

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

**KİPLƏŞDİRİCİ ELEMENTLƏRLƏ HERMETİKLƏŞDİRMƏ PROSESİNİN
RİYAZİ MODELLEŞDİRİLMƏSİ**

İxtisas: 2002.01 – Deformasiya olunan bərk cisim mexanikası

Elm sahəsi: Riyaziyyat

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş

DİSSERTASIYA

İddiaçı: _____ **Kəklük Oruc qızı Rüstəmovə**

Elmi rəhbərlər: _____ **m.e.d. Elxan Məcid oğlu Abbasov**

f.r.e.d., prof. Fəxrəddin Qurban oğlu İsayev

Bakı – 2021

MÜNDƏRİCAT

	səh.
Giriş	4
I Fəsil. Silindrik formalı elementlərlə kipləşdirmə prosesinin riyazi modelləşdirilməsi	17
1.1. Kipləşdici ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin təyini.....	17
1.2. İrsiliyin kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsiri.....	32
1.3. Xətti hal.....	39
1.4. Silindrik kipləşdirici elementin xarici səthi ilə hermetikliyin yaradılması məsələsi.....	45
1.5. İkitərəfli sıxılma zamanı silindrik formalı elementlərlə kipləşdirmə prosesinin riyazi modelləşdirilməsi.....	59
II Fəsil. Həlqəvi və konik formalı elementlərlə kipləşdirmə prosesinin riyazi modelləşdirilməsi	73
2.1. Həlqəvi kipləşdirici ilə hamar səth arasında yaranan kontakt gərginliyinin təyini.....	74
2.2. Həlqəvi kipləşdirici ilə hamar səth arasında yaranan kontakt gərginliyinə irsiliyin təsirinin təyini.....	79
2.3. Konik formalı kipləşdirici elementlərlə kipləşdirmə prosesinin riyazi modelləşdirilməsi.....	87
2.4. İrsiliyin konik kipləşdirici elementlə kipləşdirmə zamanı yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsirinin modelləşdirilməsi.....	105
2.5. Deformasiya tempinin zamandan asılı olaraq xətti dəyişməsi halında kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə irsiliyin təsirinin təyini.....	108
III Fəsil. Dairəvi dəşikli yarım silindrik elementlərlə kipləşdirmə prosesinin riyazi modelləşdirilməsi	113

3.1. Dairəvi deşikli yarımsilindrik səth ilə kipləşdirici element arasında kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinin təyini.....	114
3.2. Tangensial deformasiyanın təsiri.....	125
3.3. İrsiliyin deşikli yarımsilindrik səth ilə kipləşdirici element arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsiri.....	134
3.4. Deformasiya tempinin zamandan asılı olaraq xətti dəyişməsi halında irsiliyin deşikli yarımsilindrik səth ilə kipləşdirici element arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsiri.....	137
Nəticə	140
İstifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısı	142

GİRİŞ

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Müxtəlif sahələrdə, o cümlədən neftqazçıxarma sənayesində hermetik sistemlər geniş tətbiq edilir. Hermetikləşdirilmiş sistemlərdə kipləşdirici elementlərdən istifadə edilir ki, avadanlığın işi tamamilə kipləşdiricinin iş qabiliyyətini təyin edən parametrlərdən asılı olur. Avadanlığın işçi təzyiqinin son həddi kipləşdirici texnikanın vəziyyətinə görə təyin edilir. Hermetikliyin itməsi prosesin texnologiyasının pozulmasına gətirib çıxarır. Neftqazçıxarmada istismar prosesi zamanı avadanlığın hermetikliyinin pozulması açıq fontana, yanğına və ekoloji qəzalara səbəb ola bilər. Ona görə də kipləşdirici elementlərin bütün növlərinin müxtəlif istismar şəraitində iş qabiliyyətinin hərtərəfli analizinin, tədqiqinin və bu əsasdan onun təkmilləşdirilməsinin böyük elmi və praktiki əhəmiyyəti vardır.

Təcrübə göstərir ki, neftqazçıxarmada tətbiq edilən kipləşdirici elementlər uzunmüddətli, yəni istismar dövrünün sonunadək istifadə edildiyindən zaman keçdikcə onlar hermetikləşdirmə funksiyasını itirir. Belə ki, kipləşdirici elementin materialı özlü-elastiki xüsusiyyətə malik olduğundan onda yaranan əvvəlki deformasiya və kontakt gərginliyi vaxt keçdikcə relaksasiya edir və dəyişir. Zaman keçdikcə deformasiya sabit saxlanıldığı halda belə, kipləşdirici elementin materialının fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri dəyişir, kontakt gərginliyi azalır və hətta kipləşdirici element hermetikləşdirmə qabiliyyətini tam itirir. Digər tərəfdən kipləşdirici elementlə kipləşdirilən cismin divarı arasında əvvəlcədən yaradılmış kontakt gərginliyinin həm xarakteri və həm də qiyməti dəyişir. Nəticədə hermetiklik pozulur və avadanlıq öz funksiyasını yerinə yetirə bilmir. Qeyd etmək lazımdır ki, kipləşdirici elementin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin onun materialının irsiliyi nəzərə alınaraq öyrənilməsinə həm vətəndə və həm də xaricdə çoxsaylı işlər həsr edilmişdir. Lakin neft sənayesində istifadə edilən kipləşdirici elementlərin konfuqurasiyası, iş şəraiti və hermetikliyin alınma prosesi onların hermetikləşdirmə qabiliyyətinin irsiliyi nəzərə alınmaqla öyrənilməsinə tələb edir. Ona görə də neftqazçıxarma sənayesində tətbiq

edilən kipləşdirici elementlərin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin yaxşılaşdırılması və real iş şəraiti nəzərə alınaraq hermetikləşdirmə problemlərinin həll metodlarının yenidən işlənməsi praktiki və elmi planda aktual məsələdir. Dissertasiya işi də məhz neftqazçıxarma sənayesində tətbiq edilən müxtəlif formalı kipləşdirici elementlərin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin kipləşdiricinin fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri və sərhəd effektləri nəzərə alınmaqla riyazi həll modeli qurularaq öyrənilməsinə həsr edilmişdir.

Kipləşdirici elementin hermetikləşdirmə qabiliyyəti onun səthi ilə cismin kipləşdirilən hissəsi arasında yaranan kontakt gərginliyinin qiymətindən və paylanma xarakterindən, kontakt gərginliyinin qiyməti isə öz növbəsində kipləşdirici elementin həndəsi ölçülərindən və fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərindən asılıdır. Kipləşdirici element üçün istifadə olunan bütün materiallarda elastiklik modulu sabit kəmiyyət deyil, zamandan asılı olaraq dəyişir. Kipləşdirici elementin materialı irsilik xüsusiyyəti daşdığından [55], [59], [68], [82], [86], [91] uzunmüddətli istismar zamanı yuxarıda qeyd edildiyi kimi kipləşdiricinin daxili səthi ilə kipləşdirilən səth arasında yaranan kontakt gərginliyi relaksasiya edir və onun həm qiyməti, həm də paylanma xarakteri dəyişir. Kipləşdirici elementlərin istifadə praktikasından görünür ki, hermetikliyə nail olmaq üçün kipləşdiriciyə tətbiq olunmuş xarici qüvvənin təsir tempi onun hermetikləşdirmə qabiliyyətinə böyük təsir göstərir. Kipləşdirici elementin materialının irsilik xüsusiyyətinin nəzərə alınmaması yanlış nəticələrə gətirib çıxara bilər. Həmçinin ən az xarici qüvvə ilə hermetikliyin əldə edilməsi kipləşdirici elementin iş qabiliyyətinin yaxşılaşdırılmasına gətirib çıxarır. Kipləşdiricinin ən az xarici qüvvə ilə hermetikliyini təmin edən effektiv parametrlərinin təyininin böyük elmi əhəmiyyəti vardır [59], [63]. Belə ki, ən az xarici qüvvə ilə hermetikliyə nail olunması iş şəraitini yaxşılaşdırır, eləcə də kipləşdiricinin xidmət ömrünü uzadır. Kipləşdirici elementlərin tətbiqi təcrübəsi göstərir ki, sərhəd effektləri kipləşdiricinin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir. Ona görə də kipləşdirici elementin materialının irsiliyi və sərhəd effektləri nəzərə alınaraq onun hermetikləşdirmə qabiliyyətinin

tədqiqi və bu əsasdan onun iş qabiliyyətini yaxşılaşdıran effektiv ölçülərin təyin edilməsi həm elmi, həm də praktiki əhəmiyyət daşıyır.

Sürüncəklik nəzəriyyəsi deformasiya olunan bərk cisim mexanikasının ayrıca qolu kimi nisbətən yaxın keçmişdə formalaşmağa başlamışdır. Bu oblastdakı ilk tədqiqat işi XX əsrin 20-ci illərində aparılmışdır. Müasir plastiklik nəzəriyyəsinin inkişafında mühüm töhvələri olan alimlərin tədqiqatları sürüncəklik nəzəriyyəsinin yaranmasında əsas rol oynamışdır. Sürüncəklik nəzəriyyəsində ilk tədqiqat işləri keçmiş SSRİ alimlərindən N.M.Belyaev (1943), K.D.Mirtov (1946), 40-cı illərin sonlarında isə N.N.Malinin [66-69] və Y.N.Rabotnova aiddir.

İrsi-elastiklik oblastında araşdırmalar A.A.İlyuşinin [41-44], Y.N.Rabotnovun [81-87], A.N.Gerasimovun, A.R.Rjaniçının [91], A.Y.İşlinin işlərində öz əksini tapmışdır. Eləcə də B.Gross [125], L.M.Kaçanov [48-50], M.A.Koltunov [51-55], V.V.Moskvitin [71], D.Blend [24], R.Kristensen [56], B.E.Pobedrya [44], [73-75], R.Y.Əmənzadə [12-14], M.B.Axundov [12], [13], L.X.Talıblı [97], [144], V.C.Hacıyev [31], M.H.İlyasov [127], [128] və bir çox başqa alimlərin sürüncəklik nəzəriyyəsinin problemlərinə həsr edilmiş elmi işləri mövcuddur.

A.A.İlyuşinin [41-44] irsi-elastiklik nəzəriyyəsinin inkişafında böyük xidmətləri olmuşdur. A.A.İlyuşin və B.E.Pobedryanın müəllifi olduğu [44] monoqrafiyası irsi-elastiki bütöv mühitin izotermik və qeyri-izotermik deformasiyalanma prosesinin mexanikasına və termodinamikasına həsr edilmişdir. İrsi-elastiki mühit modeli qurularaq “gərginlik-deformasiya-zaman-temperatur” asılılığının ifadəsi alınmışdır. İrsi-elastiki cismin deformasiyası və möhkəmliyi üçün kontakt məsələlərinin qoyuluşu və həll metodları verilmişdir. Cismin periodik kvazistatik və dinamik hərəkəti məsələlərinə, həmçinin rəqs və dalğa məsələlərinə baxılmışdır. İzotrop və anizotrop mühidə qeyri-xətti termo-irsi-elastiklik nəzəriyyəsi üçün deformasiya-gərginlik əlaqəsi qurulmuşdur.

Y.N.Rabotnovun işləri [81-87] elmin bu sahəsinə həsr edilmiş çoxsaylı tədqiqat işləri arasında xüsusi yer tutur. [84] monoqrafiyasında metalların sürüncəklik məsələlərinə baxılmışdır. Xətti irsi-elastiki mühitlər üçün müxtəlif riyazi modellər verilmiş, mürəkkəb gərginlik vəziyyətində sürüncəklik, yüksək temperaturda

uzunmüddətli dağılma, qərarlaşmış sürüncəklik halında əyilmə, burulma məsələləri, oxasimmetrik müstəvi məsələlər, lövhə və örtüklər üçün qərarlaşmış sürüncəklik məsələləri, qərarlaşmamış sürüncəklik, həndəsi qeyri-xətti məsələlərə baxılmışdır.

[55] monoqrafiyasında isə yüklənmə tempinin, temperaturun və digər faktorların polimer materialın deformatsiyalanma prosesinə təsiri öyrənilmiş, temp və temperaturun təsirini aproksimasiya edən empirik düsturlar verilmişdir. İrsilik nəzəriyyəsi çərçivəsində statik və kvazistatik yükün təsirindən polimer materialdan hazırlanmış konstruksiyanın deformatsiyası məsələlərinə baxılmış, inteqral çevirilmələr və inteqral-operator metodları tətbiq edilərək məsələlər həll edilmişdir. Müəllif həmçinin A.A.İlyuşinin təklif etdiyi termo-irsi-elastiki məsələnin həllinin aproksimasiyası metodunun öyrənilməsinə də yer vermişdir.

Polimer mexanikası sahəsində məşhur amerikan alimi Con Ferri [100] monoqrafiyasında müxtəlif mexaniki təsir altında polimerlərin irsi-elastiki xüsusiyyətlərinin qanunauyğunluqlarını şərh etmişdir. Polimerin relaksasiya xüsusiyyətinə və deformatsiyanın mexaniki itkisinə baxmışdır. Polimerin xətti irsi-elastiklik nəzəriyyəsinin əsaslaşdırılması üçün müəllif böyük eksperiment materialından istifadə etmişdir.

[71] monoqrafiyasında polimer materialdan hazırlanmış konstruksiyanın deformatsiya və gərginlik vəziyyətinin öyrənilməsi və möhkəmliyinin analizi məsələsinin qoyuluşu və həlli üçün ümumi nəzəri əsaslar və metodlar təqdim edilmişdir. Xətti və qeyri-xətti özlü-elastiki cismin deformatsiya-gərginlik vəziyyətinin təyini metodları öyrənilmişdir. Monoqrafiyada həmçinin silindrə daxili təzyiqin təsiri məsələsi, temperatur gərginliklərinin təyini məsələsi, dinamik yüklənmə məsələlərinin konkret həllinə baxılmışdır.

[68] işi plastiklik və irsilik nəzəriyyəsinin əsas suallarına həsr edilmişdir. Tirin, lövhənin və örtüyün irsiliyi məsələlərinə baxılmışdır. Tirin dartılması, burulması zamanı dağılma müddəti təyin edilmişdir.

L.A.Qalinin [32] işi elastiklik və özlü-elastiklik nəzəriyyəsinin müstəvi və fəza kontakt məsələlərinə həsr edilmişdir. İşdə kontakt məsələlərindən başqa özlü-elastiki yarım-müstəvi üzərində özlü-elastiki silindrin diyirlənməsi məsələsi kompleks

dəyişənli funksiyalar nəzəriyyəsinin və potensiallar nəzəriyyəsinin metodları ilə həlli verilmişdir.

[125] monoqrafiyasında irsi-elastiklik nəzəriyyəsinin riyazi strukturu, aproksimasiya metodları verilmişdir.

Bəzi tədqiqatlarda bioloji parçalana bilən polimerlərin sürüncəkliklik və relaksasiya qabiliyyətinin öyrənilməsinə diqqət yetirilmişdir [126], [133], [143].

Keçən əsrin 60-cı illərində kipləşdirici elementlərin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin tədqiqi və yaxşılaşdırılması məsələləri ilə məşğul olan qabaqcıl alimlərin elmi nəticələrinə həsr edilmiş illik beynəlxalq konfranslar keçirilmiş və avadanlıqların hermetikləşdirmə problemlərinə baxılmışdır. Kipləşdirici texnikanın təkmilləşdirilməsində E.E.Lavendel [57-61], [113-115], [119] və onun tələbələri [33], [35-39], V.L.Biderman [21-23], Q.M.Bartenev [16-18], E.A.Vasilçov [29], L.P.Karasev, M.M.Rezinovskiy [89], [90], O.V.Rumyançev [79], V.D.Prodan [46], [78-80], L.A.Kondakov [99], Q.V.Makarov [65], V.T.Babkin, V.N.Poturaev [76], [77], Y.İ.Belqolov [20], Q.V.Bojko [25], [46], [80], A.N.Gent [117], [118], V.Gonca [33], [119-124], [140], [141], J.Shvabs [120-124], [140-142], B.N.Cassenti, A.Staroselsky [108], B.Naser, M.Kaliske, M.Andre [134] və bir çox başqa alimlərin apardığı tədqiqatlar işlərinin böyük rolu olmuşdur.

E.E.Lavendel və onun yetirmələri müxtəlif rezin materiallı detalların hermetikləşdirmə qabiliyyətini analiz etməyə imkan verən riyazi modellər və onların həll metodlarının öyrənilməsi ilə məşğul olmuşlar. [59]-də kiçik və böyük deformasiya halında “qüvvə-yerdəyişmə” və gərginlik asılılığını təyin etmək üçün metodlar verilmiş, zaman keçdikcə mexaniki göstəricilərin dəyişmə qanunauyğunluqları göstərilmişdir. İrsi-elastiklik nəzərə alınaraq müxtəlif növ kipləşdiricinin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin tədqiqi və bu əsasdan istismar ömrünün proqnozlaşdırması metodları işlənmişdir. İşdə həmçinin sadə halda həll nümunələri göstərilmişdir.

[120] işində daxilində deformasiya olunmayan mil olan və içiboş silindr formalı rezinin (absorber) oxboyu sıxıcı qüvvənin təsiri ilə yaranan deformasiya-gərginlik vəziyyəti kiçik deformasiyalar oblastında öyrənilmişdir. V.Prager

variyaşya prinsipindən istifadə edilərək qüvvə-yərdəyişmə asılılığı qurulmuşdur. Qeyri-müəyyən Laqranj vuruğu metodu tətbiq edilərək rezinin zəif sıxılan və sıxılmayan hissələri riyazi ifadə olunmuşdur.

[121] işi nazik laylı rezin elementin oxboyu sıxılması zamanı Puasson ədədinin təcrübədən təyininə həsr edilmişdir.

[123] işində nazik laylı metal və rezindən ibarət çoxlaylı elementin statik qüvvə ilə sıxılması zamanı möhkəmliyi məsələsinə baxılmışdır. Elastiklik nəzəriyyəsinin variyaşya prinsipindən istifadə edilmişdir. Potensial enerjinin minimumluq şərtindən qüvvə-yərdəyişmə asılılığı üçün analitik ifadə alınmışdır.

[142] işində oxboyu sıxıcı yükün təsirindən müxtəlif formalı rezin, rezin-metal elementlərdə yaranan yərdəyişmə ilə qüvvənin asılılıq ifadəsi analitik olaraq alınmış, təcrübədən Puasson ədədinin qiyməti təyin edilmişdir.

[25] işində kipləşdirici elementin xarici qüvvənin təsirindən yaranan deformasiyasının xarakteri analiz edilmişdir. Kipləşdirilən mühitin kipləşdirici elementi dağılmaya aparan işçi təzyiqinin qiymətini təyin edən ifadə tapılmışdır. Analitik həllin dəqiqliyi eksperimentlə yoxlanılmışdır. Kipləşdirici elementin dağılma ehtimalını qiymətləndirmək üçün onun həndəsi parametrlərindən və istismar şəraitindən asılı olaraq tapılan adsız kəmiyyət təklif edilmişdir.

[104], [130] işlərində sıxılmayan elastomerlər (rezin) üçün ədəbiyyatlarda mövcud olan bütün deformasiya enerjisi modelləri qeyd edilmişdir. Müxtəlif rezin növləri üçün araşdırma aparılmışdır.

[105] dissertasiya işində özlü-elastiki və elastiki-plastiki modellər qurularaq sonlu elementlər üsulu ilə müxtəlif yüklənmə vəziyyətində rezinin fiziki-mexaniki parametrləri təyin edilmişdir.

[65] monoqrafiyasında hidravlik və pnevmatik sistemlərdə maye və sıxılmış qaz itkisinin qarşısını almaq üçün istifadə edilən kipləşdirici elementlərə baxılmışdır. Kipləşdirici elementlərin uzunömürlülüüyü, enerji itkisi və iş prosesində qızması öyrənilmişdir.

Q.M.Bartenevin [16-18] işləri polimer materialların mexanikasının öyrənilməsinə həsr edilmişdir. [18] işində polimer materialın fizikası və mexanikası

öyrənilmiş, [17] monoqrafiyasında isə polimerin möhkəmliyi və dağılma mexanizmi araşdırılmışdır. Əvvəldən mövcud olan və ya yüklənmədən sonra yaranan mikroçatlı polimer nəzəriyyəsi və eksperimental nəticələr təqdim edilmişdir. Həmçinin işdə polimerin relaksasiya xüsusiyyəti ilə dağılma arasındakı əlaqə öyrənilmişdir.

B.N.Cassenti və A.Staroselsky [108] tərəfindən sıxılabilən kipləşdirici elementin deformasiyası və stabilliyi öyrənilmişdir. Materialın sıxılma qabiliyyətinə malik olmasının əlavə yaranan hidrostatik təzyiqlə əlaqəli əlavə gərginliklərə səbəb olduğu göstərilmişdir. Rezin materiallı həlqəvi kipləşdirici elementlərdə deformasiya-gərginlik vəziyyətinin yaranmasında bükülmənin rolu qiymətləndirilmişdir. Belə bir bükülmə elastiki qeyri-sabitliyə səbəb olur və nəticədə çox deformasiya olunmuş həlqəvi kipləşdirici element şəkilləri meydana gəlir. Ədədi hesablamalarla sabit deformasiya olunmuş sıxılabilən materiallı həlqəvi kipləşdirici elementin dairəvi olaraq qalmadığı təyin edilmişdir. Həlqəvi element bükülür və içəridən bükülmənin kənarında düz olmayan formalı “kreslo” meydana gəlir.

A.Aidy, M.Hosseini, B.B.Sahari [104] böyük elastiki deformasiyaya məruz qalan rezinəbənzər material üçün fərqli konstruktiv modelləri nəzərdən keçirmişlər.

Y.Liu və b. [131] yeni kipləşdirici quruluşunun dizaynına uyğun olaraq böyük deformasiyalar oblastında sonlu elementlər üsulu ilə nəzəri və eksperimental tədqiqat aparmışdır.

Wj.Lan və b. ABAQUS proqram simulyasiyası və eksperimental tədqiqat yolu ilə şərti bir quruluşa malik kipləşdirici elementi araşdırmış və kipləşdiricinin materiallarını və quruluşunu optimallaşdırmışlar. Ancaq bu işlərdə kipləşdirici elementinin irsi-elastiki xüsusiyyətləri nəzərə alınmır [129].

Kipləşdirici elementlərin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin tədqiqi və təkmilləşdirilməsi məsələlərinə həsr edilmiş bir çox xarici və yerli müəlliflərin işləri tədqiq edilmişdir [6], [7], [8], [40], [88], [106], [107], [110], [112], [116], [132], [136]. Lakin, neftqazçıxarma prosesində tətbiq olunan kipləşdirici elementlərin kipləşdiricinin materialının fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri, eləcə də irsiliyi və sərhəd effektləri nəzərə alınaraq hermetikləşdirmə qabiliyyətinin tədqiqi və yaxşılaşdırılması

az öyrənilmiş olaraq qalır və növbəti tədqiqatların aparılmasını tələb edir ki, dissertasiya işi də məhz bu problemlərin həllinə həsr edilmişdir.

Tədqiqatın obyekt və predmeti. Sərhəd effektləri və irsiliyi nəzərə alaraq kipləşdirici elementlərin müxtəlif şəraitlərdə hermetikləşdirmə prosesinin riyazi modelləşdirilməsi və tədqiqi.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Neftqazçıxarmada tətbiq edilən müxtəlif formalı kipləşdirici elementlərin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin kipləşdiricinin fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri, eləcə də irsiliyi və sərhəd effektləri nəzərə alınmaqla riyazi modeli qurularaq öyrənilməsindən və alınan tənliklərin həll metodlarının işlənməsindən ibarətdir.

Tədqiqat metodları. Qoyulan məsələlərin həllinə riyazi fizikanın, elastiklik və irsilik nəzəriyyəsinin fundamental metodları tətbiq edilmişdir. Variyasiya prinsipinə əsasən alınmış diferensial tənliklər Qalerkin və Rits metodları ilə həll edilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar.

1. Hermetikləşdirmə prosesinin riyazi modeli qurularaq silindrik kipləşdirici elementlərin sərhəd effektləri, kipləşdiricinin fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri, eləcə də irsiliyi nəzərə alınaraq deformasiya-gərginlik vəziyyətinin təyini metodu işlənməmiş və müəyyən edilmişdir ki, hermetikliyi təmin edən oxboyu sıxıcı qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin hündürlüyünü artırdıqca əvvəlcə azalır, hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra isə stabilləşir.

2. Kipləşdirici elementin səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin onun fiziki-mexaniki göstəricilərindən və hündəsi ölçülərindən asılı olaraq paylanma xarakterinin təyininə imkan verən analitik ifadələr alınmışdır. Göstərilmişdir ki, ən böyük kontakt gərginliyi kipləşdirici elementin aşağı oturacağına yaxın zonada yaranır, kipləşdiricinin hündürlüyü boyu yuxarı qalxdıqca azalır və hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra isə praktiki olaraq yox olur. Müəyyən edilmişdir ki, kipləşdirici elementi eyni anda hər iki tərəfdən sıxmaqla nisbətən daha az oxboyu sıxıcı qüvvə ilə hermetiklik yaradıla bilər.

3. Müəyyən edilmişdir ki, kipləşdiricinin materialının irsilik xüsusiyyətinə malik olması hermetikliyi təmin edən əvvəlcədən verilmiş oxboyu qüvvənin təsirinin az

müddətdə dəfələrlə azalmasına səbəb olur. Bu isə öz növbəsində kipləşdirici elementin səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin və beləliklə də, onun hermetikləşdirmə qabiliyyətinin azalmasına səbəb olur.

4. Oxboyu qüvvənin tətbiq tempinin kipləşdirici elementin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsiri tədqiq edilərək öyrənilmişdir. Göstərilmişdir ki, hermetikliyi təmin edən oxboyu qüvvənin tətbiq tempi azaldıqca kipləşdiricinin səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin relaksasiya sürəti də azalır və zamanın müəyyən həddindən sonra stabilləşir.

5. Hermetikləşdirmə prosesinin riyazi modeli qurularaq kəsik konus formalı və həlqəvi kipləşdirici elementlərin irsiliyi nəzərə alınmaqla kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinin təyini metodu işlənmişdir. Göstərilmişdir ki, oxboyu qüvvənin tətbiq tempi azaldıqca kontakt gərginliyinin relaksasiya sürəti də azalır və müəyyən zamandan sonra isə sabitləşir.

6. İrsilik nəzərə alınaraq dairəvi deşikli yarım silindrik səth ilə kipləşdirici element arasında yaranan kontakt gərginliyinin təyin edilmə metodu işlənmiş və kontakt gərginliyinin paylanma xarakterini təyin edən analitik ifadə alınmışdır. Göstərilmişdir ki, kontakt gərginliyi zamandan asılı olaraq əvvəlcədən nisbətən kiçik sürətlə, sonradan isə bir qədər böyük sürətlə azalır və zamanın müəyyən anından sonra stabilləşir.

Tədqiqatın elmi yeniliyi.

- İşdə neftqazçıxarmada tətbiq edilən müxtəlif formalı kipləşdirici elementlərin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin kipləşdiricinin fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri, eləcə də irsiliyi və sərhəd effektləri nəzərə alınaraq kiçik deformasiyalar oblastında riyazi modeli qurulmuş və alınan diferensial tənliklərin analitik həll metodu verilmişdir.
- Variyasiya prinsipindən istifadə edilərək hermetikliyi təmin edən oxboyu sıxıcı qüvvənin minimum qiymətini kipləşdiricinin həndəsi ölçülərindən və fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərindən asılı olaraq təyin edən analitik ifadə alınmışdır.

- Kipləşdiricinin fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri, eləcə də irsiliyi və sərhəd effektləri nəzərə alınaraq hermetikləşdirmə prosesi zamanı yaranan kontakt gərginliyin paylanma xarakteri müəyyən edilmişdir.
- Kipləşdirici elementin materialının irsilik xüsusiyyətinin onun hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsiri təyin edilmişdir.
- Hermetikləşdirmə prosesinin modeli qurularaq deformasiya tempinin müxtəlif hallarında irsiliyin kontakt gərginliyin paylanma xarakterinə təsiri təyin edilmişdir.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti. Real iş şəraiti nəzərə alınaraq hermetikləşdirmə prosesinin riyazi modelləri qurulmuşdur, həll metodları işlənmişdir. Nəzəri tədqiqatlar əsasında kipləşdirici elementin hermetiklik qabiliyyətinə irsiliyin təsiri öyrənilmişdir. Alınan elmi nəticələr neftqazçıxarma sənayesində tətbiq edilən kipləşdirici elementlərin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin tədqiqi və yaxşılaşdırılması üçün əhəmiyyətlidir və kipləşdirici elementin hermetikliyini təmin edən sıxıcı qüvvənin minimum qiymətini və kipləşdirici elementin effektiv ölçülərinin təyin edilməsi üçün istifadə edilə bilər.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiyanın əsas müddəaları və nəticələri Akademik A.X.Mirzəcanzadənin 85 illik yubleyinə həsr olunmuş “Neftqaz sahəsində qeyri-Nyuton sistemlər” adlı Beynəlxalq Elmi Konfransda (Bakı-2013) [1], Y.Ə.Əmənzadənin 100 illik yubleyinə həsr olunmuş “Mexanikanın klassik və müasir problemləri” adlı Respublika Elmi Konfransda (Bakı-2014) [2], Azərbaycan xalqının Ümummilli Lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 90 illiyinə həsr edilmiş Gənc Tədqiqatçıların I Beynəlxalq Elmi Konfransında (Bakı-2013) [4], Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XVIII Respublika Elmi Konfransında (Bakı-2013) [5], Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2014» (Uxta-2014) [95], “Qaz və neftqazkondensat yataqlarının modelləşdirilməsi” adlı gənclərin VI elmi-praktiki konfransında (Moskva-2014) [96], Akademik A.X.Mirzəcanzadənin 90 illik yubleyinə həsr olunmuş “Neftqazçıxarmada innovativ texnologiyaların və tətbiqi riyaziyyatın müasir problemləri” adlı Beynəlxalq Elmi Konfransda (Bakı-2018) [128] müzakirə olunub. Dissertasiyanın nəticələri elmi

jurnallarda 11 məqalə [3], [9], [10], [45], [92], [93], [94], [101-103], [139], 7 konfrans materialı [1], [2], [4], [5], [95], [96], [138] olmaqla çap olunub.

Müəllifin şəxsi tövhəsi. Dissertasiya işində bəzi məsələlərin qoyuluşu istisna olmaqla əsas həllərdə ifadələrin alınması, məsələlərin tətbiqi proqram təminatı üzərindən həlli və nəticələr dissertasiya müəllifinə məxsusdur.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. Dissertasiya işi Bakı Mühəndislik Universitetinin “Mexanika mühəndisliyi” kafedrasının elmi planları çərçivəsində yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi. Dissertasiya işi giriş, üç fəsil, nəticə və istifadə olunan ədəbiyyat siyahısından ibarət olmaqla 155 səhifə həcmindədir. Dissertasiya işinin ümumi həcmi 222917 işarədir (titul səhifəsi – 365 işarə, mündəricat – 3293 işarə, giriş – 25068 işarə, birinci fəsil – 85581 işarə, ikinci fəsil – 60592 işarə, üçüncü fəsil – 45708 işarə, nəticə - 2310 işarə). Dissertasiyada 10 sayda şəkil, 44 sayda qrafik, 144 adda ədəbiyyat mövcuddur.

Dissertasiya işinin qısa şərhinə keçək. Birinci fəsil (həcmi 56 səhifə) silindrik formalı kipləşdirici elementin müxtəlif yüklənmə vəziyyətində hermetikləşdirmə qabiliyyətinin tədqiqinə həsr edilmişdir. Kipləşdirici elementin fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərindən və həndəsi ölçülərindən asılı olaraq oxboyu sıxıcı qüvvənin təsirindən yaranan deformasiya-gərginlik vəziyyətinin riyazi modeli qurulmuş və nəzəri tədqiqatlar əsasında kipləşdirici elementin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə onun materialının irsiliyinin təsiri öyrənilmişdir. Birinci fəsil 5 paraqraftan ibarətdir. *Birinci paraqrafta* kiçik deformasiyalar oblastında kipləşdirici element elastiki cisim qəbul olunaraq birtərəfli oxboyu sıxıcı qüvvənin təsirindən yaranan deformasiya-gərginlik vəziyyəti təyin edilmişdir. Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə kipləşdirilən silindrin divarı arasında hermetikliyə nail olmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti və kontakt gərginliyi üçün kiçik deformasiyalar oblastında minimum potensial enerji prinsipi tətbiq edilərək analitik ifadələr alınmışdır. *İkinci paraqrafta* silindrik kipləşdirici elementin materialı irsi-elastiki qəbul edilərək birtərəfli oxboyu sıxılması zamanı yaranan deformasiya-gərginlik vəziyyəti elastiki

analogiya metodu əsasında tədqiq edilmiş, kontakt gərginliyin analitik ifadəsi alınmışdır. Nəzəri tədqiqatlar əsasında kipləşdirici elementin materialının irsiliyinin onun hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsiri öyrənilmişdir. *Üçüncü paraqrafda* isə irsi-elastiki silindrik kipləşdirici elementin materialının sürüşmə modulunu Hevisayd funksiyası ilə ifadə edərək elastiki analogiya həll metoduna əsasən riyazi modelləşdirilmiş, kontakt gərginliyin paylanması kipləşdiricinin fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərindən və həndəsi ölçülərindən asılılığı analitik ifadə edilmişdir. *Dördüncü paraqrafda* kiçik deformasiyalar oblastında kipləşdirici element elastiki və irsi-elastiki cisim kimi qəbul olunaraq birtərəfli oxboyu sıxıcı qüvvənin təsiri ilə kipləşdiricinin xarici səthi ilə kipləşdirilən silindrin divarı arasında hermetikliyə nail olmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti və kontakt gərginliyi üçün kiçik deformasiyalar oblastında minimum potensial enerji prinsipi tətbiq edilərək analitik ifadələr alınmışdır. *Beşinci paraqrafda* elastiki cisim qəbul olunaraq silindrik kipləşdirici elementin ikitərəfli oxboyu sıxılması zamanı kiçik deformasiyalar oblastında riyazi modeli qurulmuş, kipləşdirilən səthlər arasında lazımı hermetikliyə nail olmaq üçün kipləşdirici elementin effektiv hündürlüyü analitik hesablamalar vasitəsilə təyin edilmişdir.

İkinci fəsil (həcmi 43 səhifə) həlqəvi və konik formalı kipləşdirici elementlərin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin tədqiqinə həsr edilmişdir. Kiçik deformasiyalar oblastında minimum potensial enerji prinsipi əsasında kipləşdirici elementin tətbiq olunan sıxıcı qüvvənin təsirindən yaranan deformasiya-gərginlik vəziyyətinin riyazi modeli qurulmuş və variyasiya metodunun tətbiqi ilə məsələ həll edilmişdir. Həlqəvi və konik kipləşdirici elementin irsiliyi nəzərə alınaraq hermetikləşdirmə qabiliyyətinin tədqiqi zamanı elastiki analogiya həll metodundan istifadə edilmişdir. İkinci fəsil 5 paraqraftan ibarətdir. *Birinci paraqrafda* həlqəvi kipləşdirici elementin materialı elastiki qəbul edilərək variyasiya metodu ilə kipləşdiricinin xarici yükləmənin təsirindən yaranan deformasiya-gərginlik vəziyyəti öyrənilmiş, kipləşdirici elementin kontakt gərginliyinin qiymətinin onun həndəsi ölçülərindən, fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərindən və oxboyu deformasiyadan asılılığı təyin edilmişdir. Kipləşdirilən səthlər arasında hermetikliyə nail olmaq üçün kipləşdiricinin

effektiv ölçüləri təyin edilmişdir. *İkinci paraqrafda* həlqəvi kipləşdirici elementin materialı irsi-elastiki cisim kimi qəbul edilərək kontakt gərginliyin relaksasiyası öyrənilmişdir. *Üçüncü paraqrafda* qoyulan məsələ konik kipləşdirici elementin materialının elastiki qəbul edildiyi halı üçün həll edilmişdir, kipləşdirilən səthlər arasında hermetikliyə nail olmaq üçün lazım olan sıxıcı qüvvənin təsirindən yaranan deformasiya-gərginlik vəziyyəti təyin edilmişdir. *Dördüncü və beşinci paraqraflarda* kipləşdirici elementin materialının irsiliyi nəzərə alınan hallarda konik forma üçün qoyulan məsələ həll edilmişdir. İrsiliyin kipləşdirici elementin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsiri öyrənilmişdir.

Üçüncü fəsil (həcmi 29 səhifə) dəşikli yarımşilindrik səthin hermetikləşdirilməsinin tədqiqinə həsr edilmişdir. Kiçik deformasiyalar oblastunda dəşikli yarımşilindrik səthin hermetikləşdirilməsi zamanı xarici yükləmənin təsiri altında kipləşdirici elementin deformasiya-gərginlik vəziyyəti tədqiq edilmişdir. Bu fəsildə də minimum potensial enerji metodundan istifadə edilmişdir. *Birinci və ikinci paraqraflarda* qoyulan məsələ kipləşdirici elementin materialının elastiki qəbul olunan hal üçün həll edilmişdir. *Digər paraqraflarda* isə kipləşdirici elementin materialının irsi-elastiki qəbul olunaraq elastiki analogiya həll metodu ilə məsələ həll edilmişdir. Xarici qüvvənin təsir müddətinin müxtəlif qiymətlərində kipləşdirici elementin daxili səthi ilə dəşikli yarımşilindrik səth arasında yaranan kontakt gərginliyinin zamandan asılılığı təyin edilmişdir.

I FƏSİL

SİLİNDRİK FORMALI ELEMENTLƏRLƏ KIPLƏŞDİRMƏ PROSESİNİN RİYAZİ MODELƏŞDİRİLMƏSİ

Bu fəsil silindrik formalı kipləşdirici elementlərin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin tədqiqinin riyazi modeli qurularaq öyrənilməsinə həsr edilmişdir. Silindrik kipləşdirici elementin materialının elastiklik və irsilik xüsusiyyəti nəzərə alınaraq birtərəfli və ikitərəfli sıxılması zamanı kipləşdiricinin deformasiya-gərginlik vəziyyəti tədqiq edilərək öyrənilmişdir. Eləcə də, nəzəri tədqiqatlar əsasında silindrik formalı kipləşdirici elementin xarici səthi ilə hermetikləşdirmə prosesi zamanı yaranan deformasiya-gərginlik vəziyyəti öyrənilmişdir. Kipləşdirici elementin birtərəfli və ikitərəfli sıxılması zamanı hermetiklik yaradan oxboyu qüvvənin qiymətinin kipləşdiricinin həndəsi ölçülərindən asılılığı təyin edilmiş, hermetikliyi təmin edən oxboyu qüvvənin minimum qiyməti tapılmışdır. İrsiliyin kipləşdiricinin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsiri öyrənilmiş, kipləşdirici elementin materialının elastiki və irsi-elastiki olduğu halda alınan nəticələr müqayisə edilmişdir.

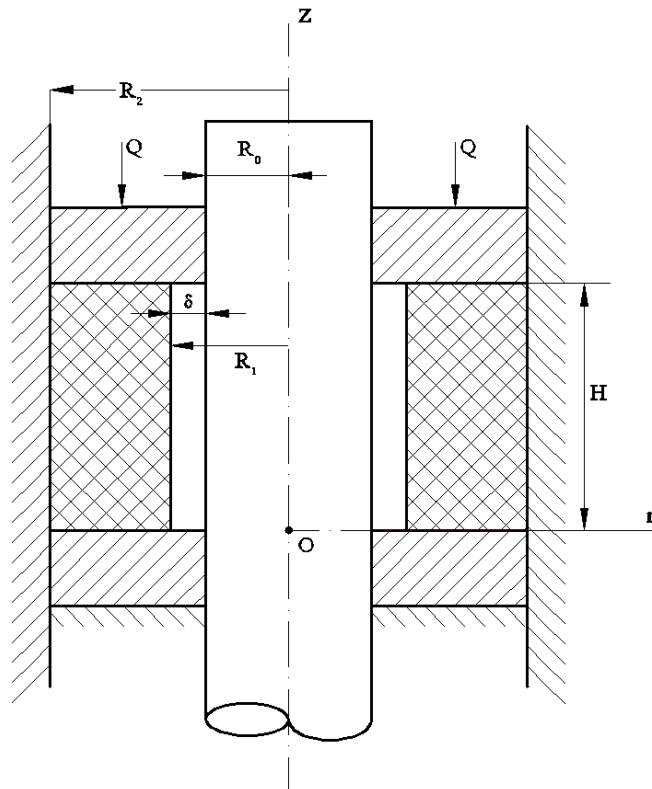
1.1. Kipləşdirici ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin təyini

Bu paraqrafda kipləşdirici elementin birtərəfli sıxılması zamanı onun daxili səthi ilə kipləşdirilən silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinin kipləşdiricinin fiziki-mexaniki göstəricilərindən və həndəsi ölçülərindən asılılığı nəzəri olaraq tədqiq edilmişdir.

Kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına ilk və tam toxunmasındakı müxtəlif deformasiya vəziyyətləri nəzərə alınmaqla bu səthlər arasında hermetikliyi təmin edən oxboyu qüvvənin qiyməti tapılmışdır. Kipləşdirici elementin birtərəfli sıxılması zamanı hermetiklik yaradan oxboyu qüvvənin

qiymətinin kipləşdiricinin həndəsi ölçülərindən asılılığı təyin edilmişdir. Göstərilmişdir ki, kipləşdirici elementin hündürlüyünün azalması ilə hermetiklik yaranan oxboyu qüvvənin qiyməti sürətlə artır. Bundan əlavə, kipləşdirici elementin hündürlüyünün elə həddi təyin edilmişdir ki, hündürlüyün ondan böyük qiymətlərində kontakt gərginliyi oxboyu sıxıcı qüvvənin qiymətindən çox az asılı olur.

Kipləşdirilən silindrin xarici səthinə δ ara məsafəsi ilə geyindirilmiş silinrik formalı elementlə kipləşdirmə prosesinə baxaq (Şəkil 1.1.1) [10]. Silindrin xarici səthi ilə kipləşdirici elementin daxili səthi arasında kipləşdiricinin birtərəfli oxboyu sıxılması ilə hermetiklik yaranılır. Məsələnin həlli iki mərhələyə bölünür. Birinci mərhələdə kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin xarici səthinin ilk kontaktı yaranana qədər sıxılması prosesinin, ikinci mərhələdə isə bu səthlər arasında hermetikliyə nail olunması prosesinin riyazi modelinin qurulmasına və həllinə baxılır.



Şəkil 1.1.1. Hesabat sxemi

Birinci mərhələyə baxaq. Kipləşdirici elementin materialı bircins olduğundan onun deformasiyası oxasimmetrik qəbul edilə bilər. Onda müstəvi kəsiklər hipotezini

qəbul edək və fərz edək ki, kipləşdirici elementin oxboyu deformasiyası yalnız oxboyu yönəlmiş koordinatdan asılıdır.

Şəkil 1.1.1-də göstərildiyi kimi koordinat sisteminin başlanğıcını kipləşdirici elementin aşağı oturacaq müstəvisinin mərkəzində yerləşdirək və z koordinat oxunu şaquli olaraq yuxarı, r koordinat oxunu isə radiusun böyüməsi istiqamətində yönəldək.

Yuxarıda qeyd edilmiş fərziyyəni nəzərə alaraq kipləşdirici elementin en kəsik sahələrinin oxboyu w_1 nisbi deformasiyasını aşağıdakı formada qəbul edək [7], [21-23], [76]:

$$w_1 = f_1(z), \quad (1.1.1)$$

burada $f_1(z)$ – z -dən asılı axtarılan naməlum funksiyadır.

Kipləşdirici elementin materialını sıxılmayan qəbul etsək [59], aşağıdakı bərabərliyi alarıq:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(u_1 r)}{\partial r} + \frac{\partial w_1}{\partial z} = 0, \quad (1.1.2)$$

burada $u_1(r, z)$ – kipləşdiricinin ixtiyari nöqtəsinin radial istiqamətdəki deformasiyasıdır.

(1.1.2) ifadəsində (1.1.1) nəzərə alınmaqla aşağıdakı ifadə alınır:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(u_1 r)}{\partial r} = -f_1'(z). \quad (1.1.3)$$

(1.1.3) ifadəsini inteqrallasaq, aşağıdakı bərabərliyi alarıq:

$$u_1(r, z) = -\frac{1}{2} r f_1'(z) + \frac{c_1}{r}, \quad (1.1.4)$$

burada c_1 - inteqral sabitidir.

Sərhəd şərti aşağıdakı kimi olar:

$$u_1(r, z)|_{r=R_2} = 0. \quad (1.1.5)$$

Onda (1.1.4) ifadəsində (1.1.5) sərhəd şərtini nəzərə alsaq, alarıq:

$$u_1(r, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_2^2}{r} - r \right) f_1'(z). \quad (1.1.6)$$

Kipləşdirici elementin birinci mərhələdə deformasiyalanmasından sonra məsələnin oxasimmetrikliyi nəzərə alınmaqla potensial enerjisi aşağıdakı kimi tapıla bilər [59]:

$$\Pi = 4\pi G \int_0^H \int_{R_1}^{R_2} \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{rz}^2 \right) r dr dz - \int_0^H Q \cdot f_1'(z) dz, \quad (1.1.7)$$

burada H – kipləşdirici elementin hündürlüyü, R_1 , R_2 – uyğun olaraq daxili və xarici radiusu, ε_r , ε_θ , ε_z və γ_{rz} – uyğun olaraq radial, tangensial, oxboyu və sürüşmə nisbi deformasiyalarıdır [15]:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right). \quad (1.1.8)$$

Onda (1.1.1), (1.1.6) və (1.1.8) ifadələrini (1.1.7) düsturunda yerinə yazsaq, alarıq:

$$\begin{aligned} \Pi = 2\pi G \int_0^H & \left\{ \left(-\frac{3}{64} R_2^4 - \frac{1}{64} R_1^4 + \frac{1}{16} R_2^2 R_1^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right) f_1''^2(z) + \right. \\ & \left. + \left(R_2^2 - \frac{3}{2} R_1^2 + \frac{1}{2} \frac{R_2^4}{R_1^2} \right) f_1'^2(z) - \frac{Q}{2\pi G} f_1'(z) \right\} dz, \end{aligned} \quad (1.1.9)$$

burada G – kipləşdirici elementin materialının sürüşmə moduludur.

(1.1.9) funksionalından Eyler tənliyinə [28], [34] əsasən alarıq:

$$\varphi''(z) - \frac{R_2^2 - \frac{3}{2} R_1^2 + \frac{1}{2} \frac{R_2^4}{R_1^2}}{-\frac{3}{64} R_2^4 - \frac{1}{64} R_1^4 + \frac{1}{16} R_2^2 R_1^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \varphi'(z) +$$

$$+ \frac{q(R_2^2 - R_1^2)}{4 \left(-\frac{3}{64} R_2^4 - \frac{1}{64} R_1^4 + \frac{1}{16} R_2^2 R_1^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right)} = 0, \quad (1.1.10)$$

burada $\varphi(z) = f_1'(z)$.

(1.1.10) tənliyini inteqrallayaraq $\varphi(z) = f_1'(z)$ bərabərliyini nəzərə alsaq, alarıq:

$$f_1(z) = \frac{c_2}{k} \operatorname{ch} kz + \frac{c_3}{k} \operatorname{sh} kz + \frac{A}{k^2} z + c_4, \quad (1.1.11)$$

burada

$$k = \sqrt{\frac{R_2^2 - \frac{3}{2} R_1^2 + \frac{1}{2} \frac{R_2^4}{R_1^2}}{-\frac{3}{64} R_2^4 - \frac{1}{64} R_1^4 + \frac{1}{16} R_2^2 R_1^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)}},$$

$$A = \frac{q(R_2^2 - R_1^2)}{4 \left(-\frac{3}{64} R_2^4 - \frac{1}{64} R_1^4 + \frac{1}{16} R_2^2 R_1^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right)}.$$

c_2, c_3, c_4 isə aşağıdakı sərhəd şərtlərindən təyin edilən inteqral sabitləridir:

$$\mu Q|_{z=H} = 2\pi G \int_{R_1}^{R_2} \gamma_{zr} r dr, \quad w_1|_{z=0} = 0, \quad u_1(r, z)|_{z=0} = -\delta, \quad (1.1.12)$$

burada μ – metal halqa ilə kipləşdiricinin yuxarı oturacağı arasındakı sürtünmə əmsalidir.

