

# ANSYS Программын Шилжилтийн Горимын Динамик Аргачлалаар Пуужингийн Хатуу Түлшний Хөдөлгүүрийн Цэнэгийг Судалсан нь

Ө. Батбаяр, Ли Жуо

Өвөрмонголын Аж Үйлдвэрийн Их сургууль, Хөх хот, Өвөрмонголын Өөртөө Засах Орон, БНХАУ

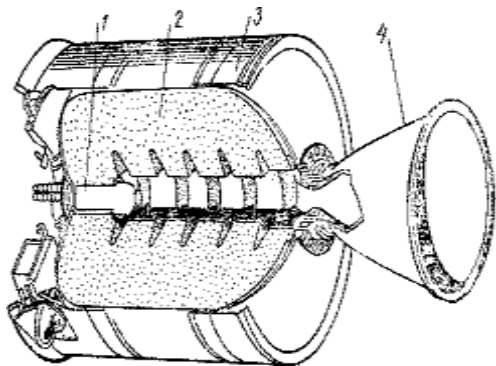
Аnsys программын геометр загварчлалаар ХТХ-ийн 2-D, 3-D загварыг бүтээж, шилжилтийн горимын динамик аргачлалын Пронийн (Prony) цувааг ашиглан хатуу түлшний харимхай зуурамтгайн шинжийн онцлогийг хугацаанаас хамааран өөрчлөгдөж буйг хүчдэлийн хариу үйлдлээр харууллаа.

Analysis of transient dynamics characteristics of solid-propellant rocket motor is an important part of investigation of the rocket motors stability work. Using Ansys finite element program in this paper created 2-D,3-D models of solid rocket motors, using an exponential Prony series, obtained the stress relaxation modulus time-varying master curve. The results show that the method can easily applied to the dynamic analysis of solid-propellant rocket motors, propellant grains has viscoelastic properties.

PACS numbers : 02.70.Dh, 62.20.Hg, 46.35.+z, 62.50.-p

## I. ОРШИЛ

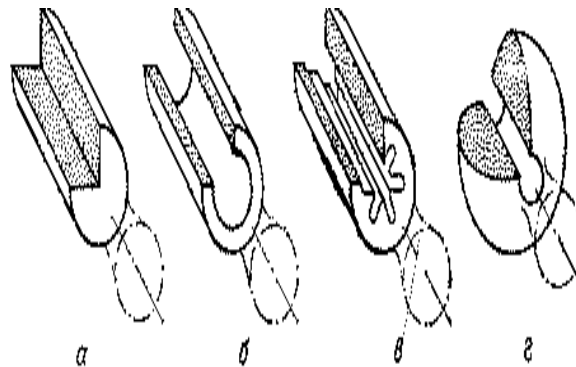
Пуужин бол түүний түлшний зарим хэсэг шатан гадагшаа урсан гарах үед үүсэх тийрэлтэт хүчний үйлчлэлээр хөдөлдөг нисдэг төхөөрөмж. [1] Пуужинг жолоодлоготой болон жолоодлоггүй гэж ангилдгаас олон шатлалтай, дан шатлалтай гэж бүтцийн хувьд ялган үздэг. Зориулалтаасаа хамааран өөр өөр бүтэцтэй ямар ч пуужинд байдаг гол эд ангийн нэг бол тийрэлтэт хөдөлгүүр юм. Тийрэлтэт хөдөлгүүр нь олон төрөл байдгаас шингэн түлшний, хатуу түлшнийхийг нь илүүтэй ашигладаг. Хатуу түлшний хөдөлгүүрийн (ХТХ) бүтэц зохион байгуулалт нь хялбар, илүү найдвартай, угсран бүтээсний дараа удаан хугацааны турш ашиглаж болдог тул голдуу цэргийн баллистик пуужингуудад хэрэглэдэг.



