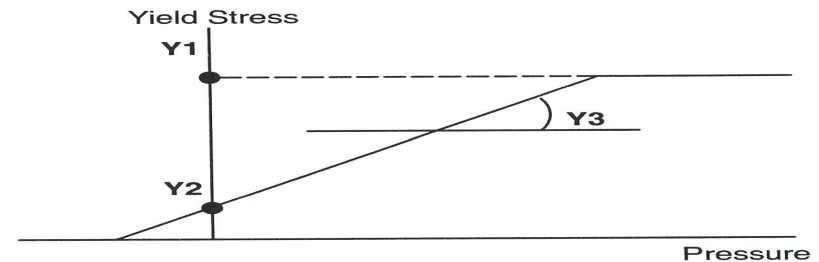
$A, B, n, C, m$  – постоянные коэффициенты

- **YLDMC** – модель текучести Мора-Кулона (Mohr-Coulomb) – применима только для *эйлеровых* материалов, воспринимающих сдвиговую нагрузку

$$\sigma_y = \min (Y1, Y2 + Y3 \cdot p),$$

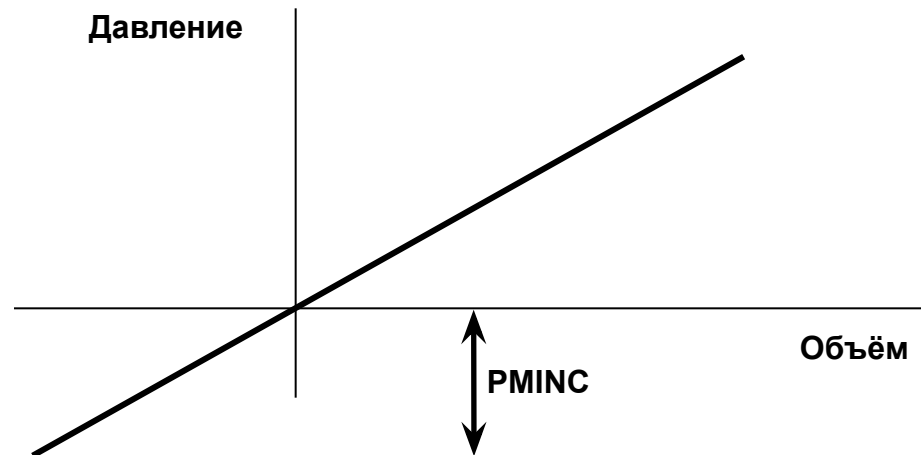
где  $Y1, Y2, Y3$  – константы;

$p$  – давление



## МОДЕЛЬ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ

- ❑ Определяет минимальное значение давления, при котором нарушается сплошность материала - возникает разрыв
- ❑ **P<sub>MINC</sub>** – напряжение нарушения сплошности постоянно



## МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ

- ❑ Определяют условия разрушения материала (после которого элемент в вычислениях “не участвует”)
- ❑ **FAILMPS** – задаётся уровень эквивалентных деформаций, при котором наступает (вязкое) разрушение материала
- ❑ **FAILEXn** – модели разрушения, определяемые пользовательскими подпрограммами (FAILEX – мгновенное разрушение, FAILEX1 – возможность постепенной деградации свойств материала DMATOR)
- ❑ **FAILEST** – разрушение при достижении эквивалентным напряжением определённого уровня (при этом происходит потеря возможности восприятия элементом сдвиговых нагрузок, “гидродинамические” свойства сохраняются) и при уменьшении шага интегрирования ниже определённого предела (после этого происходит “полное” разрушение элемента) – модель *двухэтапного* разрушения

## МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ

- ❑ **FAILMES** – разрушение при достижении эквивалентным напряжением заданного предельного уровня
- ❑ **FAILPRS** – разрушение при достижении гидродинамическим давлением заданного максимального уровня
- ❑ **FAILSDT** - разрушение при достижении эквивалентными пластическими деформациями определённого уровня (при этом происходит потеря возможности восприятия элементом сдвиговых нагрузок, “гидродинамические” свойства сохраняются) и при уменьшении шага интегрирования ниже определённого предела (после этого происходит “полное” разрушение элемента) – модель *двухэтапного* разрушения

## ПРИМЕР ОПИСАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

### □ Пример описания свойств стали (материал № 333) со следующими свойствами:

- Плотность 7830 кг/м<sup>3</sup>
- Объёмный модуль  $1,69 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>
- Модуль сдвига  $8,18 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>
- Предел текучести  $5,0 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>
- Напряжение нарушения сплошности (“разрыва”) -  $3,8 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>
- Условие разрушения – достижение 50%-ой пластической деформации

$$K = E/[3 \cdot (1-2\nu)]$$

DMAT, 333, 7830., 444, 555, 666, 777, 888

EOSPOL, 444, 1.69E11

SHREL, 555, 9.18E10

YLDVM, 666, 5.E8

FAILMPS, 777, 0.5

PMINC, 888, -3.8E9