(1.1.12) sərhəd şərtlərində (1.1.1), (1.1.6) və (1.1.11) ifadələrini nəzərə alsaq, alarıq:

$$c_2 = \frac{\mu q(R_2^2 - R_1^2)}{B k \operatorname{ch} kH} + \left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{A}{k^2} \right) \operatorname{th} kH,$$

$$c_3 = -\frac{\delta}{\lambda} - \frac{A}{k^2}, \quad (1.1.13)$$

$$c_4 = -\frac{\mu q (R_2^2 - R_1^2)}{B k^2 \operatorname{ch} kH} - \left(\frac{\delta}{\lambda k} + \frac{A}{k^3} \right) \operatorname{th} kH,$$

burada $B = \frac{R_2^3}{3} - \frac{1}{2} R_2^2 R_1 + \frac{R_1^3}{6}$, $\lambda = \frac{1}{2} \left(\frac{R_2^2}{R_1} - R_1 \right)$.

Kipləşdirici elementin ixtiyari nöqtəsindəki radial gərginlik aşağıdakı kimi tapıla bilər [15], [59]:

$$\sigma_r = G(2\varepsilon_r + s), \quad (1.1.14)$$

burada s – hidrostatik gərginlik funksiyasıdır, $s = \frac{1}{3G} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$.

Kipləşdiricinin xarici səthinin silindrin divarına ilk toxunma anında onun radial gərginliyi üçün aşağıdakı sərhəd şərti yazıla bilər:

$$\sigma_r|_{r=R(z)} = 0, \quad (1.1.15)$$

burada $R(z) = R_1 + u_1(r, z)|_{r=R_1}$.

Onda (1.1.15) sərhəd şərtindən (1.1.6) və (1.1.14) ifadələrini nəzərə almaqla alarıq:

$$s = \left(\frac{R_2^2}{R^2(z)} + 1 \right) f_1'(z). \quad (1.1.16)$$

Kipləşdirici elementə tətbiq olunmuş oxboyu Q sıxıcı qüvvə aşağıdakı kimi tapıla bilər:

$$\pi (R_2^2 - R_1^2) \sigma_z|_{z=H} = Q, \quad (1.1.17)$$

digər tərəfdən isə:

$$\sigma_z = G(2\varepsilon_z + s). \quad (1.1.18)$$

(1.1.17) ifadəsindən (1.1.11), (1.1.13) – (1.1.16) və (1.1.18) ifadələri nəzərə alınmaqla alırıq:

$$q = \left(\frac{R_2^2}{R^2(H)} + 3 \right) f_1'(H), \quad (1.1.19)$$

burada $q = \frac{Q}{\pi G (R_2^2 - R_1^2)}$.

(1.1.19) ifadəsindən q aşkar şəkildə tapılır:

$$q = \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right)^2 + \left(-\frac{a^2}{9} + \frac{b}{3} \right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right)^2 + \left(-\frac{a^2}{9} + \frac{b}{3} \right)^3}} - \frac{a}{3}, \quad (1.1.20)$$

burada

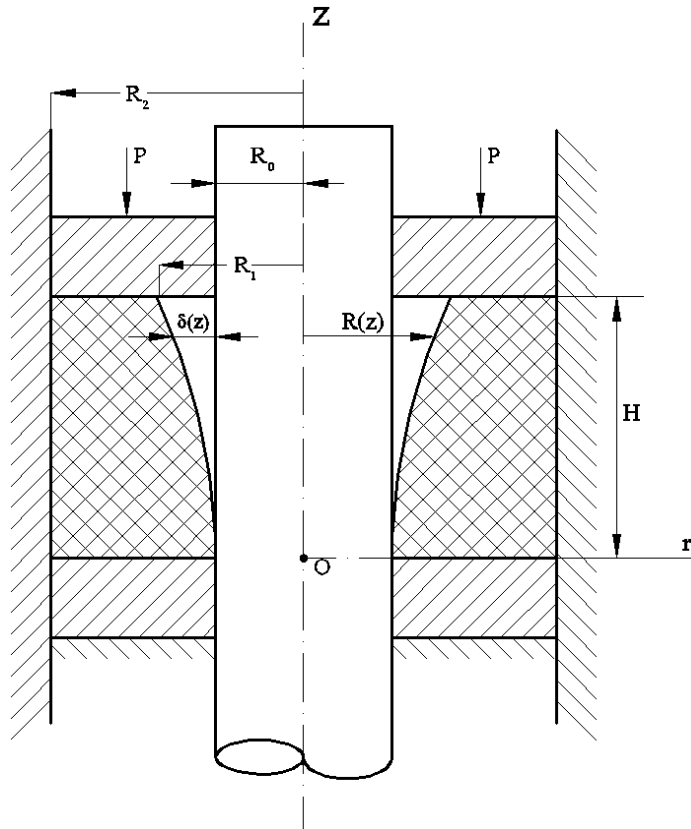
$$a = \frac{-\frac{3\delta C}{\text{ch } kH} + 2(3C-1) \left(R_1 - \frac{\delta}{\text{ch } kH} \right)}{\lambda C(3C-1)},$$

$$b = \frac{R_2^2 C + (3C-1) \left(R_1 - \frac{\delta}{\text{ch } kH} \right)^2 - \frac{6\delta C}{\text{ch } kH} \left(R_1 - \frac{\delta}{\text{ch } kH} \right)}{\lambda^2 C^2 (3C-1)},$$

$$c = \frac{-R_2^2 - 3 \left(R_1 - \frac{\delta}{\text{ch } kH} \right)^2}{\lambda^3 C^2 (3C-1) \text{ch } kH} \delta,$$

$$C = \frac{\mu (R_2^2 - R_1^2) \text{sh } kH}{B k \text{ch } kH} - \frac{(R_2^2 - R_1^2)(1 - \text{ch } kH)}{4 \left(R_2^2 - \frac{3}{2} R_1^2 + \frac{1}{2} \frac{R_2^4}{R_1^2} \right) \text{ch } kH}.$$

İndi isə kipləşdirici elementin onun daxili səthinin silindrin divarına tam toxunmasına qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiymətini tapaq. Koordinat sisteminin başlanğıcını kipləşdirici elementin aşağı oturacaq müstəvisinin mərkəzində yerləşdirək və z oxunu şaquli olaraq yuxarı, r oxunu isə radiusun böyüməsi istiqamətində yönəldək (Şəkil 1.1.2).



Şəkil 1.1.2. Hesabat sxemi

Kipləşdirici element ox boyunca metal halqanın köməyi ilə sıxıldığından müstəvi kəsiklər hipotezi tətbiq edilə bilər və uyğun olaraq kipləşdirici elementin oxboyu deformasiyasını yalnız oxboyu yönəlmiş z koordinatından asılı qəbul etmək olar:

$$w_2 = f_2(z), \quad (1.1.21)$$

burada w_2 – kipləşdirici elementin kəsiklərinin oxboyu deformasiyası, $f_2(z)$ – yalnız z -dən asılı naməlum funksiya.

Onda (1.1.21) ifadəsini nəzərə almaqla (1.1.2) sıxılmazlıq şərtindən alarıq:

$$u_2(r, z) = -\frac{1}{2} r f_2'(z) + \frac{c_5}{r}, \quad (1.1.22)$$

burada c_5 - inteqral sabitidir.

Kipləşdirici elementin daxili səthi silindrin divarına tam toxunduqdan sonra sərhəd şərti üçün alırıq:

$$u_2(r, z)|_{r=R_2} = 0. \quad (1.1.23)$$

(1.1.22) ifadəsində sərhəd şərti (1.1.23)-ü nəzərə alsaq, alırıq:

$$u_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{R_2^2}{r} - r \right) f_2'(z). \quad (1.1.24)$$

Kipləşdirici elementin deformasiya-gərginlik vəziyyətini və məsələnin oxasimetrikliyini nəzərə alaraq onun potensial enerjisi üçün aşağıdakı bərabərliyi yazı bilərik [19], [22], [25]:

$$\Pi = 4\pi G \int_0^h \int_{R_0}^{R_2} \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{rz}^2 \right) r dr dz - \int_0^h P \cdot f_2'(z) dz, \quad (1.1.25)$$

burada $h = H - |\Delta_1|$, $\Delta_1 = f_1(H)$.

(1.1.24) ifadəsini (1.1.8) düsturunda yerinə yazıb, alınmış nəticəni (1.1.25) ifadəsində yerinə qoyaraq r -ə görə inteqrallasaq, alınmış funksionaldan Eyler tənliyinə [34] əsasən aşağıdakı diferensial tənliyi alırıq:

$$\varphi_1''(z) - k_1^2 \varphi_1(z) + A_1 = 0, \quad (1.1.26)$$

burada $\varphi_1(z) = f_2'(z)$,

$$k_1 = \sqrt{\frac{R_2^2 - \frac{3}{2} R_0^2 + \frac{1}{2} \frac{R_2^4}{R_0^2}}{-\frac{3}{64} R_2^4 - \frac{1}{64} R_0^4 + \frac{1}{16} R_0^2 R_2^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_0}\right)}},$$

$$A_1 = \frac{p (R_2^2 - R_0^2)}{4 \left(-\frac{3}{64} R_2^4 - \frac{1}{64} R_0^4 + \frac{1}{16} R_0^2 R_2^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln \left(\frac{R_2}{R_0} \right) \right)}.$$

(1.1.26) diferensial tənliyinin həlli aşağıdakı kimi olar:

$$\varphi_1(z) = a_1 \cosh k_1 z + b_1 \sinh k_1 z + \frac{A_1}{k_1^2}, \quad (1.1.27)$$

burada a_1 və b_1 inteqral sabitləridir.

(1.1.27) ifadəsində $\varphi_1(z) = f_2'(z)$ bərabərliyini nəzərə alsaq, alarıq:

$$f_2(z) = \frac{a_1}{k_1} \operatorname{sh} k_1 z + \frac{b_1}{k_1} \operatorname{ch} k_1 z + \frac{A_1}{k_1^2} z + c_0. \quad (1.1.28)$$

a_1 , b_1 və c_0 sabitləri aşağıdakı sərhəd şərtlərindən tapıla bilər:

$$\mu P|_{z=h} = 2\pi G \int_{R_0}^{R_2} \gamma_{zr} r dr, \quad u_2(r, z)|_{z=h} = -\delta(h), \quad w_2|_{z=0} = 0, \quad (1.1.29)$$

burada $R(h) = R_1 + u_1(r, z)|_{z=h}$, $\delta(h) = \delta + u_1(r, z)|_{z=h}$.

(1.1.29) sərhəd şərtlərindən (1.1.28) ifadəsində nəzərə alaraq alarıq:

$$a_1 = \frac{1}{\operatorname{th}^2 k_1 h - 1} \left(\frac{2 R(h) \delta(h)}{(R_2^2 - R^2(h)) \operatorname{ch} k_1 h} + \frac{\mu p (R_2^2 - R_0^2) \operatorname{th} k_1 h}{B_1 k_1 \operatorname{ch} k_1 h} + \frac{A_1}{k_1^2 \operatorname{ch} k_1 h} \right),$$

$$b_1 = \frac{\mu p (R_2^2 - R_0^2)}{B_1 k_1 \operatorname{ch} k_1 h} - \operatorname{th} k_1 h \cdot a_1, \quad c_0 = -\frac{1}{k_1} b_1,$$

burada $B_1 = \frac{R_2^3}{3} - \frac{1}{2} R_2^2 R_0 + \frac{R_0^3}{6}$.

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti aşağıdakı kimi tapıla bilər:

$$\pi(R_2^2 - R_0^2)\sigma_z \Big|_{z=h} = P, \quad (1.1.30)$$

burada σ_z – kipləşdirici elementin ixtiyari en kəsik müstəvisində yaranan oxboyu gərginlikdir.

Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında tam kontakt yarandıqdan sonra kipləşdiricinin yuxarı oturacağıda

$$\sigma_r \Big|_{\substack{r=R_0 \\ z=h}} = 0 \quad (1.1.31)$$

sərhəd şərti ödənəcəkdir. Onda (1.1.31) sərhəd şərtini nəzərə almaqla (1.1.14) ifadəsindən alarıq:

$$s = \left(\frac{R_2^2}{R_0^2} + 1 \right) f_2'(h), \quad (1.1.32)$$

(1.1.18) və (1.1.32) ifadələrini isə (1.1.30) ifadəsində nəzərə alsaq,

$$p = \left(\frac{R_2^2}{R_0^2} + 3 \right) f_2'(h) \quad (1.1.33)$$

bərabərliyini alarıq, burada $p = \frac{P}{\pi G(R_2^2 - R_0^2)}$.

Onda (1.1.28) ifadəsini və a_1 , b_1 və c_0 -ın ifadələrini (1.1.33)-də nəzərə alsaq, alarıq:

$$p = 2 \frac{R(h)\delta(h)}{R_2^2 - R^2(h)} \left(\frac{R_2^2}{R_0^2} + 3 \right), \quad (1.1.34)$$

burada

$$R(h) = R_1 + \lambda \left(c_2 \operatorname{sh} kh + c_3 \operatorname{ch} kh + \frac{A}{k^2} \right),$$

$$\delta(h) = \delta + \lambda \left(c_2 \operatorname{sh} kh + c_3 \operatorname{ch} kh + \frac{A}{k^2} \right).$$

Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında onların tam toxunmasından sonra yaranan kontakt gərginliyi elastiki əsas üzərindəki tir məsələsinə analogi olaraq

$$\sigma_r(z) = k_0 \cdot u_0(z) \quad (1.1.35)$$

düsturu ilə tapıla bilər, burada k_0 - elastiki əsasın yataq əmsalı,

$$u_0(z) = R_1 - R_0 + u_1(r, z)|_{r=R_1}.$$

Əgər bu, səthlər arasında hermetikliyi təmin etmirsə, onda kipləşdirici elementi sıxmağa davam edirik. Bunun üçün kipləşdirici elementin aşağı oturacağından z məsafəsindən dz hündürlüklü həlqəvi element ayıraq və onun müvazinət vəziyyətinə baxaq. Müvazinət şərtinə əsasən:

$$2\pi \cdot \tau_{rz}(R_2 + R_0)dz = -\pi(R_2^2 - R_0^2) \frac{d\sigma_z}{dz} dz, \quad (1.1.36)$$

burada τ_{rz} – toxunan gərginlikdir.

Digər tərəfdən kipləşdiricinin materialının sıxılmazlığını nəzərə alsaq [9], [23],

$$\tau_{rz} = \frac{\mu\nu}{1-\nu} \sigma_z, \quad (1.1.37)$$

alırıq, burada μ – sürtünmə əmsalı, ν – Puasson əmsalıdır.

(1.1.37) ifadəsini (1.1.36) tənliyində yerinə yazaraq və alınmış ifadəni $\sigma_z|_{z=h} = \sigma_0$ sərhəd şərti daxilində inteqrallasaq, alırıq:

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{2\mu\nu(h-z)}{(1-\nu)(R_2 - R_0)}\right), \quad (1.1.38)$$

burada σ_0 – kipləşdirici elementin sıxıcı qüvvə tətbiq olunmuş kəsiyində yaranan oxboyu gərginlikdir.

Kipləşdiricinin daxili səthi və silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanması (1.1.35) və (1.1.38) ifadələrindən aşağıdakı kimi təyin edilə bilər:

$$\sigma_r = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z. \quad (1.1.39)$$

Onda (1.1.39) ifadəsində (1.1.38) düsturunu nəzərə almaqla alırıq:

$$\sigma_r = \frac{\nu \sigma_0}{1-\nu} \exp\left(\frac{2 \mu \nu (h-z)}{(1-\nu)(R_2-R_0)}\right) + k_0 \cdot u_0(z). \quad (1.1.40)$$

σ_0 gərginliyinin qiyməti aşağıdakı hermetiklik şərtindən təyin edilir:

$$\frac{\nu \sigma_0}{1-\nu} \exp\left(\frac{2 \mu \nu}{(1-\nu)(R_2-R_0)} h\right) + k_0 \cdot u_0(0) \geq P_{mühit},$$

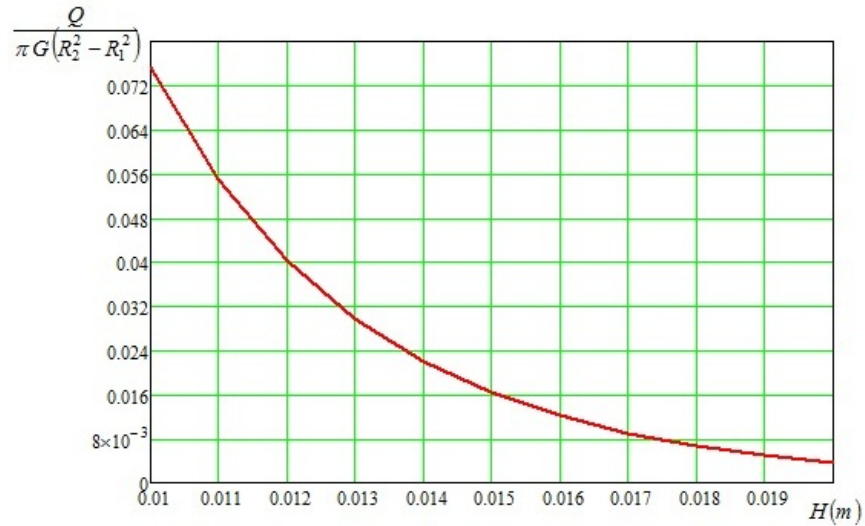
burada $P_{mühit}$ - mühitin təzyiqidir.

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk və tam toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu sıxıcı qüvvənin qiymətləri üçün (1.1.20) və (1.1.34) düsturlarına əsasən verilənlərin aşağıdakı qiymətlərində ədədi hesabat aparılmışdır:

$$\begin{aligned} R_0 &= 0.073 m, \quad R_1 = 0.076 m, \quad R_2 = 0.1 m, \quad \delta = 0.003 m, \\ P_{mühit} &= 2 \cdot 10^7 Pa, \quad G = 1.3 \cdot 10^8 Pa, \quad k_0 = 6.7 \cdot 10^9 Pa/m, \\ \mu &= 0.5, \quad \nu = 0.25. \end{aligned}$$

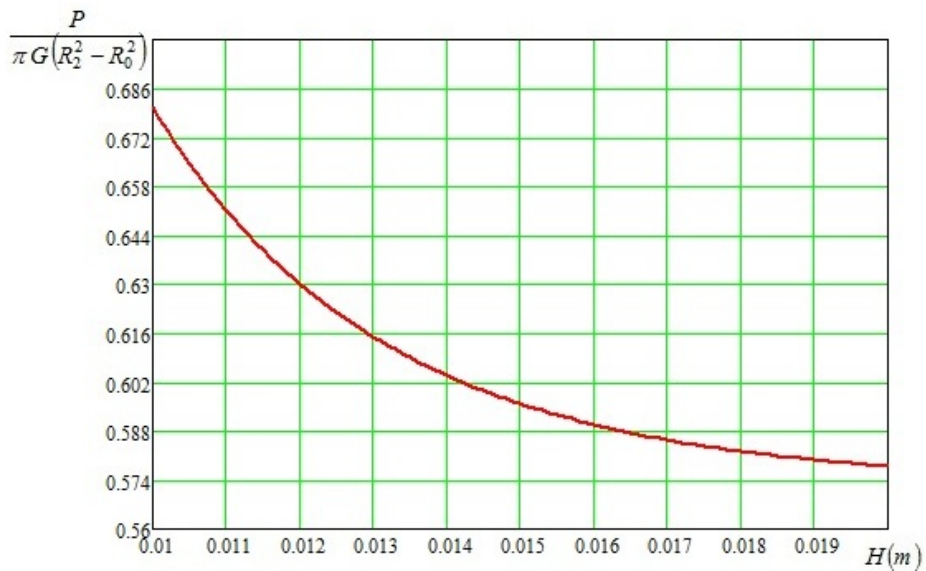
Ədədi hesabatın nəticələri Qrafik 1.1.1 – 1.1.3-də təsvir edilmişdir. Qrafik 1.1.1-dən görünür ki, kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin hündürlüyü artdıqca əvvəlcə azalır, sonra isə hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra stabiləşir.

Qrafik 1.1.2-dən görünür ki, kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti də kipləşdiricinin hündürlüyü artdıqca əvvəlcə azalır, sonra isə hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra stabilləşir.



Qrafik 1.1.1. Kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər deformasiya etdirən oxboyu Q qüvvəsinin qiymətini təyin edən

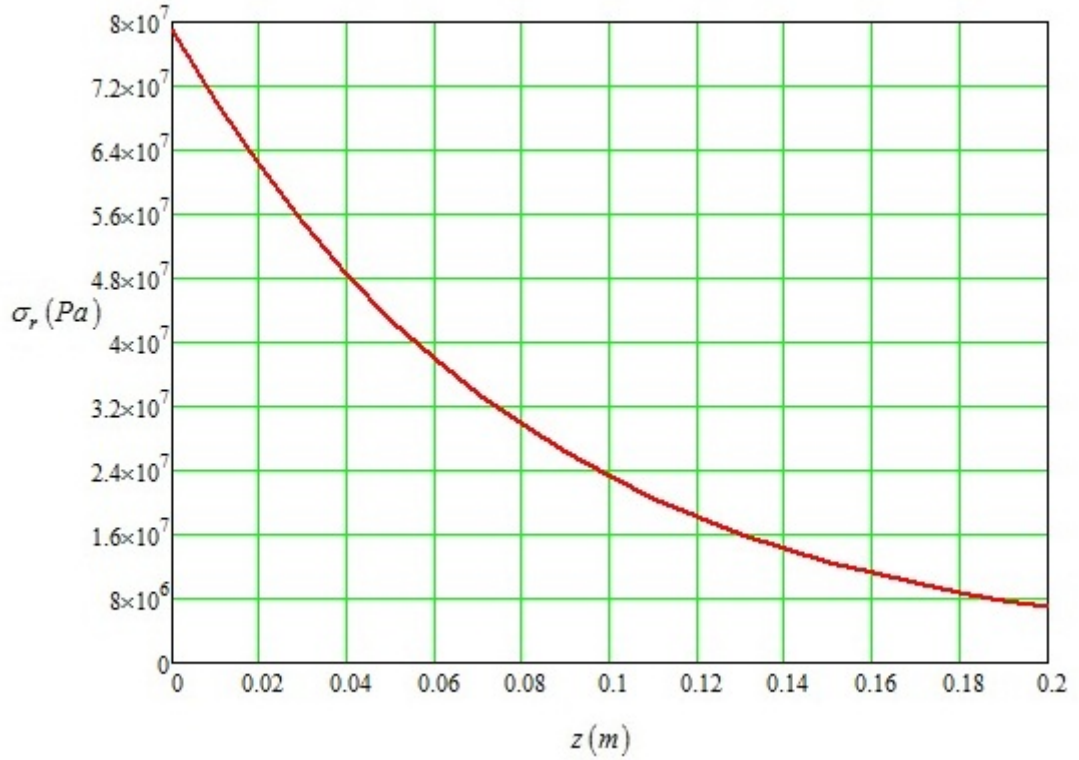
$q = Q / \pi G (R_2^2 - R_1^2)$ kəmiyyətinin qiymətinin kipləşdiricinin hündürlüyündən asılılıq qrafiki



Qrafik 1.1.2. Kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına tam

kontaktını yaradan P qüvvəsinin qiymətini təyin edən $p = \frac{P}{\pi G (R_2^2 - R_0^2)}$

kəmiyyətinin qiymətinin kipləşdiricinin hündürlüyündən asılılıq qrafiki



Qrafik 1.1.3. Kipləşdirici elementin daxili səthi və silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin z koordinatından asılılıq qrafiki ($H = 0.2 m$)

Qrafik 1.1.3-də kipləşdirici elementin daxili səthi və silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin z koordinatından asılılıq qrafiki verilmişdir. Qrafikdən görüldüyü kimi ən böyük kontakt gərginliyi kipləşdirici elementin aşağı oturacağında yaranır. z -in qiyməti artdıqca kontakt gərginliyi azalır, kipləşdirici elementin hündürlüyünün müəyyən qiymətindən sonra isə itir.

Beləliklə alınmış (1.1.40) ifadəsi kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyin onun fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərindən və həndəsi ölçülərindən asılı olaraq paylanma xarakterini təyin etməyə imkan verir.

1.2. İrsiliyin kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsiri

Bu paraqrafda materialının irsiliyi nəzərə alınmaqla kipləşdirilən silindrin xarici səthinə δ dəliyi ilə geyindirilmiş silindrik kipləşdirici elementə və kipləşdirmə prosesinə baxaq (Şəkil 1.1.1) [92]. Kipləşdirici elementin oxboyu sıxılması ilə onun daxili səthi və silindrin xarici divarı arasında hermetiklik yaradılır. Kipləşdirici elementin materialının irsi xüsusiyyətə malik olduğunu qəbul edək və kipləşdiricinin ani yüklənmə halına baxaq. Onda kipləşdirici elementin deformasiya prosesini kvazistatik qəbul edərək məsələni elastiki analogiya metodu ilə həll etmək olar [55], [59], [68], [82], [84], [91], [135].

Kipləşdirici elementin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə onun materialının özlü-elastiklik xüsusiyyətinin təsiri elastiki analogiya hipotezi əsasında nəzərə alın bilər [8]. Bu fərziyyəyə əsasən elastiki həldən özlü-elastiki həllə keçid zamanı yalnız gərginlik və deformasiya arasındakı asılılıq dəyişir.

Qeyd etmək lazımdır ki, elastik analogiya ilə gərginliyin bütün komponentləri tək bir gərginlik üçün seçilmiş model əsasında əldə olunan gərginlik və deformasiya arasındakı asılılığı təmin edir.

İxtiyari yüklənmə halı üçün gərginlik tenzoru komponentləri ilə deformasiya tenzoru komponentləri arasında kipləşdirici elementin materialının özlü-elastiklik xüsusiyyətini ən yaxşı təsvir edən asılılıq aşağıdakı kimidir [8]:

$$\dot{\sigma} + \lambda^* \sigma = E_M \left(\dot{\varepsilon} + \nu^* \varepsilon \right), \quad (1.2.1)$$

burada $E_1 = E_M$, $\lambda^* = \frac{E_1 + E_2}{\eta}$, $\nu^* = \frac{E_2}{\eta}$, $n = \frac{1}{\nu^*}$ - relaksasiya müddəti, η - kipləşdirici elementin materialının dinamik özlülük əmsalı, E_M - ani elastiklik modulu, E_2 - kipləşdiricinin materialının elastiklik modulu, $E_\infty = \frac{\nu^*}{\lambda^*}$ -

uzunmüddətli elastiklik əmsalı, σ - gərginlik, ε - nisbi deformasiya, $\dot{\sigma}$ və $\dot{\varepsilon}$ - gərginlik və deformasiya komponentlərinin zamana görə törəməsidir.

(1.2.1) diferensial tənliyindən $\sigma(t)$ - gərginlik və $\varepsilon(t)$ - nisbi deformasiya aşağıdakı kimi tapıla bilər [59]:

$$\sigma(t) = E_M \left[\varepsilon(t) - (\lambda^* - \nu^*) \int_0^t e^{-\lambda^*(t-\xi)} \varepsilon(\xi) d\xi \right], \quad (1.2.2)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_M} \left[\sigma(t) + (\lambda^* - \nu^*) \int_0^t e^{-\nu^*(t-\xi)} \sigma(\xi) d\xi \right]. \quad (1.2.3)$$

Ümumi halda (1.2.2) və (1.2.3) bərabərliklərində inteqralın nüvəsini uyğun olaraq $P(t-\xi)$ və $\Gamma(t-\xi)$ işarə etsək, alarıq:

$$\sigma(t) = E \left[\varepsilon(t) - \int_0^t P(t-\xi) \varepsilon(\xi) d\xi \right], \quad (1.2.4)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \left[\sigma(t) + \int_0^t \Gamma(t-\xi) \sigma(\xi) d\xi \right]. \quad (1.2.5)$$

Kipləşdirici elementin materialını sıxılmayan qəbul edək. Onda $\mu = 0.5$. Bu şərt gərginliyin tapılmasına müəyyən məhdudiyət qoyur. Ona görə də bu şərt daxilində gərginlik və deformasiya tenzoru komponentləri arasındakı asılılığın necə təyin edildiyini göstərək. Məsələnin həllini sadələşdirmək məqsədilə aşağıdakı kimi təyin edilən s - hidrostatik təzyiq adlanan əlavə bir funksiya daxil edək:

$$s = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{E}. \quad (1.2.6)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]. \quad (1.2.7)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z - (\sigma_y + \sigma_z) - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_x = s - \frac{1}{E} (1 + \mu)(\sigma_y + \sigma_z) \quad (1.2.8)$$

(1.2.6) ifadəsindən alarıq:

$$\sigma_y + \sigma_z = Es - \sigma_x. \quad (1.2.9)$$

Onda (1.2.9) formulunu nəzərə alaraq (1.2.8) ifadəsindən alırıq:

$$\varepsilon_x = s - \frac{1}{E}(1 + \mu)(Es - \sigma_x)$$

$$\varepsilon_x = s - (1 + \mu)s + \frac{1 + \mu}{E}\sigma_x$$

$$\varepsilon_x = -\mu s + \frac{1 + \mu}{E}\sigma_x$$

Burada $\mu = 0.5$ olduğundan yazıb bilirik:

$$\varepsilon_x = -\frac{s}{2} + \frac{1 + \mu}{E}\sigma_x \Rightarrow 2\varepsilon_x + s = \frac{2(1 + \mu)}{E}\sigma_x \Rightarrow$$

$$\sigma_x = \frac{E}{2(1 + \mu)}(2\varepsilon_x + s).$$

$$\frac{E}{2(1 + \mu)} = G \Rightarrow \sigma_x = G(2\varepsilon_x + s)$$

$$\tau_{ij} = G(2\varepsilon_{ij} + s\delta_{ij}). \quad (1.2.10)$$

Beləliklə, gərginlik tenzoru komponentlərinin nisbi deformasiya tenzoru komponentləri ilə ifadəsi (1.2.10) şəklindədir. Onda ümumiləşmiş halda (1.2.1) tənliyini aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$\dot{\tau}_{ij} + \lambda^* \tau_{ij} = G \left[2 \left(\dot{\varepsilon}_{ij} + \nu^* \varepsilon_{ij} \right) + \delta_{ij} \left(\dot{s} + \nu^* s \right) \right], \quad (1.2.11)$$

burada G - kipləşdirici elementin materialının sürüşmə modulu, τ_{ij} - gərginlik tenzoru komponentləri, ε_{ij} - nisbi deformasiya tenzoru komponentləri, δ_{ij} -

Kronoker simvolu, $\dot{\tau}_{ij}$ və $\dot{\varepsilon}_{ij}$ - gərginlik və deformasiya komponentlərinin zamana görə törəməsidir.

(1.2.11) diferensial tənliyinin həlli aşağıdakı kimidir:

$$\tau_{ij} = G \left[2\varepsilon_{ij}(\bar{x}, t) + \delta_{ij}s(\bar{x}, t) - \int_0^t e^{-\lambda^*(t-\xi)} (2\varepsilon_{ij}(\bar{x}, \xi) + \delta_{ij}s(\bar{x}, \xi)) d\xi \right]. \quad (1.2.12)$$

(1.2.12) ifadəsini ümumiləşmiş halda yazıb bilirik:

$$\tau_{ij} = G \left[2\varepsilon_{ij}(\bar{x}, t) + \delta_{ij}s(\bar{x}, t) - \int_0^t P(t - \tau) (2\varepsilon_{ij}(\bar{x}, \xi) + \delta_{ij}s(\bar{x}, \xi)) d\xi \right]. \quad (1.2.13)$$

Elastiki analojiyaya əsasən yaza bilərik:

$$u = u(\bar{x}) u(t), \quad \sigma = \sigma(\bar{x}) \sigma(t). \quad (1.2.14)$$

Zəif sıxılan material üçün [59] aşağıdakı bərabərlik doğrudur:

$$\operatorname{div} u = \varepsilon_{ii} = \frac{3}{2} \frac{1 - 2\mu}{1 + \mu} s \quad (1.2.15)$$

Buradan alırıq ki,

$$s(t) \cong \varepsilon(t). \quad (1.2.16)$$

Çünki bu funksiyaların formulunda surətdə və məxrəcdə μ Puasson əmsalı var.

(1.2.14) ifadəsini (1.2.14) düsturunda yerinə yazsaq, alırıq:

$$\tau_{ij} = G \left[2\varepsilon_{ij}(\bar{x})\varepsilon_{ij}(t) + \delta_{ij}s(\bar{x})s(t) - \int_0^t P(t - \tau) (2\varepsilon_{ij}(\bar{x})\varepsilon_{ij}(\xi) + \delta_{ij}s(\bar{x})s(\xi)) d\xi \right]. \quad (1.2.17)$$

Onda (1.2.16) ifadəsini (1.2.17)-də nəzərə alsaq, alırıq:

$$\tau_{ij} = (2\varepsilon_{ij}(\bar{x}) + \delta_{ij}s(\bar{x})) G \left[\varepsilon(t) - \int_0^t P(t - \tau)\varepsilon(\xi) d\xi \right]. \quad (1.2.18)$$

Aşağıdakı işarələməni qəbul edək:

$$\bar{G} = G \left[\varepsilon(t) - \int_0^t P(t - \tau)\varepsilon(\xi) d\xi \right]. \quad (1.2.19)$$

(1.2.19) işarələməsini (1.2.18) ifadəsində nəzərə alsaq, alırıq:

$$\tau_{ij} = \bar{G} [2\varepsilon_{ij}(\bar{x}) + \delta_{ij}s(\bar{x})], \quad (1.2.20)$$

burada kvadrat mütərizə daxilində yazılmış formul məsələnin elastiki haldakı həllini ifadə edir. Bu [59] işində daha geniş və ətraflı verilmişdir.

Baxdığımız hal üçün nüvə eksponensial olduqda (1.2.18) formulunu aşağıdakı kimi yaza bilərik [82], [91]:

$$\tau_{ij} = (2\varepsilon_{ij}(\bar{x}) + \delta_{ij}s(\bar{x})) G \left[e^{-\lambda^* t} + \int_0^t ((\varepsilon(\xi))_{,t} + \nu^* \varepsilon(\xi)) e^{-\lambda^* (t-\xi)} d\xi \right]. \quad (1.2.21)$$

Aşağıdakı işarələməni daxil edək:

$$\bar{G} = G \left\{ e^{-\lambda^* t} + \int_0^t \left[(\varepsilon(\xi))_{,t} + \nu^* \varepsilon(\xi) \right] e^{-\lambda^* (t-\xi)} d\xi \right\}. \quad (1.2.22)$$

(1.2.21) ifadəsini Huq qanununa oxşar şəkildə yazmaq [68], [82], [91]:

$$\tau_{ij} = \bar{G} [2\varepsilon_{ij}(\bar{x}) + \delta_{ij}s(\bar{x})]. \quad (1.2.23)$$

(1.2.23) formulu irsilik nəzərə alınaraq gərginliyi ifadə edir. Burada kvadrat mötərizə daxilində verilmiş ifadə elastiki həldən alınmışdır.

Göründüyü kimi qoyulmuş məsələnin elastiki halda həlli tapıldıqdan sonra (1.2.21) və (1.2.23) ifadələrindən istifadə etməklə kipləşdiricinin materialının irsiliyi nəzərə alınaraq gərginlikləri təyin etmək mümkündür.

§1.1-də variyasiya hesabı ilə elastiki cisim kimi qəbul edilmiş kipləşdirici elementin onun daxili səthinin kipləşdirilən silindrin xarici divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu sıxıcı qüvvənin qiyməti üçün (1.1.20) ifadəsi alınmışdır. Buradan

$$Q = \pi G (R_2^2 - R_1^2) \cdot q \quad (1.2.24)$$

ödənilir, burada R_1 , R_2 – uyğun olaraq kipləşdirici elementin daxili və xarici radiuslarıdır.

Elastiki analogiya həll metoduna uyğun olaraq [68], [71], [82], [91], [135] kipləşdirici elementin eninə kəsik müstəvisinin oxboyu deformasiyasını aşağıdakı kimi qəbul edək:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(z, t) &= \varepsilon_1(\bar{z}) \cdot \varepsilon_1(t), \\ \varepsilon_1(t) &= w_1(t) = 1. \end{aligned} \quad (1.2.25)$$

(1.2.22) düsturundan alarıq:

$$\bar{G} = G \left[e^{-\lambda^* t} + \nu^* \int_0^t e^{-\lambda^* (t-\xi)} d\xi \right]. \quad (1.2.26)$$

(1.2.26) ifadəsini inteqrallasaq, alarıq:

$$\bar{G} = G \left[\left(1 - \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right]. \quad (1.2.27)$$

Onda (1.1.20) və (1.2.27) ifadələrini nəzərə almaqla (1.2.24) düsturundan alarıq [59]:

$$Q = \pi G (R_2^2 - R_1^2) \left[\left(1 - \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right] \left(\sqrt[3]{-\frac{1}{2} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right)} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right)^2 + \left(-\frac{a^2}{9} + \frac{b}{3} \right)^3} + \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right)} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right)^2 + \left(-\frac{a^2}{9} + \frac{b}{3} \right)^3} - \frac{a}{3} \right). \quad (1.2.28)$$

Kipləşdirici elementi daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu sıxıcı qüvvənin qiyməti onun materialının irsiliyi nəzərə alınaraq (1.2.28) ifadəsi ilə tapıla bilər.

§1.1-də variyasiya hesabı ilə elastiki cisim kimi qəbul edilmiş kipləşdirici elementi onun daxili səthinin kipləşdirilən silindrin xarici divarına tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu sıxıcı qüvvənin qiyməti üçün (1.1.34) ifadəsi alınmışdır ki, buradan da

$$P = \pi \bar{G} (R_2^2 - R_0^2) \cdot p, \quad (1.2.29)$$

burada R_0 - kipləşdirilən silindrin radiusudur (Şəkil 1.1.2).

Elastiki analogiya həll metoduna əsasən [55], [82], [91] yazıla bilər:

$$\varepsilon_2(z, t) = \varepsilon_2(\bar{z}) \cdot \varepsilon_2(t), \quad (1.2.30)$$

$$\varepsilon_2(t) = w_2(t) = 1. \quad (1.2.31)$$

Anoloji olaraq (1.2.22) ifadəsində (1.2.30) və (1.2.31) bərabərliklərini nəzərə alsaq, alarıq:

$$\bar{G}(1) = G \left[\left(1 - \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right]. \quad (1.2.32)$$

(1.2.29) düsturunda (1.1.34) və (1.2.32) ifadələrini yerinə yazsaq, irsilik nəzərə alınaraq kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan oxboyu qüvvənin qiyməti üçün alarıq:

$$P = 2 \pi G (R_2^2 - R_0^2) \left(\frac{R_2^2}{R_0^2} + 3 \right) \left[\left(1 - \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right] \frac{R(h) \delta(h)}{R_2^2 - R^2(h)}. \quad (1.2.33)$$

Birinci yaxınlaşmada kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan qüvvəni birinci və ikinci mərhələdə təyin edilmiş qüvvələrin cəmi kimi götürmək olar:

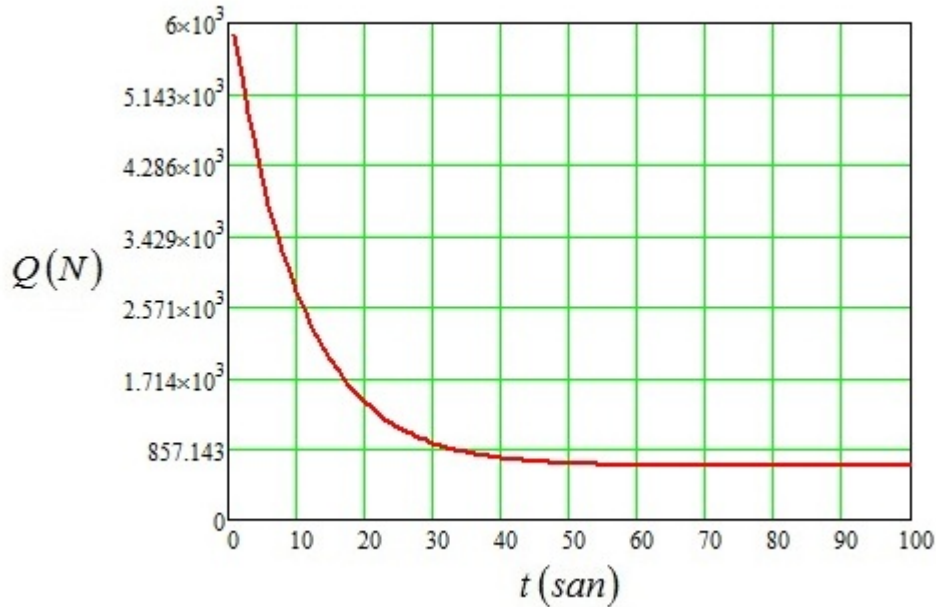
$$P_{her} = Q + P \quad (1.2.34)$$

olacaqdır. Kipləşdirici elementin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə irsiliyin təsirinin təyini məqsədilə kipləşdiricini onun daxili səthinin silindrin divarına ilk və tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvələrin qiymətləri üçün (1.2.28) və (1.2.33) ifadələrinə əsasən parametrlərin aşağıdakı qiymətlərində ədədi hesabat aparılmışdır:

$$R_0 = 0.073m, \quad R_1 = 0.076m, \quad R_2 = 0.1m, \quad \delta = 0.003m, \quad H = 0.02m,$$

$$G = 1.3 \cdot 10^8 Pa, \quad k_0 = 6.7 \cdot 10^9 Pa/m, \quad \mu = 0.5, \quad \nu = 0.25, \quad \nu^* = 0.01, \quad \lambda^* = 0.1$$

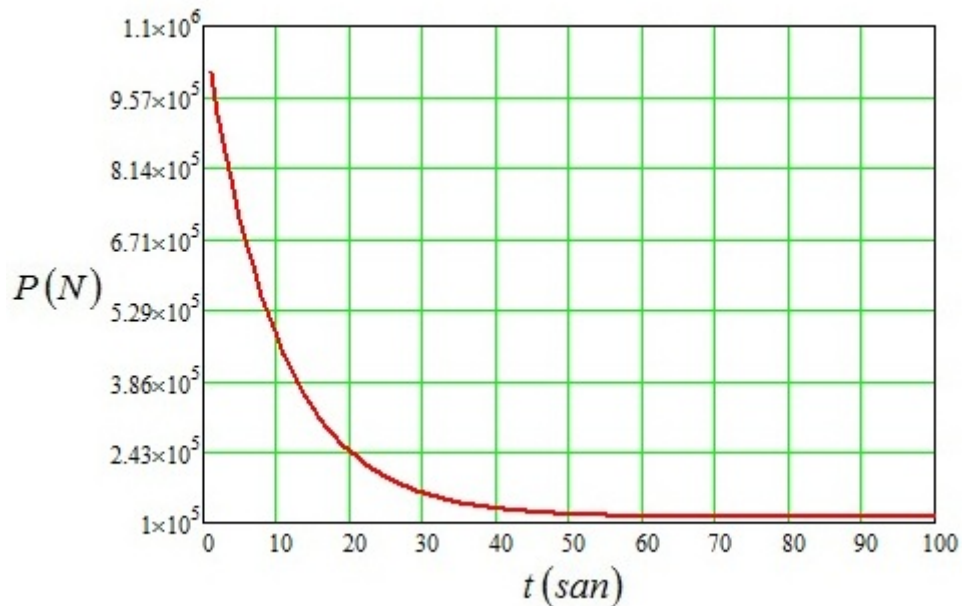
Hesabatın nəticələri Qrafik 1.2.1 və Qrafik 1.2.2-də verilmişdir. Qrafik 1.2.1 və Qrafik 1.2.2-dən görüldüyü kimi Q və P oxboyu qüvvələri zaman keçdikcə azalır və bir müddətdən sonra stabilləşir.



Qrafik 1.2.1. İrsilik nəzərə alındıqda kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu Q qüvvəsinin qiymətinin zamandan asılılıq qrafiki

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin materialının irsiliyi nəzərə alındıqda bu xüsusiyyət nəzərə alınmayan hala nisbətən yeddi dəfəyə qədər azalır (Qrafik 1.2.1).

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti isə zaman keçdikcə doqquz dəfədən çox azalır (Qrafik 1.2.2). Bu isə öz növbəsində kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin və beləliklə də onun hermetikləşdirmə qabiliyyətini azalmasına səbəb olur.



Qrafik 1.2.2. İrsilik nəzərə alındıqda kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu P qüvvəsinin qiymətinin zamandan asılılıq qrafiki

1.3. Xətti hal

İndi də oxboyu xarici qüvvənin təsirindən nisbi deformasiya tempinin zamandan asılı olaraq xətti dəyişməsi halına baxaq [103].

İrsilik nəzərə alınaraq δ ara məsafəsi ilə kipləşdirilən silindrin xarici səthinə geyindirilmiş silindrik formalı kipləşdirici elementlə kipləşdirmə prosesinə baxaq (Qrafik 1.3.1). Kipləşdirici elementin birtərəfli oxboyu sıxılması yolu ilə onun daxili səthi silindrin divarı arasında hermetiklik yaradılır. Kipləşdirici elementin irsi-elastiki cisim olduğunu nəzərə alaraq və fərz edək ki, kipləşdiricinin sərhədində xarici qüvvə və deformasiyanın dəyişməsi yavaş sürətlə baş verir. Onda kipləşdirici elementin deformasiyalanma prosesini kvazistatik və məsələnin həlli üçün elastiki analogiya metodunu qəbul edə bilərik [55], [59], [68], [82], [84], [91], [135].

Kipləşdirici elementin materialı elastiki qəbul edilmiş halda bu məsələnin həlli §1.1-də verilmişdir. İrsilik xüsusiyyəti nəzərə alınmaqla kipləşdirici elementin ixtiyari nöqtəsindəki gərginliyi (1.2.18) düsturu ilə ifadə olunur. Kipləşdirici elementin materialının sürüşmə modulu (1.2.22) şəklində olar. Onda (1.2.22) və (1.2.20) ifadələrindən istifadə etməklə silindrik kipləşdirici elementin materialının irsi-elastiki xüsusiyyətini nəzərə almaqla elastiki analogiya metodunu tətbiq edərək deformasiya-gərginlik vəziyyətini təyin etmək olar.

Kipləşdirici elementi elastiki cisim kimi qəbul edərək kipləşdiricini onun daxili səthini silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti (1.1.20) ifadəsinin köməyi ilə (1.2.21) bərabərliyindən təyin edilir.