Зур1 Хатуу түлшний цилиндр хэлбэртэй хөдөлгүүрийн бүтэц: 1- ноцоогч, 2- хатуу түлш, 3-их бие, 4- чиглүүлэгч хоолой

Цилиндр хэлбэртэй хатуу түлшний хөдөлгүүрийн загварыг 1-р зурагт үзүүлээ [2, 3]. Сүүлийн үед бодит байдал дээр хэрэгжүүлэх туршилтын оронд ТБМ дээр судлагдахууны загварыг зохион бүтээж өндөр нарийвчлалтай тооцоо шинжилгээ хийж, туршилтанд

зарцуулагдах хөрөнгө зардлыг хэмнэн, цаг хугацаа хожих хандлага түгээмэл болж байна. Тиймдээ ч осол аюулд тодорхой хэмжээгээр эрсдэлтэй ХТХ-ийн компьютер загварчлалын судалгаа хурдтай хөгжиж байна. Хатуу түлшний цэнэг бол хөдөлгүүрийг бүрдүүлэгч гол эд ангийн 1 юм. Түүнийг дулаан тусгаарлагч хамгаалалтын хучилтаар ороож хөдөлгүүрийн их биед бат бэхэлдэг.



Зур. 2 Хатуу түлшний өөр өөр хэлбэртэй цэнэгүүд.

2а зурган дээр үзүүлсэн шиг цул түлшний цэнэгийг хөдөлгүүрт барагтай бол ашигладаггүй. Ийм загварын цэнэгийн гадаргууны шатах хурд тогтмол ч түрэлтийн хүчийг өндөр байлгахын тулд том хэмжээтэй хийхийг шаарддаг [3,4]. Ийм хэлбэртэй түлш шатах явцад үүсэх хэт их дулаанаас ХТХ-ийн их биеийг хамгаалах нь хүндрэлтэй болдог. Үүнээс улбаалж түлшин дотор янз бүрийн хэлбэртэй суваг цоолж оруулснаар хөдөлгүүрийн зүтгүүрийг өөрчлөн тохируулж болдог. ХТХ-ийг зөөн тээвэрлэх, хадгалах явцад гулсалтаас үүдэлтэйгээр цэнэгийн хэмжээ, хэлбэр өөрчлөгдөж үүнээс үүдэн түлш тооцолж бодсоны дагуу шаталгүй хөдөлгүүрт элдэв алдаа, аюул учруулах

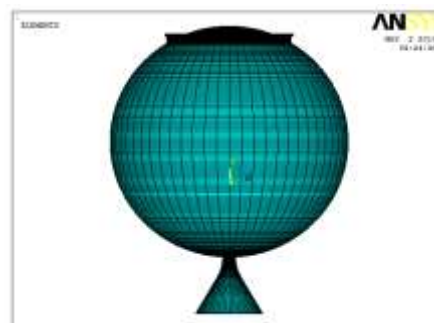
эрсдэлтэй. Иймд ашиглалтын янз бүрийн горимд түлшний шаталт, өөрчлөлтийг урьдчилж сайн тооцон судлах ёстой ба түлшний шугаман болон шугаман бус харимхай зуурамтгай шинж чанарын судалгаанд илүүтэй анхаарах шаардлага үүсдэг [2, 3, 6, 12, 16].