Elastiki analogiya metoduna əsaslanaraq [68], [71], [82], [91], [135] kipləşdirici elementin eninə kəsik müstəvisinin oxboyu deformasiyasını aşağıdakı kimi yazmaq olar (Qrafik 1.3.1):

$$\varepsilon_1(z, t) = \varepsilon_1(\bar{z}) \cdot \varepsilon_1(t), \quad (1.3.1)$$

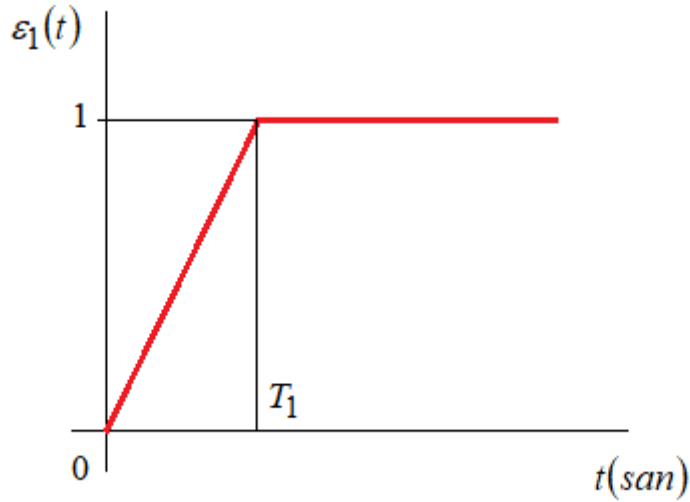
$$\varepsilon_1(t) = w_1(t) = \frac{t}{T_1} [H(t) - H(t - T_1)] + H(t - T_1), \quad (1.3.2)$$

burada $H(t)$ - Hevisayd funksiyası, T_1 - kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunmasına qədər yuxarı oturacağıının deformasiyalanma müddətidir.

(1.2.22) və (1.3.2) ifadələrindən alırıq:

$$\bar{G} = G \left\{ e^{-\lambda^* t} + \int_0^t \left[\frac{1}{T_1} (H(\xi) - H(\xi - T_1)) + \frac{\xi}{T_1} (\delta(\xi) - \delta(\xi - T_1)) + \delta(\xi - T_1) + v^* \left(\frac{\xi}{T_1} (H(\xi) - H(\xi - T_1)) + H(\xi - T_1) \right) \right] e^{-\lambda^* (t-\xi)} d\xi \right\}, \quad (1.3.3)$$

burada $\delta(t)$ - Dirak funksiyasıdır.



Qrafik 1.3.1. Nisbi deformasiyanın zamandan asılılıq qrafiki

(1.3.3) ifadəsini inteqrallasaq, alarıq:

$$\bar{G}(t, T_1) = G \left\{ e^{-\lambda^* t} + \left[\left((v^* - \lambda^*) \left(1 - e^{-\lambda^* (t-T_1)} \right) - v^* \lambda^* (t - T_1) \right) H(t - T_1) - \left((v^* - \lambda^*) \left(1 - e^{-\lambda^* t} \right) - v^* \lambda^* t \right) H(t) \right] \right\}. \quad (1.3.4)$$

Onda (1.2.21) ifadəsində (1.1.20) və (1.3.4) düsturlarını nəzərə alsaq, oxboyu qüvvənin qiyməti üçün aşağıdakı bərabərliyi alarıq [59]:

$$Q = \pi \bar{G}(t, T_1) (R_2^2 - R_1^2) q, \quad (1.3.5)$$

(1.3.5) düsturu ilə kipləşdirici elementi materialının irsi-elastiki xüsusiyyəti nəzərə alınaraq onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti təyin edilir.

Kipləşdirici elementi materialının elastiki qəbul olunduğu halda onun daxili səthinin silindrin divarına tam kontaktını yaradan oxboyu qüvvənin qiyməti (1.1.34) ifadəsini yerinə yazmaqla (1.2.26) bərabərliyi ilə təyin olunur [71].

Elastiki həll metodunu [55], [82], [91], [135] tətbiq edərək kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər sıxdıqda eninə kəsik müstəvisində yaranan oxboyu deformasiyasını aşağıdakı bərabərliklə ifadə edək:

$$\varepsilon_2(z, t) = \varepsilon_2(\bar{z}) \cdot \varepsilon_2(t), \quad (1.3.6)$$

$$\varepsilon_2(t) = w_2(t) = \frac{t}{T_2} [H(t) - H(t - T_2)] + H(t - T_2), \quad (1.3.7)$$

burada T_2 - kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına tam toxunmasına qədər sıxdıqca onun yuxarı oturacağıının deformasiyalanma müddətidir.

Anoloji olaraq (1.3.7) bərabərliyini nəzərə almaqla (1.2.22) ifadəsindən alaraq inteqrallasaq, alarıq:

$$\begin{aligned} \bar{G}(t, T_2) = G \left\{ e^{-\lambda^* t} + \left[\left((\nu^* - \lambda^*) \left(1 - e^{-\lambda^* (t - T_2)} \right) - \nu^* \lambda^* (t - T_2) \right) H(t - T_2) - \right. \right. \\ \left. \left. - \left((\nu^* - \lambda^*) \left(1 - e^{-\lambda^* t} \right) - \nu^* \lambda^* t \right) H(t) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (1.3.8)$$

(1.1.34) və (1.3.8) düsturlarını (1.2.26) ifadəsində yerinə yazsaq, irsilik nəzərə alınmaqla kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti üçün alarıq:

$$P = 2\pi \bar{G}(t, T_2) (R_2^2 - R_0^2) \frac{R(h) \delta(h)}{R_2^2 - R^2(h)} \left(\frac{R_2^2}{R_0^2} + 3 \right), \quad (1.3.9)$$

Birinci yaxınlaşmada kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan qüvvəni birinci və ikinci mərhələdə təyin edilmiş qüvvələrin cəmi kimi götürmək olar:

$$P_{her} = Q + P. \quad (1.3.10)$$

Silindrik kipləşdirici elementin hermetiklik qabiliyyətinə irsiliyin təsirinin öyrənilməsi məqsədilə (1.3.5) və (1.3.9) ifadələrinə əsasən uyğun olaraq kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk və tam toxunana qədər

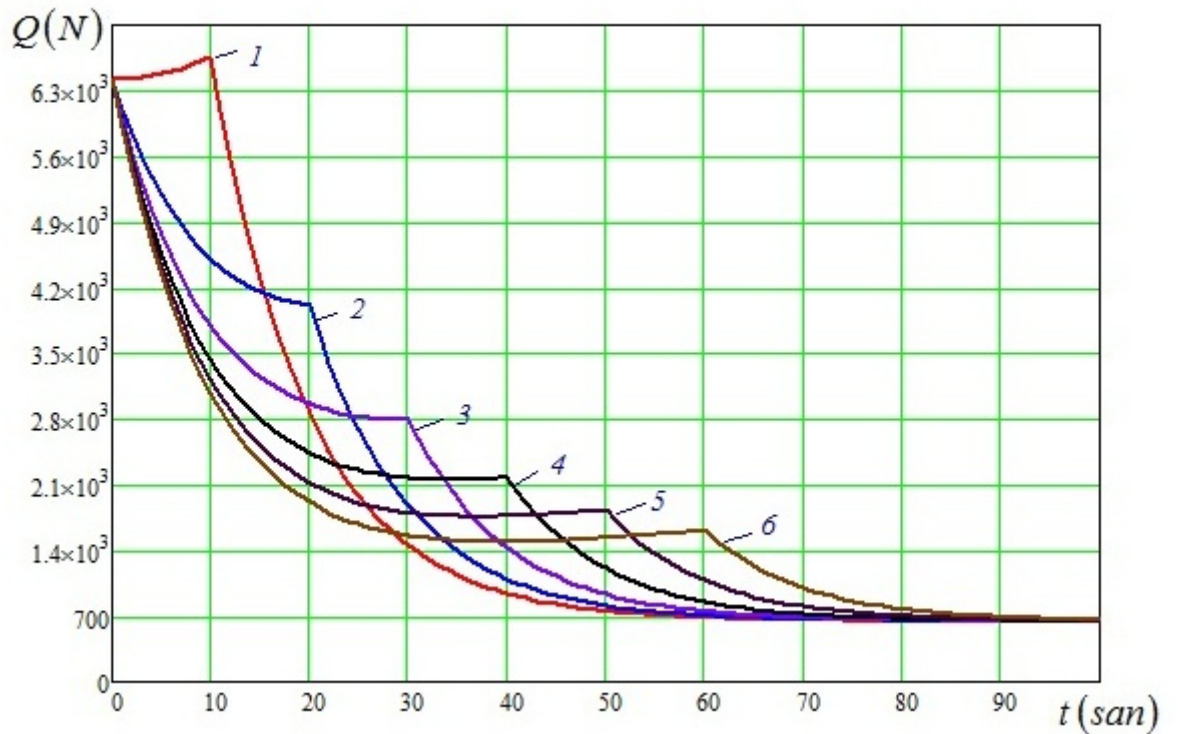
deformasiyası üçün lazım olan oxboyu sıxıcı qüvvələrin qiymətləri üçün parametrlərin aşağıda verilmiş qiymətlərində ədədi hesabat aparılmışdır:

$$R_0 = 0.073m, \quad R_1 = 0.076m, \quad R_2 = 0.1m, \quad \delta = 0.003m, \quad H = 0.02m,$$

$$G = 1.3 \cdot 10^8 Pa, \quad k_0 = 6.7 \cdot 10^9 Pa/m, \quad \mu = 0.5, \quad \nu = 0.25, \quad \nu^* = 0.01, \quad \lambda^* = 0.1,$$

$$T_1 = 10, 15, 20, 25, 30, 35 san, \quad T_2 = 15, 20, 25, 30, 35 san.$$

Hesabatın nəticələri Qrafik 1.3.2 və Qrafik 1.3.3-də verilmişdir.

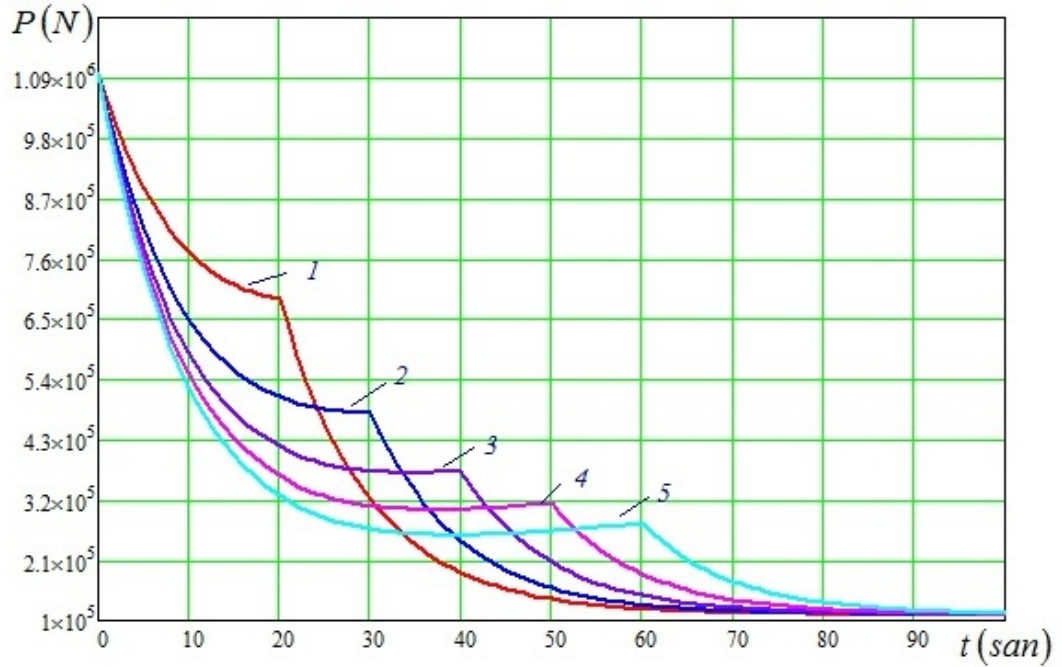


1- $T_1 = 10 san$, 2- $T_1 = 20 san$, 3- $T_1 = 30 san$,
4- $T_1 = 40 san$, 5- $T_1 = 50 san$, 6- $T_1 = 60 san$

Qrafik 1.3.2. İrsilik nəzərə alındıqda kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu Q qüvvəsinin qiymətinin zamandan asılılıq qrafiki

Qrafik 1.3.2 və Qrafik 1.3.3-dən görüldüyü kimi kipləşdirici elementin kiçik tempi deformasiyalanma müddətində Q və P oxboyu qüvvələrin qiymətləri də ani

deformasiyalanma prosesindən fərqli olaraq kiçik sürətlə azalır və bir müddətdən sonra stabilləşirlər.



1- $T_2 = 20\text{san}$, 2- $T_2 = 30\text{san}$, 3- $T_2 = 40\text{san}$, 4- $T_2 = 50\text{san}$, 5- $T_2 = 60\text{san}$

Qrafik 1.3.3 İrsilik nəzərə alındıqda kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan oxboyu P qüvvəsinin qiymətinin zamandan asılılıq qrafiki

İrsilik nəzərə alınaraq kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxılması üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti irsilik nəzərə alınmayan hala nisbətən doqquz dəfəyə qədər azalır.

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti isə qiyməti irsilik nəzərə alınmayan hala nisbətən on dəfədən çox azalır. Bu isə öz növbəsində kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin

azalmasına və beləcə də kipləşdiricinin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin pisləşməsinə gətirib çıxarır.

Beləliklə, aparılmış tədqiqatlar göstərir ki, kipləşdirici elementin irsilik xüsusiyyətinin nəzərə alınmaması bəzi hallarda yanlış nəticələrə gətirib çıxarır.

1.4. Silindrik kipləşdirici elementin xarici səthi ilə hermetikliyin yaradılması məsələsi

Bu paraqrafda nəzəri tədqiqatlar əsasında silindrik formalı kipləşdirici elementin xarici səthi ilə hermetikləşdirmə prosesi zamanı yaranan deformasiya-gərginlik vəziyyəti öyrənilmişdir [102]. Elastiki analogiya metoduna əsasən kipləşdirici elementin materialının irsilik xüsusiyyətinin onun hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsiri tədqiq edilmişdir.

Kipləşdirici elementin xarici səthi ilə divar arasında δ ara məsafəsi vardır. Silindr ilə kipləşdirici element arasında kipləşdiricinin birtərəfli oxboyu sıxılması ilə hermetiklik yaradılır. Məsələnin həlli iki mərhələyə bölünür. Birinci mərhələdə kipləşdirici elementin xarici səthi ilə silindrik divarın ilk kontaktı yaranana qədər sıxılması prosesinin, ikinci mərhələdə isə bu səthlər arasında hermetikliyə nail olunması prosesinin riyazi modelinin qurulmasına və həllinə baxılır.

Birinci mərhələyə baxaq. Kipləşdirici elementin materialı bircins olduğundan onun deformasiyası oxasimmetrik qəbul edək. Onda müstəvi kəsiklər hipotezini qəbul edək və fərz edək ki, kipləşdirici elementin oxboyu deformasiyası yalnız oxboyu yönəlmiş z koordinatından asılıdır.

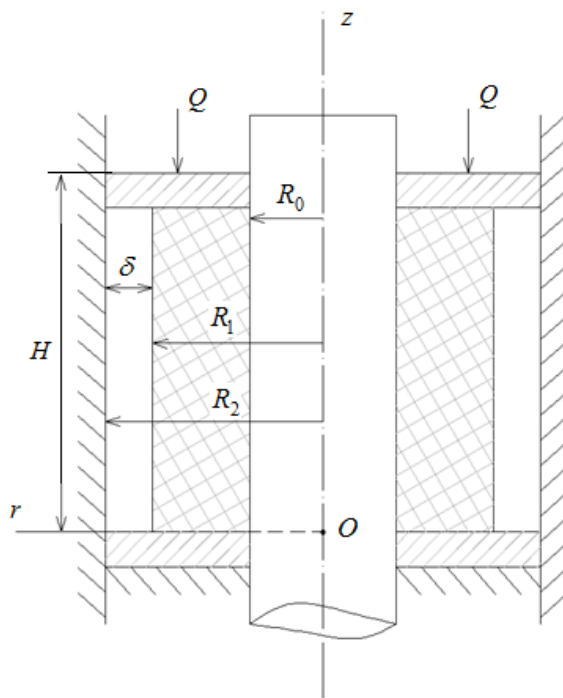
Koordinat sisteminin başlanğıcını kipləşdirici elementin aşağı oturacaq müstəvisinin mərkəzində yerləşdirək və z koordinat oxunu şaquli olaraq yuxarı, r koordinat oxunu isə radiusun böyüməsi istiqamətində yönəldək (Şəkil 1.4.1).

Yuxarıda qeyd edilmiş fərziyyəni nəzərə alsaq, kipləşdirici elementin en kəsik sahələrinin oxboyu w_1 nisbi deformasiyasını aşağıdakı formada qəbul edə bilərik [9], [10], [59]:

$$w_1 = f_1(z), \quad (1.4.1)$$

burada $f_1(z)$ - z -dən asılı axtarılan naməlum funksiya. Kipləşdirici elementin materialını sıxılmayan qəbul edək [15], [59]. Onda (1.1.2) bərabərliyi ödənəcəkdir. (1.4.1) ifadəsini (1.1.2) sıxılmazlıq şərtində yerinə yazıb, alınmış ifadəni $u_1(r, z)|_{r=R_0} = 0$ sərhəd şərti daxilində inteqrallasaq, alarıq:

$$u_1(r, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0^2}{r} - r \right) f_1'(z). \quad (1.4.2)$$



Şəkil 1.4.1. Hesabat sxemi

Kipləşdirici elementin oxboyu qüvvənin təsirində deformasiyasından sonra onun deformasiya vəziyyətinin oxasimmetrikliyi şərtini nəzərə almaqla potensial enerjisi üçün yazarıq [59], [121]:

$$\Pi = 4\pi G \int_0^H \int_{R_0}^{R_1} \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{rz}^2 \right) r dr dz - \int_0^H Q \cdot f_1'(z) dz, \quad (1.4.3)$$

burada H - kipləşdirici elementin hündürlüyü, R_0 , R_1 - uyğun olaraq kipləşdiricinin daxili və xarici radiusu, Q - kipləşdirici elementin xarici səthini silindrik divara ilk

toxunmasına qədər sıxılması üçün lazım olan oxboyu qüvvə, ε_r , ε_θ , ε_z və γ_{rz} – uyğun olaraq (1.1.8) düsturları ilə ifadə olunan radial, tangensial, oxboyu və sürüşmə nisbi deformasiyalarıdır [15], [117]:

Onda (1.1.8), (1.4.1) və (1.4.2) ifadələrini (1.4.3) ifadəsində nəzərə alsaq, alarıq:

$$\begin{aligned} \Pi = 2\pi G \int_0^H \left\{ \left(-\frac{1}{2} \frac{R_0^4}{R_1^2} + \frac{3}{2} R_1^2 - R_0^2 \right) f'^2(z) + \right. \\ \left. + \frac{1}{32} \left(2R_0^4 \ln \frac{R_1}{R_0} - 2R_0^2 R_1^2 + \frac{1}{2} R_1^4 + \frac{3}{2} R_0^4 \right) f''^2(z) - \frac{Q}{2\pi G} f'(z) \right\} dz \end{aligned} \quad (1.4.4)$$

burada G - kipləşdirici elementin materialının sürüşmə moduludur.

Eyler tənliyinə əsasən [34], [137] (1.4.4) funksionalından alarıq:

$$\begin{aligned} \varphi_1''(z) - \frac{16 \left(-\frac{R_0^4}{R_1^2} + 3R_1^2 - 2R_0^2 \right)}{2R_0^4 \ln \frac{R_1}{R_0} - 2R_0^2 R_1^2 + \frac{1}{2} R_1^4 + \frac{3}{2} R_0^4} \varphi_1(z) + \\ + \frac{8q(R_1^2 - R_0^2)}{2R_0^4 \ln \frac{R_1}{R_0} - 2R_0^2 R_1^2 + \frac{1}{2} R_1^4 + \frac{3}{2} R_0^4} = 0, \end{aligned} \quad (1.4.5)$$

burada $q = \frac{Q}{\pi G(R_1^2 - R_0^2)}$, $\varphi_1(z) = f_1'(z)$.

$\varphi(z) = f_1'(z)$ işarələməsini qəbul edərək (1.4.5) diferensial tənliyini inteqrallasaq, alarıq:

$$f_1(z) = \frac{c_1}{k_1} \operatorname{ch}(k_1 z) + \frac{c_2}{k_1} \operatorname{sh}(k_1 z) + \frac{A_1}{k_1^2} q \cdot z + c_3, \quad (1.4.6)$$

$$\text{burada } k_1 = 4 \sqrt{\frac{-\frac{R_0^4}{R_1^2} + 3R_1^2 - 2R_0^2}{2R_0^4 \ln \frac{R_1}{R_0} - 2R_0^2 R_1^2 + \frac{1}{2} R_1^4 + \frac{3}{2} R_0^4}},$$

$$A_1 = \frac{8(R_1^2 - R_0^2)}{2R_0^4 \ln \frac{R_1}{R_0} - 2R_0^2 R_1^2 + \frac{1}{2} R_1^4 + \frac{3}{2} R_0^4}.$$

c_1, c_2, c_3 inteqral sabitləri aşağıdakı sərhəd şərtlərindən təyin edilə bilər:

$$\mu Q|_{z=H} = -2\pi G \int_{R_0}^{R_1} \gamma_{zr}(r, H) r dr; \quad w_1|_{z=0} = 0; \quad u_1(r, z)|_{r=R_1} = \delta, \quad (1.4.7)$$

burada μ - metal lövhəciklə kipləşdiricinin yuxarı oturacağı arasındakı sürtünmə əmsəlidir.

(1.4.7) sərhəd şərtlərində (1.4.6) bərabərliyini yerinə yazsaq, inteqral sabitləri üçün alarıq:

$$c_1 = \frac{\mu q (R_1^2 - R_0^2)}{B_1 k_1 \operatorname{ch}(k_1 H)} - \left(\frac{\delta}{\lambda} - \frac{A_1}{k_1^2} q \right) \frac{\operatorname{sh}(k_1 H)}{\operatorname{ch}(k_1 H)}, \quad c_2 = \frac{\delta}{\lambda} - \frac{A_1}{k_1^2} q,$$

$$c_3 = -\frac{c_1}{k_1} = -\frac{\mu q (R_1^2 - R_0^2)}{B_1 k_1^2 \operatorname{ch}(k_1 H)} + \left(\frac{\delta}{\lambda} - \frac{A_1}{k_1^2} q \right) \frac{\operatorname{sh}(k_1 H)}{k_1 \operatorname{ch}(k_1 H)}, \quad (1.4.8)$$

burada $B_1 = \frac{1}{3} R_0^3 - \frac{1}{2} R_0^2 R_1 + \frac{1}{6} R_1^3$, $\lambda = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0^2}{R_1} - R_1 \right)$.

Kipləşdirici elementin ixtiyari nöqtəsində radial gərginlik (1.1.14) ifadəsi ilə təyin edilə bilər [15], [59], [132]. $\sigma_r|_{r=R(z)} = 0$ sərhəd şərti daxilində s hidrostatik gərginlik funksiyası üçün (1.1.6) ifadəsini alarıq:

$$s = \left(\frac{R_0^2}{R^2(z)} + 1 \right) f_1'(z), \quad (1.4.9)$$

burada $R(z) = R_1 + u_1(r, z)|_{r=R_1}$.

Kipləşdiricini onun xarici səthinin silindrik divara ilk toxunmasına qədər sıxmaq üçün lazım olan Q qüvvəsinin qiyməti aşağıdakı kimi tapıla bilər:

$$\pi (R_1^2 - R_0^2) \sigma_z|_{z=H} = Q. \quad (1.4.10)$$

Digər tərəfdən oxboyu istiqamətdəki gərginlik üçün (1.1.18) bərabərliyi ödənilir. (1.1.18), (1.4.6), (1.4.8) və (1.4.9) ifadələrinin köməyilə (1.4.10) bərabərliyindən alarıq:

$$Q = \left(\frac{R_0^2}{R^2(H)} + 3 \right) f'(H). \quad (1.4.11)$$

(1.4.11) ifadəsindən q üçün alarıq:

$$q = \left(\sqrt[3]{-\frac{1}{2} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right)} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right)^2 + \left(-\frac{a^2}{9} + \frac{b}{3} \right)^3} + \right. \\ \left. + \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right)} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c \right)^2 + \left(-\frac{a^2}{9} + \frac{b}{3} \right)^3} - \frac{a}{3} \right), \quad (1.4.12)$$

burada

$$a = \frac{1}{\lambda C(3C-1)} \left(2(3C-1) \left(R_1 + \frac{\delta}{\text{ch}(k_1 H)} \right) + \frac{3\delta C}{\text{ch}(k_1 H)} \right), \\ b = \frac{1}{\lambda^2 C^2 (3C-1)} \left(R_0^2 C + (3C-1) \left(R_1 + \frac{\delta}{\text{ch}(k_1 H)} \right)^2 + \frac{6\delta C}{\text{ch}(k_1 H)} \left(R_1 + \frac{\delta}{\text{ch}(k_1 H)} \right) \right), \\ c = \frac{R_0^2 + 3 \left(R_1 + \frac{\delta}{\text{ch}(k_1 H)} \right)^2}{\lambda^3 C^2 (3C-1) \text{ch}(k_1 H)} \delta, \quad C = \frac{\mu (R_1^2 - R_0^2) \text{sh}(k_1 H)}{B_1 k_1 \text{ch}(k_1 H)} + \frac{A_1}{k_1^2} \frac{1 - \text{ch}(k_1 H)}{\text{ch}(k_1 H)}.$$

(1.4.11) ifadəsi ilə kipləşdirici elementin xarici səthinin kipləşdirilən silindrik divara ilk toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti təyin edilir.

İndi isə kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan oxboyu qüvvənin qiymətini tapaq. Şəkil 1.4.2-də göstərildiyi kimi koordinat sisteminin başlanğıcını kipləşdirici elementin aşağı oturacaq müstəvisinin mərkəzində

yerləşdirək və z koordinat oxunu şaquli olaraq yuxarı, r koordinat oxunu isə radiusun böyüməsi istiqamətində yönəldək.

Yenə də kipləşdiricinin deformasiyası üçün müstəvi kəsiklər fərziyyəsini qəbul edə bilirik və uyğun olaraq fərz edək ki, onun oxboyu deformasiyası yalnız z koordinatından asılıdır:

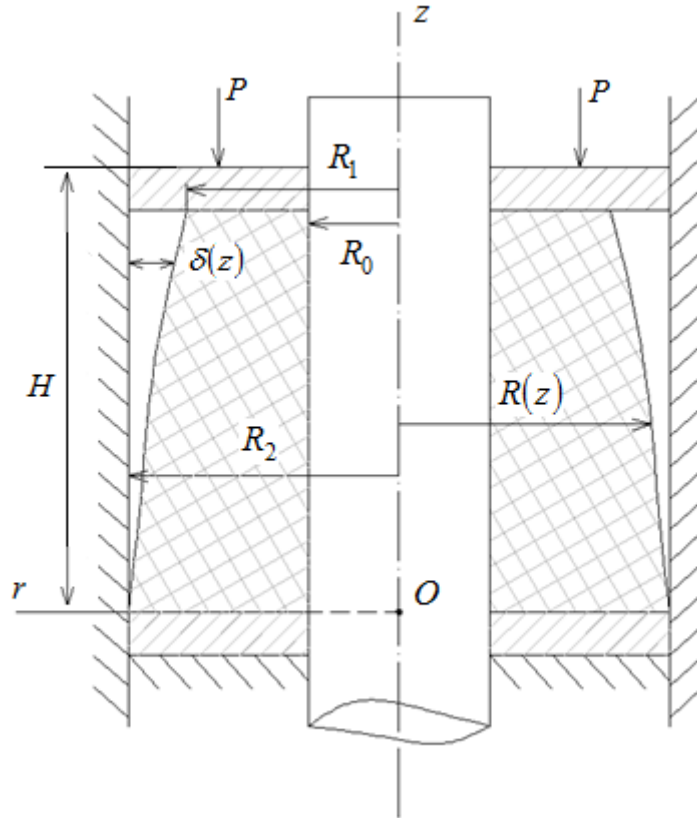
$$w_2 = f_2(z), \quad (1.4.13)$$

burada w_2 -kipləşdirici elementin oxboyu deformasiyası $f_2(z)$ - z - dən asılı naməlum funksiyadır.

Onda (1.1.2) sıxılmazlıq şərtində (1.4.13) bərabərliyini nəzərə alsaq, alarıq:

$$u_2(r, z) = -\frac{1}{2} r f_2'(z) + \frac{c_4}{r}, \quad (1.4.14)$$

burada c_4 - inteqral sabitidir.



Şəkil 1.4.2. Hesabat sxemi

İnteqral sabitini $u_2(r, z)|_{r=R_0} = 0$ sərhəd şərtindən təyin edərək (1.4.14)

ifadəsindən alarıq:

$$u_2(r, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0^2}{r} - r \right) f_2'(z). \quad (1.4.15)$$

Məsələnin oxasimmetrikliliyini nəzərə alaraq kipləşdirici elementin deformasiya olunduqdan sonrakı potensial enerjisi üçün yazı bilərik [142]:

$$\Pi = 4\pi G \int_0^h \int_{R_0}^{R_2} \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{rz}^2 \right) r dr dz - \int_0^h P \cdot f_2'(z) dz, \quad (1.4.16)$$

burada $h = H - |f_1(H)|$.

(1.4.15) ifadəsini (1.1.8) düsturunda yerinə yazıb, alınmış ifadələri (1.4.16) bərabərliyində nəzərə alaraq r -ə nəzərən inteqrallasaq, alınmış funksionaldan Eylər tənliyinə əsasən alarıq [34]:

$$\varphi_2''(z) - k_2^2 \varphi_2(z) + A_2 p = 0, \quad (1.4.17)$$

burada $\varphi_2(z) = f_2'(z)$, $p = \frac{P}{\pi G(R_2^2 - R_0^2)}$,

$$k_2 = 4 \sqrt{\frac{-\frac{R_0^4}{R_2^2} + 3R_2^2 - 2R_0^2}{2R_0^4 \ln \frac{R_2}{R_0} - 2R_0^2 R_2^2 + \frac{1}{2} R_2^4 + \frac{3}{2} R_0^4}}, \quad A_2 = \frac{8(R_2^2 - R_0^2)}{2R_0^4 \ln \frac{R_2}{R_0} - 2R_0^2 R_2^2 + \frac{1}{2} R_2^4 + \frac{3}{2} R_0^4}.$$

(1.4.17) diferensial tənliyinin həlli aşağıdakı kimi olacaqdır:

$$\varphi_2(z) = c_5 \operatorname{ch}(k_2 z) + c_6 \operatorname{sh}(k_2 z) + \frac{A_2}{k_2^2} p, \quad (1.4.18)$$

burada c_5 və c_6 inteqral sabitləridir.

$\varphi_2(z) = f_2'(z)$ bərabərliyini nəzərə alaraq (1.4.18) ifadəsindən alarıq:

$$f_2(z) = \frac{c_5}{k_2} \operatorname{sh}(k_2 z) + \frac{c_6}{k_2} \operatorname{ch}(k_2 z) + \frac{A_2}{k_2^2} p \cdot z + c_7. \quad (1.4.19)$$

c_5 , c_6 və c_7 inteqral sabitlərini aşağıdakı sərhəd şərtlərindən təyin edə bilərik:

$$\mu P \Big|_{z=h} = -2\pi G \int_{R_0}^{R_2} \gamma_{zr} r dr, \quad (1.4.20)$$

$$u_2(r, z) \Big|_{z=h}^{r=R(h)} = \delta(h), \quad (1.4.21)$$

$$w_2 \Big|_{z=0} = 0, \quad (1.4.22)$$

burada

$$R(z) = R_1 + \left| u_1(r, z) \Big|_{r=R_1} \right|, \quad \delta(z) = \delta - \left| u_1(r, z) \Big|_{r=R_1} \right|.$$

(1.4.20) – (1.4.22) sərhəd şərtlərində (1.4.19) ifadəsini nəzərə alsaq, alarıq:

$$c_5 = \frac{\mu(R_2^2 - R_0^2)}{B_2 k_2 \operatorname{ch}(k_2 h)} p - \frac{\operatorname{sh}(k_2 h)}{\operatorname{ch}(k_2 h)} c_6,$$

$$c_6 = \frac{2R(h)\delta(h) \operatorname{ch}(k_2 h)}{(R_2^2 - R^2(h))} - \frac{\mu(R_2^2 - R_0^2) \operatorname{sh}(k_2 h)}{B_2 k_2} p - \frac{A_2 \operatorname{ch}(k_2 h)}{k_2^2}, \quad c_7 = -\frac{1}{k_2} c_5,$$

burada $B_2 = \frac{R_0^3}{3} - \frac{1}{2} R_0^2 R_2 + \frac{R_2^3}{6}.$

Kipləşdirici elementin xarici səthini silindrik divara tam toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvəni aşağıdakı kimi təyin edə bilərik:

$$\pi(R_2^2 - R_0^2) \sigma_z \Big|_{z=h} = P, \quad (1.4.23)$$

burada σ_z - kipləşdirici elementin ixtiyari en kəsik müstəvisində yaranan oxboyu gərginlikdir.

Kipləşdirici elementin xarici səthi ilə silindrik divar arasında tam kontakt yarandıqdan sonar kipləşdiricinin yuxarı oturacağında aşağıdakı sərhəd şərti ödənilir:

$$\sigma_r \Big|_{z=h}^{r=R_2} = 0. \quad (1.4.24)$$

Onda (1.4.24) sərhəd şərtini nəzərə almaqla (1.1.14) ifadəsindən alarıq:

$$s_2 = \left(\frac{R_0^2}{R_2^2} + 1 \right) f_2'(h), \quad (1.4.25)$$

(1.1.18) və (1.4.25) ifadələrini (1.4.23) bərabərliyində nəzərə alsaq, alarıq:

$$p = \left(\frac{R_0^2}{R_2^2} + 3 \right) f_2'(h). \quad (1.4.26)$$

Onda (1.4.19) düsturunu və c_5 , c_6 və c_7 inteqral sabitlərinin ifadələrini (1.4.26) bərabərliyində nəzərə alsaq, alarıq:

$$p = 2 \frac{R(h)\delta(h)}{R_2^2 - R^2(h)} \left(\frac{R_0^2}{R_2^2} + 3 \right). \quad (1.4.27)$$

Kipləşdirici elementin xarici səthi ilə silindrik divar arasında onların tam toxunmasından sonra yaranan kontakt gərginliyi (1.1.35) düsturu ilə tapıla bilər.

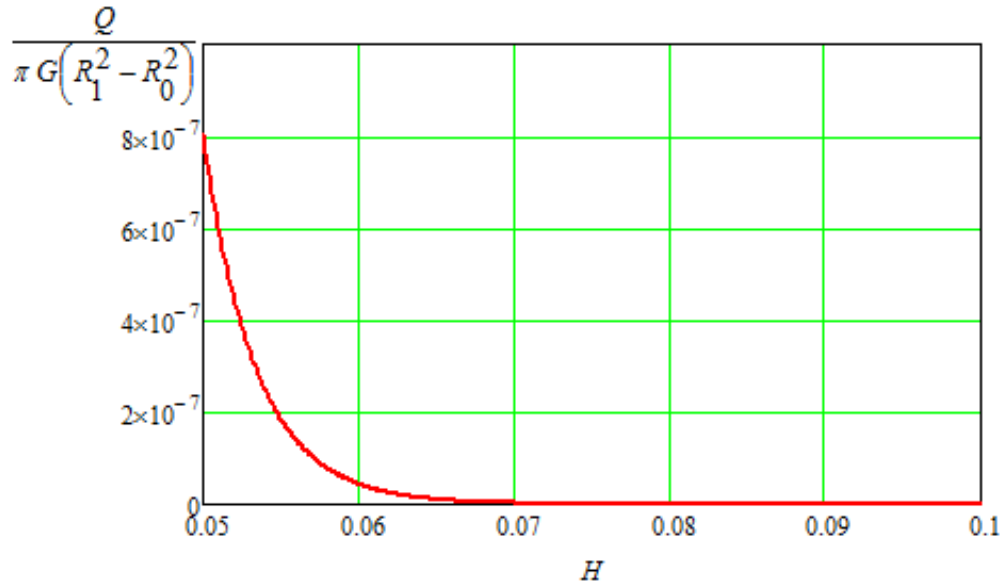
Parametrlərin aşağıdakı qiymətlərində (1.4.12) və (1.4.27) ifadələrinə əsasən ədədi hesablar aparılmış və kipləşdirici elementi onun xarici səthinin silindrik divara ilk və tam toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin hündürlüyünün müxtəlif qiymətlərində hesablanmışdır:

$$\begin{aligned} R_0 &= 0.073 \text{ m}, \quad R_1 = 0.093 \text{ m}, \quad R_2 = 0.1 \text{ m}, \quad \delta = 0.003 \text{ m}, \\ P_{mühit} &= 2 \cdot 10^7 \text{ Pa}, \quad G = 1.3 \cdot 10^8 \text{ Pa}, \quad k_0 = 6.7 \cdot 10^9 \text{ Pa/m}, \\ \mu &= 0.5, \quad \nu = 0.25 \end{aligned}$$

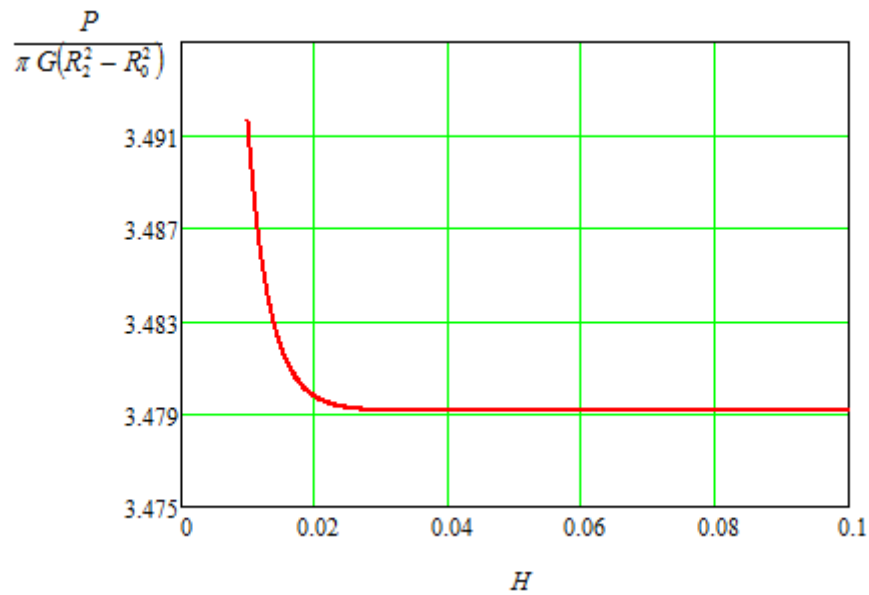
Ədədi hesabların nəticələri kipləşdirici elementin xarici səthi ilə silindrik divar arasında hermetikliyə nail olmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvələrin və kontakt gərginliyin qrafiki şəklində verilmişdir (Qrafik 1.4.1 – 1.4.3).

Qrafik 1.4.1-dən görüldüyü kimi kipləşdirici elementin hündürlüyü artdıqca onun xarici səthinin silindrik divarla ilk kontaktını yaradan oxboyu qüvvənin qiyməti əvvəl azalır, hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra isə stabilləşir.

Kipləşdirici elementin xarici səthinin silindrik divarla ilk kontaktını yaradan oxboyu qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin qiyməti artıqca əvvəlcə azalır, hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra isə stabilləşir (Qrafik 1.4.2).



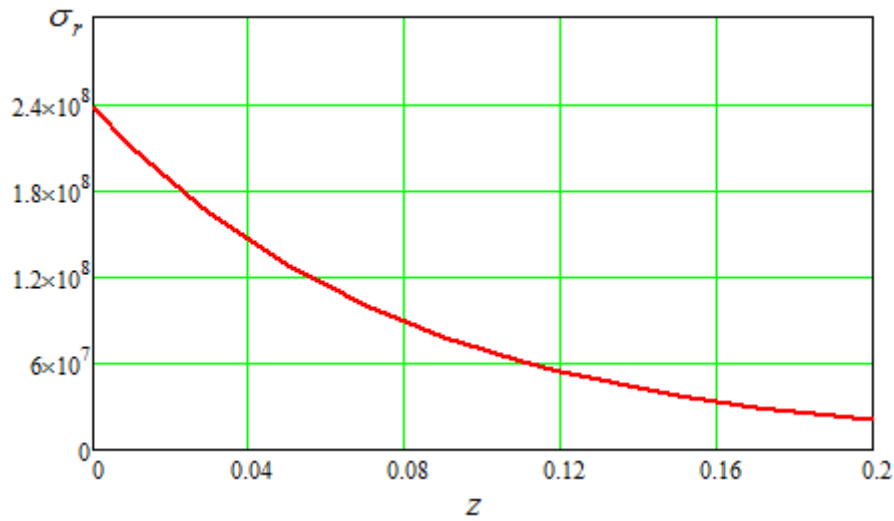
Qrafik 1.4.1. Kipləşdirici elementin xarici səthinin silindrik divarla ilk kontaktını yaranan oxboyu qüvvənin onun hündürlüyündən asılılıq qrafiki



Qrafik 1.4.2. Kipləşdirici elementin xarici səthinin silindrik divarla ilk kontaktını yaranan oxboyu qüvvənin onun hündürlüyündən asılılıq qrafiki

Kipləşdirici elementin xarici səthi ilə silindrik divar arasında yaranan kontakt gərginliyin z koordinatından asılı olaraq paylanma xarakteri Qrafik 1.4.3-də verilmişdir. Qrafikdən görüldüyü kimi ən böyük kontakt gərginliyi kipləşdirici

elementin aşağı oturacağında əmələ gəlir. z -in qiyməti artdıqca kontakt gərginliyi azalır, kipləşdiricinin hündürlüyünün müəyyən qiymətindən sonra isə itir.



Qrafik 1.4.3. Kontakt gərginliyin paylanma xarakterinin z koordinatından asılılıq qrafiki

İndi isə kipləşdirici elementin materialını irsi-elastiki cisim kimi qəbul edərək kipləşdiricinin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə irsilinin təsirini öyrənək. Kipləşdirici elementin ani yüklənmə halına baxaq. Onda kipləşdirici elementin deformasiya prosesini kvazistatik qəbul edərək məsələni elastiki analogiya metodu ilə həll etmək olar [59], [135]. Baxılan hal üçün kipləşdirici element deformasiyanın başlanğıc anında olduqda $w(z, t)|_{t=0} = w^*(z)$.

$$w(z, t) = w^*(\bar{z}) w(t), \quad w(t) = 1. \quad (1.4.28)$$

(1.4.28) bərabərliyini (1.2.22) ifadəsində nəzərə alsaq, alarıq:

$$\bar{G} = G \left[\left(1 - \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right]. \quad (1.4.29)$$

(1.4.12) və (1.4.29) bərabərliklərindən Q qüvvəsi üçün alarıq:

$$Q = \pi G (R_1^2 - R_0^2) \left[\left(1 - \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right] q. \quad (1.4.30)$$

(1.4.27) və (1.4.29), ifadələrindən kipləşdirici elementin xarici səthi ilə silindrik divarın tam kontaktını yaradan P oxboyu qüvvəsi üçün alarıq:

$$P = 2\pi G \frac{R(h)\delta(h)}{R_2^2 - R^2(h)} (R_2^2 - R_0^2) \left(\frac{R_0^2}{R_2^2} + 3 \right) \left(\left(1 - \frac{v^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{v^*}{\lambda^*} \right). \quad (1.4.31)$$

İndi isə fərz edək ki, oxboyu xarici qüvvənin təsirindən kipləşdirici elementin deformasiyalanma tempi zamandan asılı olaraq xətti dəyişir. Elastiki analogiya metoduna əsasən [59], [135] kipləşdirici elementin eninə kəsik müstəvisinin oxboyu deformasiyasını aşağıdakı kimi qəbul edə bilərik (Qrafik 1.3.1):

$$\varepsilon_1(z, t) = \varepsilon_1(\bar{z}) \cdot \varepsilon_1(t), \quad (1.4.32)$$

$$\varepsilon_1(t) = \frac{t}{T_1} [H(t) - H(t - T_1)] + H(t - T_1), \quad (1.4.33)$$

burada $H(t)$ - Hevisayd funksiyası, T_1 - kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrik divara ilk toxunmasına qədər yuxarı oturacağıının deformasiyalanma müddətidir.

Kipləşdirici elementin eninə kəsik müstəvisinin oxboyu deformasiyası zamandan asılılığı (1.4.33) düsturu ilə ifadə olunduqda kipləşdiricinin materialının sürüşmə modulu (1.3.4) şəklində olar. Onda (1.3.4) və (1.4.12) düsturlarından kipləşdirici elementin xarici səthinin silindrik divara ilk toxunmasına qədər lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti üçün aşağıdakı ifadəni alarıq:

$$Q = \pi \bar{G}(t, T_1) (R_1^2 - R_0^2) q. \quad (1.4.34)$$

(1.3.4) və (1.4.27) ifadələrindən alarıq:

$$P = 2\pi \bar{G}(t, T_2) (R_2^2 - R_0^2) \left(\frac{R_0^2}{R_2^2} + 3 \right) \frac{R(h)\delta(h)}{R_2^2 - R^2(h)}. \quad (1.4.35)$$

Beləliklə, (1.4.35) bərabərliyi irsilik nəzərə alınmaqla kipləşdirici elementin xarici səthi ilə silindrik divarın tam kontaktını yaradan oxboyu xarici qüvvənin qiymətini təyin edir. Kipləşdirilən səthlər arasında hermetikliyə nail olmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti ilkin yaxınlaşmada aşağıdakı kimi tapıla bilər:

$$P^* = Q + P. \quad (1.4.36)$$

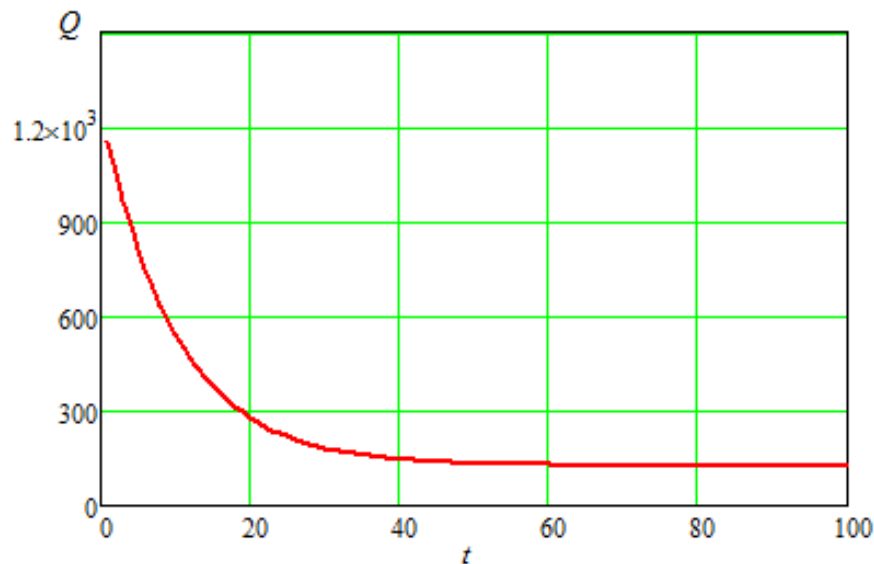
Parametrlərin aşağıdakı qiymətlərində (1.4.30), (1.4.31), (1.4.34) və (1.4.35) düsturlarına əsasən ədədi hesablar aparılmışdır:

$$R_0 = 0.073m, R_1 = 0.093m, R_2 = 0.1m, \delta = 0.003m, H = 0.005m,$$

$$G = 1.3 \cdot 10^8 Pa, k_0 = 6.7 \cdot 10^9 Pa/m, \mu = 0.5, \nu = 0.25, \nu^* = 0.01, \lambda^* = 0.1,$$

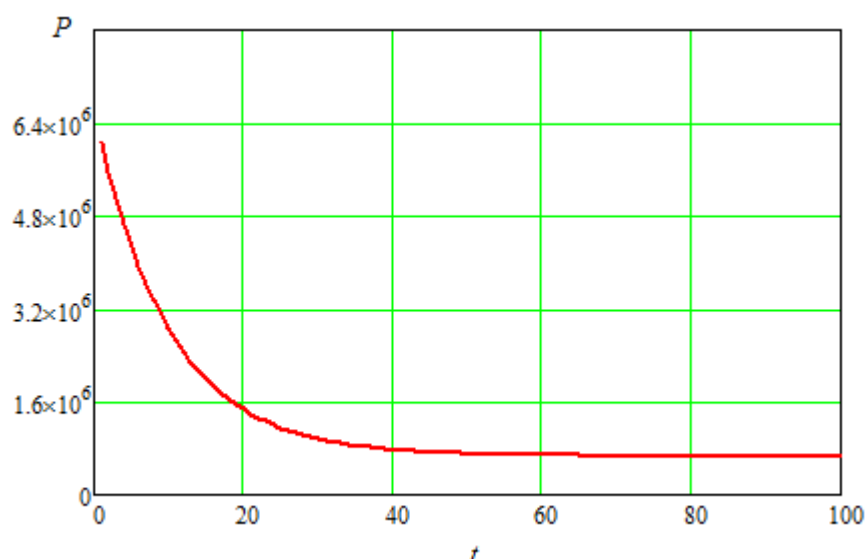
$$T_1 = 10, 20, 30, 40, 50, 60 \text{ san}, T_2 = 10, 20, 30, 40, 50, 60 \text{ san}.$$

Kipləşdirici elementin materialının irsi-elastiki xüsusiyyəti nəzərə alınaraq kipləşdiricinin xarici səthinin silindrik divarına ilk və tam toxunana qədər deformasiyaetdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvələrin qüvvənin tətbiq olunma müddətində zaman keçdikcə dəyişməsi qrafik şəkildə verilmişdir (Qrafik 1.4.4-1.4.7).

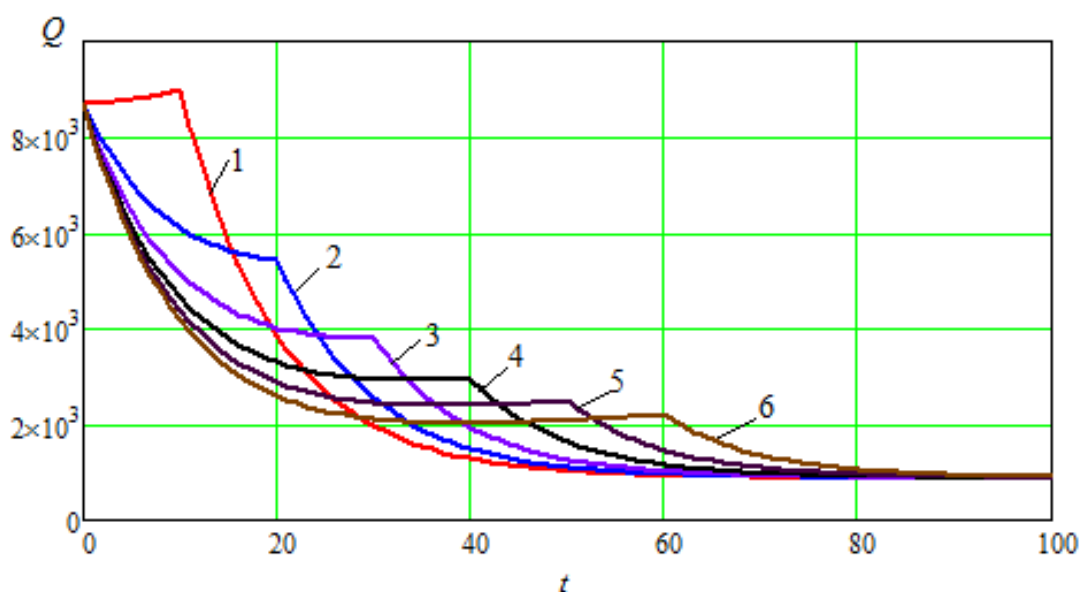


Qrafik 1.4.4. Ani yüklənmə halında irsilik nəzərə alınaraq kipləşdirici elementin xarici səthinin silindrik divar ilə ilk təmasına qədər sıxılması üçün lazım olan Q oxboyu qüvvəsinin asılılıq qrafiki

Qrafik 1.4.4 və Qrafik 1.4.5-dən görüldüyü kimi irsilik nəzərə alındıqda oxboyu deformasiyanın sabit qiymətində oxboyu qüvvənin tətbiq olunduğu hissəsində gərginlik relaksasiya edir. 40 saniyəyə qədər qüvvənin tətbiq olunduğu hissədə oxboyu qüvvənin qiyməti 5 dəfəqədər azalır, sonra isə stabilləşir. Bu kipləşdiricinin hermetikliyinin pozulmasına səbəb ola bilər.

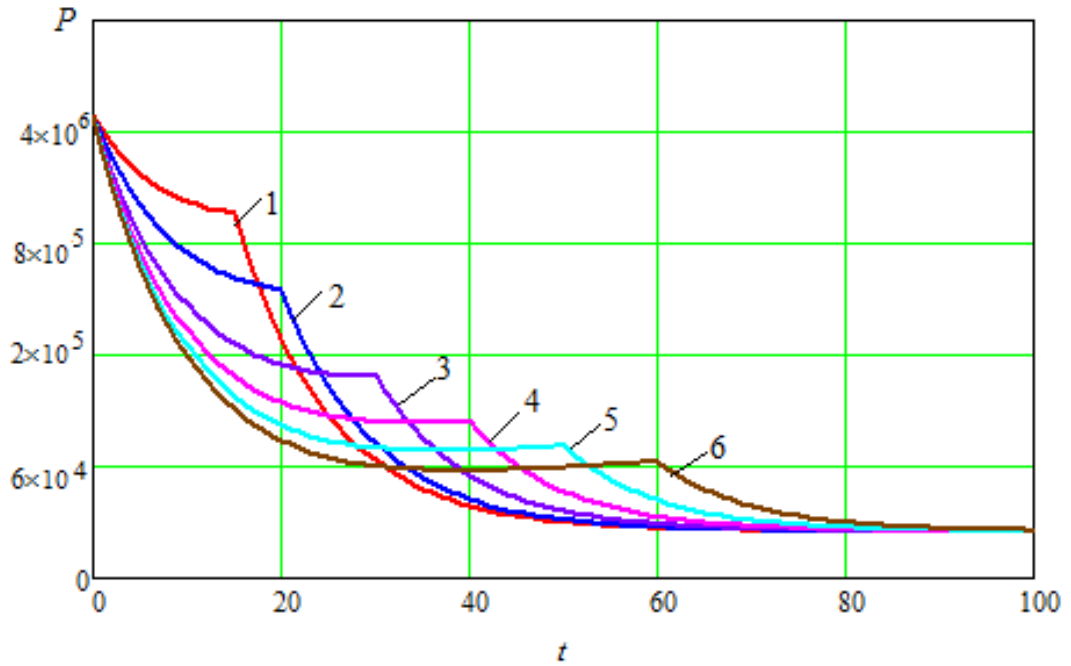


Qrafik 1.4.5. Ani yüklənmə halında rsilik nəzərə alınaraq kipləşdirici elementin xarici səthinin silindrik divar ilə tam təmasına qədər sıxılması üçün lazım olan P oxboyu qüvvəsinin asılılıq qrafiki



1- $T_1 = 10 \text{ san}$, 2- $T_1 = 20 \text{ san}$, 3- $T_1 = 30 \text{ san}$, 4- $T_1 = 40 \text{ san}$,
5- $T_1 = 50 \text{ san}$, 6- $T_1 = 60 \text{ san}$

Qrafik 1.4.6. Kipləşdirici elementin yuxarı oturacağında Q qüvvəsinin zamandan asılı olaraq dəyişməsi qrafiki



1- $T_1 = 10 \text{ san}$, 2- $T_1 = 20 \text{ san}$, 3- $T_1 = 30 \text{ san}$, 4- $T_1 = 40 \text{ san}$,
5- $T_1 = 50 \text{ san}$, 6- $T_1 = 60 \text{ san}$

Qrafik 1.4.7. Kipləşdirici elementin yuxarı oturacağında Q qüvvəsinin zamandan asılı olaraq dəyişməsi qrafiki

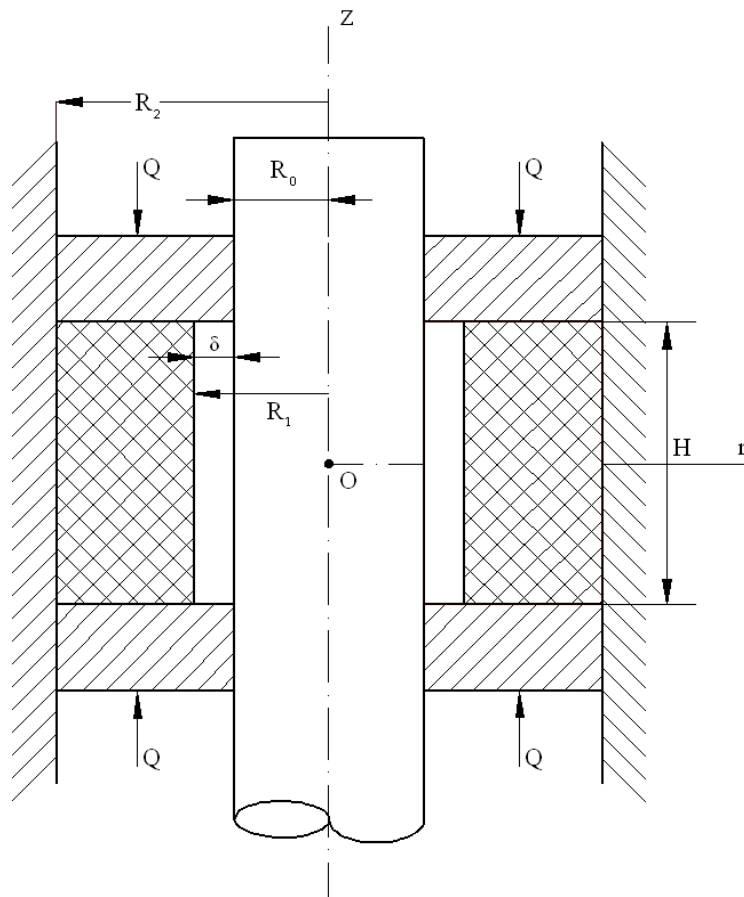
Kipləşdirici element bərabərsürətli deformasiya etdikdə də eyni proses baş verir. Sadəcə bu halda hər bir deformasiyanın müxtəlif dəyişmə templərinə uyğun oxboyu gərginliyin relaksasiyası fərqlənir (Qrafik 1.4.6-1.4.7).

1.5. İkitərəfli sıxılma zamanı silindrik formalı elementlərlə kipləşdirmə prosesinin riyazi modelləşdirilməsi

Bu paragrafda ikitərəfli sıxılma zamanı kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasındakı kontakt gərginliyin paylanması kipləşdiricinin həndəsi ölçülərindən və fiziki-mexaniki xüsusiyyətindən asılılığı nəzəri olaraq tədqiq edilərək öyrənilir. Silindrik kipləşdirici elementin eyni anda iki tərəfdən sıxılaraq hermetikliyinin təmin edilməsi onun iş qabiliyyətini və deformasiya-gərginlik

vəziyyətini yaxşılaşdırır. Kipləşdiricinin eyni anda iki tərəfdən sıxılması zamanı onun deformasiya-gərginlik vəziyyətinin həm oxboyu və həm də radial istiqamətdə simmetrik olması yuxarıda qeyd edildiyi kimi kipləşdiricinin iş qabiliyyətini yaxşılaşdırır.

Kipləşdirilən silindrin xarici divarına δ ara məsafəsi ilə oturdulmuş və xarici səthi ilə xarici silindrə kip söykənmiş silindrik kipləşdirici elementə baxaq (Şəkil 1.5.1) [3]. Kipləşdirici elementin ikitərəfli oxboyu sıxılmasıyla onun daxili səthi ilə silindrin divarı arasında hermetikliyə nail olunur (Şəkil 1.5.1). Məsələnin həlli §1.1-də olduğu kimi iki mərhələyə bölünür. Birinci mərhələdə kipləşdirici elementin onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunmasına qədər sıxılması, ikinci mərhələdə isə kipləşdirici elementin tam sıxılması ilə hermetikliyin təmin edilməsi prosesinin riyazi modeli qurularaq öyrənilir.



Şəkil 1.5.1. Hesabat sxemi

Birinci mərhələyə baxaq. Şəkil 1.5.1-də göstəriləyi kimi koordinat başlanğıcını kipləşdirici elementin ortasında, $H/2$ kəsiyinin mərkəzində yerləşdirək (H - kipləşdirici elementin hündürlüyüdür), z koordinat oxunu şaquli olaraq yuxarı, r koordinat oxunu isə kipləşdiricinin radiusunun artması istiqamətində yönəldək. Kipləşdirici elementin materialını bircins qəbul edərək onun deformasiya-gərginlik vəziyyəti eyni zamanda iki istiqamətli oxasimmetrik olduğundan məsələnin həlli kipləşdiricinin koordinat başlanğıcından yuxarı hissəsinin birtərəfli sıxılması məsələsinin həllinə gətirilir.

§1.1-də olduğu kimi müstəvi kəsik hipotezini qəbul edərək fərz etmək olar ki, kipləşdirici elementin w_1 oxboyu deformasiyası yalnız ox istiqamətindəki koordinatdan asılıdır və aşağıdakı kimi dəyişir [7], [9], [22]:

$$w_1 = f_1(z), \quad (1.5.1)$$

burada $f_1(z)$ z - dən asılı naməlum funksiyadır.

Kipləşdirici elementin materialını sıxılmayan qəbul etsək, (1.1.2) bərabərliyi ödənəcəkdir. (1.1.2)-də (1.5.1) bərabərliyini nəzərə alıb, $u_1(r, z)|_{r=R_2} = 0$ sərhəd şərti daxilində r -ə görə inteqrallasaq, alarıq:

$$u_1(r, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_2^2}{r} - r \right) f_1'(z). \quad (1.5.2)$$

Məsələnin oxasimmetrikliyini nəzərə alaraq kipləşdirici elementin deformasiya olunduqdan sonrakı potensial enerjisi [59] üçün yaza bilərik:

$$\Pi = 8\pi G \int_0^{H/2} \int_{R_1}^{R_2} \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{zr}^2 \right) r dr dz - 2 \int_0^{H/2} Q \cdot f_1'(z) dz, \quad (1.5.3)$$

burada R_1 , R_2 - uyğun olaraq kipləşdirici elementin daxili və xarici radiusu, ε_r , ε_θ , ε_z və γ_{zr} - uyğun olaraq radial, tangensial, oxboyu və sürüşmə nisbi deformasiyalarıdır [15], [82].

Onda (1.5.3) ifadəsində (1.1.8), (1.5.1) və (1.5.2) bərabərliklərini nəzərə alsaq, alarıq:

$$\begin{aligned} \Pi = 4\pi G \int_0^{H/2} & \left\{ \left(-\frac{3}{64} R_2^4 - \frac{1}{64} R_1^4 + \frac{1}{16} R_2^2 R_1^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right) f_1''^2(z) + \right. \\ & \left. + \left(R_2^2 - \frac{3}{2} R_1^2 + \frac{1}{2} \frac{R_2^4}{R_1^2} \right) f_1'^2(z) \right\} dz - 2 \int_0^{H/2} Q f_1'(z) dz, \end{aligned} \quad (1.5.4)$$

burada G - kipləşdirici elementin materialının sürüşmədə elastiklik moduludur.

Eyler tənliyi [9], [59] əsasında (1.5.4) funksionalından alarıq:

$$\begin{aligned} \varphi_1''(z) - \frac{-\frac{3}{2} R_1^2 + \frac{1}{2} \frac{R_2^4}{R_1^2} + R_2^2}{-\frac{1}{64} R_1^4 - \frac{3}{64} R_2^4 + \frac{1}{16} R_1^2 R_2^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \varphi_1(z) + \\ + \frac{q(R_2^2 - R_1^2)}{4 \left(-\frac{1}{64} R_1^4 - \frac{3}{64} R_2^4 + \frac{1}{16} R_1^2 R_2^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right)} = 0, \end{aligned} \quad (1.5.5)$$

burada $\varphi_1(z) = f_1'(z)$, $q = \frac{Q}{\pi G (R_2^2 - R_1^2)}$.

$\varphi_1(z) = f_1'(z)$ bərabərliyini nəzərə alaraq (1.5.5) diferensial tənliyini inteqrallasaq, alarıq:

$$f_1(z) = \frac{c_1}{k_1} \operatorname{ch} k_1 z + \frac{c_2}{k_1} \operatorname{sh} k_1 z + \frac{A_1}{k_1^2} z + c_3, \quad (1.5.6)$$

burada

$$\begin{aligned} k_1 = \sqrt{\frac{-\frac{3}{2} R_1^2 + \frac{1}{2} \frac{R_2^4}{R_1^2} + R_2^2}{-\frac{1}{64} R_1^4 - \frac{3}{64} R_2^4 + \frac{1}{16} R_1^2 R_2^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}}, \\ A_1 = \frac{q(R_2^2 - R_1^2)}{4 \left(-\frac{1}{64} R_1^4 - \frac{3}{64} R_2^4 + \frac{1}{16} R_1^2 R_2^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right)}, \end{aligned}$$

c_1 , c_2 və c_3 isə aşağıdakı sərhəd şərtlərindən təyin edilən inteqral sabitləridir:

$$\mu Q|_{z=H/2} = 2\pi G \int_{R_1}^{R_2} \gamma_{zr} r dr, \quad u_1|_{z=0} = -\delta, \quad w_1|_{z=0} = 0, \quad (1.5.7)$$

burada μ - kipləşdiricinin yuxarı oturacağı ilə şayba arasındakı sürtünmə əmsəlidir.

(1.5.7) sərhəd şərtlərindən c_1 , c_2 və c_3 inteqral sabitləri üçün aşağıdakı ifadələri alırıq:

$$c_1 = \frac{\mu(R_2^2 - R_1^2)}{B_1 k_1 \operatorname{ch} \frac{k_1 H}{2}} q + \left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{A_1}{k_1^2} \right) \operatorname{th} \frac{k_1 H}{2}, \quad c_2 = -\frac{\delta}{\lambda} - \frac{A_1}{k_1^2}, \quad c_3 = -\frac{c_1}{k_1}, \quad (1.5.8)$$

$$\text{burada } \lambda = \frac{1}{2} \left(\frac{R_2^2}{R_1} - R_1 \right), \quad B_1 = \frac{R_2^3}{3} - \frac{1}{2} R_2^2 R_1 + \frac{R_1^3}{6}.$$

Kipləşdirici elementin ixtiyari nöqtəsində radial gərginlik (1.1.14) ifadəsi ilə təyin edilə bilər. $\sigma_r|_{r=R(z)} = 0$ sərhəd şərti daxilində s hidrostatik gərginlik funksiyası üçün (1.1.16) ifadəsini alırıq.

Kipləşdiricini onun daxili səthinin kipləşdirilən silindrin divarına ilk toxunmasına qədər sıxmaq üçün lazım olan Q qüvvəsinin qiyməti aşağıdakı kimi tapıla bilər:

$$\pi(R_2^2 - R_1^2) \sigma_z|_{z=H/2} = Q. \quad (1.5.9)$$

Digər tərəfdən (1.1.18) bərabərliyi ödəyir. (1.1.16), (1.1.18), (1.5.6) və (1.5.8) ifadələrinin köməyiylə (1.5.9) bərabərliyindən alırıq:

$$q = \left(\frac{R_2^2}{R^2 \left(\frac{H}{2} \right)} + 3 \right) f_1' \left(\frac{H}{2} \right), \quad (1.5.10)$$

$$\text{burada } q = \frac{Q}{\pi G (R_2^2 - R_1^2)}.$$

(1.5.10) ifadəsindən q üçün alırıq:

$$q = \sqrt[3]{-\frac{1}{2}\left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c\right) + \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c\right)^2 + \left(-\frac{a^2}{9} + \frac{b}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{1}{2}\left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c\right) - \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c\right)^2 + \left(-\frac{a^2}{9} + \frac{b}{3}\right)^3}} - \frac{a}{3}, \quad (1.5.11)$$

burada

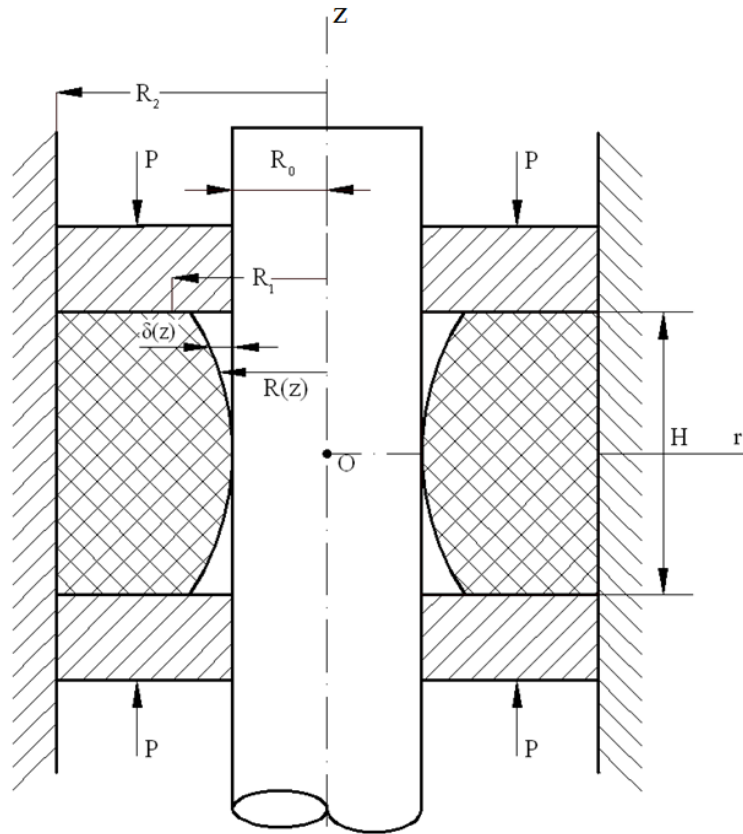
$$a = \frac{-\frac{3\delta C}{\operatorname{ch}\frac{k_1 H}{2}} + 2(3C-1)\left(R_1 - \frac{\delta}{\operatorname{ch}\frac{k_1 H}{2}}\right)}{\lambda C(3C-1)},$$

$$b = \frac{R_2^2 C + (3C-1)\left(R_1 - \frac{\delta}{\operatorname{ch}\frac{k_1 H}{2}}\right)^2 - \frac{6\delta C}{\operatorname{ch}\frac{k_1 H}{2}}\left(R_1 - \frac{\delta}{\operatorname{ch}\frac{k_1 H}{2}}\right)}{\lambda^2 C^2(3C-1)},$$

$$c = \frac{-R_2^2 - 3\left(R_1 - \frac{\delta}{\operatorname{ch}\frac{k_1 H}{2}}\right)^2}{\lambda^3 C^2(3C-1)\operatorname{ch}\frac{k_1 H}{2}}, \quad C = \frac{R_2^2 - R_1^2}{\operatorname{ch}\frac{k_1 H}{2}} \left(\frac{\mu \cdot \operatorname{sh}\frac{k_1 H}{2}}{B_1 \cdot k_1} - \frac{1 - \operatorname{ch}\frac{k_1 H}{2}}{4\left(R_2^2 - \frac{3}{2}R_1^2 + \frac{1}{2}R_2^4\right)} \right).$$

(1.5.11) ifadəsi ilə kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti təyin edilir.

İndi isə kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan oxboyu qüvvənin qiymətini tapaq. Şəkil 1.5.2-də göstəriləyi kimi koordinat sisteminin başlanğıcını yenə də kipləşdirici elementin $H/2$ en kəsiyinin mərkəzində yerləşdirək və z oxunu şaquli olaraq yuxarı, r oxunu isə kipləşdirici elementin radiusunun artması istiqamətində yönəldək.



Şəkil 1.5.2. Hesabat sxemi

Yenə də kipləşdiricinin deformasiyası üçün müstəvi kəsiklər fərziyyəsini qəbul edə bilərik və uyğun olaraq fərz edək ki, onun oxboyu deformasiyası yalnız z koordinatından asılıdır:

$$w_2 = f_2(z), \quad (1.5.12)$$

burada $f_2(z)$ - z - dən asılı naməlum funksiyadır.

Onda (1.1.2) sıxılmazlıq şərtində (1.5.12) bərabərliyini nəzərə alsaq, alarıq:

$$u_2(r, z) = -\frac{1}{2} r f_2'(z) + \frac{c_4}{r}, \quad (1.5.13)$$

burada c_4 - inteqral sabitidir.

Sərhəd şərti aşağıdakı kimi olacaq:

$$u_2(r, z)|_{r=R_2} = 0. \quad (1.5.14)$$

Onda (1.5.14) sərhəd şərti daxilində (1.5.13) ifadəsindən alarıq:

$$u_2(r, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_2^2}{r} - r \right) f_2'(z). \quad (1.5.15)$$

Məsələnin oxasimmetrikliliyini nəzərə alaraq kipləşdirici elementin deformasiya olunduqdan sonrakı potensial enerjisi üçün yazıla bilər:

$$\Pi = 8\pi G \int_0^h \int_{R_0}^{R_2} \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{zr}^2 \right) r dr dz - 2 \int_0^h P \cdot f_2'(z) dz, \quad (1.5.16)$$

burada $h = \frac{H}{2} - \left| f_1 \left(\frac{H}{2} \right) \right|$.

Kipləşdiricinin radial deformasiyasının (1.5.15) ifadəsini (1.1.8) düsturlarında, alınmış nəticələri isə (1.5.16) ifadəsində yerinə yazsaq və sonra r - ə görə inteqrallasaq alınmış funksionaldan Eyler tənliyinə əsasən [7], [9], [15] alırıq:

$$\varphi_2''(z) - k_2^2 \varphi_2(z) + A_2 = 0, \quad (1.5.17)$$

burada $\varphi_2(z) = f_2'(z)$,

$$k_2 = \sqrt{\frac{R_2^2 - \frac{3}{2} R_0^2 + \frac{1}{2} \frac{R_2^4}{R_0^2}}{-\frac{3}{64} R_2^4 - \frac{1}{64} R_0^4 + \frac{1}{16} R_0^2 R_2^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln \left(\frac{R_2}{R_0} \right)}},$$

$$A_2 = \frac{p (R_2^2 - R_0^2)}{4 \left(-\frac{3}{64} R_2^4 - \frac{1}{64} R_0^4 + \frac{1}{16} R_0^2 R_2^2 + \frac{1}{16} R_2^4 \ln \left(\frac{R_2}{R_0} \right) \right)}.$$

(1.5.17) diferensial tənliyinin həllini yazıla bilər:

$$\varphi_2(z) = c_5 \operatorname{ch} k_2 z + c_6 \operatorname{sh} k_2 z + \frac{A_2}{k_2^2}, \quad (1.5.18)$$

burada c_5 və c_6 inteqral sabitləridir.

(1.5.18) ifadəsində $\varphi_2(z) = f_2'(z)$ bərabərliyini nəzərə almaqla alırıq:

$$f_2(z) = \frac{c_5}{k_2} \operatorname{sh} k_2 z + \frac{c_6}{k_2} \operatorname{ch} k_2 z + \frac{A_2}{k_2^2} z + c_7, \quad (1.5.19)$$

burada c_7 - inteqral sabitidir.

c_5 , c_6 və c_7 sabitlərini aşağıdakı sərhəd şərtlərindən tapa bilərik:

$$\mu P|_{z=h} = 2\pi G \int_{R_0}^{R_2} \gamma_{zr} r dr, \quad u_2(r, z)|_{r=R(h)} = -\delta(h), \quad w_2|_{z=0} = 0, \quad (1.5.20)$$

burada $R(h) = R_1 + u_1(r, z)|_{r=R_1}$, $\delta(h) = \delta + u_1(r, z)|_{r=R_1}$.

Onda (1.5.20) sərhəd şərtlərində (1.5.19) ifadəsini nəzərə alsaq, alarıq:

$$c_5 = \frac{1}{\text{th}^2 k_2 h - 1} \left(\frac{2R(h)\delta(h)}{(R_2^2 - R^2(h)) \text{ch} k_2 h} + \frac{\mu p (R_2^2 - R_0^2) \text{th} k_2 h}{B_2 k_2 \text{ch} k_2 h} + \frac{A_2}{k_2^2 \text{ch} k_2 h} \right),$$

$$c_6 = \frac{\mu p (R_2^2 - R_0^2)}{B_2 k_2 \text{ch} k_2 h} - \text{th} k_2 h \cdot c_5, \quad c_7 = -\frac{1}{k_2} c_6,$$

burada $B_2 = \frac{R_0^3}{6} - \frac{1}{2} R_0 R_2^2 + \frac{R_2^3}{3}$.

Kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına tam toxunmasına qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvəni aşağıdakı şərtədən təyin edək:

$$\pi (R_2^2 - R_0^2) \sigma_z|_{z=h} = P, \quad (1.5.21)$$

burada σ_z - kipləşdirici elementin ixtiyari en kəsiyinin oxboyu gərginliyidir.

Kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına tam toxunmasından sonra onun yuxarı en kəsiyində sərhəd şərti aşağıdakı kimi olacaq:

$$\sigma_r|_{r=R_0} = 0. \quad (1.5.22)$$

Onda (1.1.14) ifadəsini (1.5.22) sərhəd şərtində nəzərə alsaq,

$$s = \left(\frac{R_2^2}{R_0^2} + 1 \right) f_2'(h). \quad (1.5.23)$$

(1.1.18) və (1.5.23) ifadələrini (1.5.21) şərtində nəzərə alsaq,

$$p = \left(\frac{R_2^2}{R_0^2} + 3 \right) f_2'(h), \quad (1.5.24)$$

burada
$$p = \frac{P}{\pi G (R_2^2 - R_0^2)}.$$

(1.5.19) bərabərliyini və c_5 , c_6 və c_7 sabitlərinin ifadələrini (1.5.24)-də nəzərə almaqla alarıq:

$$p = 2 \frac{R(h)\delta(h)}{R_2^2 - R^2(h)} \left(\frac{R_2^2}{R_0^2} + 3 \right), \quad (1.5.25)$$

burada

$$R(h) = R_1 + \lambda \left(c_1 \operatorname{sh} k_1 h + c_2 \operatorname{ch} k_1 h + \frac{A_1}{k_1^2} \right), \quad \delta(h) = \delta + \lambda \left(c_1 \operatorname{sh} k_1 h + c_2 \operatorname{ch} k_1 h + \frac{A_1}{k_1^2} \right).$$

§1.1-də olduğu kimi kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında onların tam təmasından sonra yaranan kontakt gərginliyi elastiki əsas üzərindəki tirin deformasiyası məsələsinə analogi olaraq (1.1.35) düsturu ilə verilə bilər. Əgər (1.1.35) ifadəsi ilə təyin olunan $\sigma_r(z)$ gərginliyi toxunan divarlar arasında lazımi hermetikliyi yaradacaq qiymətə malik deyilsə, onda kipləşdirici elementin sıxılması davam etdirilir. Bu sıxıcı qüvvənin kipləşdirici elementin səthi ilə silindrin divarı arasında yaratdığı kontakt gərginliyin qiymətini tapmaq üçün koordinat başlanğıcından z məsafədə kipləşdiricidən elementar dz hündürlüklü həlqəvi element ayıraq və onun müvazinətinə baxaq:

$$2\pi \cdot \tau_{rz} (R_2 + R_0) dz = -\pi (R_2^2 - R_0^2) \frac{d\sigma_z}{dz} dz, \quad (1.5.26)$$

burada τ_{rz} - toxunan gərginlikdir.

Digər tərəfdən kipləşdirici elementin materialı (1.1.37) sıxılmazlıq şərtini ödəyir. (1.1.37) bərabərliyini (1.5.26) tənliyində nəzərə alıb, $\sigma_z|_{z=h} = \sigma_0$ sərhəd şərti daxilində onu inteqrallasaq, alarıq:

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{2\mu\nu(h-z)}{(1-\nu)(R_2 - R_0)}\right), \quad (1.5.27)$$

burada σ_0 - kipləşdirici elementin sıxıcı qüvvə tətbiq edilən kəsiyindəki oxboyu gərginliyidir.

Kipləşdiricinin daxili divarı ilə silindrin divarı arasında kontakt gərginliyinin paylanma qanunu (1.1.35) və (1.5.27) ifadələrindən aşağıdakı kimi tapıla bilər:

$$\sigma_r = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z,$$

$$\sigma_r = \frac{\nu\sigma_0}{1-\nu} \exp\left(\frac{2\mu\nu(h-z)}{(1-\nu)(R_2 - R_0)}\right) + k_0 \cdot u_0(z). \quad (1.5.28)$$

σ_0 gərginliyinin qiyməti isə hermetiklik şərtindən təyin edilir:

$$\frac{\nu\sigma_0}{1-\nu} \exp\left(\frac{2\mu\nu}{(1-\nu)(R_2 - R_0)} h\right) + k_0 \cdot u_0(0) \geq P_{mühit},$$

burada $P_{mühit}$ - mühitin təzyiqidir.

Beləliklə alınmış (1.5.28) ifadəsi kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin onun fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərindən və həndəsi ölçülərindən asılı olaraq paylanma xarakterini müəyyənləşdirir.

Parametrlərin aşağıdakı qiymətlərində (1.5.11) və (1.5.25) ifadələrinə əsasən ədədi hesablar aparılmış və kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk və tam təmasına qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin hündürlüyünün müxtəlif qiymətlərində hesablanmışdır:

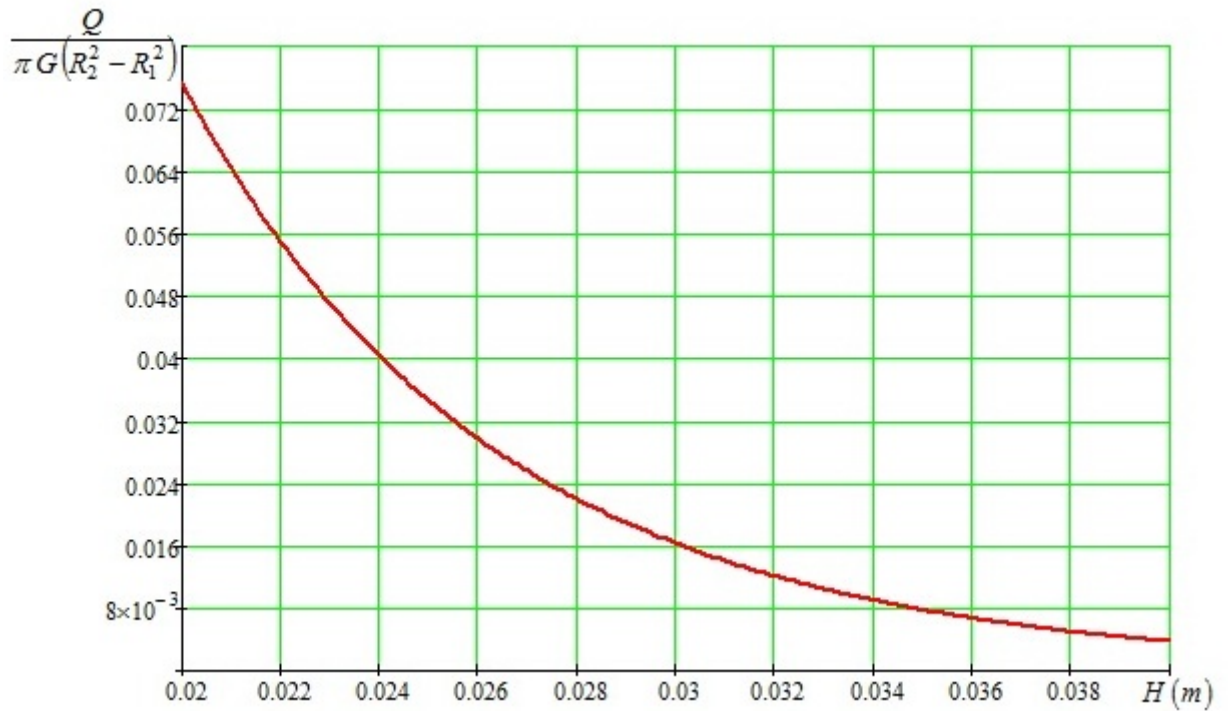
$$R_0 = 0.073 m, R_1 = 0.076 m, R_2 = 0.1 m, \delta = 0.003 m, P^* = 2 \cdot 10^7 Pa,$$

$$G = 1.3 \cdot 10^8 Pa, P_{mühit} = 6.7 \cdot 10^9 Pa/m, \mu = 0.5, \nu = 0.25.$$

Ədədi hesabın nəticələri Qrafik 1.5.1-1.5.3-də verilmişdir.

Qrafik 1.5.1-dən görüldüyü kimi kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunmasına qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu

qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin hündürlüyü artdıqca azalır, hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra isə stabilləşir.



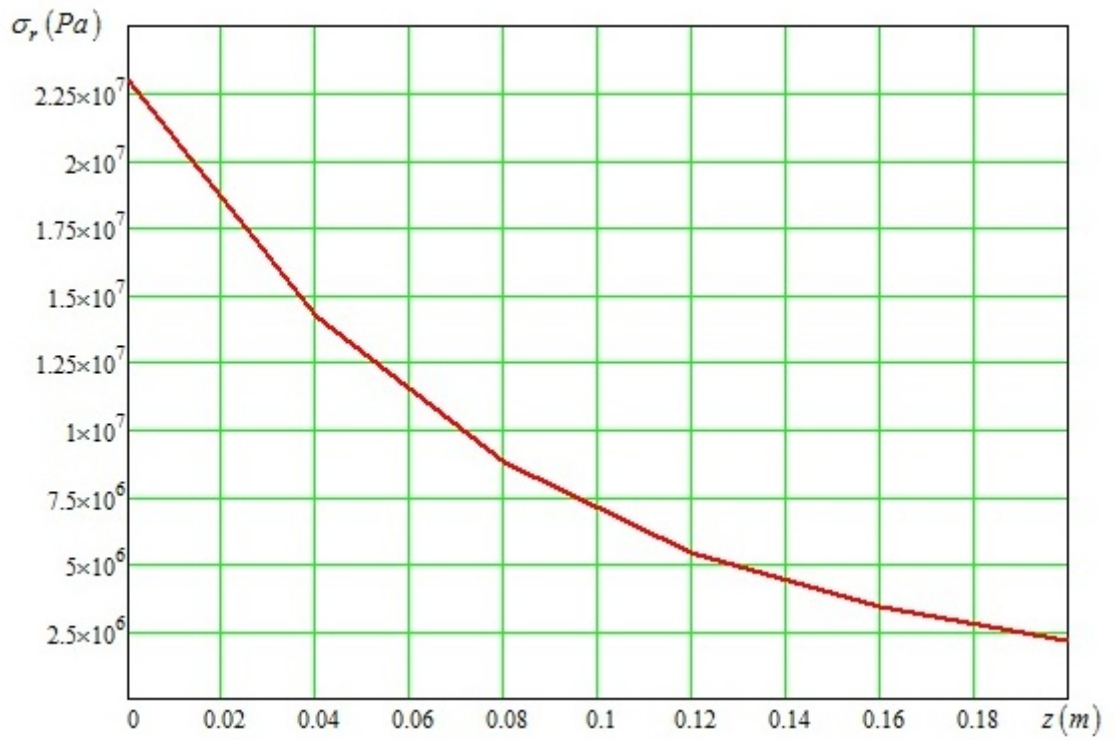
Qrafik 1.5.1. Kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu Q qüvvəsinin qiymətini təyin edən $q = \frac{Q}{\pi G (R_2^2 - R_1^2)}$ kəmiyyətinin qiymətinin kipləşdiricinin hündürlüyündən asılılıq qrafiki

Qrafik 1.5.2-dən görüldüyü kimi kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına tam toxunmasına qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti də həmçinin kipləşdiricinin hündürlüyü artdıqca azalır, hündürlüyün müəyyən olunmuş qiymətindən sonra isə stabilləşməyə başlayır.



Qrafik 1.5.2. Kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına tam kontaktını yaradan oxboyu P qüvvəsinin qiymətini təyin edən $p = \frac{P}{\pi G (R_2^2 - R_0^2)}$ kəmiyyətinin qiymətinin kipləşdiricinin hündürlüyündən asılılıq qrafiki

Qrafik 1.5.3-də kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin z koordinatından asılı olaraq paylanma xarakterini əks etdirən qrafik verilmişdir. Qrafikdən görüldüyü kimi səthlər arasındakı kontakt gərginliyi kipləşdirici elementin aşağı oturacağında öz maksimum qiymətini alır. z - in qiymətinin artması ilə kontakt gərginliyi azalır və kipləşdiricinin hündürlüyün təyin olunmuş qiymətindən sonra itir.



Qrafik 1.5.3. Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin z koordinatından asılılıq qrafiki ($H = 0.2\text{ m}$)

II FƏSİL

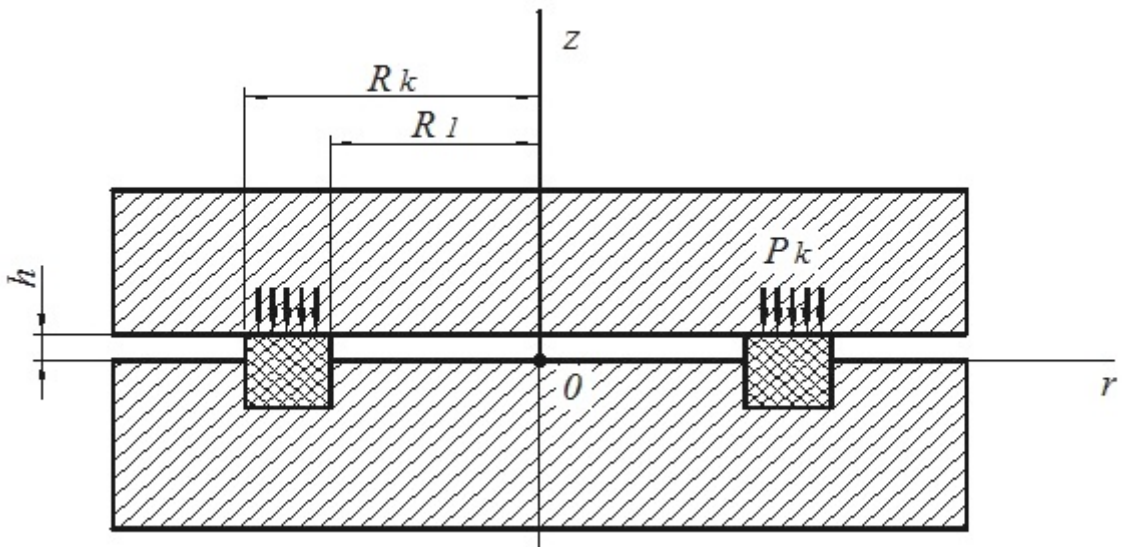
HƏLQƏVİ VƏ KONİK FORMALI ELEMENTLƏRLƏ KIPLƏŞDİRMƏ PROSESİNİN RİYAZI MODELLEŞDİRİLMƏSİ

Bu fəsil həlqəvi və kəsik konus formalı kipləşdirici elementlərin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin tədqiqinin riyazi modeli qurularaq öyrənilməsinə həsr edilmişdir. Elastiki səthlərarası həlqəvi kipləşdirici elementin xarici yükün təsiri altında yaranan deformasiya-gərginlik vəziyyəti öyrənilmiş, həlqəvi kipləşdirici ilə hamar səth arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterini və kipləşdiricinin effektiv ölçülərini təyin edən analitik ifadələr alınmışdır. Həlqəvi kipləşdirici elementin xətti irsi-elastiki modeli qurularaq kontakt gərginliyinin relaksasiya prosesi tədqiq edilərək öyrənilmişdir. İrsiliyin səthlərarası həlqəvi kipləşdirici elementin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsiri əks etdirən analitik ifadələr alınmışdır. Həlqəvi kipləşdirici elementin iki müxtəlif yüklənmə halında – ani və tədricən yüklənmə halında deformasiya-gərginlik vəziyyəti təyin edilmişdir. Alınmış analitik düsturlara əsasən ədədi hesablar aparılmış, alınan nəticələr qrafik şəkildə verilmişdir.

Eləcə də, konik formalı kipləşdirici elementin materialının elastiklik və irsilik xüsusiyyəti nəzərə alınaraq kipləşdiricinin daxili divarı ilə kipləşdirilən səth arasında hermetikliyi təmin edən oxboyu qüvvənin minimum qiyməti tapılmışdır. Konik kipləşdirici elementlə hermetikləşdirmə prosesi zamanı kipləşdirilən səthlər arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakteri təyin edilmişdir. İrsiliyin kipləşdiricinin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsiri öyrənilmiş, aparılmış tədqiqat işinin nəticələri qrafik şəkildə verilmişdir. Kəsik konus formalı kipləşdirici elementin materialının elastiki və irsi-elastiki olduğu halda alınan nəticələr müqayisə edilmişdir. Hermetikləşdirmə prosesinin modeli qurularaq deformasiya tempinin müxtəlif hallarında irsiliyin kontakt gərginliyin paylanma xarakterinə təsiri təyin edilmişdir.

2.1. Həlqəvi kipləşdirici ilə hamar səth arasında yaranan kontakt gərginliyinin təyini

Aşağı oturacağı ilə hündürlüyünün müəyyən hissəsinə qədər yuvaya geyindirilmiş səthlərarası həlqəvi kipləşdirici elementlə hermetikləşdirmə prosesinə baxaq (Şəkil 2.1.1) [9]. Səthlərarası həlqəvi kipləşdiricinin yuvadan çıxan hissəsi hamar səthə söykənərək kontakt gərginliyi yaradır. Həlqəvi kipləşdirici elementin eni onun digər ölçülərinə nisbətən çox kiçik olduğundan en boyu yaranan kontakt gərginliyin müntəzəm paylandığını, onun deformasiya vəziyyətini isə oxasimmetrik qəbul edək. Onda müstəvi kəsiklər hipotezini qəbul edərək həlqəvi kipləşdirici elementin yuvadan çıxan hissəsinin oxboyu deformasiyasını yalnız oxboyu yönəlmiş koordinatdan asılı götürmək olar.



Şəkil 2.1.1. Hesabat sxemi

Koordinat sisteminin başlanğıcını kipləşdiricinin en kəsiyinin mərkəzində götürək və r koordinat oxunu Şəkil 2.1.1-də göstərildiyi kimi radiusun artması istiqamətində yönəldək.

Baxılan halda yuxarıda qəbul edilən fərziyyələr daxilində kipləşdirici elementin oxboyu ω deformasiyası

$$\omega = f(z), \quad (2.1.1)$$

burada $f(z)$ - z -dən asılı naməlum funksiyadır. Kipləşdirici elementin materialını sıxılmayan qəbul etsək, (1.1.2) bərabərliyi ödənəcəkdir. (1.1.2)-də (2.1.1)

bərabərliyini nəzərə alıb, $\sigma_r \Big|_{r=R_k} = 0$ (burada σ_r - radial gərginlik, R_k -

kipləşdirici elementin xarici radiusudur) sərhəd şərti daxilində inteqrallasaq, radial istiqamətindəki yerdəyişmə üçün alarıq:

$$u = -\left(\frac{r}{2} + \frac{R_k^2}{2r}\right)f'(z). \quad (2.1.2)$$

Məsələnin oxasimmetrikliliyini nəzərə alaraq kipləşdirici elementin potensial enerjisi üçün yazı bilərik [7], [15], [47]:

$$\Pi = 4\pi G \int_0^h \int_{R_1}^{R_k} \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_{rz}^2 \right) r dr dz - \int_0^h P f'(z) dz, \quad (2.1.3)$$

burada h - kipləşdirici elementin çıxan hissəsinin hündürlüyü, R_1 - kipləşdiricinin daxili divarının radiusu, P - xarici oxboyu qüvvə, G - kipləşdirici elementin materialının sürüşmə moduludur.