## II. ANSYS ПРОГРАММ

Ansyes бол сүүлийн 40 жилийн турш өндөр хурдтай тархан хөгжиж буй өргөн цар хүрээтэй программын систем юм. ANSYS нь Multiphysics, Mechanical, Structural, Workbench, Fluent, Linear Plus гэх мэт өөр өөр зориулалт ажиллагаатай дэд программуудад хуваагддаг ба судлаач хүн өөрийн мэргэжил, шийдвэрлэх гэж буй асуудал, бодлогоосоо хамаарч алиныг нь сонгохоо өөрөө шийдэн компьютертоо суулган ажилуулдаг. ANSYS программд 150-аас дээш төрөл зүйлийн төгсгөлөг элементууд агуулагддаг ба тэднийг ашиглан инженерийн автомат тооцооны (Computer-Aided Engineering, CAE) салбарын мэргэжилтнүүд деформцлагддаг хатуу биеийн тогтвортой, тогтворгүй, шугаман болон шугаман бус, 2 эсвэл 3 хэмжээст орон зайн янз бүрийн угсармал бүтэц, зохион байгуулалттай системийн механикийн бодлогууд, дулаан дамжуулалт, солилцоо, хий, шингэний урсгал, цахилгаан, соронзон динамикийн хүнд бодлогуудыг боддог. Энэ программын ажиллагааг 2 горимоор хэрэгжүүлдгийн эхнийх нь Motif фирмын боловсруулсан суурь дээр тулгуурласан цэсийн цонх, үйлдлийн хавтан дээрх ажиллагааг сонгон өгөгдлүүдийг оруулж программыг удирддаг. Харилцан нөлөөлөх interactive гэгдэх энэ горимоор гүйцэтгэсэн үйлдэл бүрийнхээ үр дүнг инженер шууд үзэх боломжтой. Нөгөө горимоор хэрэгжүүлэх ажиллагааг APDL буюу ANSYS Parametric Design Language хэл дээр бичсэн тушаалуудыг лавлах ном ашиглан судлаач командын цонхонд өөрөө бичиж эсвэл text буюу бичмэл файлаас хуулан оруулж ажлаа гүйцэтгэнэ. ANSYS/Mechanical программ дээрх тооцоог боловсруулахдаа судлаач хүн нэгт төгсгөлөг элементээ сонгож, геометр загварыг нь бүтээн торонд хуваагаад, өгөгдлүүдийг оруулж ачааллаад бодлогын хариу, үр дүнг үзээд зөв бурууг шинжин дүгнэнэ гэсэн 3 үе шатлалаар хэрэгжүүлдэг. Бодлогын төрөл, өгөгдлөөс хамаарч программын дүн шинжилгээг статик, завсрын шилжилтийн динамик, модал, гармоник, спектраль ажиллагаануудын аль нэгээр сонгон хийнэ. Ansys дээр 3-1 зурагт үзүүлсэн шиг ХТХ-ийн 2 хэмжээст тал загварыг бүтээн түүнийгээ 360 хэм эргүүлж 3-2 зураг дээрх эзлэхүүнт биеийг бүтээж болдог.



Зур. 3-1 Дугуй ХТХ-ийн 2



Зур.3-2 Дугуй ХТХ-ийн 3

Шугаман бүтцийн хувьд Ansys-ын завсрын шилжилтийн горимын динамик тэнцвэрийн ерөнхий тэгшитгэл

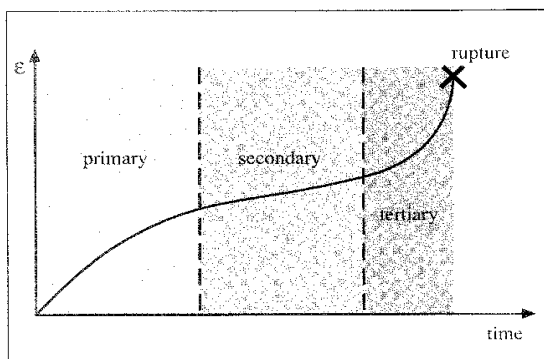
$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\}, \quad (1)$$

энд  $[M]$  массын матриц,  $[C]$  хэлбэлзэл сааруулагч хүчний коэффициентуудын матриц,  $[K]$  хатуулгын матриц,  $\{\ddot{u}\}$  зангилаа цэгийн хурдатгалын вектор,  $\{\dot{u}\}$  зангилаа цэгийн хурдны вектор,  $\{u\}$  зангилаа цэгийн шилжилтийн вектор,  $\{F^a\}$  зангилаа цэгт үйлчлэх гадны хүч буюу ачаалал. Ansys программ нь энэ тэгшитгэлийг хугацааны ялгавраар интегралчлах арга болон Ньюмаркийн (Newmark) аргаар боддог. Завсрын шилжилтийн горимын дүн шинжилгээг бүрэн (Full), суперпозицын (Mode superposition), товчилсон (Reduced) гэсэн 3 аргаар шинжин шийдвэрлэнэ. Гүйцэт арга нь системийн динамик хариу үйлдлийг олохдоо матрицуудыг бүрэн бүтнээр ашигладаг. Энэ арга нь нөгөө хоёрыгоо бодвол харимхай зуурамтгай чанар, их шилжилт, хэт хазайлт зэрэг шугаман бус шинжүүдийг тооцогоороо давуу ч ой санамж, хурд сайтай компьютер дээр хүртэл түргэн шуурхай боддоггүй “өртөг” өндөр арга юм [7, 8, 9, 10, 11, 17].