(1.1.8) və (2.1.2) bərabərliklərini (2.1.3) ifadəsində nəzərə alsaq, aşağıdakı funksionalı alarıq:

$$\begin{aligned} \Pi = 4\pi G \int_0^h \left\{ \frac{(f'(z))^2}{2} \left[-\frac{R_k^4}{2(R_k^2 - R_1^2)} + \frac{3(R_k^2 - R_1^2)}{2} \right] + \right. \\ \left. + \frac{(f'(z))^2}{8} \left[\frac{R_k^4 - R_1^4}{4} + R_k^2(R_k^2 - R_1^2) + R_k^4 \ln \frac{R_k}{R_1} \right] - \frac{P}{4\pi G} f'(z) \right\} dz. \quad (2.1.4) \end{aligned}$$

Eyler tənliyinə əsasən [47], [59] (2.1.4) funksionalından alarıq:

$$\psi'' - \frac{2 \left[\frac{1}{1-\xi^2} - 3(1-\xi^2) \right]}{R_k^2 \left[\frac{1-\xi^4}{4} + (1-\xi^2) + \ln \frac{1}{\xi} \right]} \psi = P_0, \quad (2.1.5)$$

burada $f'(z) = \psi(z)$, $\xi = \frac{R_1}{R_k}$, $P_0 = \frac{P}{\pi G R_k^4 \left(\frac{1-\xi^4}{4} + 1 - \xi^2 - \ln \xi \right)}$.

$f'(z) = \psi(z)$ bərabərliyini nəzərə alaraq (2.1.5) tənliyini inteqrallasaq, alarıq:

$$f(z) = \frac{c_1}{k} \operatorname{sh} kz + \frac{c_2}{k} \operatorname{ch} kz - \frac{P_0 R_k^2 \left(\frac{1-\xi^4}{4} + 1 - \xi^2 - \ln \xi \right)}{2 \left[\frac{1}{1-\xi^2} - 3(1-\xi^2) \right]} z + c_3, \quad (2.1.6)$$

burada $k = \frac{1}{R_k} \sqrt{\frac{2 \left[\frac{1}{1-\xi^2} - 3(1-\xi^2) \right]}{\frac{1-\xi^4}{4} + 1 - \xi^2 - \ln \xi}}$, c_1 , c_2 və c_3 - inteqral sabitləridir. Bu sabitləri

tapmaq üçün aşağıdakı sərhəd şərtlərindən istifadə edək:

$$\omega \Big|_{z=0} = 0, \quad (2.1.7)$$

$$\tau_{rz} \Big|_{z=h} = \mu \sigma_z \Big|_{z=h}, \quad (2.1.8)$$

$$u \Big|_{z=0} = 0, \quad (2.1.9)$$

burada μ - kipləşirici ilə hamar səth arasındakı sürtünmə əmsalıdır.

Onda (2.1.6) bərabərliyində (2.1.7), (2.1.8) və (2.1.9) sərhəd şərtlərinə əsasən alarıq:

$$f(z) = \frac{B}{k} (\operatorname{ch} kz - 1) - \frac{P_0 R_k^2 \left(\frac{1-\xi^4}{4} + 1 - \xi^2 - \ln \xi \right)}{2 \left[\frac{1}{1-\xi^2} - 3(1-\xi^2) \right]} z, \quad (2.1.10)$$

$$B = \frac{\mu P_0 R_k^2 \left(\frac{1-\xi^4}{4} + 1 - \xi^2 - \ln \xi \right)}{\left[\frac{1}{1-\xi^2} - 3(1-\xi^2) \right] \left[2\mu \operatorname{sh} kh + \frac{k}{2} \left(r + \frac{R_k^2}{r} \right) \operatorname{ch} kh \right]}. \quad (2.1.11)$$

Kipləşdirici elementin kontakt səthində

$$f(z)\Big|_{z=h} = \Delta, \quad (2.1.12)$$

burada Δ - kipləşdirici elementin kontakt səthinin oxboyu yerdəyişməsidir.

(2.1.10) və (2.1.11) ifadələrini (2.1.12) tənliyində nəzərə alsaq, alarıq:

$$P = \frac{\pi G \Delta k R_k^2 (2\mu \operatorname{sh} kh + k R_k \operatorname{ch} kh) \left[\frac{1}{1 - \xi^2} - 3(1 - \xi^2) \right]}{\mu (\operatorname{ch} kh - 1) + \frac{kh}{2} (2\mu \operatorname{sh} kh + k R_k \operatorname{ch} kh)}. \quad (2.1.13)$$

(2.1.13) bərabərliyindən σ_k kontakt gərginliyi üçün alarıq:

$$\sigma_k = \frac{G k \Delta \left[\frac{1}{1 - \xi^2} - 3(1 - \xi^2) \right] (2\mu \operatorname{sh} kh - k R_k \operatorname{ch} kh)}{\left(1 - \frac{R_1^2}{R_k^2} \right) \left(\mu (\operatorname{ch} kh - 1) + \frac{kh}{2} (2\mu \operatorname{sh} kh + k R_k \operatorname{ch} kh) \right)}. \quad (2.1.14)$$

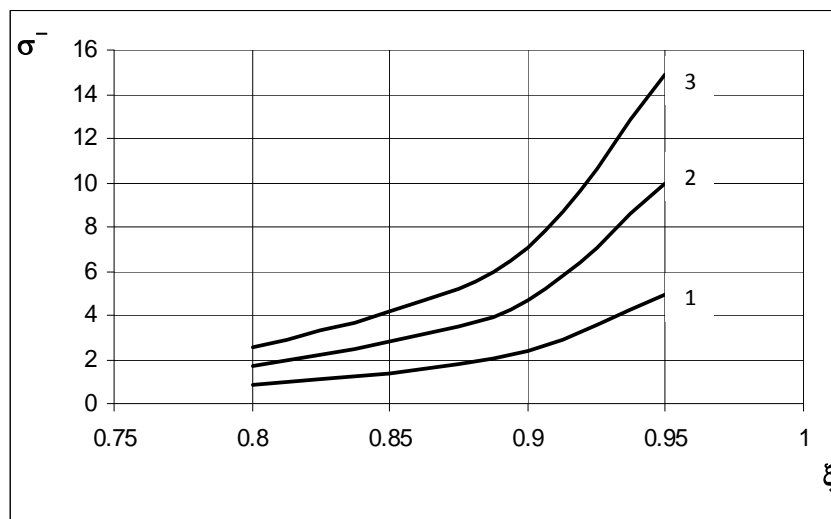
Beləliklə, alınmış (2.1.14) düsturu ilə kipləşdirici elementin kontakt gərginliyinin qiymətinin onun həndəsi ölçülərindən, fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərindən və oxboyu deformasiyadan asılılığı təyin edilir.

Kipləşdirici elementin parametrlərinin aşağıdakı qiymətlərinə görə (2.1.14) düsturu əsasında ədədi hesabat aparılmışdır:

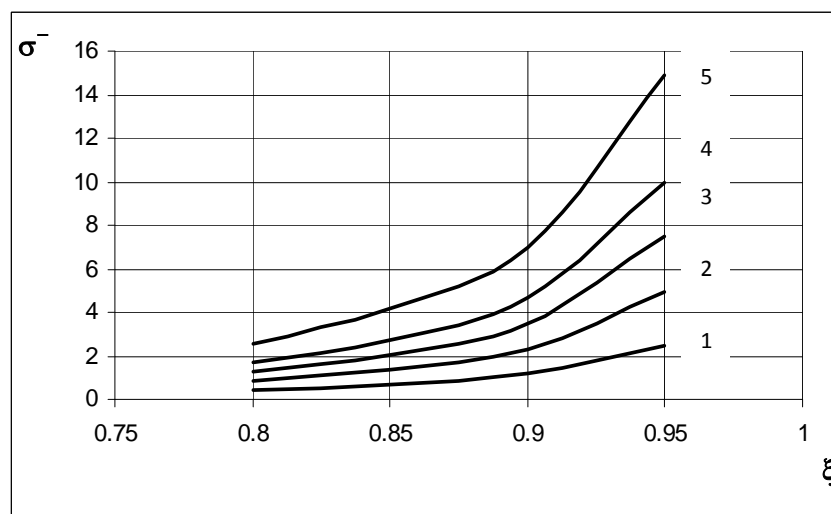
$$R_k = 5 \cdot 10^{-2} m, \Delta = 1, 2 \cdot 10^{-3} m, \mu = 0.07, \xi = 0.8 - 0.95, h = 1, 2, 5 \cdot 10^{-3} m.$$

Hesabatın nəticələri Qrafik 2.1.1, Qrafik 2.1.2, Qrafik 2.1.3-də təsvir edilmişdir. Ordinat oxu ilə $\bar{\sigma} = \frac{\sigma_k}{G}$ parametri ifadə edilmişdir.

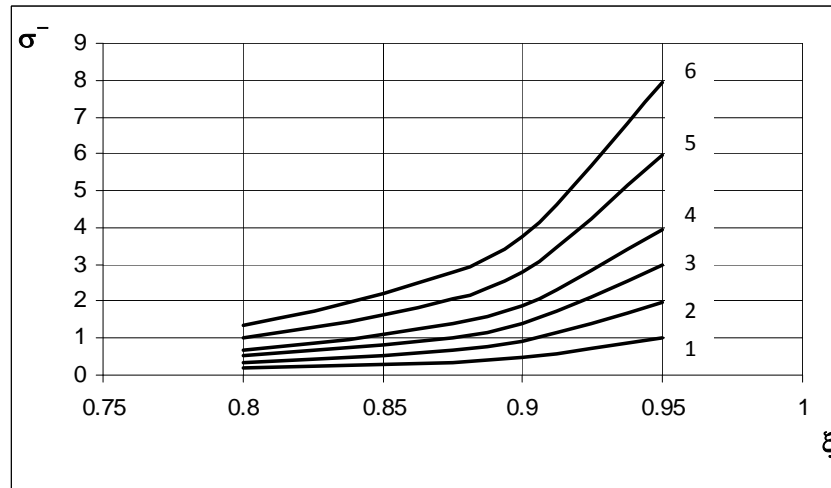
Qrafik 2.1.1, Qrafik 2.1.2 və Qrafik 2.1.3-dən görüldüyü kimi ξ - parametrinin qiyməti artdıqca kipləşdiricinin kontakt gərginliyi də artır, bununla belə $\xi = 0,87$ qiymətinə qədər artım xətti xarakter daşıyır, $\xi = 0,87$ qiymətindən başlayaraq isə $0,87 \leq \xi \leq 0,95$ intervalında artımın tempi sürətlənir.



Qrafik 2.1.1. h və Δ kəmiyyətlərinin müxtəlif qiymətlərində σ_k/G nisbətinin $\xi = R_1/R_k$ nisbətindən asılılıq qrafiki ($1-\Delta = 0.25 \cdot 10^{-3} m$,
 $2-\Delta = 0.5 \cdot 10^{-3} m$, $3-\Delta = 0.75 \cdot 10^{-3} m$, $h = 10^{-3} m$)



Qrafik 2.1.2. h və Δ kəmiyyətlərinin müxtəlif qiymətlərində σ_k/G nisbətinin $\xi = R_1/R_k$ nisbətindən asılılıq qrafiki ($1-\Delta = 0,25 \cdot 10^{-3} m$, $2-\Delta = 0,5 \cdot 10^{-3} m$,
 $3-\Delta = 0,75 \cdot 10^{-3} m$, $4-\Delta = 10^{-3} mm$, $5-\Delta = 1,5 \cdot 10^{-3} m$, $h = 2 \cdot 10^{-3} m$)



Qrafik 2.1.3. h və Δ kəmiyyətlərinin müxtəlif qiymətlərində σ_k/G nisbətinin

$\xi = R_1/R_k$ nisbətindən asılılıq qrafiki ($1-\Delta = 0,25 \cdot 10^{-3} m$, $2-\Delta = 0,5 \cdot 10^{-3} m$,

$3-\Delta = 0,75 \cdot 10^{-3} m$, $4-\Delta = 10^{-3} mm$, $5-\Delta = 1,5 \cdot 10^{-3} m$, $6-\Delta = 2 \cdot 10^{-3} m$, $h = 5 \cdot 10^{-3} m$)

2.2. Həlqəvi kipləşdirici ilə hamar səth arasında yaranan kontakt gərginliyinə irsiliyin təsirinin təyini

Bu paragraf həlqəvi kipləşdirici elementin xətti iris-elastiki modeli qurularaq kontakt gərginliyinin relaksasiya prosesinin analizinə həsr edilmişdir. Həlqəvi kipləşdirici elementin irsi-elastiki xüsusiyyətinin onun hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsiri öyrənilir. Həlqəvi kipləşdirici elementin iki müxtəlif yüklənmə halında – ani və tədricən yüklənmə halında deformasiya-gərginlik vəziyyəti təyin edilmişdir.

Materialının irsiliyi nəzərə alınmaqla aşağı oturacağı ilə hündürlüyünün müəyyən hissəsinə qədər yuvaya geyindirilmiş səthlərarası həlqəvi kipləşdirici elementlə hermetikləşdirmə prosesinə baxaq (Şəkil 2.1.1). Səthlərarası həlqəvi kipləşdiricinin yuvadan çıxan hissəsi hamar səthə söykənərək kontakt gərginliyi yaradır. Kipləşdirici elementin materialı elastiki qəbul edildiyi halda bu məsələnin həlli §2.1-də verilmişdir.

Kipləşdirici elementin materialının irsi xüsusiyyətə malik olduğunu qəbul edək və kipləşdiricinin ani yüklənmə halına baxaq. Onda kipləşdiricinin deformasiyalanma prosesini kvazistatik qəbul edərək məsələni elastiki analogiya metodu ilə həll etmək olar [55], [59], [68], [82], [84], [91], [135]. Kipləşdirici elementin eninə kəsik müstəvisinin oxboyu deformasiyasını aşağıdakı kimi qəbul edək:

$$\begin{aligned}\varepsilon(z, t) &= \varepsilon(\bar{z}) \cdot \varepsilon(t), \\ \varepsilon(t) &= w(t) = 1.\end{aligned}\quad (2.2.1)$$

(1.2.22) düsturunda (2.2.1) ifadəsini yerinə yazıb inteqrallasaq, kipləşdirici elementin materialının sürüşmə modulu üçün alarıq:

$$\bar{G} = G \left[\left(1 - \frac{\nu}{\lambda} \right) e^{-\lambda t} + \frac{\nu}{\lambda} \right]. \quad (2.2.2)$$

(2.1.13) ifadəsində (2.2.2) bərabərliyini nəzərə alsaq, hermetikliyi yaradan oxboyu qüvvə üçün alarıq:

$$P = \pi G \Delta k R_k^2 \left[\left(1 - \frac{\nu}{\lambda} \right) e^{-\lambda t} + \frac{\nu}{\lambda} \right] \frac{(2\mu \operatorname{sh}(kh) + k R_k \operatorname{ch}(kh)) \left[\frac{1}{1 - \xi^2} - 3(1 - \xi^2) \right]}{\mu(\operatorname{ch}(kh) - 1) + \frac{kh}{2}(2\mu \operatorname{sh}(kh) + k R_k \operatorname{ch}(kh))}. \quad (2.2.3)$$

(2.2.2) bərabərliyini (2.1.14) ifadəsində yerinə yazsaq, kontakt gərginliyi üçün alarıq:

$$\sigma_k = \frac{G k \Delta \left[\left(1 - \frac{\nu}{\lambda} \right) e^{-\lambda t} + \frac{\nu}{\lambda} \right] \left[\frac{1}{1 - \xi^2} - 3(1 - \xi^2) \right] (2\mu \operatorname{sh} kh - k R_k \operatorname{ch} kh)}{\left(1 - \frac{R_1^2}{R_k^2} \right) \left(\mu(\operatorname{ch} kh - 1) + \frac{kh}{2}(2\mu \operatorname{sh} kh + k R_k \operatorname{ch} kh) \right)}. \quad (2.2.4)$$

İndi isə fərz edək ki, müəyyən T zamanına qədər kipləşdirici element sabit sürətlə deformasiya olunur, sonra isə stabil qalır.

Elastiki analogiya [59], [101], [135] metoduna əsasən kipləşdiricinin en kəsik müstəvisinin oxboyu deformasiyasını aşağıdakı kimi qəbul edə bilərik (Qrafik 1.3.1):

$$\varepsilon(z, t) = \varepsilon(\bar{z}) \cdot \varepsilon(t), \quad (2.2.5)$$

$$\varepsilon(t) = w(t) = \frac{t}{T} [H(t) - H(t - T)] + H(t - T), \quad (2.2.6)$$

burada $H(t)$ - Hevisayd funksiyası, T - kipləşdirici elementin yuvadan kənarında qalan hissəsinin deformasiyalanma müddətidir.

(1.2.22) və (2.2.6) ifadələrindən alarıq:

$$\begin{aligned} \bar{G} = G \left\{ e^{-\lambda t} + \int_0^t \left[\frac{1}{T} (H(\xi) - H(\xi - T)) + \frac{\xi}{T} (\delta(\xi) - \delta(\xi - T)) + \delta(\xi - T) + \right. \right. \\ \left. \left. + \nu \left(\frac{\xi}{T} (H(\xi) - H(\xi - T)) + H(\xi - T) \right) \right] e^{-\lambda(t-\xi)} d\xi \right\}, \quad (2.2.7) \end{aligned}$$

burada $\delta(t)$ - Dirak funksiyasıdır.

(2.2.7) ifadəsini inteqrallasaq, kipləşdirici elementin materialının sürüşmə modulu üçün alarıq:

$$\begin{aligned} \bar{G}(t, T) = G \left\{ e^{-\lambda t} + \left[((\nu - \lambda)(1 - e^{-\lambda(t-T)}) - \nu \lambda(t - T)) H(t - T) - \right. \right. \\ \left. \left. - ((\nu - \lambda)(1 - e^{-\lambda t}) - \nu \lambda t) H(t) \right] \right\}. \quad (2.2.8) \end{aligned}$$

Onda (2.2.8) düsturunu (2.1.13) ifadəsində yerinə yazsaq, hermetiklik yaradan oxboyu qüvvənin qiyməti üçün alarıq:

$$\begin{aligned} P = \pi G \Delta k R_k^2 \left\{ e^{-\lambda t} + \left[((\nu - \lambda)(1 - e^{-\lambda(t-T)}) - \nu \lambda(t - T)) H(t - T) - \right. \right. \\ \left. \left. - ((\nu - \lambda)(1 - e^{-\lambda t}) - \nu \lambda t) H(t) \right] \right\} \frac{(2\mu \operatorname{sh} kh + k R_k \operatorname{ch} kh) \left[\frac{1}{1 - \xi^2} - 3(1 - \xi^2) \right]}{\mu(\operatorname{ch} kh - 1) + \frac{kh}{2}(2\mu \operatorname{sh} kh + k R_k \operatorname{ch} kh)}. \quad (2.2.9) \end{aligned}$$

(2.1.14) və (2.2.8) bərabərliklərindən σ_k kontakt gərginliyi üçün alarıq:

$$\begin{aligned} \sigma_k = G k \Delta \left\{ e^{-\lambda t} + \left[((\nu - \lambda)(1 - e^{-\lambda(t-T)}) - \nu \lambda(t - T)) H(t - T) - \right. \right. \\ \left. \left. - ((\nu - \lambda)(1 - e^{-\lambda t}) - \nu \lambda t) H(t) \right] \right\} \frac{\left[\frac{1}{1 - \xi^2} - 3(1 - \xi^2) \right] (2\mu \operatorname{sh} kh - k R_k \operatorname{ch} kh)}{\left(1 - \frac{R_1^2}{R_k^2} \right) \left(\mu(\operatorname{ch} kh - 1) + \frac{kh}{2}(2\mu \operatorname{sh} kh + k R_k \operatorname{ch} kh) \right)}. \quad (2.2.10) \end{aligned}$$

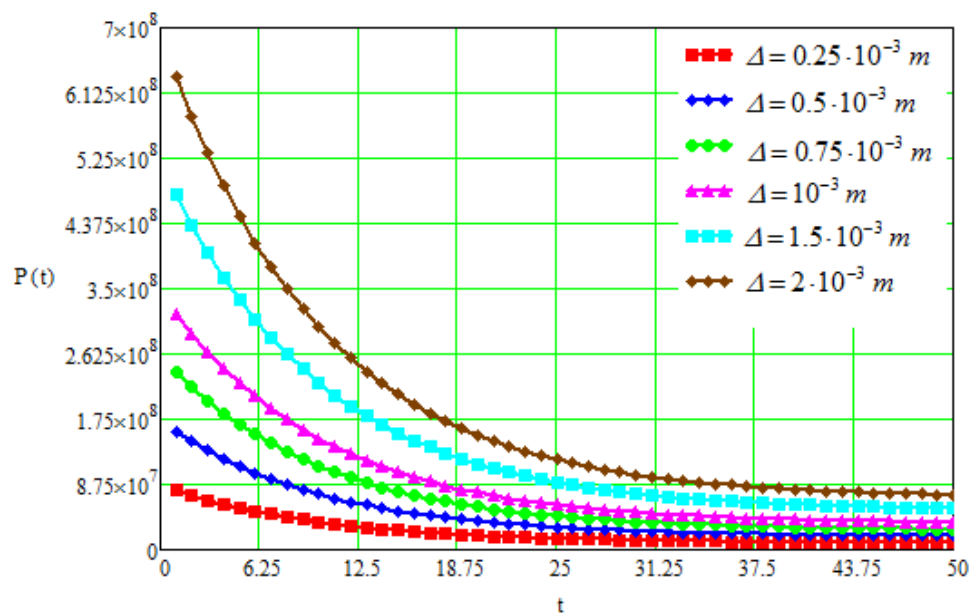
Parametrlərin aşağıdakı qiymətlərində (2.2.3), (2.2.4), (2.2.9) və (2.2.10) düsturlarına əsasən ədədi hesablar aparılmışdır:

$$R_k = 5 \cdot 10^{-2} m, \Delta = 0.25 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-3} m, \mu = 0.5, \xi = 0.8 - 0.95, h = 1, 2, 5 \cdot 10^{-3} m$$

$$G = 1.3 \cdot 10^8 Pa, \nu = 0.01, \lambda = 0.1, T = 10, 20, 30, 40, 50, 60 san.$$

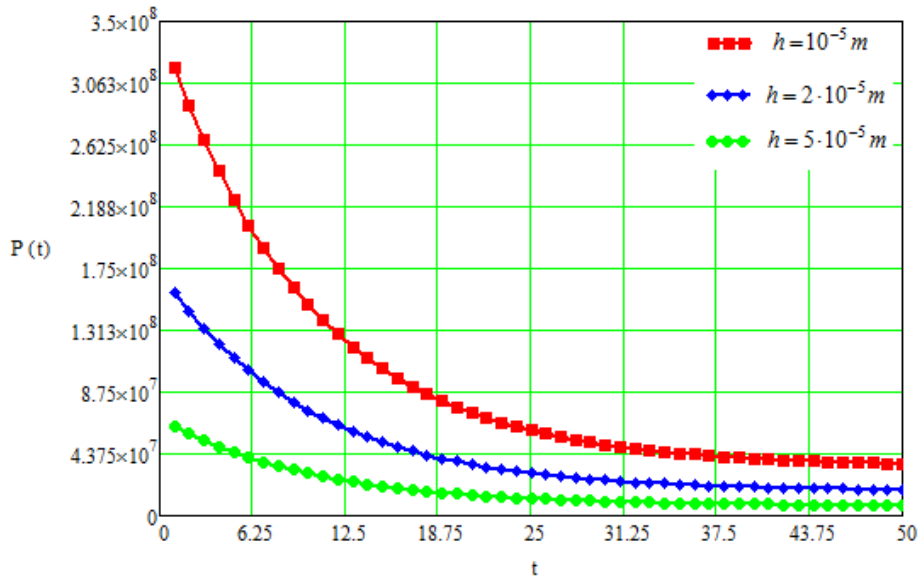
Ədədi hesabın nəticələri Qrafik 2.2.1-2.2.8-də verilmişdir.

Qrafik 2.2.1-2.2.3-də ani yüklənmə halında irsilik nəzərə alınmaqla Δ , h , ξ parametrlərinin müxtəlif qiymətlərində qüvvə-zaman asılılığı verilmişdir.



Qrafik 2.2.1. Kipləşdiricinin kontakt səthinin oxboyu yerdəyişməsinin müxtəlif qiymətlərində qüvvə-zaman asılılığı ($h = 10^{-5} m$, $\xi = 0.8$)

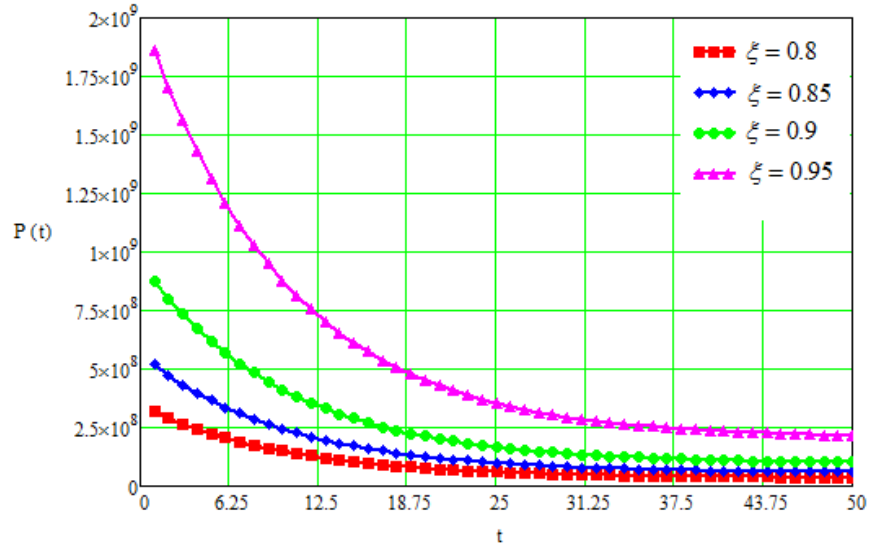
Qrafik 2.2.1 kipləşdirici elementin kontakt səthinin oxboyu yerdəyişməsinin müxtəlif qiymətlərində oxboyu qüvvə-zaman asılılığını əks etdirir. Qrafik 2.2.1-dən görüldüyü kimi Δ -ın hər bir qiymətində oxboyu qüvvənin qiyməti azalan sürətlə kiçilir. Oxboyu yerdəyişmənin qiyməti artdıqca oxboyu qüvvənin qiyməti və onun relaksasiya sürəti böyüyür.



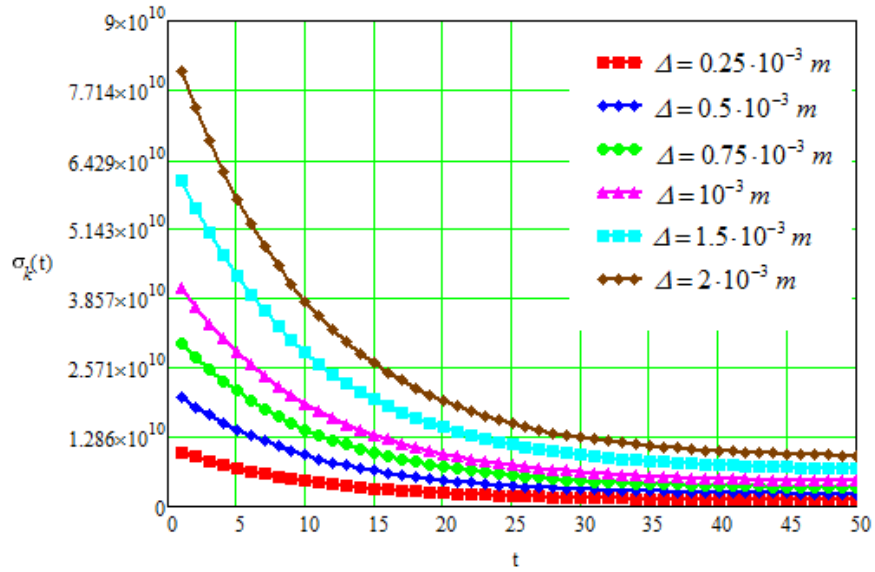
Qrafik 2.2.2. Kipləşdiricinin yuvadan çıxan hissəsinin hündürlüyünün müxtəlif qiymətlərində qüvvə-zaman asılılığı ($\Delta = 10^{-3} m$, $\xi = 0.8$)

Qrafik 2.2.2-də həlqəvi kipləşdirici elementin yuvadan çıxan hissəsinin hündürlüyünün müxtəlif qiymətlərində oxboyu qüvvənin relaksasiyasını göstərir. Kipləşdirilən səthlər arasında hermetiklik yaradan oxboyu qüvvə zaman keçdikcə relaksasiya edir və xarici qüvvənin tətbiq olunduğu nöqtədə onun qiyməti 30 saniyəyə qədər azalır, sonra isə stabilləşir. Kipləşdirici elementin yuvadan çıxan sərbəst hissəsinin hündürlüyü artıqca hermetiklik yaradan qüvvənin qiyməti və onun relaksasiya sürəti azalır (Qrafik 2.2.2).

Qrafik 2.2.3-dən görüldüyü kimi kipləşdirilən səthlər arasında hermetiklik yaradan oxboyu qüvvənin tətbiq olunduğunöqtədəki qiyməti zaman keçdikcə azalan sürətlə relaksasiya edir. Kipləşdirici elementin xarici və daxili radiusları nisbəti artdıqca hermetiklik yaradan oxboyu qüvvənin qiyməti və onun relaksasiya sürəti artır.

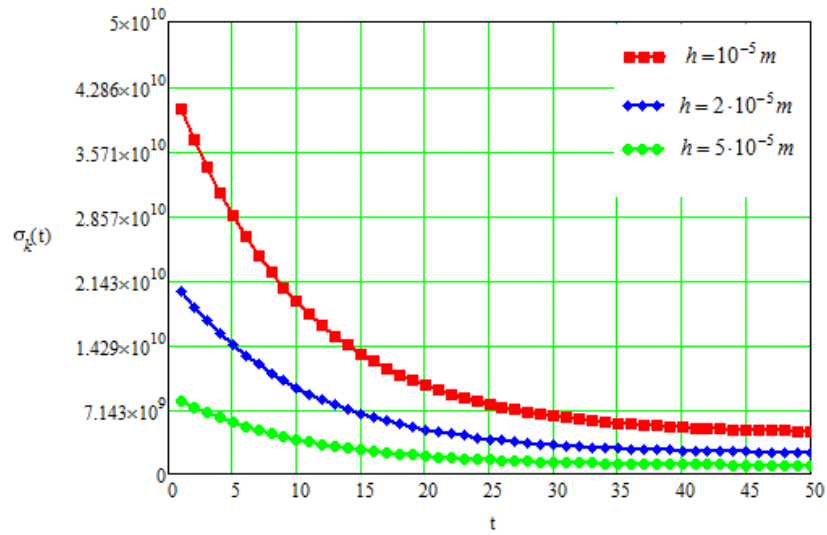


Qrafik 2.2.3. Kipləşdirici elementin xarici və daxili radiusları nisbətinin müxtəlif qiymətlərində qüvvə-zaman asılılığı ($h = 10^{-5} m$, $\Delta = 10^{-3} m$)

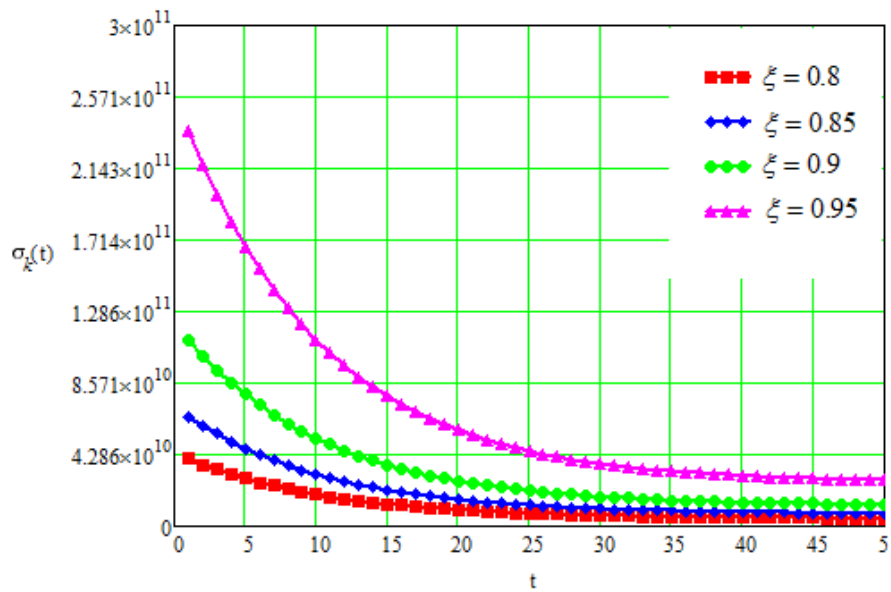


Qrafik 2.2.4. Kipləşdirici elementin kontakt səthinin oxboyu yerdəyişməsinin müxtəlif qiymətlərində gərginliyin relaksasiya əyrisi ($h = 10^{-5} m$, $\xi = 0.8$)

Qrafik 2.2.4-2.2.6-da Δ , h , ξ parametrlərinin müxtəlif qiymətlərində ani yüklənmə halında kontakt gərginliyinin relaksasiya əyriləri verilmişdir. Qrafiklərdən görüldüyü kimi zaman keçdikcə kontakt gərginliyi azalan sürətlə relaksasiya edir.

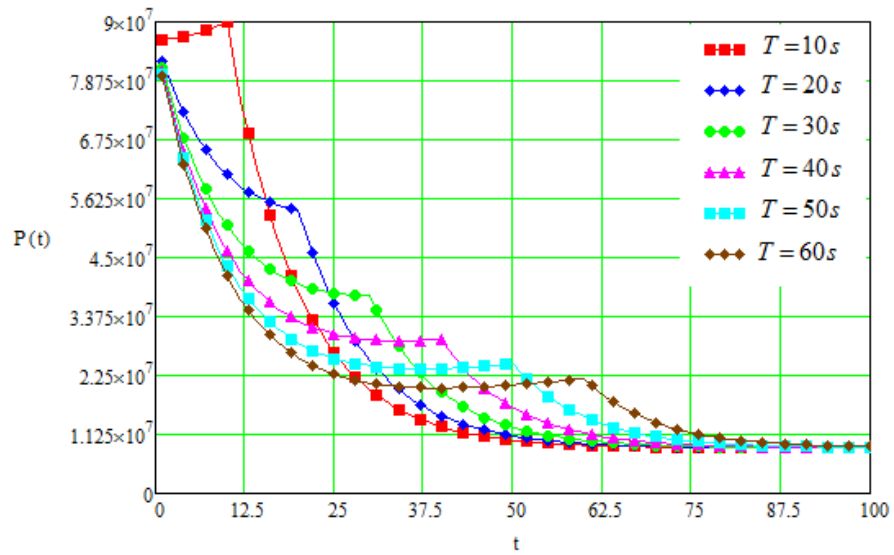


Qrafik 2.2.5. Kipləşdiricinin yuvadan çıxan hissəsinin hündürlüyünün müxtəlif qiymətlərində gərginliyin relaksasiya əyrisi ($\Delta = 10^{-3} m$, $\xi = 0.8$)

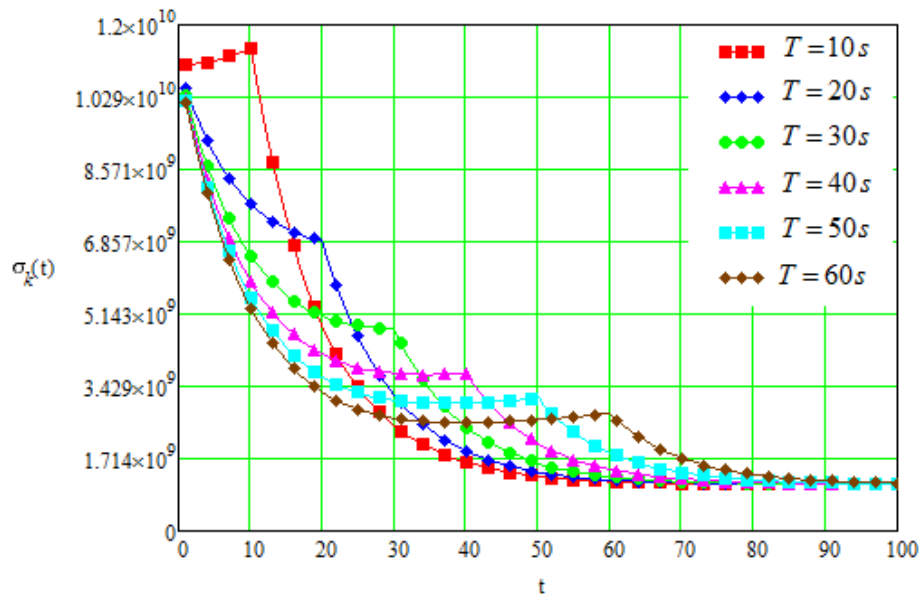


Qrafik 2.2.6. Kipləşdirici elementin xarici və daxili radiusları nisbətinin müxtəlif qiymətlərində gərginliyin relaksasiya əyrisi ($h = 10^{-5} m$, $\Delta = 10^{-3} m$)

Kontakt gərginliyin qiyməti və onun relaksasiya sürəti Δ oxboyu yerdəyişmənin qiyməti artdıqca artır (Qrafik 2.2.4), h və ξ parametrlərinin qiyməti artıqca isə azalır (Qrafik 2.2.5, Qrafik 2.2.6).



Qrafik 2.2.7. Kipləşdirici elementin tədricən yüklənmə halında qüvvə-zaman asılılığı ($h = 10^{-5} m$, $\xi = 0.95$, $\Delta = 0.25 \cdot 10^{-3} m$)



Qrafik 2.2.4. Kipləşdirici elementin tədricən yüklənmə halında gərginliyin relaksasiya əyrisi ($h = 10^{-5} m$, $\xi = 0.8$, $\Delta = 0.25 \cdot 10^{-3} m$)

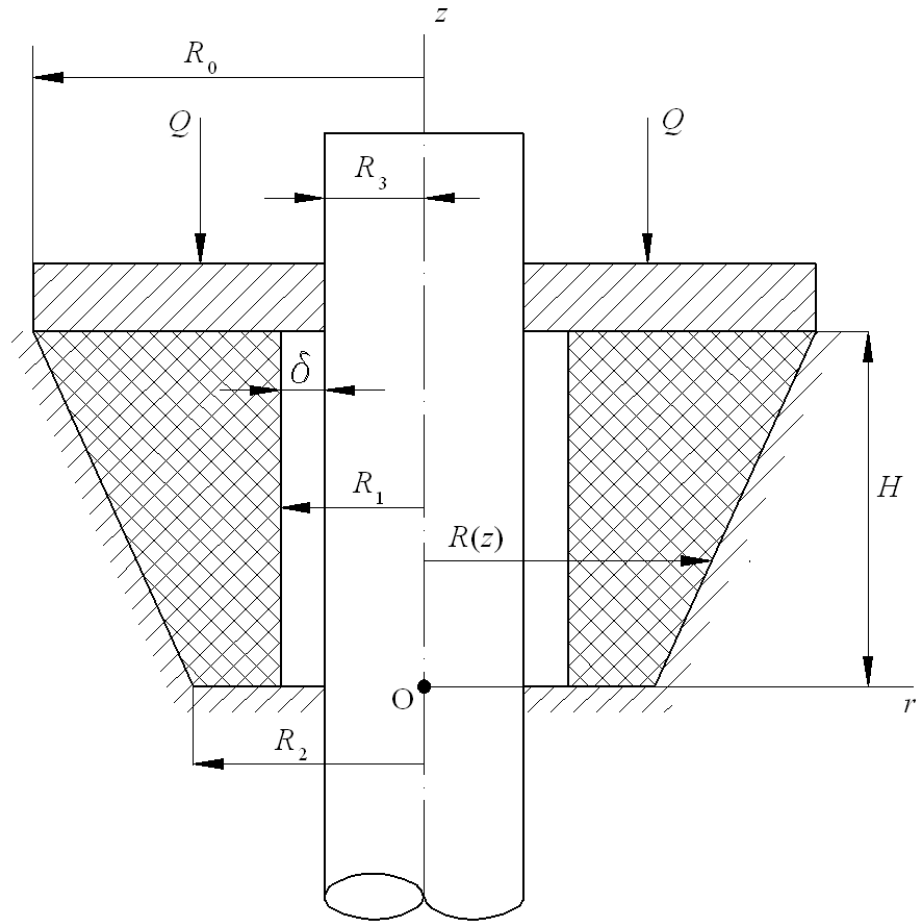
Qrafik 2.2.7 və Qrafik 2.2.8 tədricən yüklənmə halında kipləşdirici elementin relaksasiya prosesini əks etdirir. Bu zaman kipləşdirici elementin deformasiyalanma tempi dəyişdikcə gərginliyin relaksasiya sürəti dəyişir (Qrafik 2.2.7, Qrafik 2.2.8).

Beləliklə aparılmış tədqiqat işi göstərir ki, kipləşdirici elementin materialının irsilik xüsusiyyəti onun hermetikləşdirmə qabiliyyətinə böyük təsir göstərir və onun nəzərə alınmaması yanlış nəticələrə gətirib çıxarar. Kipləşdirici elementin materialının irsiliyinin təsirindən xarici oxboyu qüvvənin qiyməti bəzi hallarda yeddi dəfəyə qədər azalır.

2.3. Konik formalı kipləşdirici elementlərlə kipləşdirmə prosesinin riyazi modelləşdirilməsi

Bir sıra hallarda silindrik səthin hermetikləşdirilməsini kəsik konus formalı kipləşdirici elementlərlə yerinə yetirmək lazım olur (Şəkil 2.3.1) [94]. Kipləşdirilən silindrin və birləşdirici halqanın xarici diametrlərinin fərqli olduğu hallarda konik formalı kipləşdirici elementlərdən istifadə edilir ki, bu da kipləşdiricinin daxili səthi ilə silindrin kipləşdirilən divarı arasındakı boşluğun artmasına gətirib çıxarır. Bu isə öz növbəsində silindrin səthinin hermetikliyinin əldə edilməsi prosesinin mürəkkəbləşməsinə səbəb olur. Silindrin kipləşdirilən divarında daha az oxboyu sıxıcı qüvvə ilə hermetikliyin əldə edilməsi və kipləşdiricinin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin yaxşılaşdırılması üçün kipləşdirici element kəsik konus formasında hazırlanır. Hermetikləşdirmə prosesi zamanı oxboyu yükün təsiri altında konik formalı kipləşdirici element gövdəyə nəzərən xarici səthi boyunca sürüşür, daxilə doğru daralır və beləliklə daxili diametrini kiçildir. Bu kipləşdirici elementin daxili silindrik səthinin daha müntəzəm deformasiyalanmasına gətirib çıxarır ki, bu da silindrin divarı ilə kipləşdiricinin daxili səthi arasında yaranan kontakt gərginliyin paylanma xarakterinə güclü təsir göstərir. Beləliklə, kəsik konus formalı kipləşdirici elementlərlə hermetikləşdirmə prosesinin tədqiqi və öyrənilməsi, bu əsasdan onun

hermetikləşdirmə qabiliyyətinin yaxşılaşdırılması üçün effektiv tədbirlərin işlənməsi həm elmi, həm də praktiki əhəmiyyət kəsb edir.



Şəkil 2.3.1. Hesabat sxemi

Konik şəkilli xarici səthi divara otuzdurulmuş, daxili səthi ilə isə silindrin xarici səthinə δ ara məsafəsiylə geyindirilmiş kipləşdirici elementlə hermetikləşdirmə prosesinə baxaq (Şək.2.3.1). Kipləşdiricinin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında hermetikliyə kipləşdirici elementin birtərəfli oxboyu sıxılması ilə nail olunur. Məsələnin həllini iki mərhələyə bölək. Birinci mərhələdə kipləşdirici elementin daxili səthinin kipləşdirilən silindrin divarına toxunana qədər sıxılması məsələsinə, ikinci mərhələdə isə bu iki səth arasında hermetikliyin yaradılması məsələsinə baxaq.

Kipləşdirici elementin materialı bircins olduğundan onun deformasiyasını oxasimetrik götürmək olar. Onda müstəvi kəsiklər fərziyyəsini qəbul etmək və kipləşdirici elementin en kəsik sahələrinin oxboyu deformasiyasını yalnız z koordinatından asılı götürmək olar.

Koordinat sisteminin başlanğıcını Şəkil 2.3.1-də göstəriləyi kimi kipləşdirici elementin aşağı oturacaq müstəvisinin mərkəzində yerləşdirək, z koordinat oxunu şaquli olaraq yuxarı, r oxunu isə radiusun böyüməsi istiqamətində yönəldək.

Yuxarıda qəbul edilmiş fərziyyəyə əsasən kipləşdiricinin en kəsik sahələrinin w oxboyu deformasiyası üçün yaza bilərik:

$$w_1 = f_1(z), \quad (2.3.1)$$

burada $f_1(z)$ – z -dən asılı axtarılan naməlum funksiyadır [7], [9], [59].

Kipləşdirici elementin materialını sıxılmayan qəbul edək. Onda (1.1.2) bərabərliyi ödənəcəkdir. (2.3.1) ifadəsini (1.1.2) sıxılmazlıq şərtində yerinə yazıb, alınmış ifadəni $u|_{r=R(z)} = 0$ sərhəd şərti daxilində inteqrallasaq, alarıq:

$$u_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{R^2(z)}{r} - r \right) f_1'(z). \quad (2.3.2)$$

Kipləşdirici elementin oxboyu qüvvənin təsirində deformasiyasından sonra onun deformasiya vəziyyətinin oxasimetrikliyi şərtini nəzərə almaqla potensial enerjisi üçün yazarıq [59]:

$$\Pi = 4\pi G \int_0^H \int_{R_1}^{R(z)} \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{rz}^2 \right) r dr dz - \int_0^H Q \cdot f_1'(z) dz, \quad (2.3.3)$$

burada H – kipləşdirici elementin hündürlüyü, R_1 , $R(z)$ – uyğun olaraq daxili və xarici radiusları, Q - kipləşdirici elementin daxili səthini silindrin divarına ilk toxunmasına qədər sıxılması üçün lazım olan oxboyu qüvvə, ε_r , ε_θ , ε_z və γ_{rz} – uyğun olaraq (1.1.8) düsturları ilə ifadə olunan radial, tangensial, oxboyu və sürüşmə nisbi deformasiyalarıdır [47], [59].

Onda (1.1.8), (2.3.1) və (2.3.2) ifadələrini (2.3.3) ifadəsində nəzərə alsaq, alarıq:

$$\begin{aligned} \Pi = 2\pi G \int_0^H & \left\{ \left(\frac{1}{16} R^4(z) \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{3}{64} R^4(z) + \frac{1}{16} R_1^2 R^2(z) - \frac{1}{64} R_1^4 \right) f''^2(z) + \right. \\ & + \left(\frac{1}{4} R^3(z) \operatorname{tg} \alpha \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{1}{8} R^3(z) \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{8} R_1^2 R(z) \operatorname{tg} \alpha \right) f''(z) f'(z) + \left(\frac{11}{8} R^2(z) + \frac{1}{8} \frac{R^4(z)}{R_1^2} + \right. \\ & \left. \left. + R^2(z) \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{3}{2} R_1^2 \right) f'^2(z) \right\} dz - \int_0^H Q \cdot f'(z) dz, \quad (2.3.4) \end{aligned}$$

burada G – kipləşdirici elementin materialının sürüşmə moduludur.

Eyler tənliyinə [9], [15] əsasən (2.3.4) funksionalından alarıq:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4} R^4(z) \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{3}{16} R^4(z) + \frac{1}{4} R_1^2 R^2(z) - \frac{1}{16} R_1^4 \right) \varphi''(z) + \left(\frac{1}{2} R^3(z) \ln \frac{R(z)}{R_1} \operatorname{tg} \alpha - \right. \\ & - \frac{1}{4} R^3(z) \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{4} R_1^2 R(z) \operatorname{tg} \alpha \left. \right) \varphi'(z) + \left(-\frac{5}{4} R^2(z) \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{22 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{8} R^2(z) + \right. \\ & \left. + \frac{24 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{8} R_1^2 - \frac{1}{4} \frac{R^4(z)}{R_1^2} \right) \varphi(z) + \frac{1}{2} q (R_0^2 - R_1^2) = 0, \quad (2.3.5) \end{aligned}$$

burada $\varphi_1(z) = f_1'(z)$, $q = \frac{Q}{\pi G (R_0^2 - R_1^2)}$.

Sərhəd şərtləri olacaqdır:

$$\mu Q \Big|_{z=H} = 2\pi G \int_{R_1}^{R_0} \gamma_{zr} r dr, \quad (2.3.6)$$

$$w_1 \Big|_{z=0} = 0, \quad (2.3.7)$$

$$u_1(r, z) \Big|_{z=0}^{r=R_1} = -\delta, \quad (2.3.8)$$

burada μ – metal lövhəciclə kipləşdiricinin yuxarı oturacağı arasındakı sürtünmə əmsəlidir.

Alınmış (2.3.5) tənliyi dəyişən əmsalli diferensial tənlikdir. Bu diferensial tənliyi Rits metodu ilə həll edək. Bunun üçün (2.3.5) diferensial tənliyinin (2.3.7) sərhəd şərtini ödəyən həllini aşağıdakı formada seçək:

$$f_1(z) = c_1 \frac{z}{H} + c_2 \left(\frac{z}{H}\right)^2 + c_3 \left(\frac{z}{H}\right)^3, \quad (2.3.9)$$

burada c_1, c_2, c_3 inteqral sabitləridir.

c_1 sabiti (2.3.8) sərhəd şərtindən təyin edilir:

$$c_1 = -\frac{2\delta H R_1}{R_2^2 - R_1^2}. \quad (2.3.10)$$

(2.3.9) ifadəsini (2.3.5) tənliyində yerinə yazaraq və bundan sonra növbə ilə $\left(\frac{z}{H}\right)^2$ və $\left(\frac{z}{H}\right)^3$ hədlərinə vurub, alınmış ifadələri 0-dan H -a kimi inteqrallayaq. Onda c_2 və

c_3 sabitlərinə görə cəbri tənliklər sistemi alarıq:

$$\begin{cases} A_1 \cdot c_1 + A_2 \cdot c_2 + A_3 \cdot c_3 + \frac{H}{6}(R_0^2 - R_1^2) \cdot q = 0 \\ B_1 \cdot c_1 + B_2 \cdot c_2 + B_3 \cdot c_3 + \frac{H}{8}(R_0^2 - R_1^2) \cdot q = 0 \end{cases}, \quad (2.3.11)$$

burada

$$A_1 = \frac{1}{H} \int_0^H \left(R^2(z) \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{R^4(z)}{R_1^2} - \frac{4 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R^2(z) + \frac{6 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R_1^2 \right) \left(\frac{z}{H}\right)^2 dz,$$

$$A_2 = \int_0^H \left(\frac{2}{H^2} \left(2R^3(z) \ln \frac{R(z)}{R_1} \operatorname{tg} \alpha - R^3(z) \operatorname{tg} \alpha + R_1^2 R(z) \operatorname{tg} \alpha \right) \left(\frac{z}{H}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{2}{H} \left(R^2(z) \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{R^4(z)}{R_1^2} - \frac{4 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R^2(z) + \frac{6 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R_1^2 \right) \left(\frac{z}{H}\right)^3 \right) dz,$$

$$A_3 = \int_0^H \left(\frac{6}{H^3} \left(\frac{1}{4} R^4(z) \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{3}{16} R^4(z) + \frac{1}{4} R_1^2 R^2(z) - \frac{1}{16} R_1^4 \right) \left(\frac{z}{H}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{3}{H^2} \left(2R^3(z) \ln \frac{R(z)}{R_1} \operatorname{tg} \alpha - R^3(z) \operatorname{tg} \alpha + R_1^2 R(z) \operatorname{tg} \alpha \right) \left(\frac{z}{H}\right)^3 + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{3}{H} \left(R^2(z) \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{R^4(z)}{R_1^2} - \frac{4 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R^2(z) + \frac{6 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R_1^2 \right) \left(\frac{z}{H} \right)^4 dz, \\
B_1 &= \frac{1}{H} \int_0^H \left(R^2(z) \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{R^4(z)}{R_1^2} - \frac{4 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R^2(z) + \frac{6 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R_1^2 \right) \left(\frac{z}{H} \right)^3 dz, \\
B_2 &= \int_0^H \left(\frac{2}{H^2} \left(2R^3(z) \ln \frac{R(z)}{R_1} \operatorname{tg} \alpha - R^3(z) \operatorname{tg} \alpha + R_1^2 R(z) \operatorname{tg} \alpha \right) \left(\frac{z}{H} \right)^3 + \right. \\
& + \frac{2}{H} \left(R^2(z) \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{R^4(z)}{R_1^2} - \frac{4 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R^2(z) + \frac{6 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R_1^2 \right) \left(\frac{z}{H} \right)^4 \left. \right) dz, \\
B_3 &= \int_0^H \left(\frac{6}{H^3} \left(\frac{1}{4} R^4(z) \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{3}{16} R^4(z) + \frac{1}{4} R_1^2 R^2(z) - \frac{1}{16} R_1^4 \right) \left(\frac{z}{H} \right)^3 + \right. \\
& + \frac{3}{H^2} \left(2R^3(z) \ln \frac{R(z)}{R_1} \operatorname{tg} \alpha - R^3(z) \operatorname{tg} \alpha + R_1^2 R(z) \operatorname{tg} \alpha \right) \left(\frac{z}{H} \right)^4 + \\
& \left. + \frac{3}{H} \left(R^2(z) \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_1} - \frac{R^4(z)}{R_1^2} - \frac{4 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R^2(z) + \frac{6 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} R_1^2 \right) \left(\frac{z}{H} \right)^5 \right) dz.
\end{aligned}$$

(2.3.11) cəbri tənliklər sistemini c_2 və c_3 -ə nəzərən həll edək:

$$c_2 = \frac{2\delta H R_1}{R_2^2 - R_1^2} \frac{A_1}{A_2} - \frac{H}{6A_2} (R_0^2 - R_1^2) \cdot q - \frac{A_3}{A_2} \cdot c_3, \quad (2.3.12)$$

$$c_3 = \left(\frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{A_2 B_3 - A_3 B_2} \right) \frac{2\delta H R_1}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{H}{2} \left(\frac{\frac{1}{4} A_2 - \frac{1}{3} B_2}{A_2 B_3 - A_3 B_2} \right) (R_0^2 - R_1^2) \cdot q. \quad (2.3.13)$$

Kipləşdirici elementin ixtiyari nöqtəsində radial gərginliyi (1.1.14) ifadəsi ilə hesablanır. s hidrostatik gərginlik funksiyası aşağıdakı sərhəd şərtindən tapılır:

$$\sigma_r \Big|_{r=R_1(z)} = 0, \quad (2.3.14)$$

burada $R_1(z) = R_1 + u_1(r, z) \Big|_{r=R_1}$.

Onda (1.1.14) və (2.3.2) ifadələrini nəzərə almaqla (2.3.14) şərtindən alarıq:

$$s = \left(\frac{R^2(z)}{R_1^2(z)} + 1 \right) f_1'(z). \quad (2.3.15)$$

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin xarici divarına ilk toxunmasına qədər sıxılması üçün lazım olan Q oxboyu qüvvəsinin qiyməti aşağıdakı düsturla hesablanı bilər:

$$\pi(R_0^2 - R_1^2)\sigma_z \Big|_{z=H} = Q. \quad (2.3.16)$$

burada R_0 - kipləşdirici elementin yuxarı oturacağıının xarici radiusudur.

Digər tərəfdən isə kipləşdirici elementin ixtiyari nöqtəsindəki oxboyu gərginliyi (1.1.18) düsturu ilə hesablanır. (1.1.18), (2.3.9), (2.3.10), (2.3.12), (2.3.13) və (2.3.15) ifadələrini (2.3.16) ifadəsində nəzərə alsaq, alarıq:

$$q = \left(\frac{R_0^2}{R_1^2(H)} + 3 \right) f_1'(H), \quad (2.3.17)$$

burada $q = \frac{Q}{\pi G(R_0^2 - R_1^2)}$.

Digər tərəfdən (2.3.6) sərhəd şərtindən alarıq:

$$q = \frac{2R_0^2 - R_0R_1 - R_1^2}{6\mu(R_0 + R_1)} f_1''(H) + \frac{2R_0 \operatorname{tg} \alpha}{\mu(R_0 + R_1)} f_1'(H) \quad (2.3.18)$$

(2.3.17) və (2.3.18) ifadələrini bərabərləşdirməklə q -i aşkar şəkildə təyin edək:

$$q = \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \left(\frac{2C_2^3}{27C_1^3} - \frac{C_2C_3}{3C_1^2} + \frac{C_4}{C_1} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{2C_2^3}{27C_1^3} - \frac{C_2C_3}{3C_1^2} + \frac{C_4}{C_1} \right)^2 + \left(-\frac{C_2^2}{9C_1^2} + \frac{C_3}{3C_1} \right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \left(\frac{2C_2^3}{27C_1^3} - \frac{C_2C_3}{3C_1^2} + \frac{C_4}{C_1} \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{2C_2^3}{27C_1^3} - \frac{C_2C_3}{3C_1^2} + \frac{C_4}{C_1} \right)^2 + \left(-\frac{C_2^2}{9C_1^2} + \frac{C_3}{3C_1} \right)^3}} - \frac{C_2}{3C_1}, \quad (2.3.19)$$

burada

$$\begin{aligned}
C_1 = & 2H^3 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{3} - \eta_1 A_3 \right) \frac{A_3}{A_2^3} \eta_1 (R_0^2 - R_1^2)^3 - \frac{9}{4} H^3 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{5\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{3} - \eta_1 A_3 \right) \frac{\eta_1^2}{A_2} (R_0^2 - R_1^2)^3 + \\
& + \frac{3}{2} H^3 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{4\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{9} - \eta_1^2 A_3^2 \right) \frac{\eta_1}{A_2^2} (R_0^2 - R_1^2)^3 - H^3 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{27} - \eta_1^3 A_3^3 \right) \frac{(R_0^2 - R_1^2)^3}{A_2^3} + \\
& + H^3 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{4\lambda_1}{H} \right) \frac{A_3}{A_2^2} \eta_1^2 (R_0^2 - R_1^2)^3 - \frac{27}{8} H^3 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \eta_1^3 (R_0^2 - R_1^2)^3,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_2 = & 3H^2 R_1 \lambda_3 \left(2\lambda_2 + \frac{3\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{3} - \eta_1 A_3 \right) \frac{\eta_1}{A_2} (R_0^2 - R_1^2)^2 - 18\delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{3} - \eta_1 A_3 \right) \frac{\eta_1}{A_2} \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{(R_2^2 - R_1^2)} + \\
& + 12\delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{4\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{3} - \eta_1 A_3 \right) \frac{A_1}{A_2^2} \eta_1 \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{(R_2^2 - R_1^2)} + 9\delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{5\lambda_1}{H} \right) (A_1 - 3\eta_2 A_3) \frac{\eta_1^2}{A_2} \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{(R_2^2 - R_1^2)} + \\
& + 12\delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{A_3}{A_2^3} \eta_1^2 \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{(R_2^2 - R_1^2)} - 8\delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{\eta_1 A_3}{A_2^3} \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{(R_2^2 - R_1^2)} + \\
& + 24\delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{4\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{6} - \eta_1 A_3 \right) \frac{\eta_2}{A_2^2} \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{(R_2^2 - R_1^2)} - \frac{3}{2} \delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{4\lambda_1}{H} \right) \left(3 + \frac{4\eta_2 A_3^2}{A_2^2} \right) \eta_1^2 \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{(R_2^2 - R_1^2)} - \\
& - 2\delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{3} - \eta_1 A_3 \right)^2 \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{A_2^2 (R_2^2 - R_1^2)} + 2H^2 R_1 \lambda_3 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{3} - \eta_1 A_3 \right)^2 \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{A_2^2} + \\
& + \frac{2}{3} \delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{A_2^3 (R_2^2 - R_1^2)} + 18\delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_1 \eta_2}{A_2} \frac{(R_0^2 - R_1^2)^2}{R_2^2 - R_1^2} + \\
& + \frac{81}{2} \delta H^3 R_1 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_1^2 \eta_2 (R_0^2 - R_1^2)^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{9}{2} H^2 R_1 \lambda_3 \left(\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \eta_1^2 (R_0^2 - R_1^2)^2,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_3 = & 4\delta H^2 R_1^2 \lambda_3 \left(2\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{3} - \eta_1 A_3 \right) \frac{(R_0^2 - R_1^2)}{A_2 (R_2^2 - R_1^2)} - \frac{3}{2} H R_1^2 \left(3\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \eta_1 (R_0^2 - R_1^2) - 4\delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \left(\frac{1}{3} - \eta_1 A_3 \right) \frac{(R_0^2 - R_1^2)}{A_2 (R_2^2 - R_1^2)^2} + \\
& + 16\delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{R_0^2 - R_1^2}{A_2^3 (R_2^2 - R_1^2)^2} - 24\delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{4\lambda_1}{H} \right) (A_1 - 2\eta_2 A_3)^2 \frac{\eta_1}{A_2^2} \frac{R_0^2 - R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} - \\
& - \frac{16}{3} \delta H^2 R_1^2 \lambda_3 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{R_0^2 - R_1^2}{A_2^2 (R_2^2 - R_1^2)} + 24\delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_2}{A_2} \frac{(R_0^2 - R_1^2)}{(R_2^2 - R_1^2)^2} + \frac{3}{2} H R_0^2 \eta_1 (R_0^2 - R_1^2) + \\
& + 32\delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_2 A_1 A_3}{A_2^3} \frac{R_0^2 - R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} + 16\delta H^2 R_1^2 \lambda_3 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_1 A_1 A_3}{A_2^2} \frac{R_0^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{1}{3} H R_1^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \frac{(R_0^2 - R_1^2)}{A_2} - \\
& - 36\delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{5\lambda_1}{H} \right) (2A_1 - 3\eta_2 A_3) \frac{\eta_1 \eta_2}{A_2} \frac{R_0^2 - R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} - 32\delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{4\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{\eta_2}{A_2^2} \frac{R_0^2 - R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} - \\
& - 6\delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \eta_1 \frac{R_0^2 - R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} + 12\delta H^2 R_1^2 \lambda_3 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \eta_1 \frac{R_0^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - 12\delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{5\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_2^2}{A_2} \frac{R_0^2 - R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -162 \delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_1 \eta_2^2}{A_2} \frac{R_0^2 - R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} + \frac{1}{3} \frac{R_0^2 H (R_0^2 - R_1^2)}{A_2} + H \lambda_2 R_1^2 \frac{\eta_1 A_3}{A_2} (R_0^2 - R_1^2) - H \left(R_0^2 - \frac{R_1^2 \lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_1 A_3}{A_2} (R_0^2 - R_1^2) - \\
& -12 \delta H^2 R_1^2 \lambda_3 \left(2\lambda_2 + \frac{3\lambda_1}{H} \right) (A_1 - 2\eta_2 A_3) \frac{\eta_1}{A_2} \frac{R_0^2 - R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - 16 \delta^2 H^3 R_1^2 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_1 A_1 A_3}{A_2^2} \frac{R_0^2 - R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2}, \\
C_4 = & -192 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{\eta_2 A_1 A_3}{A_2^3} \frac{1}{(R_2^2 - R_1^2)^3} + 4 \delta H R_1^3 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{1}{A_2 (R_2^2 - R_1^2)} + \\
& + 48 \delta^2 H^2 R_1^3 \lambda_3 \left(2\lambda_2 + \frac{3\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{\eta_2}{A_2} \frac{1}{(R_2^2 - R_1^2)^2} - 16 \delta^2 H^2 R_1^3 \lambda_3 \left(2\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{1}{A_2 (R_2^2 - R_1^2)^2} + \\
& + 64 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1^3 - \eta_2^3 A_3^3) \frac{1}{A_2^3 (R_2^2 - R_1^2)^3} - 288 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{\eta_2}{A_2} \frac{1}{(R_2^2 - R_1^2)^3} + \\
& + 144 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{5\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{\eta_2^2}{A_2} \frac{1}{(R_2^2 - R_1^2)^3} + 32 \delta^2 H^2 R_1^3 \lambda_3 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3)^2 \frac{1}{A_2^2 (R_2^2 - R_1^2)^2} + \\
& + 16 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{1}{A_2 (R_2^2 - R_1^2)^3} - 32 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) (A_1 - \eta_2 A_3)^2 \frac{1}{A_2^2 (R_2^2 - R_1^2)^3} + \\
& + 96 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{4\lambda_1}{H} \right) (A_1 - 2\eta_2 A_3) \frac{\eta_2 A_1}{A_2^2} \frac{1}{(R_2^2 - R_1^2)^3} + 72 \delta^2 H^2 R_1^3 \lambda_3 \left(\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_2^2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} - \frac{2 \delta H R_1^3 \lambda_2}{R_2^2 - R_1^2} + \\
& + 24 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_2}{(R_2^2 - R_1^2)^3} - 72 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{4\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_2^2}{(R_2^2 - R_1^2)^3} - 48 \delta^2 H^2 R_1^3 \lambda_3 \left(\lambda_2 + \frac{\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_2}{(R_2^2 - R_1^2)^2} - \\
& - 4 \delta H R_1 (A_1 - \eta_2 A_3) \frac{R_0^2}{A_2 (R_2^2 - R_1^2)} - 6 \delta H R_1 \eta_2 \frac{R_0^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{8 \delta^2 H^2 R_1^3 \lambda_2 \lambda_3}{(R_2^2 - R_1^2)^2} - \frac{8 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_2 \lambda_3^2}{(R_2^2 - R_1^2)^3} + \frac{2 \delta H R_0^2 R_1}{R_2^2 - R_1^2} + \\
& + 96 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(3\lambda_2 + \frac{4\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_2^3 A_3^2}{A_2^2} \frac{1}{(R_2^2 - R_1^2)^3} + 216 \delta^3 H^3 R_1^3 \lambda_3^2 \left(\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_2^3}{(R_2^2 - R_1^2)^3} + 6 \delta H R_1^3 \left(\lambda_2 + \frac{2\lambda_1}{H} \right) \frac{\eta_2}{R_2^2 - R_1^2}, \\
\lambda_1 = & \frac{2R_0^2 - R_0 R_1 - R_1^2}{6\mu(R_0 + R_1)}, \quad \lambda_2 = \frac{2R_0 \operatorname{tg} \alpha}{\mu(R_0 + R_1)} - 3, \quad \lambda_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0^2}{R_1} - R_1 \right).
\end{aligned}$$

$$\eta_1 = \frac{\frac{1}{4} A_2 - \frac{1}{3} B_2}{A_2 B_3 - A_3 B_2}, \quad \eta_2 = \frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{A_2 B_3 - A_3 B_2}.$$

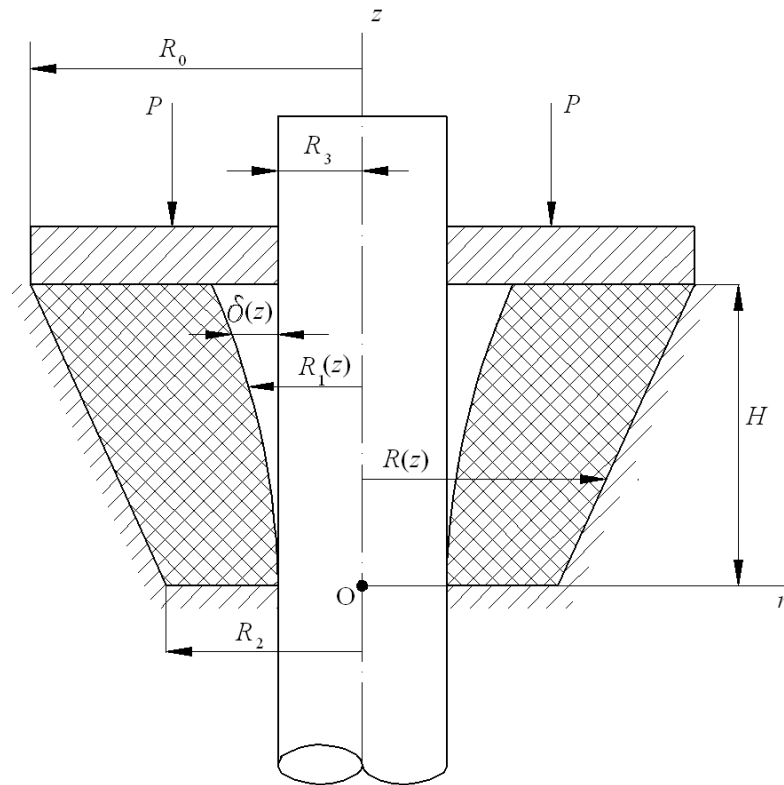
(2.3.19) düsturu konik kipləşdirici elementi onun daxili səthinin kipləşdirilən silindrin xarici divarına ilk toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu sıxıcı qüvvənin qiymətini təyin edir.

İndi isə kipləşdirici elementin onun daxili səthinin kipləşdirilən silindrin xarici divarına tam toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvənin

qiymətini təyin edək. Koordinat sisteminin başlanğıcını yenə də kipləşdirici elementin aşağı oturacaq müstəvisinin mərkəzində yerləşdirək, z oxunu şaquli olaraq yuxarı, r oxunu isə radiusun böyüməsi istiqamətində yönəldək (Şəkil 2.3.2). Müstəvi kəsiklər hipotezini qəbul edək və uyğun olaraq fərz edək ki, kipləşdirici elementin en kəsik sahələrinin oxboyu deformasiyası yalnız z koordinatından asılıdır:

$$w_2 = f_2(z), \quad (2.3.20)$$

burada w_2 – kipləşdirici elementin en kəsik sahələrinin oxboyu deformasiyası, $f_2(z)$ – z -dən asılı naməlum funksiyadır.



Şəkil 2.3.2. Hesabat sxemi

Onda (1.1.2) sıxılmazlıq şərtində (2.3.20) bərabərliyini nəzərə alsaq, alarıq:

$$u_2 = -\frac{1}{2}rf_2'(z) + \frac{c_4}{r}, \quad (2.3.21)$$

burada c_4 – inteqral sabitidir.

Sərhəd şərtini qəbul edək:

$$u_2|_{r=R(z)} = 0. \quad (2.3.22)$$

Onda (2.3.21) ifadəsində (2.3.22) sərhəd şərtini nəzərə almaqla alarıq:

$$u_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{R^2(z)}{r} - r \right) f_2'(z). \quad (2.3.23)$$

Məsələnin oxasimmetrikliliyini nəzərə alaraq kipləşdirici elementin deformasiyalandıqdan sonra potensial enerjisi üçün yaza bilərik:

$$\Pi = 4\pi G \int_0^h \int_{R_3}^{R(z)} \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{rz}^2 \right) r dr dz - \int_0^h P \cdot f_2'(z) dz, \quad (2.3.24)$$

burada P - kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin xarici divarına tam toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu sıxıcı qüvvə,

$$R(z) = R_2 + z \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{R_0 - R_2}{H}, \quad h = H - |f_1(H)|.$$

(2.3.23) ifadəsini (1.1.8) düsturunda, alınmış nəticəni isə (2.3.24) ifadəsində yerinə yazsaq, sonra isə onu r -ə görə inteqrallasaq, onda alınmış funksionaldan Eylər tənliyinə [7], [15] əsasən alarıq:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{8} R^4(z) \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{3}{32} R^4(z) + \frac{1}{8} R^2(z) R_3^2 - \frac{1}{32} R_3^4 \right) \varphi_2''(z) + \left(\frac{1}{2} R^3(z) \operatorname{tg} \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{4} R^3(z) \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{4} R(z) R_3^2 \operatorname{tg} \alpha \right) \varphi_2'(z) + \left(-\frac{5}{4} R^2(z) \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{22 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{8} R^2(z) + \right. \\ & \left. + \frac{24 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{8} R_3^2 - \frac{1}{4} \frac{R^4(z)}{R_3^2} \right) \varphi_2(z) + \frac{1}{2} p (R^2(h) - R_3^2) = 0, \quad (2.3.25) \end{aligned}$$

burada $\varphi_2(z) = f_2'(z)$.

Sərhəd şərtləri aşağıdakı kimidir:

$$\mu P|_{z=h} = 2\pi G \int_{R_3}^{R(h)} \gamma_{zr} r dr, \quad (2.3.26)$$

$$u_2(r, z)|_{z=h}^{r=R_1(h)} = -\delta(h), \quad (2.3.27)$$

$$w_2|_{z=0} = 0, \quad (2.3.28)$$

burada $R_1(z) = R_1 + u_1(r, z)|_{r=R_1}$, $\delta(z) = \delta + u_1(r, z)|_{r=R_1}$.

Alınmış (2.3.25) tənliyi dəyişən əmsallı diferensial tənlik olduğundan onun həllini Rits metodu ilə təqribi tapaq. Bunun üçün (2.3.25) diferensial tənliyinin (2.3.28) sərhəd şərtini ödəyən həllini aşağıdakı şəkildə seçək:

$$f_2(z) = c_5 \frac{z}{h} + c_6 \left(\frac{z}{h}\right)^2 + c_7 \left(\frac{z}{h}\right)^3, \quad (2.3.29)$$

burada c_5 , c_6 və c_7 naməlum sabit əmsallardır. $f_2(z)$ funksiyasının ifadəsini (2.3.27) sərhəd şərtində yazsaq, alarıq:

$$c_5 + 2c_6 + 3c_7 = -\frac{2h\delta(h)R_1(h)}{R^2(h) - R_1^2(h)}. \quad (2.3.30)$$

(2.3.29) ifadəsini (2.3.25) tənliyində yerinə yazaq və daha sonra isə alınmış ifadəni növbə ilə $\left(\frac{z}{h}\right)^2$ və $\left(\frac{z}{h}\right)^3$ hədlərinə vurub, alınmış ifadələri sıfırdan h -a kimi inteqrallayaq. Onda c_5 , c_6 və c_7 sabitlərinə görə aşağıdakı cəbri tənliklər sistemi alınır:

$$\begin{cases} A_1^1 \cdot c_5 + A_2^1 \cdot c_6 + A_3^1 \cdot c_7 + \frac{h}{6}(R^2(h) - R_3^2) \cdot p = 0 \\ B_1^1 \cdot c_5 + B_2^1 \cdot c_6 + B_3^1 \cdot c_7 + \frac{h}{8}(R^2(h) - R_3^2) \cdot p = 0, \\ c_5 + 2c_6 + 3c_7 = -\frac{2h\delta(h)R_1(h)}{R^2(h) - R_1^2(h)} \end{cases} \quad (2.3.31)$$

burada

$$A_1^1 = \frac{1}{h} \int_0^h \left(-\frac{5}{4} R^2(z) \operatorname{tg}^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{22 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{8} R^2(z) + \frac{24 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{8} R_3^2 - \frac{1}{4} \frac{R^4(z)}{R_3^2} \right) \left(\frac{z}{h}\right)^2 dz$$

$$A_2^1 = \int_0^h \left(\frac{2}{h^2} \left(\frac{1}{2} R^3(z) \operatorname{tg} \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{1}{4} R^3(z) \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{4} R(z) R_3^2 \operatorname{tg} \alpha \right) \right) \left(\frac{z}{h}\right)^2 +$$

$$+ \frac{2}{h} \left(-\frac{5}{4} R^2(z) t g^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{22 + t g^2 \alpha}{8} R^2(z) + \frac{24 + t g^2 \alpha}{8} R_3^2 - \frac{1}{4} \frac{R^4(z)}{R_3^2} \right) \left(\frac{z}{h} \right)^3 dz,$$

$$A_3^1 = \int_0^h \left(\frac{6}{h^3} \left(\frac{1}{8} R^4(z) \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{3}{32} R^4(z) + \frac{1}{8} R^2(z) R_3^2 - \frac{1}{32} R_3^4 \right) \left(\frac{z}{h} \right)^2 + \frac{6}{h^2} \left(\frac{1}{2} R^3(z) t g \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{1}{4} R^3(z) t g \alpha + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{4} R(z) R_3^2 t g \alpha \right) \left(\frac{z}{h} \right)^3 + \frac{3}{h} \left(-\frac{5}{4} R^2(z) t g^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{22 + t g^2 \alpha}{8} R^2(z) + \frac{24 + t g^2 \alpha}{8} R_3^2 - \frac{1}{4} \frac{R^4(z)}{R_3^2} \right) \left(\frac{z}{h} \right)^4 \right) dz,$$

$$B_1^1 = \frac{1}{h} \int_0^h \left(-\frac{5}{4} R^2(z) t g^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{22 + t g^2 \alpha}{8} R^2(z) + \frac{24 + t g^2 \alpha}{8} R_3^2 - \frac{1}{4} \frac{R^4(z)}{R_3^2} \right) \left(\frac{z}{h} \right)^3 dz,$$

$$B_2^1 = \int_0^h \left(\frac{2}{h^2} \left(\frac{1}{2} R^3(z) t g \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{1}{4} R^3(z) t g \alpha + \frac{1}{4} R(z) R_3^2 t g \alpha \right) \left(\frac{z}{h} \right)^3 + \right.$$

$$\left. \frac{2}{h} \left(-\frac{5}{4} R^2(z) t g^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{22 + t g^2 \alpha}{8} R^2(z) + \frac{24 + t g^2 \alpha}{8} R_3^2 - \frac{1}{4} \frac{R^4(z)}{R_3^2} \right) \left(\frac{z}{h} \right)^4 \right) dz,$$

$$B_3^1 = \int_0^h \frac{6}{h^3} \left(\frac{1}{8} R^4(z) \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{3}{32} R^4(z) + \frac{1}{8} R^2(z) R_3^2 - \frac{1}{32} R_3^4 \right) \left(\frac{z}{h} \right)^3 + \frac{6}{h^2} \left(\frac{1}{2} R^3(z) t g \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{1}{4} R^3(z) t g \alpha + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} R(z) R_3^2 t g \alpha \right) \left(\frac{z}{h} \right)^4 + \frac{3}{h} \left(-\frac{5}{4} R^2(z) t g^2 \alpha \ln \frac{R(z)}{R_3} - \frac{22 + t g^2 \alpha}{8} R^2(z) + \frac{24 + t g^2 \alpha}{8} R_3^2 - \frac{1}{4} \frac{R^4(z)}{R_3^2} \right) \left(\frac{z}{h} \right)^5 dz.$$

c_5 , c_6 və c_7 sabitləri üçün (2.3.31) tənliyinin həlli olacaqdır:

$$c_5 = -\frac{h}{6A_1^1} \left(R^2(h) - R_3^2 \right) \cdot p - \frac{A_2^1}{A_1^1} \cdot c_6 - \frac{A_3^1}{A_1^1} \cdot c_7, \quad (2.3.32)$$

$$c_6 = -\frac{h}{2} \left(\frac{\frac{1}{4} A_1^1 - \frac{1}{3} B_1^1}{A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1} \right) \left(R^2(h) - R_3^2 \right) \cdot p - \left(\frac{A_1^1 B_3^1 - A_3^1 B_1^1}{A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1} \right) \cdot c_7, \quad (2.3.33)$$

$$c_7 = \frac{h}{2} \frac{\frac{1}{3A_1^1} \left(A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1 \right) - \left(2 - \frac{A_2^1}{A_1^1} \right) \left(\frac{1}{4} A_1^1 - \frac{1}{3} B_1^1 \right)}{\left(3 - \frac{A_3^1}{A_1^1} \right) \left(A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1 \right) - \left(2 - \frac{A_2^1}{A_1^1} \right) \left(A_1^1 B_3^1 - A_3^1 B_1^1 \right)} \left(R^2(h) - R_3^2 \right) \cdot p -$$

$$-\frac{2h\delta(h)R_1(h)}{R^2(h) - R_1^2(h)} \frac{A_1^1 B_3^1 - A_3^1 B_1^1}{\left(3 - \frac{A_3^1}{A_1^1}\right)(A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1) - \left(2 - \frac{A_2^1}{A_1^1}\right)(A_1^1 B_3^1 - A_3^1 B_1^1)}. \quad (2.3.34)$$

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan oxboyu sıxıcı qüvvənin qiyməti aşağıdakı ifadə ilə təyin edilə bilər:

$$\pi(R^2(h) - R_3^2)\sigma_z \Big|_{z=h} = P, \quad (2.3.35)$$

burada σ_z – kipləşdirici elementin ixtiyari en kəsiyində oxboyu gərginliyi.

Kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin xarici divarına tam toxunandan sonra onun yuxarı en kəsiyində aşağıdakı sərhəd şərti ödənəcəkdir:

$$\sigma_r \Big|_{r=R_3} = 0. \quad (2.3.36)$$

Onda (2.3.36) sərhəd şərtini (1.1.14) ifadəsində nəzərə almaqla alarıq:

$$s = \left(\frac{R^2(h)}{R_3^2} + 1\right) f_2'(h). \quad (2.3.37)$$

(1.1.18) və (2.3.37) ifadələrini (2.3.35) ifadəsində nəzərə alsaq, alarıq:

$$p = \left(\frac{R_2^2}{R_0^2} + 3\right) f_2'(h), \quad (2.3.38)$$

burada
$$p = \frac{P}{\pi G(R^2(h) - R_3^2)}.$$

Digər tərəfdən (2.3.36) sərhəd şərtindən alarıq:

$$p = \frac{2R^2(h) - R_0 R_3 - R_3^2}{6\mu(R(h) + R_3)} f_1''(h) + \frac{2R(h)tg\alpha}{\mu(R(h) + R_3)} f_1'(h). \quad (2.3.39)$$

Onda (2.3.29) ifadəsini, c_5 , c_6 və c_7 -in ifadələrini (2.3.38) və (2.3.39) düsturlarında nəzərə alsaq, alarıq:

$$p = \frac{\lambda_7}{\lambda_6} \frac{(R^2(h) - R_1^2(h))(R^2(h) - R_3^2)}{4\delta(h)R_1(h)(A_1^1 B_3^1 - A_3^1 B_1^1)} \left(\frac{\lambda_5}{3A_1^1} + \left(\frac{2\lambda_4}{h} + \left(2 - \frac{A_2^1}{A_1^1} \right) \right) \frac{\frac{1}{4}A_1^1 - \frac{1}{3}B_1^1}{A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1} - \right.$$

$$-\frac{\lambda_6}{\lambda_7} \left(\frac{1}{3A_1^1} (A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1) - \left(2 - \frac{A_2^1}{A_1^1} \right) \left(\frac{1}{4} A_1^1 - \frac{1}{3} B_1^1 \right) \right), \quad (2.3.40)$$

burada

$$\lambda_4 = \frac{2R^2(h) - R_0 R_3 - R_3^2}{6\mu(R(h) + R_3)}; \quad \lambda_5 = \frac{2R(h) \operatorname{tg} \alpha}{\mu(R(h) + R_3)} - \frac{R^2(h)}{R_3^2} - 3,$$

$$\lambda_6 = \left(\frac{6\lambda_4}{h} + \left(3 - \frac{A_3^1}{A_1^1} \right) \lambda_5 \right) - \left(\frac{2\lambda_4}{h} + \left(2 - \frac{A_2^1}{A_1^1} \right) \right) \left(\frac{A_1^1 B_3^1 - A_3^1 B_1^1}{A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1} \right),$$

$$\lambda_7 = \left(3 - \frac{A_3^1}{A_1^1} \right) (A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1) - \left(2 - \frac{A_2^1}{A_1^1} \right) (A_1^1 B_3^1 - A_3^1 B_1^1),$$

$$\delta(h) = \delta + \frac{1}{2} \left(\frac{R^2(h)}{R_1} - R_1 \right) \left(\frac{1}{H} c_1 + 2c_2 \frac{h}{H^2} + 3c_3 \frac{h^2}{H^3} \right),$$

$$R_1(h) = R_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R^2(h)}{R_1} - R_1 \right) \left(\frac{1}{H} c_1 + 2c_2 \frac{h}{H^2} + 3c_3 \frac{h^2}{H^3} \right).$$

Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında onların tam toxunmasından sonra yaranan kontakt gərginliyi elastiki əsas üzərindəki tir məsələsinə analogi olaraq aşağıdakı düsturla tapıla bilər:

$$\sigma_r(z) = k_0 \cdot u_0(z) \quad (2.3.41)$$

burada k_0 - elastiki əsasın yataq əmsalı,

$$u_0(z) = R_1 - R_3 + u(r, z)|_{r=R_1}. \quad (2.3.42)$$

Əgər bu, səthlər arasında hermetikliyi təmin etməsə, onda hermetiklik yaratmaq üçün kipləşdirici elementi sıxmağa davam edirik. Kipləşdirici elementin aşağı oturacağından z məsafəsindən dz hündürlüklü həlqəvi element ayıraq və onun müvazinət vəziyyətinə baxaq. Elementə təsir edən qüvvələri oxboyu proeksiyalayaq:

$$\pi(R^2(z) - R_3^2) \left(\sigma_z - \sigma_z - \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dz \right) + \tau \cdot 2\pi R_3 dz + \tau_1 \cdot 2\pi R(z) \frac{dz}{\cos \alpha} + N \sin \alpha \cdot 2\pi R(z) \frac{dz}{\cos \alpha} = 0, \quad (2.3.43)$$

burada τ , τ_1 - toxunan gərginliklərdir.

Digər tərəfdən kipləşdiricinin materialının sıxılmazlığını nəzərə alsaq, alarıq [9]:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_r; \quad N = \sigma_r \cos \alpha; \quad \tau_1 = \mu \cdot N; \quad \sigma_r = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z, \quad (2.3.44)$$

burada μ – sürtünmə əmsalı, ν – Puasson əmsalıdır.

(2.3.44) ifadəsini (2.3.43) tənliyində yerinə yazaraq və $\sigma_z|_{z=h} = \sigma_0$ sərhəd şərtini nəzərə alaraq alınmış ifadəni inteqrallasaq alarıq:

$$\sigma_z = \sigma_0 \cdot (R(z) - R_3)^{\frac{2\mu\nu}{(1-\nu)\operatorname{tg}\alpha}} \left(R^2(z) - R_3^2 \right)^{\frac{\nu}{1-\nu} \cos \alpha}, \quad (2.3.45)$$

burada σ_0 – kipləşdirici elementin sıxıcı qüvvə tətbiq olunmuş kəsiyində yaranan oxboyu gərginlikdir.

Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə kipləşdirilən silindrin xarici divarı arasında kontakt gərginliyin paylanma xarakteri (2.3.41) və (2.3.45) düsturları ilə təyin edilə bilər. Digər tərəfdən kipləşdirici elementin ixtiyari nöqtəsindəki radial və oxboyu gərginlikləri arasındakı münasibət (1.1.39) bərabərliyi ilə ifadə olunur. Onda (2.3.41) və (2.3.45) düsturlarını (1.1.39) bərabərliyində nəzərə almaqla alarıq:

$$\sigma_r(z) = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_0 \cdot (R(z) - R_3)^{\frac{2\mu\nu}{(1-\nu)\operatorname{tg}\alpha}} \left(R^2(z) - R_3^2 \right)^{\frac{\nu}{1-\nu} \cos \alpha} + k_0 \cdot u_0(z). \quad (2.3.46)$$

σ_0 gərginliyinin qiyməti hermetiklik şərtindən tapılır:

$$\frac{\nu}{1-\nu} \sigma_0 \cdot (R(z) - R_3)^{\frac{2\mu\nu}{(1-\nu)\operatorname{tg}\alpha}} \left(R^2(z) - R_3^2 \right)^{\frac{\nu}{1-\nu} \cos \alpha} + k_0 \cdot u_0(z) \geq P_{mühit},$$

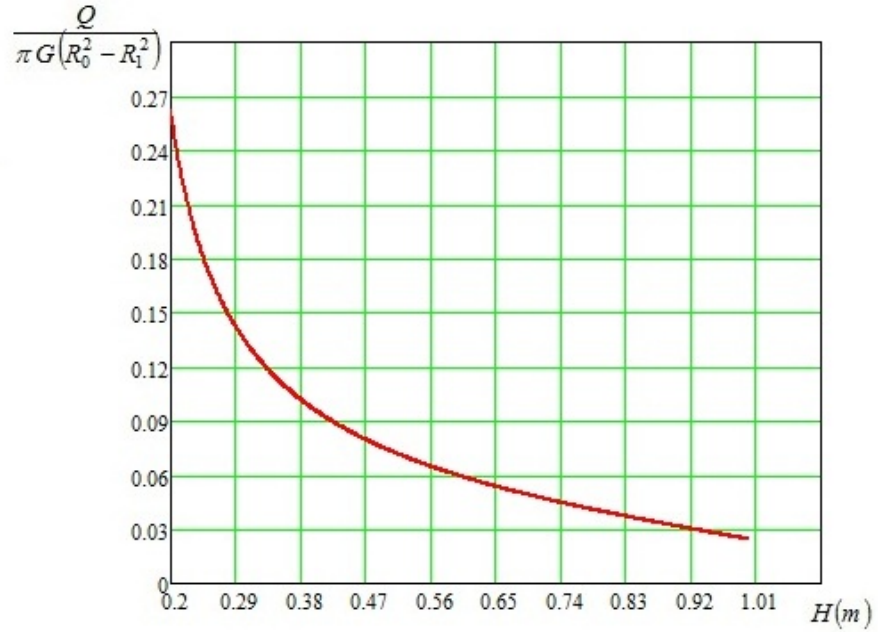
burada $P_{mühit}$ – mühitin təzyiqidir.

(2.3.19), (2.3.40) və (2.3.46) düsturlarına əsasən verilənlərin aşağıdakı qiymətlərində ədədi hesabat aparılmış, kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin xarici divarına ilk və tam toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu sıxıcı qüvvələrin qiyməti tapılmış və həmçinin bu səthlər arasında yaranan σ_r kontakt gərginliyinin paylanma xarakteri təyin edilmişdir:

$$R_0 = 0.6 \text{ m}, \quad R_1 = 0.15 \text{ m}, \quad R_2 = 0.3 \text{ m}, \quad R_3 = 0.037 \text{ m}, \quad \delta = 0.005 \text{ m},$$

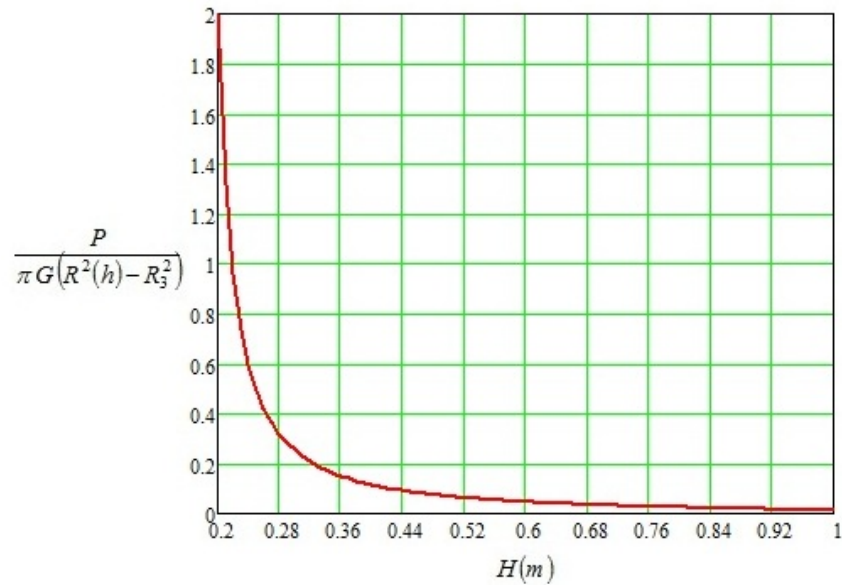
$$P_{mühit} = 2 \cdot 10^7 \text{ Pa}, \quad G = 1.3 \cdot 10^8 \text{ Pa}, \quad k_0 = 6.7 \cdot 10^7 \text{ Pa/m}, \quad \mu = 0.5, \quad \nu = 0.25.$$

Ədədi hesabatın nəticələri Qrafik 2.3.1, Qrafik 2.3.2 və Qrafik 2.3.3-də verilmişdir.



Qrafik 2.3.1. Konik kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu Q qüvvəsinin qiymətini təyin edən $q = \frac{Q}{\pi G (R_0^2 - R_1^2)}$ kəmiyyətinin qiymətinin onun

hündürlüyündən asılılıq qrafiki

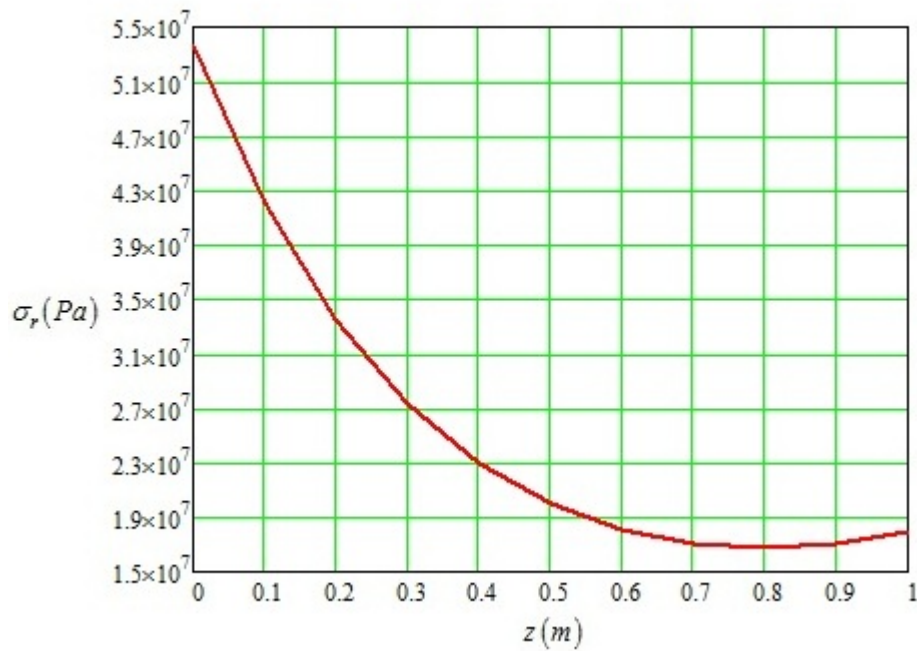


Qrafik 2.3.2. Konik kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan oxboyu P qüvvəsinin qiymətini təyin edən $p = \frac{P}{\pi G (R^2(h) - R_3^2)}$ kəmiyyətinin qiymətinin onun hündürlüyündən asılılıq qrafiki

Qrafik 2.3.1-dən görüldüyü kimi kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin xarici divarına ilk toxunana qədər deformasiya etdirmək üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin hündürlüyü artdıqca əvvəlcə azalır, sonra isə hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra stabilləşir.

Kipləşdirici elementin daxili səthini silindrin xarici divarına tam toxundurmaq üçün üçün lazım olan sıxıcı qüvvənin qiyməti də həmçinin kipləşdiricinin hündürlüyü artdıqca əvvəlcə azalır, sonra isə hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra stabilləşir. (Qrafik 2.3.2).