## III. PRONY ЦУВРАЛЫГ АШИГЛАСНААР ХАТУУ ТҮЛШНИЙ ЦЭНЭГИЙН

### ХАРИМХАЙ ЗУУРАМТГАЙ ОНЦЛОГИЙГ ШИНЖИХ НЬ

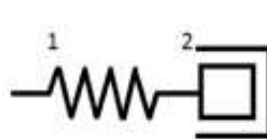
Тогтмол ачаалалтай үед хэсэг хугацааны дараа материалын хэв гажилт буюу деформаци нэмэгдэх үзэгдлийг гулсалт гэнэ. Бетон, тоосго, мод хуванцар ийм гулсамтгай чанартай ба өндөр хэмд буй ямар ч металл, тасалгааны температурт буй зэс, хар тугалга гэх мэт өнгөт металл ч ингэж деформацилагддаг. Органик бодисын гулсалтыг бодитоор үзэх хамгийн амархан жишээ бол шил халаан урсгах явдал юм. Харимхай деформаци нь атом хоорондох, молекул хоорондох зайн өөрчлөлтөөс үүдэлтэй бол олон найрлагат бодис полимерын гулсалт нь урт хэлхээст молекулуудын хөдөлгөөн эсвэл молекулуудын гадна бүтцийн холбоосууд холилдсоноос болж үүсдэг. Төмөр бетон угсармалын арматурын хүчдэл гулсалтаас болж 3-4 дахин нэмэгддэг. Хэрэв гулсалтын деформацийн өсөлт хүчдэлийн өсөлтөнд пропорциональ байвал шугаман гулсалт, эсрэг тохиолдолд шугаман бус гулсалт гэнэ. Бага хүчдэлтэй хуванцар материалын гулсалт шугаман байна.



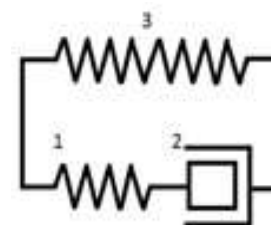
Зур.4 Гулсалтын 3 шатлал

Зураг 4 дээр үзүүлснээр бол анхан, дунд, дээд гэсэн 3 шатлалаар гулсалтын явцыг харуулдаг. Ansys программаар эхний 2 явцыг л загварчлан үзүүлэх боломжтой. 3 дахь шатлалын үед их өөрчлөлттэй загвар зохион бүтээх шаардлагаас болж бүтээсэн зүйлсийг программ шинжин судлахаас өмнө тэд гэмтэн арилах нь элбэг тохиолддог. Эхний 2 явцын хүнд бодлогын томьёо, тооцоог Matlab эсвэл Fortran хэл дээр бичин дараа нь ANSYS руу оруулдаг. Хатуу түлш нь хоёр суурьт (гомоген), холимог (гетероген) гэсэн хоёр төрөлд хуваагддаг өндөр дүүргэлттэй олон найрлагат органик бодис юм. Хоёр суурьт түлшний гол бодис нь их бага хэмжээний азот агуулсан нитроцеллюлоз бол холимог түлшний үндсэн суурь нэгдэл нь нитроглицерин юм. Түлш шатах хурдыг тохируулах, түүний механик шинж чанарыг өөрчлөхийн тулд янз бүрийн хольцыг дотор нь бага тунгаар нэмж

оруулдаг. Олон найрлагат бодис полимерын гулсамтгай чанар нь цаг, температураас хамааралтай ба дулааны хэм өсөхөд даган нэмэгддэг. Материалын гулсамтгай шинж чанар нь деформацийн үед харимхай ч, зуурамтгай ч шинжтэй байх тул түүнийг харимхай, зуурамтгай гэсэн нэр томъёогоор орлуулах нь олонтоо тохиолддог. Харимхай зуурамтгай материалыг илэрхийлэхийн тулд харимхай шинжийг илэрхийлэгч Гукийн хууль, зуурамтгай шингэнийн Ньютоны хуульд захирагдах элементуудээс бүрдсэн янз бүрийн загваруудыг бүтээдэг.



а. Максвеллын загвар



б. Стандартын шугаман гулсамтгай загвар.