Kəşik konus şəkilli kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin xarici divarı arasında yaranan kontakt gərginliyi ən böyük qiymətini kipləşdirici elementin aşağı oturacağında alır, z koordinatının artması istiqamətində azalır və oxboyu qüvvənin tətbiq edildiyi yuxarı oturacaqda isə ən kiçik həddə çatır (Qrafik 2.3.3).



Qrafik 2.3.3. Konik kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında kontakt gərginliyin paylanma xarakterinin z koordinatından asılılıq qrafiki

Beləliklə, konik kipləşdirici elementin daxili səthi ilə kipləşdirilən silindrin xarici divarı arasında yaranan kontakt gərginliyin paylanma xarakterinin

kipləşdiricinin fiziki-mexaniki göstəricilərindən və həndəsi ölçülərindən asılılığını müəyyən edən (2.3.46) analitik düsturu alınmışdır.

2.4. İrsiliyin konik kipləşdirici elementlə kipləşdirmə zamanı yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsirinin modelləşdirilməsi

İndi isə kəsik konus formalı kipləşdirici elementin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə irsiliyin təsirini öyrənək [93]. Aparılmış tədqiqatlar göstərir ki, kipləşdirici elementin irsiliyinin nəzərə alınmaması bəzi hallarda yanlış nəticələrə gətirib çıxarır.

δ ara məsafəsi ilə kipləşdirilən silindrin ətrafına geyindirilmiş konik kipləşdirici elementə baxaq (Şəkil 2.3.1). Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında hermetikliyə kipləşdiricinin oxboyu sıxılması ilə nail olunur. Kipləşdirici elementi irsi-elastiki cisim kimi qəbul edək və fərz edək ki, kipləşdiricinin sərhədində xarici qüvvənin və deformasiyanın dəyişməsi kiçik sürətlə gedir. Kipləşdirici element təbii vəziyyətdə yerləşir. Onda kipləşdirici elementin deformasiya olunma prosesini kvazistatik qəbul etmək və məsələnin həlli üçün isə elastiki analogiya metodundan istifadə etmək olar [55], [59], [68], [82], [84], [91], [135].

Qoyulmuş məsələnin elastiki halda həlli tapıldıqdan sonra (1.2.22) və (1.2.20) ifadələrindən istifadə etməklə konik kipləşdiricinin materialının irsi-elastiki xüsusiyyətini nəzərə alaraq deformasiya-gərginlik vəziyyətini təyin etmək olar [94].

§2.3-də variyasiya hesabının köməyi ilə kipləşdirici elementi elastiki cisim kimi qəbul edərək kipləşdiricini onun daxili səthini silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti üçün (2.3.19) düsturu alınmışdır ki [94], buradan da

$$Q = \pi G (R_0^2 - R_1^2) \cdot q, \quad (2.4.1)$$

burada G – kipləşdirici elementin materialının sürüşmə modulu, R_0, R_1 – isə uyğun olaraq kipləşdirici elementin yuxarı oturacağıının xarici və daxili radiuslarıdır.

Elastiki analogiya həll metoduna uyğun olaraq kipləşdiricinin oxboyu deformasiyasını (1.2.22) şəklində göstərə bilərik. Onda \bar{G} üçün (1.2.23) bərabərliyi ödəyir. Onda (1.2.24) və (2.3.19) ifadələrini (2.4.1)-də nəzərə alsaq, oxboyu sıxıcı qüvvənin qiyməti üçün alarıq:

$$Q = \pi G (R_0^2 - R_1^2) \left[\left(1 - \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right] q. \quad (2.4.2)$$

(2.4.2) düsturu ilə irsiliyi nəzərə alınmaqla konik kipləşdirici elementi onun daxili səthinin kipləşdirilən silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu sıxıcı qüvvənin qiyməti hesablanır.

§2.3-də variyasiya hesabının köməyilə elastiki cisim kimi baxılaraq kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan oxboyu qüvvənin qiyməti (Şək.2.3.2) aşağıdakı düsturla tapılmışdır:

$$P = \pi G (R^2(h) - R_3^2) \cdot p, \quad (2.4.3)$$

burada $R_3, R(h)$ - uyğun olaraq silindrin və kipləşdiricinin yuxarı oturacağıının xarici radiusudur, p (2.3.40) düsturu ilə ifadə olunur.

Elastiki analogiya həll metoduna uyğun olaraq kipləşdiricinin oxboyu deformasiyasını (1.2.27) şəklində göstərə bilərik. Onda \bar{G} üçün (1.2.29) bərabərliyi ödəyir. Onda (1.2.29) və (2.3.40) ifadələrini (2.4.3)-də nəzərə alsaq, oxboyu sıxıcı qüvvənin qiyməti üçün alarıq:

$$P = \frac{\pi G}{\nu_0} (R^2(h) - R_3^2) \left[\left(1 - \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right] \frac{\lambda_7 (R^2(h) - R_1^2(h)) (R^2(h) - R_3^2)}{4 \lambda_6 \delta(h) R_1(h) (A_1^1 B_3^1 - A_3^1 B_1^1)} \times$$

$$\times \left(\frac{\lambda_5}{3 A_1^1} + \left(\frac{2 \lambda_4}{h} + \left(2 - \frac{A_2^1}{A_1^1} \right) \right) \frac{\frac{1}{4} A_1^1 - \frac{1}{3} B_1^1}{A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1} - \frac{\lambda_6}{\lambda_7} \left(\frac{1}{3 A_1^1} (A_1^1 B_2^1 - A_2^1 B_1^1) - \left(2 - \frac{A_2^1}{A_1^1} \right) \left(\frac{1}{4} A_1^1 - \frac{1}{3} B_1^1 \right) \right) \right). \quad (2.4.4)$$

Hermetikliyə nail olmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti isə

$$P_{her} = Q + P \quad (2.4.5)$$

olacaqdır. Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk və tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti uyğun olaraq (2.4.2) və (2.4.4) düsturları ilə tapmaqla kipləşdiricinin irsilik xüsusiyyətinin onun hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsirini təyin edirik.

(2.4.2) və (2.4.4) düsturlarına əsasən parametrlərin aşağıdakı qiymətlərində ədədi hesabat aparılmışdır:

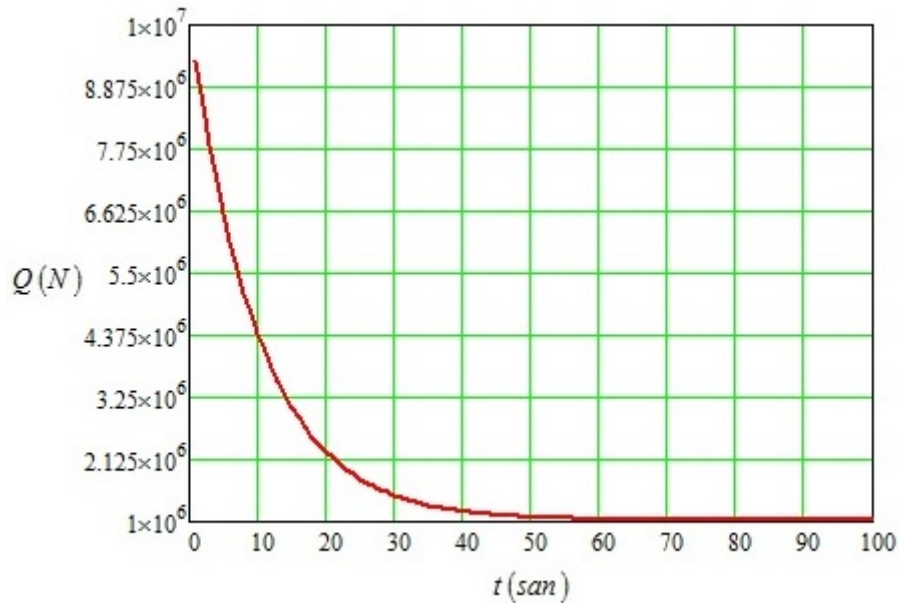
$$R_0 = 0.6 \text{ m}, \quad R_1 = 0.15 \text{ m}, \quad R_2 = 0.3 \text{ m}, \quad R_3 = 0.037 \text{ m},$$

$$H = 0.5 \text{ m}, \quad \delta = 0.005 \text{ m}, \quad G = 1.3 \cdot 10^8 \text{ Pa}, \quad k_0 = 3.9 \cdot 10^8 \text{ Pa/m},$$

$$\mu = 0.5, \quad \nu = 0.25, \quad \nu^* = 0.01, \quad \lambda^* = 0.1.$$

Ədədi hesabatın nəticələri Qrafik 2.4.1 və Qrafik 2.4.2-də göstərilmişdir.

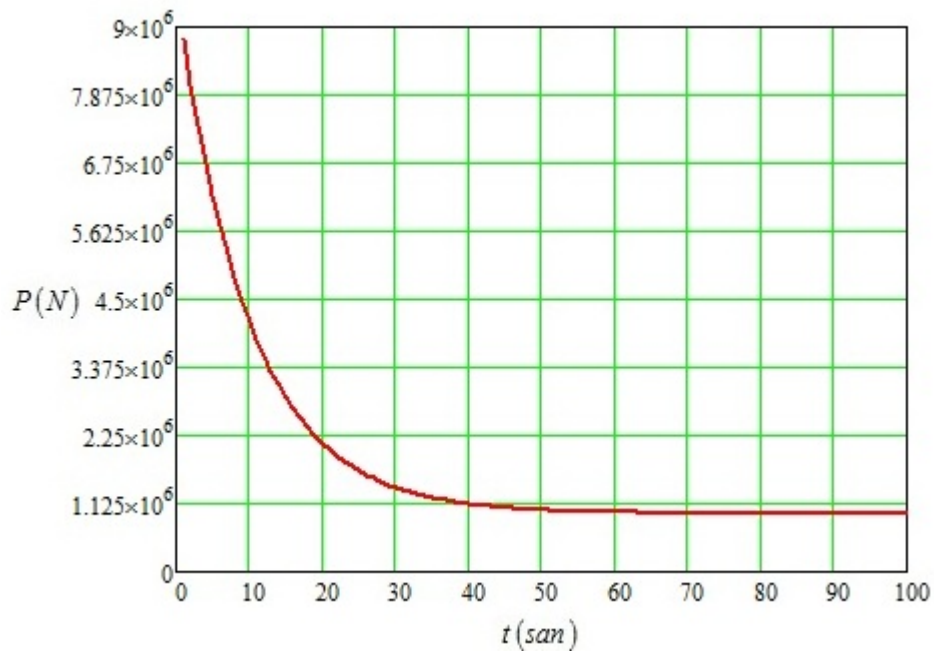
Qrafik 2.4.1 və Qrafik 2.4.2-dən göründüyü kimi Q və P oxboyu qüvvələri zaman keçdikcə azalır və bir müddətdən sonra stabilləşir.



Qrafik 2.4.1. Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu Q qüvvəsinin zamandan asılılıq qrafiki

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin materialının irsiliyi nəzərə alındıqda doqquz dəfəyə qədər azalır.

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti də həmçinin zaman keçdikcə doqquz dəfəyə qədər azalır. Bu isə öz növbəsində kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin və beləliklə də onun hermetikləşdirmə qabiliyyətini azalmasına səbəb olur.



Qrafik 2.4.2. Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan oxboyu P qüvvəsinin zamandan asılılıq qrafiki

2.5. Deformasiya tempinin zamandan asılı olaraq xətti dəyişməsi halında kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə irsiliyin təsirinin təyini

Nisbi deformasiyanın zamandan asılı olaraq dəyişməsi halında kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə irsiliyin təsirini öyrənmək məqsədilə δ ara məsafəsi ilə kipləşdirilən silindrin ətrafına geyindirilmiş konik kipləşdirici elementə baxaq (Şəkil 2.3.1). Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında

hermetikliyə kipləşdiricinin oxboyu sıxılması ilə nail olunur. Kipləşdirici elementi irsi-elastiki cisim kimi qəbul edək və fərz edək ki, kipləşdiricinin sərhədində xarici qüvvənin və deformasiyanın dəyişməsi kiçik sürətlə baş verir. Kipləşdirici element təbii vəziyyətdə yerləşir. Onda kipləşdirici elementin deformasiyalanma prosesini kvazistatik qəbul etmək və məsələnin həlli üçün isə elastiki analogiya metodunu seçmək olar [55], [59], [68], [82], [84], [91], [135].

Bu məsələnin kipləşdirici elementin materialı elastiki qəbul edilmiş halda həlli §2.3-də verilmişdir. Kipləşdirici elementin materialı irsi-elastiki qəbul edilmiş halda kipləşdiricinin ixtiyari nöqtəsindəki gərginliyi (1.2.18) düsturu ilə ifadə olunur. Kipləşdirici elementin materialının sürüşmə modulunu (1.3.4) şəklində göstərmək olar. Onda (1.2.22) və (1.2.20) ifadələrindən istifadə etməklə konik kipləşdirici elementin materialının irsi-elastiki xüsusiyyətini nəzərə alaraq elastiki analogiya metodunu tətbiq etməklə deformasiya-gərginlik vəziyyətini təyin etmək olar.

Kipləşdirici elementi elastiki cisim kimi qəbul edərək kipləşdiricini onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti (2.3.19) ifadəsinin köməyi ilə təyin edilir.

Elastiki həll metoduna əsaslanaraq [68], [71], [82], [91], [135] kipləşdirici elementin eninə kəsik müstəvisinin oxboyu deformasiyasını (1.3.1) və (1.3.2) düsturları ilə ifadə edildiyini qəbul edək. Onda kipləşdirici elementin materialının sürüşmə modulunu (1.3.4) şəklində ifadə etmək olar.

Onda (1.3.4) və (2.3.19) ifadələrinin köməyi ilə oxboyu qüvvənin qiyməti üçün aşağıdakı bərabərliyi alarıq [59]:

$$Q = \pi G \left\{ e^{-\lambda^* t} + \left[\left(\nu^* - \lambda^* \right) \left(1 - e^{-\lambda^* (t-T_1)} \right) - \nu^* \lambda^* (t - T_1) \right] H(t - T_1) - \left[\left(\nu^* - \lambda^* \right) \left(1 - e^{-\lambda^* t} \right) - \nu^* \lambda^* t \right] H(t) \right\} (R_0^2 - R_1^2) q. \quad (2.5.1)$$

(2.5.1) düsturu ilə konik kipləşdirici elementi nisbi deformasiya tempinin zamandan asılılığı nəzərə alınaraq onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiymətinə irsiliyin təsiri təyin edilir.

Kipləşdirici elementi materialının elastiki qəbul olunduğu halda onun daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti isə (2.3.39) bərabərliyi ilə təyin olunur [8].

Elastiki həll metodunu [55], [82], [91] tətbiq edərək kipləşdirici elementin daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər sıxdıqda eninə kəsik müstəvisində yaranan oxboyu deformasiyasının (1.3.6) və (1.3.7), kipləşdiricinin materialının sürüşmə modulunun isə (1.3.8) ilə ifadə edildiyini qəbul edək.

(1.3.8) və (2.3.9) ifadələrindən nisbi deformasiyanın zamandan asılılığı və irsiliyi nəzərə alınaraq konik kipləşdirici elementin onun daxili səthi ilə silindrin divarının tam kontaktını yaradan oxboyu qüvvənin qiyməti üçün alarıq:

$$P = \pi G \left\{ e^{-\lambda^* t} + \left[\left(\left(\nu^* - \lambda^* \right) \left(1 - e^{-\lambda^* (t-T_2)} \right) - \nu^* \lambda^* (t - T_2) \right) H(t - T_2) - \left(\left(\nu^* - \lambda^* \right) \left(1 - e^{-\lambda^* t} \right) - \nu^* \lambda^* t \right) H(t) \right] \right\} (R^2(h) - R_3^2) p. \quad (2.5.2)$$

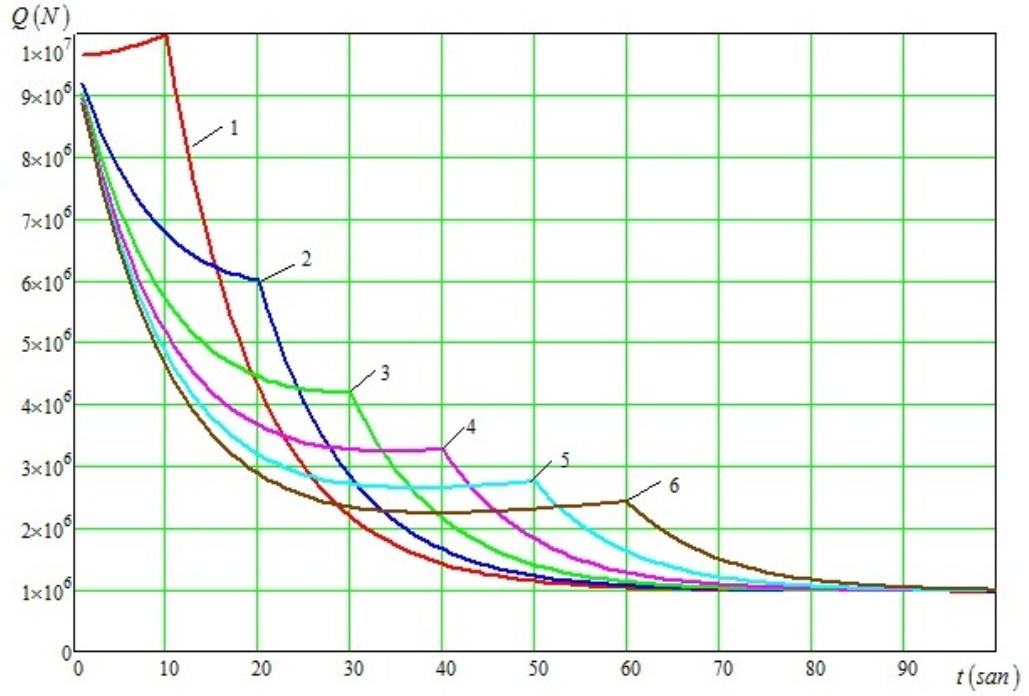
Hermetikliyə nail olmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti isə

$$P_{her} = Q + P. \quad (2.5.3)$$

Konik kipləşdirici elementin hermetiklik qabiliyyətinə irsiliyin təsirinin öyrənilməsi məqsədilə (2.5.1) və (2.5.2) ifadələrinə əsasən uyğun olaraq kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk və tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu sıxıcı qüvvələrin qiymətləri üçün parametrlərin aşağıda verilmiş qiymətlərində ədədi hesabat aparılmışdır:

$$\begin{aligned} R_0 &= 0.6 \text{ m}, & R_1 &= 0.15 \text{ m}, & R_2 &= 0.3 \text{ m}, & R_3 &= 0.037 \text{ m}, & H &= 0.5 \text{ m}, \\ \delta &= 0.005 \text{ m}, & G &= 1.3 \cdot 10^8 \text{ Pa}, & k_0 &= 3.9 \cdot 10^8 \text{ Pa/m}, & \mu &= 0.5, & \nu &= 0.25, \\ \nu^* &= 0.01, & \lambda^* &= 0.1, & T_1; T_2 &= 10, 20, 30, 40, 50, 60 \text{ san}. \end{aligned}$$

Ədədi hesabatın nəticələri Qrafik 2.5.1 və Qrafik 2.5.2-də verilmişdir.



1- $T_1 = 10 \text{ san}$, 2- $T_1 = 20 \text{ san}$, 3- $T_1 = 30 \text{ san}$, 4- $T_1 = 40 \text{ san}$, 5- $T_1 = 50 \text{ san}$, 6- $T_1 = 60 \text{ san}$

Qrafik 2.5.1. Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu Q qüvvəsinin zamandan asılılıq qrafiki

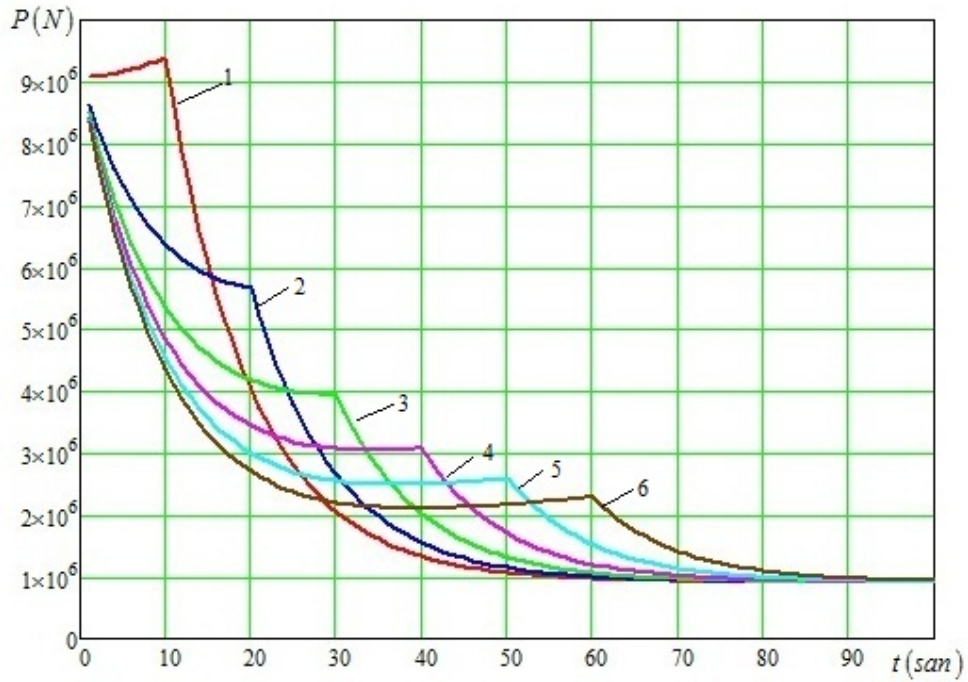
Qrafik 2.5.1 və Qrafik 2.5.2-dən görüldüyü kimi kipləşdirici elementin kiçik sürətli deformasiyalanma müddətində Q və P oxboyu qüvvələrin qiymətləri də ani deformasiyalanma prosesindən fərqli olaraq kiçik sürətlə azalır və bir müddətdən sonra stabilləşir.

İrsiliyi nəzərə alınmaqla kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti dörd dəfədən çox azalır (Qrafik 2.5.1).

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına tam toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti isə altı dəfədən çox azalır (Qrafik 2.5.2). Bu isə öz növbəsində kipləşdirici elementin daxili səthi ilə silindrin

divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin azalmasına və beləcə də kipləşdiricinin hermetikləşdirmə qabiliyyətinin pisləşməsinə gətirib çıxarır.

Beləliklə aparılmış tədqiqatlar göstərir ki, kipləşdirici elementin irsiliyinin nəzərə alınmaması bəzi hallarda yanlış nəticələrə gətirib çıxarır.



1- $T_2 = 10 \text{ san}$, 2- $T_2 = 20 \text{ san}$, 3- $T_2 = 30 \text{ san}$, 4- $T_2 = 40 \text{ san}$, 5- $T_2 = 50 \text{ san}$, 6- $T_2 = 60 \text{ san}$

Qrafik 2.5.2. Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarı ilə tam kontaktını yaradan oxboyu P qüvvəsinin zamandan asılılıq qrafiki

III FƏSİL

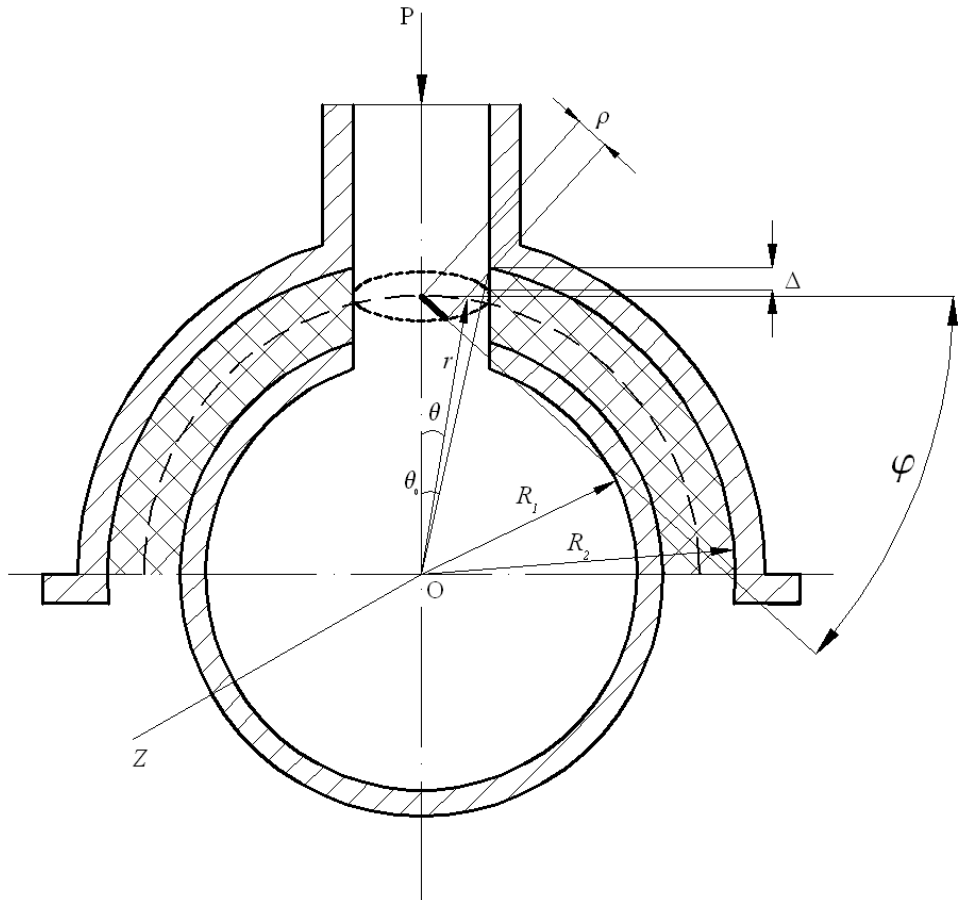
DAİRƏVİ DEŞİKLİ YARIMSİLİNDRİK ELEMENTLƏRLƏ KIPLƏŞDİRMƏ PROSESİNİN RİYAZİ MODELLƏŞDİRİLMƏSİ

Praktikada bəzi hallarda deşikli yarımşilindrik səthi hermetikləşdirmək lazım gəlir. Bu zaman hermetikliyin etibarlılığı yarımşilindrik səthdə yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterindən çox asılıdır. Bu isə öz növbəsində yarımşilindrik səthin və kipləşdirici elementin həndəsi ölçülərindən və fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərindən asılıdır. Bu məsələlərə bir çox müəlliflərin işləri [113], [121], [123], [140], [142] həsr edilmişdir. Lakin bu işlərdə kipləşdirilən yarımşilindrik səthdə deşik yoxdur. Hermetikləşdirilən şilindrik səthdə deşiyin olması onun səthində yaranan kontakt gərginliyin paylanma xarakterinə güclü təsir göstərir. Ona görə də yarımşilindrik səthdə olan deşiyin onunla kipləşdirici elementin səthi arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsirinin tədqiq edilib öyrənilməsinin həm elmi və həm də praktiki əhəmiyyəti vardır.

Bu fəsildə hermetikləşdirmə prosesinin modeli qurularaq dairəvi deşikli yarımşilindrik səth ilə kipləşdirici element arasında kontakt gərginliyinin paylanma xarakteri tədqiq edilmişdir. Variyasiya prinsipindən istifadə edilərək alınan dəyişən əmsallı dördüncü tərtib diferensial tənlik Qalerkin metodu ilə həll edilərək üzərində mövcud olan dairəvi deşik nəzərə alınmaqla hermetikliyi təmin edən oxboyu sıxıcı qüvvənin minimum qiymətini kipləşdiricinin həndəsi ölçülərindən və fiziki-mexaniki xüsusiyyətlərindən asılı olaraq təyin edən analitik ifadələr alınmışdır. Həmçinin oxboyu deformasiyanın nəzərə alınmasının deşikli yarımşilindrik səthdə yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsirinə baxılmışdır. Deformasiya tempinin müxtəlif hallarında, ani yüklənmə halında və nisbi deformasiyanın zamandan asılı olaraq dəyişməsi halında elastiki analogiya metodu ilə irsiliyin kontakt gərginliyin paylanma xarakterinə təsiri təyin edilmişdir.

3.1. Dairəvi deşikli yarım silindrik səth ilə kipləşdirici element arasında kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinin təyini

Dairəvi deşikli yarım silindrik səthə baxaq. Bu səthə kipləşdirici element yarım silindrik sıxacaq vasitəsilə sıxılmışdır (Şəkil 3.1.1). Baxdığımız modeldə deşiyin diametri silindrin diametri ilə müqayisədə çox kiçik olduğundan dairəvi deşiyin kontur əyrisini müstəvi əyrisi kimi qəbul edək.



Şəkil 3.1.1. Hesabat sxemi

Silindrik koordinat sisteminin başlanğıcını silindrin eninə kəsik müstəvisinin mərkəzində yerləşdirək, r koordinat oxunu radiusun böyüməsi istiqamətində yönəldək (Şəkil 3.1.1). Bundan əlavə, φ və ρ koordinatları ilə deşik sahəsindəki nöqtələrin vəziyyətini təyin edə bilərik (Şəkil 3.1.1).

Sərhəd şərtlərini nəzərə alaraq kipləşdirici elementin radial deformasiyasını aşağıdakı formada qəbul edək [7], [9], [21], [22]:

$$u(r, \theta) = -\Delta f(r) \cos \theta, \quad (3.1.1)$$

burada $\Delta - \theta = 0$ -da kipləşdirici elementin deformasiyası, $f(r)$ - r koordinatından asılı naməlum funksiyadır.

Məsələnin oxasimmetrikliliyini nəzərə almaqla kipləşdirici elementin materialını sıxılmayan qəbul edərək yazı bilərik [23], [76], [79], [132]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ur)}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3.1.2)$$

burada w - kipləşdiricinin oxboyu deformasiyasıdır.

(3.1.1) tənliyini nəzərə almaqla (3.1.2) ifadəsindən alırıq:

$$w = \left(f'(r) + \frac{1}{r} f(r) \right) \Delta \cos \theta \cdot z + C_1, \quad (3.1.3)$$

burada C_1 - inteqral sabitidir.

Sərhəd şərti aşağıdakı kimi olar:

$$w|_{z=0} = 0, \quad (3.1.4)$$

Onda (3.1.3) ifadəsindən (3.1.4) sərhəd şərtinə əsasən inteqral sabiti üçün alırıq:

$$C_1 = 0.$$

Nisbi radial, tangensial, oxboyu və sürüşmə deformasiyaları baxdığımız halda aşağıdakı kimi olacaqdır [15], [59]:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (3.1.5)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{2} \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta}, \quad \gamma_{\theta z} = \frac{1}{2} \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta}, \quad \gamma_{zr} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right). \quad (3.1.6)$$

Kipləşdirici elementin potensial enerjisini hesablamaq üçün dəşik olan oblastda sferik koordinat sistemi daxil edək (Şəkil 3.1.1). Onda silindrdə olan dairəvi dəşiyi nəzərə alaraq kipləşdirici elementin potensial enerjisi üçün yazı bilərik [28], [34], [59], [113]:

$$\begin{aligned} \Pi = & G \int_{R_1}^{R_2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-l}^l \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{r\theta}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{\theta z}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{zr}^2 \right) r dz d\theta dr - \\ & - G \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_0} \left(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{r\theta}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{\theta z}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{zr}^2 \right) r^2 \sin \theta d\varphi d\theta dr - \int_{R_1}^{R_2} P \cdot u'_r|_{\theta=0} dr, \end{aligned} \quad (3.1.7)$$

burada R_1 və R_2 - uyğun olaraq kipləşdirici elementin daxili və xarici divarının radiusu, θ_0 - deşiyin mərkəzindən və kontur nöqtəsindən keçən radiuslar arasındakı bucaq, l - kipləşdirici elementin uzunluğunun yarısı, P - kipləşdirici elementi silindrin divarına radial istiqamətdə sıxan xarici qüvvə, G - kipləşdiricinin materialının elastiki sürüşmə moduludur.

(3.1.1), (3.1.3), (3.1.5) və (3.1.6) ifadələrini (3.1.7) düsturunda yerinə yazsaq, aşağıdakı funksionalı alırıq:

$$\begin{aligned} \Pi = & \pi G \int_{R_1}^{R_2} \left(\Delta^2 \left(\frac{l^3}{24} r - \frac{1}{16} \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{2} \cos \theta_0 - \frac{1}{6} \cos 3\theta_0 \right) r^4 \right) \cdot f''^2(r) + \Delta^2 \left(\frac{l^3}{12} - \frac{1}{8} \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{2} \cos \theta_0 - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \frac{1}{6} \cos 3\theta_0 \right) r^3 \right) \cdot f''(r) f'(r) - \Delta^2 \left(\frac{l^3}{12} \frac{1}{r} - \frac{1}{8} \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{2} \cos \theta_0 - \frac{1}{6} \cos 3\theta_0 \right) r^2 \right) \cdot f''(r) f(r) + \Delta^2 \left(2lr + \frac{l^3}{12} \frac{1}{r} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \left(\frac{29}{24} - \frac{7}{8} \cos \theta_0 - \frac{1}{3} \cos 3\theta_0 \right) r^2 \right) \cdot f'^2(r) + \Delta^2 \left(2l - \left(\frac{17}{12} - \frac{9}{8} \cos \theta_0 - \frac{7}{24} \cos 3\theta_0 \right) r \right) \cdot f'(r) f(r) + \right. \\ & \left. + \Delta \frac{P}{\pi G} f'(r) + \Delta^2 \left(\frac{17l}{8} \frac{1}{r} + \frac{l^3}{12} \frac{1}{r^3} - \left(\frac{23}{8} - \frac{7}{2} \cos \theta_0 + \frac{3}{8} \cos 3\theta_0 \right) \right) \cdot f^2(r) \right) dr. \end{aligned} \quad (3.1.8)$$

Eyler tənliyinə [34], [137] əsasən (3.1.8) funksionalından alırıq:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{l^3}{12} r^3 - \frac{1}{8} \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{2} \cos \theta_0 - \frac{1}{6} \cos 3\theta_0 \right) r^6 \right) \cdot f^{IV}(r) + \left(\frac{l^3}{6} r^2 - \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{2} \cos \theta_0 - \frac{1}{6} \cos 3\theta_0 \right) r^5 \right) \cdot f'''(r) - \\ & - \left(\frac{l^3}{3} r + 4lr^3 - \left(\frac{4}{3} - \frac{15}{16} \cos \theta_0 - \frac{19}{48} \cos 3\theta_0 \right) r^4 \right) \cdot f''(r) + \left(\frac{l^3}{3} - 4lr^2 + \left(\frac{14}{3} - \frac{27}{8} \cos \theta_0 - \frac{31}{24} \cos 3\theta_0 \right) r^3 \right) \cdot f'(r) + \\ & + \left(\frac{17l}{4} r - \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) r^2 \right) \cdot f(r) = 0. \end{aligned} \quad (3.1.9)$$

Sərhəd şərtləri olacaqdır:

$$u(r, \theta) \Big|_{\substack{r=R_2 \\ \theta=0}} = -\Delta, \quad (3.1.10)$$

$$u(r, \theta) \Big|_{\substack{r=R_2 \\ \theta=\pm\pi/2}} = 0, \quad (3.1.11)$$

$$\sigma_\theta \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = 0, \quad (3.1.12)$$

burada Δ - kipləşdiricinin $\theta = 0$, $r = R_2$ nöqtəsindəki radial deformasiyasıdır.

(3.1.1) ifadəsini nəzərə alaraq (3.1.10) şərtindən alarıq:

$$f(r) \Big|_{r=R_2} = 1. \quad (3.1.13)$$

Alınmış (3.1.9) tənliyi dördüncü tərtib dəyişən əmsallı diferensial tənlikdir. Bu tənliyin dəqiq həllini tapmaq mümkün deyil. Ona görə də bu tənliyi Qalerkin metodunu [7], [22], [23], [113] tətbiq etməklə təqribi yolla həll edək. (3.1.10) və (3.1.11) sərhəd şərtlərini nəzərə alaraq (3.1.9) tənliyinin həllini aşağıdakı kimi seçə bilərik:

$$f(r) = A_1 \frac{R_1 - r}{R_1} + A_2 \frac{(R_1 - r)^2}{R_1^2} + A_3 \frac{(R_1 - r)^3}{R_1^3} + A_4 \frac{(R_1 - r)^4}{R_1^4}, \quad (3.1.14)$$

burada A_1 , A_2 , A_3 və A_4 - naməlum sabitlərdir.

(3.1.14) ifadəsini (3.1.9) tənliyində yerinə yazaraq, alınmış ifadənin hər bir həddini növbə ilə $\delta A_2 \frac{(R_1 - r)^2}{R_1^2} dr$, $\delta A_3 \frac{(R_1 - r)^3}{R_1^3} dr$, $\delta A_4 \frac{(R_1 - r)^4}{R_1^4} dr$ hədlərinə vuraq və (3.1.13) sərhəd şərtini nəzərə alaraq R_1 -dən R_2 -ə kimi inteqrallayaraq alarıq:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(a_2^{(1)} - \frac{R_1 - R_2}{R_1} a_1^{(1)} \right) A_2 + \left(a_3^{(1)} - \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2} a_1^{(1)} \right) A_3 + \left(a_4^{(1)} - \frac{(R_1 - R_2)^3}{R_1^3} a_1^{(1)} \right) A_4 + \frac{R_1}{R_1 - R_2} a_1^{(1)} = 0 \\ \left(a_2^{(2)} - \frac{R_1 - R_2}{R_1} a_1^{(2)} \right) A_2 + \left(a_3^{(2)} - \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2} a_1^{(2)} \right) A_3 + \left(a_4^{(2)} - \frac{(R_1 - R_2)^3}{R_1^3} a_1^{(2)} \right) A_4 + \frac{R_1}{R_1 - R_2} a_1^{(2)} = 0, \quad (3.1.15) \\ \left(a_2^{(3)} - \frac{R_1 - R_2}{R_1} a_1^{(3)} \right) A_2 + \left(a_3^{(3)} - \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2} a_1^{(3)} \right) A_3 + \left(a_4^{(3)} - \frac{(R_1 - R_2)^3}{R_1^3} a_1^{(3)} \right) A_4 + \frac{R_1}{R_1 - R_2} a_1^{(3)} = 0 \end{array} \right.$$

burada

$$\begin{aligned}
a_1^{(1)} = & (R_2^6 - R_1^6) \frac{1}{R_1} \left(-\frac{1}{12} - \frac{19}{48} \cos \theta_0 + \frac{19}{48} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^5 - R_1^5) \left(-\frac{19}{30} + \frac{21}{10} \cos \theta_0 - \frac{7}{6} \cos 3\theta_0 - \frac{1}{20} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1 \left(\frac{47}{24} - \frac{111}{32} \cos \theta_0 + \frac{109}{96} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{19}{16} l \right) + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^2 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - \right. \\
& \left. - \frac{35}{12} l R_1 - \frac{1}{9} \frac{l^3}{R_1} \right) + (R_2^2 - R_1^2) \left(\frac{1}{3} l^3 + \frac{17}{8} l R_1^2 \right) - (R_2 - R_1) \frac{l^3 R_1}{3},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_2^{(1)} = & (R_2^7 - R_1^7) \frac{1}{R_1^2} \left(\frac{47}{42} - \frac{23}{56} \cos \theta_0 - \frac{107}{168} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^6 - R_1^6) \frac{1}{R_1} \left(-\frac{25}{9} + \frac{1}{6} \cos \theta_0 + \frac{41}{18} \cos 3\theta_0 - \frac{47}{24} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^5 - R_1^5) \left(\frac{17}{15} + \frac{99}{40} \cos \theta_0 - \frac{361}{120} \cos 3\theta_0 + \frac{23}{5} \frac{l}{R_1} \right) + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1 \left(\frac{11}{6} - \frac{65}{16} \cos \theta_0 + \frac{83}{48} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{13}{8} l \right) + \\
& + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^2 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - 3l R_1 - \frac{2}{9} \frac{l^3}{R_1} \right) + (R_2^2 - R_1^2) \left(\frac{2}{3} l^3 + \frac{17}{8} l R_1^2 \right) - (R_2 - R_1) \frac{2l^3 R_1}{3},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_3^{(1)} = & (R_2^8 - R_1^8) \frac{1}{R_1^3} \left(-\frac{83}{48} + \frac{7}{8} \cos \theta_0 + \frac{19}{24} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^7 - R_1^7) \frac{1}{R_1^2} \left(\frac{307}{42} - \frac{181}{56} \cos \theta_0 - \frac{625}{168} \cos 3\theta_0 + \frac{127}{28} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^6 - R_1^6) \frac{1}{R_1} \left(-\frac{187}{18} + \frac{137}{48} \cos \theta_0 + \frac{965}{144} \cos 3\theta_0 - \frac{395}{24} \frac{l}{R_1} \right) + (R_2^5 - R_1^5) \left(\frac{67}{15} + \frac{91}{40} \cos \theta_0 - \frac{689}{120} \cos 3\theta_0 + \frac{203}{10} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1 \left(\frac{41}{24} - \frac{149}{32} \cos \theta_0 + \frac{223}{96} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{59}{8} l \right) + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^2 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{37}{12} l R_1 - \frac{1}{3} \frac{l^3}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^2 - R_1^2) \left(l^3 + \frac{17}{8} l R_1^2 \right) - (R_2 - R_1) R_1 l^3,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_4^{(1)} = & (R_2^9 - R_1^9) \frac{1}{R_1^4} \left(\frac{25}{18} - \frac{11}{18} \cos \theta_0 - \frac{13}{18} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^8 - R_1^8) \frac{1}{R_1^3} \left(-\frac{241}{24} + \frac{39}{8} \cos \theta_0 + \frac{115}{24} \cos 3\theta_0 - \frac{239}{32} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^7 - R_1^7) \frac{1}{R_1^2} \left(\frac{1021}{42} - \frac{45}{4} \cos \theta_0 - \frac{1007}{84} \cos 3\theta_0 + \frac{493}{14} \frac{l}{R_1} \right) + (R_2^6 - R_1^6) \frac{1}{R_1} \left(-\frac{227}{9} + \frac{53}{6} \cos \theta_0 + \frac{265}{18} \cos 3\theta_0 - \frac{1537}{24} \frac{l}{R_1} + \frac{5}{9} \frac{l^3}{R_1^3} \right) + \\
& + (R_2^5 - R_1^5) \left(\frac{281}{30} + \frac{3}{2} \cos \theta_0 - \frac{281}{30} \cos 3\theta_0 + \frac{267}{5} \frac{l}{R_1} - \frac{4}{3} \frac{l^3}{R_1^3} \right) + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1 \left(\frac{19}{12} - \frac{21}{4} \cos \theta_0 + \frac{35}{12} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{257}{16} l + \frac{5}{6} \frac{l^3}{R_1^2} \right) + \\
& + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^2 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{19}{6} l R_1 - \frac{4}{9} \frac{l^3}{R_1} \right) + (R_2^2 - R_1^2) \left(\frac{4}{3} l^3 + \frac{17}{8} l R_1^2 \right) - (R_2 - R_1) \frac{4R_1 l^3}{3},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_1^{(2)} = & (R_2^7 - R_1^7) \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{14} + \frac{19}{56} \cos \theta_0 - \frac{19}{56} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^6 - R_1^6) \left(\frac{4}{9} - \frac{103}{48} \cos \theta_0 + \frac{197}{144} \cos 3\theta_0 + \frac{1}{24} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^5 - R_1^5) \left(R_1 \left(-\frac{11}{5} + \frac{39}{8} \cos \theta_0 - \frac{83}{40} \cos 3\theta_0 \right) - l \right) + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1^2 \left(3 - \frac{157}{32} \cos \theta_0 + \frac{45}{32} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{27}{8} l R_1 + \frac{1}{12} \frac{l^3}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^3 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{1}{3} l^3 - \frac{13}{3} l R_1^2 \right) + (R_2^2 - R_1^2) \left(\frac{1}{2} l^3 R_1 + \frac{17}{8} l R_1^3 \right) - (R_2 - R_1)^2 \frac{l^3 R_1}{3},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_2^{(2)} = & (R_2^8 - R_1^8) \frac{1}{R_1^2} \left(-\frac{47}{48} + \frac{23}{64} \cos \theta_0 + \frac{107}{192} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^7 - R_1^7) \frac{1}{R_1} \left(\frac{7}{2} - \frac{31}{56} \cos \theta_0 + \frac{145}{56} \cos 3\theta_0 + \frac{47}{28} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^6 - R_1^6) \left(-\frac{67}{18} - \frac{91}{48} \cos \theta_0 + \frac{689}{144} \cos 3\theta_0 - \frac{139}{24} \frac{l}{R_1} \right) + (R_2^5 - R_1^5) \left(R_1 \left(-\frac{1}{3} + \frac{229}{40} \cos \theta_0 - \frac{527}{120} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{59}{10} l \right) + \\
& + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1^2 \left(\frac{23}{8} - \frac{11}{2} \cos \theta_0 + 2 \cos 3\theta_0 \right) + \frac{5}{8} l R_1 + \frac{1}{6} \frac{l^3}{R_1} \right) + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^3 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{2}{3} l^3 - \frac{53}{12} l R_1^2 \right) + \\
& + (R_2^2 - R_1^2) \left(l^3 R_1 + \frac{17}{8} l R_1^3 \right) - (R_2 - R_1) \frac{2l^3 R_1^2}{3},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_3^{(2)} = & (R_2^9 - R_1^9) \frac{1}{R_1^3} \left(\frac{83}{54} - \frac{7}{9} \cos \theta_0 - \frac{19}{27} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^8 - R_1^8) \frac{1}{R_1^2} \left(-\frac{65}{8} + \frac{237}{64} \cos \theta_0 + \frac{259}{64} \cos 3\theta_0 - \frac{127}{32} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^7 - R_1^7) \frac{1}{R_1} \left(\frac{227}{14} - \frac{159}{28} \cos \theta_0 - \frac{265}{28} \cos 3\theta_0 + \frac{261}{14} \frac{l}{R_1} \right) + (R_2^6 - R_1^6) \left(-\frac{127}{9} + \frac{23}{24} \cos \theta_0 + \frac{827}{72} \cos 3\theta_0 - \frac{267}{8} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^5 - R_1^5) \left(R_1 \left(\frac{31}{10} + 6 \cos \theta_0 - \frac{38}{5} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{131}{5} l \right) + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1^2 \left(\frac{11}{4} - \frac{195}{32} \cos \theta_0 + \frac{83}{32} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{81}{16} l R_1 + \frac{1}{4} \frac{l^3}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^3 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - l^3 - \frac{9}{2} l R_1^2 \right) + (R_2^2 - R_1^2) \left(\frac{3}{2} l^3 R_1 + \frac{17}{8} l R_1^3 \right) - (R_2 - R_1) R_1^2 l^3,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_4^{(2)} = & (R_2^9 - R_1^9) \frac{1}{R_1^3} \left(\frac{557}{54} - \frac{89}{18} \cos \theta_0 - \frac{269}{54} \cos 3\theta_0 + \frac{239}{36} \frac{l}{R_1} \right) + (R_2^8 - R_1^8) \frac{1}{R_1^2} \left(-\frac{501}{16} + \frac{471}{32} \cos \theta_0 + \frac{489}{32} \cos 3\theta_0 - \frac{1225}{32} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^7 - R_1^7) \frac{1}{R_1} \left(\frac{643}{14} - \frac{527}{28} \cos \theta_0 - \frac{689}{28} \cos 3\theta_0 + \frac{2523}{28} \frac{l}{R_1} - \frac{10}{21} \frac{l^3}{R_1^3} \right) + (R_2^6 - R_1^6) \left(-\frac{1189}{36} + \frac{91}{12} \cos \theta_0 + \frac{811}{36} \cos 3\theta_0 - \frac{2605}{24} \frac{l}{R_1} + \frac{5}{3} \frac{l^3}{R_1^3} \right) + \\
& + (R_2^5 - R_1^5) \left(R_1 \left(\frac{81}{10} + \frac{57}{10} \cos \theta_0 - \frac{117}{10} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{265}{4} l - \frac{2l^3}{R_1^2} \right) + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1^2 \left(\frac{21}{8} - \frac{107}{16} \cos \theta_0 + \frac{51}{16} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{219}{16} l R_1 + \frac{7}{6} \frac{l^3}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^3 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{4}{3} l^3 - \frac{55}{12} l R_1^2 \right) + (R_2^2 - R_1^2) \left(2l^3 R_1 + \frac{17}{8} l R_1^3 \right) - (R_2 - R_1) \frac{4R_1^2 l^3}{3},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_1^{(3)} = & (R_2^8 - R_1^8) \frac{1}{R_1} \left(-\frac{1}{16} - \frac{19}{64} \cos \theta_0 + \frac{19}{64} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^7 - R_1^7) \left(-\frac{13}{42} + \frac{61}{28} \cos \theta_0 - \frac{127}{84} \cos 3\theta_0 - \frac{1}{28} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^6 - R_1^6) \left(R_1 \left(\frac{41}{18} - \frac{149}{24} \cos \theta_0 + \frac{223}{72} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{7}{8} l \right) + (R_2^5 - R_1^5) \left(R_1^2 \left(-\frac{23}{5} + \frac{44}{5} \cos \theta_0 - \frac{16}{5} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{37}{10} l R_1 - \frac{1}{15} \frac{l^3}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1^3 \left(\frac{97}{24} - \frac{203}{32} \cos \theta_0 + \frac{161}{96} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{1}{3} l^3 + \frac{53}{8} l R_1 \right) + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^4 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{2}{3} l^3 R_1 - \frac{23}{4} l R_1^3 \right) + \\
& + (R_2^2 - R_1^2) \left(\frac{2}{3} l^3 R_1^2 + \frac{17}{8} l R_1^4 \right) - (R_2 - R_1)^3 \frac{l^3 R_1}{3},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_2^{(3)} = & (R_2^9 - R_1^9) \frac{1}{R_1^2} \left(\frac{47}{54} - \frac{23}{72} \cos \theta_0 - \frac{107}{216} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^8 - R_1^8) \frac{1}{R_1} \left(-\frac{97}{24} + \frac{27}{32} \cos \theta_0 + \frac{271}{96} \cos 3\theta_0 - \frac{47}{32} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^7 - R_1^7) \left(\frac{281}{42} + \frac{15}{14} \cos \theta_0 - \frac{281}{42} \cos 3\theta_0 + \frac{93}{14} \frac{l}{R_1} \right) + (R_2^6 - R_1^6) \left(R_1 \left(-\frac{31}{9} - \frac{20}{3} \cos \theta_0 + \frac{76}{9} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{257}{24} l \right) + \\
& + (R_2^5 - R_1^5) \left(R_1^2 \left(-\frac{79}{30} + \frac{81}{8} \cos \theta_0 - \frac{719}{120} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{27}{5} l R_1 - \frac{2}{15} \frac{l^3}{R_1} \right) + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1^3 \left(\frac{47}{12} - \frac{111}{16} \cos \theta_0 + \frac{109}{48} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{2}{3} l^3 + \frac{63}{16} l R_1 \right) + \\
& + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^4 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{4}{3} l^3 R_1 - \frac{35}{6} l R_1^3 \right) + (R_2^2 - R_1^2) \left(-\frac{4}{3} l^3 R_1^2 + \frac{17}{8} l R_1^4 \right) - (R_2 - R_1)^3 \frac{2l^3 R_1}{3},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_3^{(3)} = & (R_2^{10} - R_1^{10}) \frac{1}{R_1^3} \left(-\frac{83}{60} + \frac{7}{10} \cos \theta_0 + \frac{19}{30} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^9 - R_1^9) \frac{1}{R_1^2} \left(\frac{473}{54} - \frac{293}{72} \cos \theta_0 - \frac{929}{216} \cos 3\theta_0 + \frac{127}{32} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^8 - R_1^8) \frac{1}{R_1} \left(-\frac{357}{16} + \frac{555}{64} \cos \theta_0 + \frac{789}{64} \cos 3\theta_0 - \frac{649}{32} \frac{l}{R_1} \right) + (R_2^7 - R_1^7) \left(\frac{1189}{42} - \frac{13}{2} \cos \theta_0 - \frac{811}{42} \cos 3\theta_0 + \frac{189}{4} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^6 - R_1^6) \left(R_1 \left(-\frac{601}{36} - \frac{97}{24} \cos \theta_0 + \frac{1283}{72} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{1325}{24} l \right) + (R_2^5 - R_1^5) \left(R_1^2 \left(\frac{9}{10} + \frac{87}{8} \cos \theta_0 - \frac{387}{40} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{121}{4} l R_1 - \frac{1}{5} \frac{l^3}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1^3 \left(\frac{91}{24} - \frac{241}{32} \cos \theta_0 + \frac{275}{96} \cos 3\theta_0 \right) + l^3 - \frac{27}{16} l R_1 \right) + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^4 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - 2l^3 R_1 - \frac{71}{12} l R_1^3 \right) + \\
& + (R_2^2 - R_1^2) \left(2l^3 R_1^2 + \frac{17}{8} l R_1^4 \right) - (R_2 - R_1)^3 R_1 l^3,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_4^{(3)} = & (R_2^{11} - R_1^{11}) \frac{1}{R_1^4} \left(\frac{25}{22} - \frac{1}{2} \cos \theta_0 - \frac{13}{22} \cos 3\theta_0 \right) + (R_2^{10} - R_1^{10}) \frac{1}{R_1^3} \left(-\frac{158}{15} + 5 \cos \theta_0 + \frac{77}{15} \cos 3\theta_0 - \frac{239}{40} \frac{l}{R_1} \right) + \\
& + (R_2^9 - R_1^9) \frac{1}{R_1^2} \left(\frac{1030}{27} - \frac{649}{36} \cos \theta_0 - \frac{2005}{108} \cos 3\theta_0 + \frac{122}{3} \frac{l}{R_1} \right) + (R_2^8 - R_1^8) \frac{1}{R_1} \left(-\frac{143}{2} + \frac{499}{16} \cos \theta_0 + \frac{589}{16} \cos 3\theta_0 - \frac{937}{8} \frac{l}{R_1} + \frac{5}{12} \frac{l^3}{R_1^3} \right) + \\
& + (R_2^7 - R_1^7) \left(\frac{1559}{21} - \frac{709}{28} \cos \theta_0 - \frac{527}{12} \cos 3\theta_0 + \frac{1282}{7} \frac{l}{R_1} - \frac{40}{21} \frac{l^3}{R_1^3} \right) + (R_2^6 - R_1^6) \left(R_1 \left(-\frac{358}{9} + \frac{17}{6} \cos \theta_0 + \frac{581}{18} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{655}{4} l + \frac{10}{3} \frac{l^3}{R_1^2} \right) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (R_2^5 - R_1^5) \left(R_1^2 \left(6 + \frac{221}{20} \cos \theta_0 - \frac{57}{4} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{386}{5} l R_1 - \frac{44}{15} \frac{l^3}{R_1} \right) + (R_2^4 - R_1^4) \left(R_1^3 \left(\frac{11}{3} - \frac{65}{8} \cos \theta_0 + \frac{83}{24} \cos 3\theta_0 \right) + \frac{13}{6} l^3 - \frac{41}{4} l R_1^2 \right) + \\
& + (R_2^3 - R_1^3) \left(-\frac{1}{3} R_1^4 \left(\frac{25}{6} - \frac{23}{4} \cos \theta_0 + \frac{13}{12} \cos 3\theta_0 \right) - \frac{8}{3} l^3 R_1 - 6 l R_1^3 \right) + (R_2^2 - R_1^2) \left(\frac{8}{3} l^3 R_1^2 + \frac{17}{8} l R_1^4 \right) - (R_2 - R_1)^3 \frac{4 R_1 l^3}{3}.
\end{aligned}$$