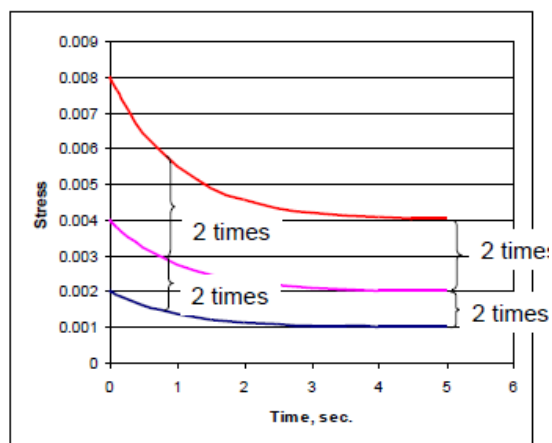
Зур. 5. Харимхай зуурамтгай материалын загварууд

Тухайлбал, пүрш буюу харимхай элемент (1), зуурамтгай шингэнд шилжин хөдлөх поршень болох зуурамтгай элемент (2) хоёрыг цуваа холбосон Максвеллын загвар (зур.5а), зэрэгцээ холбосон Фойхт- Кельвины загвар гэх мэт. Хатуу түлшний цэнэгийг шугаман гулсалтгай бодис гэж тооцдог ба стандартын загварыг нь 5б зурагт үзүүллээ. Харимхай, зуурамтгай элементуудыг өөр өөрөөр холбон нийлүүлж хүнд бодисын гулсамтгай шинж чанарыг харуулах сайн загварыг ч бүтээж болно. Хэрэв түлшний цилиндр хэлбэртэй

дээжийг тогтмол  $\dot{\epsilon}$  деформацийн хурдтайгаар  $\epsilon_0$  хүртэл сунгаж байгаад деформацийг өөрчлөхгүй тогтмол үлдээвэл дээжний  $\sigma(t)$  хүчдэл тогтмол утгаа хадгалахгүй хугацаанаас хамаарч аажим буурахыг сулрал (relaxation) гэнэ. E нь харимхайн,  $\mu$  нь зуурамтгайн коэффициентууд,  $\sigma_0$  нь анхны хүчдэл болог. Харимхай зуурамтгай материалын хүчдэлийн утга хугацаанаас хамаарч

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E}{2\mu} t\right) \tag{2}$$

экспоненциаль функцээр буурдаг тул сулралын графикууд голдуу 6-р зурагт үзүүлсэн шиг хэлбэртэй байдаг.



Зур.6 Гулсамтгай материалын хүчдэлийн сулралын графикууд.

Материалын харимхай шинж чанарыг бодвол зуурамтгай шинж чанар хэсэгхэн зуур илэрдэг [4, 5, 6, 18]. Ansys программын бүх чиглэлд ижил шинжтэй материалын бага деформаттай харимхай зуурамтгайн онцлогийг дараах тэгшитгэлээр тодорхойлдог

$$\sigma = \int_0^t 2G(t-\tau) \frac{de}{d\tau} d\tau + I \int_0^t K(t-\tau) \frac{d\Delta}{d\tau} d\tau, \quad (3)$$

энд  $\sigma$  Кошийн (Cauchy) хүчдэл,  $e$  деформацийн өөрчлөлт,  $\Delta$  эзлэхүүний хэсэг,  $G(t)$  огтлолын сулралын цөм функц,  $K(t)$  гол биеийн сулралын цөм функц,  $t$  одоо цаг,  $\tau$  өнгөрсөн цаг,  $I$  нэгжийн тензор. ANSYS-т  $G(t)$ ,

$K(t)$  функцуудын параметруудаар материалын бага хэмжээний гулсалтыг 2 аргаар харуулдаг. Эхнийх нь VISCO88, VISCO89 элементуудтай Максвеллын ерөнхийлсөн загварыг хэрэглэдэг арга бол нөгөө нь бүтэц, угсармалын элементуудтай Прони цувааны загвараар зуурамтгай шинжийг илэрхийлнэ [14,15]. ХТХ-ийн 8 одтой цэнэгийн фото зураг, Ansys программ дээр бүтээсэн түүний загварыг 7, 8-р зургуудаас харьцуулж үзэхэд бараг адил болсон байна.

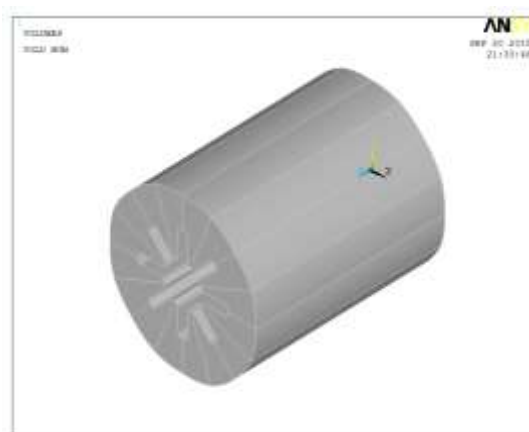
Зураг 8-д үзүүлсэн 8 одтой загварын урт 300 мм, цилиндрийн радиус  $R = 193$  мм, доторх төвийн нүхний  $r = 46$  мм болог

Хүснэгт2 Прони цувааны 7 параметртай хүснэгт

	1	2	3	4	5	6	7
$E_i$	0.3426	0.20757	0.17446	0.0536	0.061482	0.03573	0.02417
$t_i$ сек	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000



Зур.7 Хатуу түлшний 8 одтой цэнэгийн фотозураг



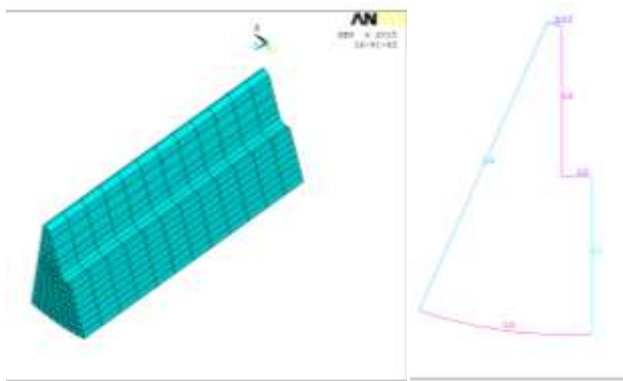
Зур.8. Хатуу түлшний 8 одтой цэнэгийн 3 хэмжээст загвар

Хатуу түлшний цэнэг тэгш хэмтэй тул бодлогоо хялбаршуулж бодох хугацааг хожихын тулд цэнэгийн 1/16-тай тэнцэх загварыг бүтээн, түүнийг олон хэсэгт торлон хуваан хүчдэлийг олъё. Энэ загварын урд талын хэрчмүүдийн уртуудыг доорхи хүснэгтэд үзүүлээ.

Хүснэгт1

L1	L2	L4	L5	L8	L10
74 мм	5 мм	147 мм	77 мм	58 мм	2 мм





Зур.9 Хатуу түлшний цэнэгийн хязгаарлагдмал загвар.

Пуассоны коэффициент нь  $\mu = 0.495$ , харимхайн модуль  $19\text{MPa}$  болог. ХТХ-ийн цэнэгийн сулралыг үзүүлэхийн тулд цэнэгийг огцом деформцлана. Харимхай, зуурамтгай материалын деформаци, онцлогийг хугацаанаас хамаарч хувьсан өөрчлөгдөх экспоненциал олон гишүүнтээс тогтох доорхи

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = \sum_{j=0}^n A_j \exp[-a_j t] \quad (4)$$

Ргону цуваагаар илэрхийлдэг.  $A_j, a_j$  коэффициентуудыг туршилтын үр дүнгээс олдог. (4) томьёог

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (5)$$

гэсэн хэлбэртэй бичиж болно.  $E_\infty$  бол материалын удаан хугацаа өнгөрсний дараах хүчдэлийн утга. Шилжилтийн горимын анхны хүчдэлийн утга энэ үед

$$E_0 = E(t=0) = E_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} E_i \quad (6)$$

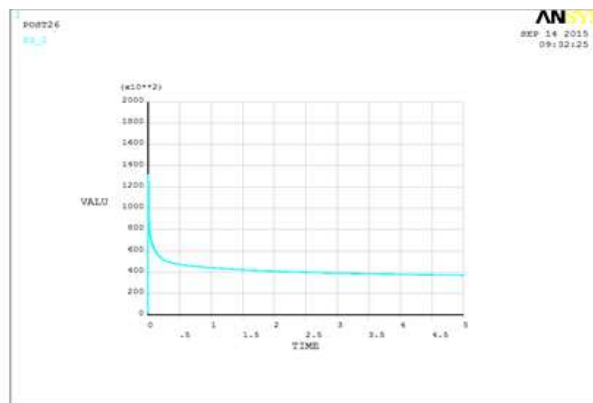
болно. Цэнэгийн хүчдэлийн утга хугацаа өнгөрөхөд буурч буйг харуулсан туршилтаар хэмжсэн түүний өгөгдлүүдийн хүснэгтийг үзүүлээ [12].

Анхны пуужингуудын түлш шатах үед ялгарах утаа нь богино хугацаанд хүчтэй деформацид оруулах асар их хэмжээний дотоод даралт бий болгож хөдөлгүүрийг дэлбэлдэг байсан тул үүнээс сэргийлэн шийдвэрлэх олон янзын аргачлалуудыг 20-р зуунд л илүүтэй сайн

боловсруулж амжилт олжээ. Пуужин хөөрөх үед эрсдэл дагуулах их даралтын учруулах нөлөө холимог түлшний цэнэгт ямар байхыг ANSYS программаар тооцон харуулья. Цэнэгийн загварын нүүрэн тал, доод, ар талыг тогтоон барьж наад талын нугаларсан доторх урт хэсэгт доорх

$$P(t) = P_0(1 - e^{-nt}) = 1.6 * 10^7 * (1 - e^{-5t}) \quad (7)$$

томьёогоор илэрхийлэгдэх паскаль даралтаар үйлчилж тооцоог хийж гүйцэтгэснээр цэнэгийн загварын урд талын нугаларсан хэсэг ойр дурын цэгийг сонгон хүчдэлийн хугацаанаас хамаарах хамаарлын графикийг 10-р зурагт үзүүлээ. Графикаас үзэхэд үйлчлэлийн дүнд маш огцом унаж байсан хүчдэл хугацаа өнгөрөхөд тун аажим тогтвортойгоор буурч байгаа нь цэнэг харимхай зуурамтгай шинжтэйг тод томруунаар үзүүлэн харуулж байна [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19].



Зур.10 Харимхай зуурамтгай цэнэгийн загварын хүчдэл хугацаанаас амаарах нь

#### IV. ДҮГНЭЛТ

Ansys программаар хатуу түлшний хөдөлгүүрийн 2-D, 3-D хэмжээстэй тэгш хэмтэй дугуй загварууд, хатуу түлшний цэнэгийн 3-D хэмжээстэй загварыг бүтээлээ. Түлшний 3 хэмжээст цэнэгийн 1/16-тай тэнцэх загварын наад талын нугаларсан урт хэсэгт тодорхой даралтаар дарж хүчдэлийн сулралын графикийг үзүүлснээр хатуу түлш харимхай, зуурамтгай шинж чанартай материалаар хийгдсэн болохыг харууллаа.

[1] Новый политехнический словарь, (2000)  
 [2] А.А.Шишков, С.Д.Панин, Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. Справочник, (1989)

[3] А.Назаров, В.И.Прищеп "Космические РДТТ", (1986)  
 [4] А.В.Александров, Сопротивление материалов, (1995)

- [5] В.В.Москвитин, Сопротивление вязкоупругих материалов применительно к зарядам РДТТ, (1975)
- [6] Г.Варданян, Сопротивление материалов с основами теории упругости, (1995)
- [7] Ansys. Introduction to Dynamics. Training Manual
- [8] ANSYS Command Reference Book,
- [9] Ansys Basic Analysis Guide
- [10] Ansys Modeling and Meshing Guide
- [11] Ansys Structural Analysis Guide
- [12] 李卓, 力学在固体发动机上的应用
- [13] 阮建则;固体火箭冲压发动机设计与性能分析的工程方法[D]西北工业大学;2007年
- [14] Ansys 粘弹性
- [15] Ansys练习44-瞬态动力学时间函数加载
- [16] 戴旭东, 王义亮, 袁小阳等.多缸内燃机缸体瞬态动力分析[J].内燃机学报.2003(3): 277
- [17] ANSYS 13.0 有限元分析与范例解析, (2006)
- [18] 材料力学 1,2 , 高等教育出版社, (2005)
- [19] David Roylance, Engineering Viscoelasticity, (2001)