(3.1.15) tənliklər sistemini həll etsək, alırıq:

$$\left\{ \begin{aligned}
A_1 &= \frac{R_1}{R_1 - R_2} - A_2 \frac{R_1 - R_2}{R_1} - A_3 \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2} - A_4 \frac{(R_1 - R_2)^3}{R_1^3} \\
A_2 &= -\frac{a_3^{(1)} - \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2} a_1^{(1)}}{a_2^{(1)} - \frac{R_1 - R_2}{R_1} a_1^{(1)}} A_3 - \frac{a_4^{(1)} - \frac{(R_1 - R_2)^3}{R_1^3} a_1^{(1)}}{a_2^{(1)} - \frac{R_1 - R_2}{R_1} a_1^{(1)}} A_4 - \frac{a_1^{(1)}}{a_2^{(1)} - \frac{R_1 - R_2}{R_1} a_1^{(1)}} \frac{R_1}{R_1 - R_2} \\
A_3 &= -\frac{(a_4^{(2)} - \nu_1 a_4^{(1)}) - (a_1^{(2)} - \nu_1 a_1^{(1)}) \frac{(R_1 - R_2)^3}{R_1^3}}{(a_3^{(2)} - \nu_1 a_3^{(1)}) - (a_1^{(2)} - \nu_1 a_1^{(1)}) \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2}} A_4 - \frac{a_1^{(2)} - \nu_1 a_1^{(1)}}{(a_3^{(2)} - \nu_1 a_3^{(1)}) - (a_1^{(2)} - \nu_1 a_1^{(1)}) \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2}} \frac{R_1}{R_1 - R_2} \\
A_4 &= -\frac{(a_1^{(3)} - \nu_2 a_1^{(1)}) - \nu_3 (a_1^{(2)} - \nu_1 a_1^{(1)})}{((a_4^{(3)} - \nu_2 a_4^{(1)}) - \nu_3 (a_4^{(2)} - \nu_1 a_4^{(1)})) - ((a_1^{(3)} - \nu_2 a_1^{(1)}) - \nu_3 (a_1^{(2)} - \nu_1 a_1^{(1)})) \frac{(R_1 - R_2)^3}{R_1^3}} \frac{R_1}{R_1 - R_2}
\end{aligned} \right. \quad (3.1.16)$$

burada

$$\begin{aligned}
\nu_1 &= \frac{a_2^{(2)} - \frac{R_1 - R_2}{R_1} a_1^{(2)}}{a_2^{(1)} - \frac{R_1 - R_2}{R_1} a_1^{(1)}}, & \nu_2 &= \frac{a_2^{(3)} - \frac{R_1 - R_2}{R_1} a_1^{(3)}}{a_2^{(1)} - \frac{R_1 - R_2}{R_1} a_1^{(1)}}, \\
\nu_3 &= \frac{(a_3^{(3)} - \nu_2 a_3^{(1)}) - (a_1^{(3)} - \nu_2 a_1^{(1)}) \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2}}{(a_3^{(2)} - \nu_1 a_3^{(1)}) - (a_1^{(2)} - \nu_1 a_1^{(1)}) \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2}}.
\end{aligned}$$

Kipləşdiricinin ixtiyari nöqtəsində tangensial gərginlik aşağıdakı düstur ilə təyin edilə bilər [59], [76], [113]:

$$\sigma_\theta = G(2\varepsilon_\theta + s), \quad (3.1.17)$$

burada s - hidrostatik gərginlik funksiyasıdır.

Onda (3.1.1), (3.1.5) ifadələrini və (3.1.12) şərtini (3.1.17) tənliyində nəzərə alsaq, alarıq:

$$s = 0. \quad (3.1.18)$$

Kipləşdiricinin ixtiyari nöqtəsində radial gərginliyi (3.1.14) düsturu ilə təyin edilir [59]. (3.1.1), (3.1.5) və (3.1.8) bərabərliklərini (3.1.14) ifadəsində nəzərə alsaq, alarıq:

$$\sigma_r = -2G\Delta f'(r) \cos \theta. \quad (3.1.19)$$

$r = R_1$ -də kipləşdiricinin səthindəki kontakt gərginliyi (3.1.14) və (3.1.16) ifadələrini (3.1.19) tənliyində nəzərə almaqla təyin edilə bilər:

$$\sigma_r = -2G\Delta f'(r) \cos \theta \Big|_{r=R_1}. \quad (3.1.20)$$

P xarici qüvvəsi aşağıdakı kimi tapılır:

$$P = 2 \int_0^{\pi/2} \sigma_r \Big|_{r=R_1} l R_1 \cos \theta d\theta. \quad (3.1.21)$$

Onda (3.1.20) ifadəsini (3.1.21) tənliyində yerinə yazsaq, alarıq:

$$P = \pi G\Delta l R_1 f'(R_1). \quad (3.1.22)$$

Parametrlərin

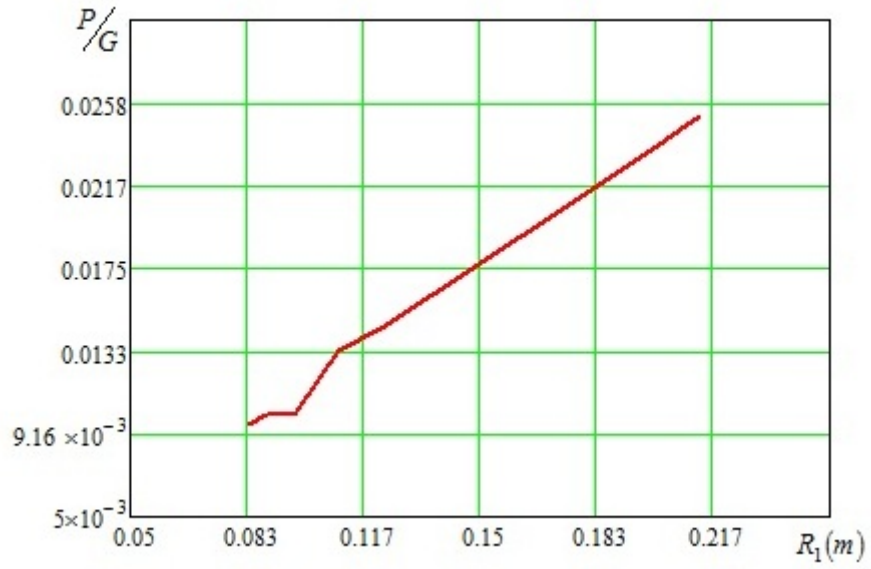
$$R_1 = 0.084 \text{ m}, \quad R_2 = R_1 + \delta, \quad \delta = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}, \quad \Delta = 0,05 \text{ m},$$

$$l = 0.3 \text{ m}, \quad \theta_0 = \frac{2\pi}{35}, \quad G = 2.3 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

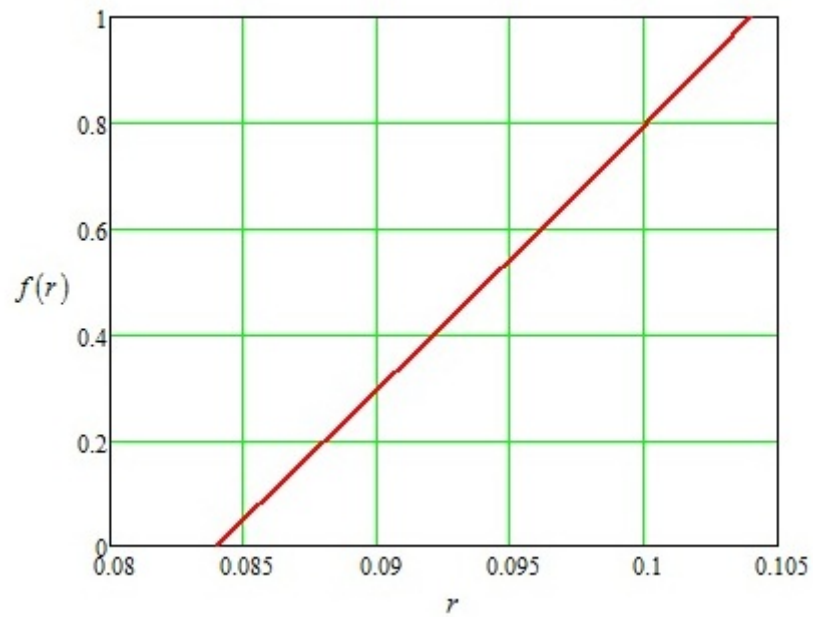
qiymətlərində (3.1.14), (3.1.20) və (3.1.22) ifadələrinə əsasən ədədi hesabat aparılmışdır. Aparılmış ədədi hesabatın nəticələri Qrafik 3.1.1, Qrafik 3.1.2 və Qrafik 3.1.3-də verilmişdir.

Qrafik 3.1.1-dən görüldüyü kimi eyni şərt daxilində silindrin radiusu böyüdükcə silindrin səthində hermetikliyi təmin edən xarici qüvvənin qiyməti də artır. Bununla belə bu asılılıq demək olar ki, xətti xarakter daşıyır.

Qrafik 3.1.2-də $f(r)$ funksiyasının r koordinatından asılılıq qrafiki verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi $r \in [R_1; R_2]$ koordinatının böyüməsi ilə $f(r)$ funksiyasının qiyməti də artır. Bu artım xətti xarakter daşıyır.



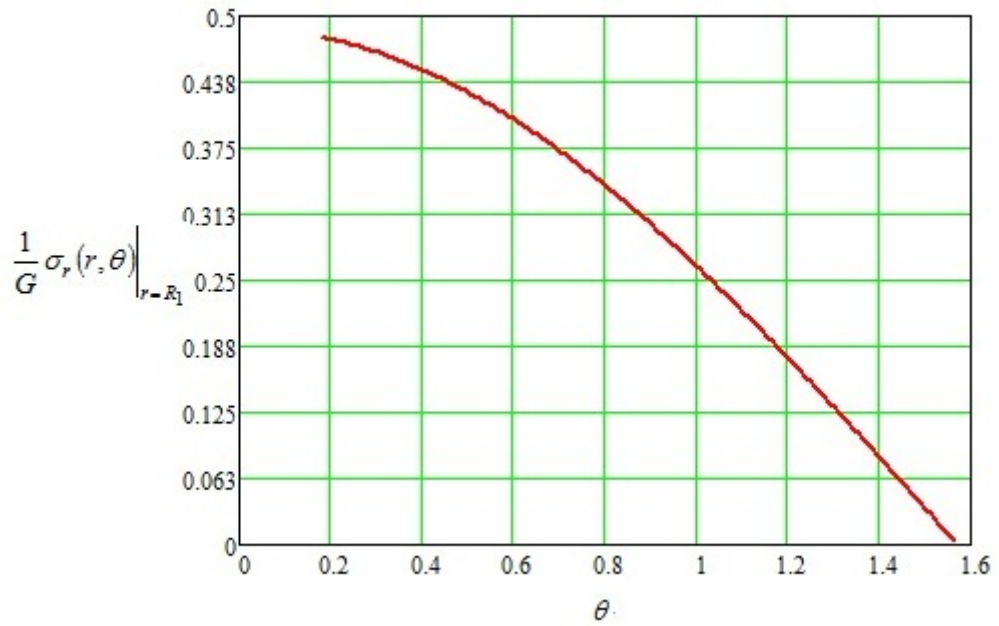
Qrafik 3.1.1. Hermetiklik yaradan P xarici qüvvənin qiymətinin kipləşdiricinin daxili səthinin radiusundan asılılıq qrafiki



Qrafik 3.1.2. $f(r)$ funksiyasının r radiusundan asılılıq qrafiki

Qrafik 3.1.3-də üzərindəki dəşik nəzərə alınmaqla silindrin xarici divarı ilə kipləşdirici elementin daxili səthi arasında yaranan kontakt gərginliyin $\theta \in \left[\theta_0; \frac{\pi}{2} \right]$ polyar bucağından asılı olaraq paylanma xarakteri verilmişdir.

Qrafik 3.1.3-dən görüldüyü kimi kontakt gərginliyi θ bucağının böyüməsi ilə azalır və $\theta = \frac{\pi}{2}$ olduqda sıfır qiyməti alır.



Qrafik 3.1.3. Silindrin xarici divarı ilə kipləşdirici elementin daxili səthi arasında yaranan kontakt gərginliyin paylanma xarakterinin θ polyar bucağından asılılıq qrafiki

Beləliklə, alınmış (3.1.20) ifadəsi dəşik nəzərə alınmaqla silindrin xarici divarı ilə kipləşdirici elementin daxili səthi arasındakı kontakt gərginliyin kipləşdiricinin fiziki-mexaniki göstəricilərindən və hündəsi ölçülərindən asılı olaraq paylanma xarakterini təyin etməyə imkan verir.

3.2. Tangensial deformasiyanın təsiri

Kipləşdirici elementin divarının qalınlığı çoxaldıqda oxboyu deformasiyanın təsirini nəzərdən atmaq xətalara gətirib çıxarır. Ona görə də oxboyu deformasiyanın nəzərə alınmasının dəşikli yarımşilindrik səthdə yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsirinə baxaq [45].

Dairəvi dəşikli yarımşilindrik səthə baxaq. Bu səthə kipləşdirici element yarımşilindrik sıxac vasitəsilə sıxılmışdır (Şəkil 3.1.1). Baxdığımız modeldə dəşiyin diametri şilindrin diametri ilə müqayisədə çox kiçik olduğundan dairəvi dəşiyin kontur əyrisini müstəvi əyrisi kimi qəbul edək.

Şilindrik koordinat sisteminin başlanğıcını şilindrin eninə kəsik müstəvisinin mərkəzində yerləşdirək, r koordinat oxunu radiusun böyüməsi istiqamətində yönəldək (Şəkil 3.1.1). Bundan əlavə, φ və ρ koordinatları ilə dəşik sahəsindəki nöqtələrin vəziyyətini təyin edək (Şəkil 3.1.1).

Kipləşdirici elementin materialını sıxılmayan qəbul edərək məsələnin oxasimmetrikliyini nəzərə almaqla yaza bilərik [22], [23], [59], [76], [132]:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3.2.1)$$

burada u -kipləşdirici elementin radial, v -tangensial və w -oxboyu deformasiyasıdır.

Sərhəd şərtləri aşağıdakı kimi olar:

$$u(r, \theta) \Big|_{\theta=\pm\frac{\pi}{2}} = 0, \quad (3.2.2)$$

$$v(r, \theta) \Big|_{\theta=0} = 0. \quad (3.2.3)$$

(3.2.2) və (3.2.3) sərhəd şərtləri daxilində kipləşdirici elementin ixtiyari nöqtəsindəki radial və tangensial deformasiyasını aşağıdakı formada ifadə edək [7], [9], [21], [22], [59]:

$$u(r, \theta) = -\Delta f(r) \cos \theta, \quad (3.2.4)$$

$$v(r, \theta) = f_1(r) \sin \theta, \quad (3.2.5)$$

burada $\Delta - \theta = 0$ -da kipləşdirici elementin deformasiyası, $f(r)$ və $f_1(r)$ - r koordinatından asılı olan naməlum funksiyalardır.

(3.2.4) və (3.2.5) bərabərliklərini nəzərə almaqla (3.2.1) ifadəsindən alarıq:

$$w = \left(\Delta f'(r) + \frac{\Delta}{r} f(r) - \frac{1}{r} f_1(r) \right) \cos \theta \cdot z + C_1, \quad (3.2.6)$$

burada C_1 - inteqral sabitidir.

Aşağıdakı sərhəd şərti ödənilir:

$$w \Big|_{\substack{z=0 \\ r=R_1}} = 0, \quad (3.2.7)$$

onda (3.2.7) sərhəd şərtini (3.2.6) bərabərliyində yazsaq, inteqral sabiti üçün alarıq:

$$C_1 = 0.$$

Baxdığımız hal üçün nisbi radial, tangensial, oxboyu və sürüşmə deformasiyaları [15], [79] üçün yazıla bilər:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (3.2.8)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right), \quad \gamma_{\theta z} = \frac{1}{2} \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta}, \quad \gamma_{zr} = \frac{1}{2} \frac{\partial w}{\partial r}. \quad (3.2.9)$$

Kipləşdirici elementin potensial enerjisini hesablamaq üçün dəyişən olan oblastda sferik koordinat sistemi daxil edək (Şəkil 3.1.1). Onda silindrdə olan dairəvi deşiyi nəzərə almaqla kipləşdirici elementin potensial enerjisi üçün yazıla bilər [28], [34], [59], [113]:

$$\begin{aligned} \Pi = & G \int_{R_1}^{R_2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-l}^l \left(\varepsilon_{rr}^2 + \varepsilon_{\theta\theta}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{r\theta}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{\theta z}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{zr}^2 \right) r \, dz \, d\theta \, dr - \\ & - G \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_0} \left(\varepsilon_{rr}^2 + \varepsilon_{\theta\theta}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{r\theta}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{\theta z}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{zr}^2 \right) r^2 \sin \theta \, d\varphi \, d\theta \, dr - \int_{R_1}^{R_2} P \cdot u'_r \Big|_{\theta=0} \, dr, \quad (3.2.10) \end{aligned}$$

burada R_1 və R_2 - uyğun olaraq kipləşdirici elementin daxili və xarici radiusları, θ_0 - deşiyin mərkəz və kontur nöqtələrindən keçən radiusları arasındakı bucaq, l - kipləşdirici elementin uzunluğunun yarısı, P - kipləşdiricini radial istiqamətdə

silindrin divarına sıxan xarici qüvvə, G – kipləşdirici elementin materialının elastiki sürüşmə moduludur.

(3.2.4)-(3.2.6), (3.2.8) və (3.2.9) ifadələrini (3.2.10) tənliyində nəzərə alsaq, aşağıdakı funksionalı alırıq:

$$\begin{aligned}
\Pi = 2\pi G \int_{R_1}^{R_2} & \left(\frac{1}{12} \Delta^2 \left((\cos^3 \theta_0 - 1)r^4 + l^3 r \right) \cdot f''^2(r) + \frac{1}{6} \Delta^2 \left((\cos^3 \theta_0 - 1)r^3 + l^3 \right) \cdot f''(r) f'(r) + \right. \\
& + \frac{1}{6} \Delta^2 \left((1 - \cos^3 \theta_0) \cdot r^2 - l^3 \frac{1}{r} \right) \cdot f''(r) f(r) + \Delta^2 \left(\left(\frac{4}{3} \cos^3 \theta_0 + \frac{1}{4} \cos \theta_0 - \frac{19}{12} \right) r^2 + 2lr + \frac{l^3}{6} \frac{1}{r} \right) f'^2(r) + \\
& + 2\Delta^2 \left(\left(\frac{1}{2} \cos^3 \theta_0 + \frac{1}{4} \cos \theta_0 - \frac{3}{4} \right) r + l \right) f'(r) f(r) + \frac{\Delta P}{2\pi G} \cdot f'(r) + \Delta^2 \left(\frac{9l}{4} \frac{1}{r} + \frac{l^3}{6} \frac{1}{r^3} + \frac{7}{6} \cos^3 \theta_0 + \frac{3}{4} \cos \theta_0 - \frac{23}{12} \right) f^2(r) + \\
& + \frac{1}{4} \left(\left(-\frac{1}{3} \cos^3 \theta_0 + 2 \cos \theta_0 - \frac{5}{3} \right) \cdot r^2 + lr + \frac{l^3}{6} \frac{1}{r} \right) f_1'^2(r) + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{1}{3} \cos^3 \theta_0 - 2 \cos \theta_0 + \frac{5}{3} \right) r - \frac{l^3}{3} \frac{1}{r^2} - l \right) f_1'(r) f_1(r) + \\
& + 2 \left(\frac{9l}{8} \frac{1}{r} + \frac{l^3}{12} \frac{1}{r^3} + \frac{7}{12} \cos^3 \theta_0 + \frac{3}{8} \cos \theta_0 - \frac{23}{24} \right) f_1^2(r) - 4 \Delta \left(\frac{9l}{8} \frac{1}{r} + \frac{l^3}{12} \frac{1}{r^3} + \frac{7}{12} \cos^3 \theta_0 + \frac{3}{8} \cos \theta_0 - \frac{23}{24} \right) f(r) f_1(r) - \\
& - 2\Delta \left(\left(\frac{1}{2} \cos^3 \theta_0 + \frac{1}{4} \cos \theta_0 - \frac{3}{4} \right) r + l \right) f'(r) f_1(r) + \frac{1}{2} \Delta \left(\left(-\frac{1}{3} \cos^3 \theta_0 + 2 \cos \theta_0 - \frac{5}{3} \right) r + \frac{l^3}{3} \frac{1}{r^2} + l \right) f(r) f_1'(r) + \\
& + \Delta \left(\frac{1}{6} (\cos^3 \theta_0 - 1)r^2 + \frac{l^3}{4} \frac{1}{r} \right) f''(r) f_1(r) + \frac{\Delta}{6} \left((1 - \cos^3 \theta_0)r^3 - l^3 \right) \cdot f''(r) f_1'(r) + \\
& \left. + \frac{\Delta}{6} \left((1 - \cos^3 \theta_0)r^2 - l^3 \frac{1}{r} \right) \cdot f'(r) f_1'(r) \right) dr. \tag{3.2.11}
\end{aligned}$$

Eyler tənliyinə əsasən (3.2.11) funksionalından $f(r)$ və $f_1(r)$ funksiyalarına nəzərən dəyişən əmsallı diferensial tənlik alırıq. Bu tənliyi dəqiq həll etmək mümkün deyil. Ona görə də $f(r)$ və $f_1(r)$ funksiyalarını (3.2.11) funksionalından Rits metodunun [7], [22], [23], [59] tətbiqi ilə təqribi təyin edək. $f(r)$ və $f_1(r)$ funksiyalarını sərhəd şərtlərini ödəyən qüvvət funksiyaları şəklində axtaraq:

$$u(r, \theta)|_{r=R_1} = 0, \quad v(r, \theta)|_{r=R_1} = 0, \quad v(r, \theta)|_{r=R_2} = 0, \tag{3.2.12}$$

$$f(r) = A_1 \frac{R_1 - r}{R_1} + A_2 \frac{(R_1 - r)^2}{R_1^2} + A_3 \frac{(R_1 - r)^3}{R_1^3} + A_4 \frac{(R_1 - r)^4}{R_1^4}, \tag{3.2.13}$$

$$f_1(r) = B_1 \left(1 - \frac{r}{R_1} \right) \left(1 - \frac{r}{R_2} \right) + B_2 \left(1 - \frac{r}{R_1} \right)^2 \left(1 - \frac{r}{R_2} \right)^2, \tag{3.2.14}$$

burada A_1, A_2, A_3, A_4, B_1 və B_2 təyin olunmalı sabitlərdir.

(3.2.13) və (3.2.14) ifadələrini (3.2.11) funksionalında yerinə yazıb alınmış funksionalı inteqralladıqdan sonra aldığımız ifadəni A_1, A_2, A_3, A_4, B_1 və B_2 -ə görə differensiallasaq və alınmış ifadələri sifira bərabər etsək, A_1, A_2, A_3, A_4, B_1 və B_2 -ə nəzərən cəbri tənliklər sistemi alarıq:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = \frac{R_1}{R_1 - R_2} - A_2 \frac{R_1 - R_2}{R_1} - A_3 \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2} - A_4 \frac{(R_1 - R_2)^3}{R_1^3} \\ k_2 A_1 + 2k_7 A_2 + k_8 A_3 + k_9 A_4 + k_{10} B_1 + k_{11} B_2 + n_2 P = 0 \\ k_3 A_1 + k_8 A_2 + 2k_{12} A_3 + k_{13} A_4 + k_{14} B_1 + k_{15} B_2 + n_3 P = 0 \\ k_4 A_1 + k_9 A_2 + k_{13} A_3 + 2k_{16} A_4 + k_{17} B_1 + k_{18} B_2 + n_4 P = 0 \\ k_5 A_1 + k_{10} A_2 + k_{14} A_3 + k_{17} A_4 + 2k_{19} B_1 + k_{20} B_2 = 0 \\ k_6 A_1 + k_{11} A_2 + k_{15} A_3 + k_{18} A_4 + k_{20} B_1 + 2k_{21} B_2 = 0 \end{array} \right. , \quad (3.2.15)$$

burada

$$\begin{aligned} k_1 &= 7.77 \cdot 10^{-6}, & k_2 &= -7.676 \cdot 10^{-6}, & k_3 &= 2.25 \cdot 10^{-6}, & k_4 &= -6.3609 \cdot 10^{-7}, \\ k_5 &= -1.134 \cdot 10^{-5}, & k_6 &= 1.0387 \cdot 10^{-7}, & k_7 &= 6.4679 \cdot 10^{-6}, & k_8 &= -4.637 \cdot 10^{-6}, \\ k_9 &= 1.471 \cdot 10^{-6}, & k_{10} &= -8.11 \cdot 10^{-6}, & k_{11} &= 7.4204 \cdot 10^{-8}, & k_{12} &= 1.049 \cdot 10^{-6}, \\ k_{13} &= -7.3756 \cdot 10^{-7}, & k_{14} &= 1.7541 \cdot 10^{-5}, & k_{15} &= -1.6102 \cdot 10^{-7}, & k_{16} &= 1.3755 \cdot 10^{-7}, \\ k_{17} &= -7.76826 \cdot 10^{-6}, & k_{18} &= 7.0865 \cdot 10^{-8}, & k_{19} &= 2.9431 \cdot 10^{-4}, & k_{20} &= -5.39503 \cdot 10^{-6}, \\ k_{21} &= 3.41781 \cdot 10^{-8}, & n_1 &= -2.04045 \cdot 10^{-11}, & n_2 &= 4.85821 \cdot 10^{-12}, & n_3 &= -1.15672 \cdot 10^{-12}, \\ & & & & n_4 &= 2.7541 \cdot 10^{-13}. \end{aligned}$$

$u(r, \theta)|_{r=R_2} = -\Delta$ sərhəd şərtini nəzərə almaqla bu tənliklər sistemini həll

edərək A_1, A_2, A_3, A_4, B_1 və B_2 sabitlərini kipləşdirici elementin və yarım silindrik səthin parametrləri ilə ifadə edirik:

$$\begin{aligned}
A_1 &= \frac{R_1}{R_1 - R_2} - A_2 \frac{R_1 - R_2}{R_1} - A_3 \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_1^2} - A_4 \frac{(R_1 - R_2)^3}{R_1^3}, \\
A_2 &= -\frac{R_1^2}{R_1 - R_2} \frac{k_2}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} - \frac{1}{R_1} \frac{R_1^2k_8 - (R_1 - R_2)^2k_2}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} A_3 - \frac{1}{R_1^2} \frac{k_9R_1^3 - (R_1 - R_2)^3k_2}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} A_4 - \\
&\quad - \frac{R_1k_{10}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} B_1 - \frac{R_1k_{11}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} B_2 - \frac{R_1n_2}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} P, \\
A_3 &= -\frac{R_1^3}{(R_1 - R_2)a_1} \left(k_3 - \frac{k_2(R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3)}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} \right) - \frac{1}{R_1} \frac{a_2}{a_1} A_4 - \frac{R_1^2}{a_1} \left(k_{14} - \frac{(R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3)k_{10}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} \right) B_1 - \\
&\quad - \frac{R_1^2}{a_1} \left(k_{15} - \frac{(R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3)k_{11}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} \right) B_2 - \frac{R_1^2}{a_1} \left(n_3 - \frac{R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} n_2 \right) P, \\
A_4 &= -\frac{a_1}{a_1a_4 - a_2a_3} \frac{R_1^4}{R_1 - R_2} \left(k_4 - \frac{(R_1k_9 - (R_1 - R_2)k_4)k_2}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} - \frac{a_3}{a_1} \left(k_3 - \frac{k_2(R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3)}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} \right) \right) - \\
&\quad - \frac{R_1^3a_1}{a_1a_4 - a_2a_3} \left(k_{17} - \frac{(R_1k_9 - (R_1 - R_2)k_4)k_{10}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} - \frac{a_3}{a_1} \left(k_{14} - \frac{(R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3)k_{10}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} \right) \right) B_1 - \\
&\quad - \frac{R_1^3m_1}{a_1a_4 - a_2a_3} \left(k_{18} - \frac{(R_1k_9 - (R_1 - R_2)k_4)k_{11}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} - \frac{a_3}{a_1} \left(k_{15} - \frac{(R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3)k_{11}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} \right) \right) B_2 - \\
&\quad - \frac{R_1^3a_1}{a_1a_4 - a_2a_3} \left(n_4 - \frac{R_1k_9 - (R_1 - R_2)k_4}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} n_2 - \frac{a_3}{a_1} \left(n_3 - \frac{R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} n_2 \right) \right) P, \\
B_1 &= \frac{C_1}{b_1} - \frac{b_2}{b_1} B_2 - \frac{p_1}{b_1} P, \\
B_2 &= \frac{b_1C_2 - b_3C_1}{b_1b_4 - b_2b_3} - \frac{b_1p_2 - b_3p_1}{b_1b_4 - b_2b_3} P,
\end{aligned}$$

burada

$$\begin{aligned}
b_1 &= 2k_{19} - \frac{(R_1k_{10} - (R_1 - R_2)k_5)k_{10}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} - \frac{a_5}{a_1} \left(k_{14} - \frac{(R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3)k_{10}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} \right) - \\
&\quad - \frac{a_1a_6 - a_2a_5}{a_1a_4 - a_2a_3} \left(k_{17} - \frac{(R_1k_9 - (R_1 - R_2)k_4)k_{10}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} - \frac{a_3}{a_1} \left(k_{14} - \frac{(R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3)k_{10}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} \right) \right), \\
b_2 &= k_{20} - \frac{(R_1k_{10} - (R_1 - R_2)k_5)k_{11}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} - \frac{a_5}{a_1} \left(k_{15} - \frac{(R_1k_8 - (R_1 - R_2)k_3)k_{11}}{2R_1k_7 - (R_1 - R_2)k_2} \right) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{a_1 a_6 - a_2 a_5}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \left(k_{18} - \frac{(R_1 k_9 - (R_1 - R_2) k_4) k_{11}}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} - \frac{a_3}{a_1} \left(k_{15} - \frac{(R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3) k_{11}}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} \right) \right), \\
& b_3 = k_{20} - \frac{(R_1 k_{11} - (R_1 - R_2) k_6) k_{10}}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} - \frac{a_7}{a_1} \left(k_{14} - \frac{(R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3) k_{10}}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} \right) - \\
& -\frac{a_1 a_8 - a_2 a_7}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \left(k_{17} - \frac{(R_1 k_9 - (R_1 - R_2) k_4) k_{10}}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} - \frac{a_3}{a_1} \left(k_{14} - \frac{(R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3) k_{10}}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} \right) \right), \\
& b_4 = 2k_{21} - \frac{(R_1 k_{11} - (R_1 - R_2) k_6) k_{11}}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} - \frac{a_7}{a_1} \left(k_{15} - \frac{(R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3) k_{11}}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} \right) - \\
& -\frac{a_1 a_8 - a_2 a_7}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \left(k_{18} - \frac{(R_1 k_9 - (R_1 - R_2) k_4) k_{11}}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} - \frac{a_3}{a_1} \left(k_{15} - \frac{(R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3) k_{11}}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} \right) \right), \\
& p_1 = -\frac{R_1 k_{10} - (R_1 - R_2) k_5}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} n_2 - \frac{a_5}{a_1} \left(n_3 - \frac{R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} n_2 \right) - \\
& -\frac{a_1 a_6 - a_2 a_5}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \left(n_4 - \frac{R_1 k_9 - (R_1 - R_2) k_4}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} n_2 - \frac{a_3}{a_1} \left(n_3 - \frac{R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} n_2 \right) \right), \\
& p_2 = -\frac{R_1 k_{11} - (R_1 - R_2) k_6}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} n_2 - \frac{a_7}{a_1} \left(n_3 - \frac{R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} n_2 \right) - \\
& -\frac{a_1 a_8 - a_2 a_7}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \left(n_4 - \frac{R_1 k_9 - (R_1 - R_2) k_4}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} n_2 - \frac{a_3}{a_1} \left(n_3 - \frac{R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} n_2 \right) \right), \\
& C_1 = -\frac{R_1}{R_1 - R_2} \left(k_5 - \frac{(R_1 k_{10} - (R_1 - R_2) k_5) k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} - \frac{a_5}{a_1} \left(k_3 - \frac{k_2 (R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3)}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} \right) - \right. \\
& \left. -\frac{a_1 a_6 - a_2 a_5}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \left(k_4 - \frac{(R_1 k_9 - (R_1 - R_2) k_4) k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} - \frac{a_3}{a_1} \left(k_3 - \frac{k_2 (R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3)}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} \right) \right) \right), \\
& C_2 = -\frac{R_1}{R_1 - R_2} \left(k_6 - \frac{(R_1 k_{11} - (R_1 - R_2) k_6) k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} - \frac{a_7}{a_1} \left(k_3 - \frac{k_2 (R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3)}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} \right) - \right. \\
& \left. -\frac{a_1 a_8 - a_2 a_7}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \left(k_4 - \frac{(R_1 k_9 - (R_1 - R_2) k_4) k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} - \frac{a_3}{a_1} \left(k_3 - \frac{k_2 (R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3)}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} \right) \right) \right), \\
& a_1 = 2R_1^2 k_{12} - (R_1 - R_2)^2 k_3 - \frac{R_1^2 k_8 - (R_1 - R_2)^2 k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} (R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3), \\
& a_2 = R_1^3 k_{13} - (R_1 - R_2)^3 k_3 - \frac{k_9 R_1^3 - (R_1 - R_2)^3 k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} (R_1 k_8 - (R_1 - R_2) k_3),
\end{aligned}$$

$$a_3 = R_1^2 k_{13} - (R_1 - R_2)^2 k_4 - \frac{R_1^2 k_8 - (R_1 - R_2)^2 k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} (R_1 k_9 - (R_1 - R_2) k_4),$$

$$a_4 = 2R_1^3 k_{16} - (R_1 - R_2)^3 k_4 - \frac{k_9 R_1^3 - (R_1 - R_2)^3 k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} (R_1 k_9 - (R_1 - R_2) k_4),$$

$$a_5 = R_1^2 k_{14} - (R_1 - R_2)^2 k_5 - \frac{R_1^2 k_8 - (R_1 - R_2)^2 k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} (R_1 k_{10} - (R_1 - R_2) k_5),$$

$$a_6 = R_1^3 k_{17} - (R_1 - R_2)^3 k_5 - \frac{k_9 R_1^3 - (R_1 - R_2)^3 k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} (R_1 k_{10} - (R_1 - R_2) k_5),$$

$$a_7 = R_1^2 k_{15} - (R_1 - R_2)^2 k_6 - \frac{R_1^2 k_8 - (R_1 - R_2)^2 k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} (R_1 k_{11} - (R_1 - R_2) k_6),$$

$$a_8 = R_1^3 k_{18} - (R_1 - R_2)^3 k_6 - \frac{k_9 R_1^3 - (R_1 - R_2)^3 k_2}{2R_1 k_7 - (R_1 - R_2) k_2} (R_1 k_{11} - (R_1 - R_2) k_6).$$

(3.2.4) və (3.2.5) ifadələrini (3.2.8) tənliyində yerinə yazsaq, alarıq:

$$\varepsilon_r = -\Delta f'(r) \cos \theta, \quad (3.2.16)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{f_1(r) - \Delta f(r)}{r} \cos \theta. \quad (3.2.17)$$

Kipləşdiricinin ixtiyari nöqtəsindəki radial və tangensial gərginlikləri aşağıdakı kimi ifadə edilir [59]:

$$\sigma_r = G(2\varepsilon_{rr} + s), \quad (3.2.18)$$

$$\sigma_\theta = G(2\varepsilon_{\theta\theta} + s), \quad (3.2.19)$$

burada s - hidrostatik gərginlik funksiyasıdır.

s aşağıdakı sərhəd şərtindən tapıla bilər:

$$\sigma_\theta \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = 0. \quad (3.2.20)$$

Onda (3.2.17) bərabərliyini nəzərə almaqla (3.2.19) ifadəsindən və (3.2.20) sərhəd şərtindən $s = 0$ alarıq.

Məsələnin oxasimmetrikliliyini nəzərə alaraq P xarici qüvvəsinin qiyməti aşağıdakı kimi tapıla bilər:

$$P = 4 \int_0^{\pi/2} \sigma_{rr} \Big|_{r=R_1} l R_1 \cos \theta d\theta. \quad (3.2.21)$$

(3.2.16) düsturunu və $s = 0$ bərabərliyini nəzərə almaqla (3.2.18) ifadəsindən radial gərginlik σ_r üçün tapılır:

$$\sigma_r|_{r=R_1} = -2G\Delta f'(R_1) \cos\theta. \quad (3.2.22)$$

(3.2.22) ifadəsini (3.2.21) tənliyində yerinə yazıb inteqrallasaq, alarıq:

$$P = -2\pi G\Delta l A_1. \quad (3.2.23)$$

(3.2.22) ifadəsindən alarıq:

$$\sigma_r|_{r=R_1} = -\frac{2G\Delta A_1}{R_1} \cos\theta. \quad (3.2.24)$$

Parametrlərin aşağıda verilmiş qiymətlərində (3.2.23) və (3.2.24) düsturlarına əsasən ədədi hesabat aparılmışdır:

$$R_1 = 0.084 \text{ m}, \quad R_2 = R_1 + \delta, \quad \delta = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}, \quad \Delta = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

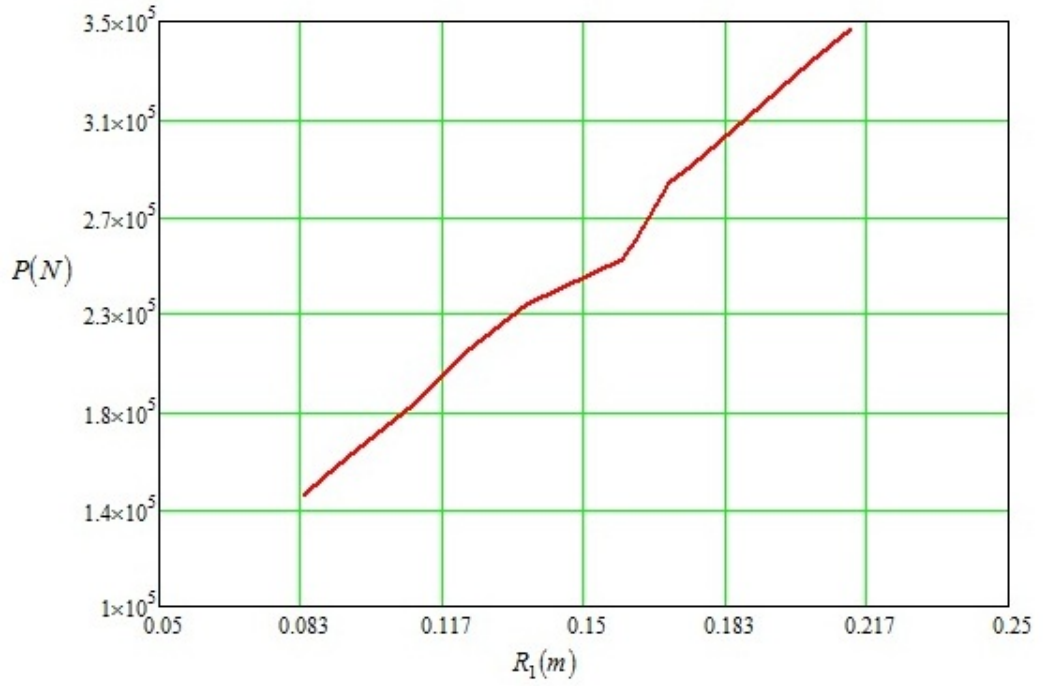
$$l = 0.2 \text{ m}, \quad \theta_0 = \frac{2\pi}{35}, \quad G = 1.3 \cdot 10^7 \text{ Pa}.$$

(3.2.23) və (3.2.24) düsturlarının ədədi hesabatının nəticələri Qrafik 3.2.1 və Qrafik 3.2.2-də verilmişdir.

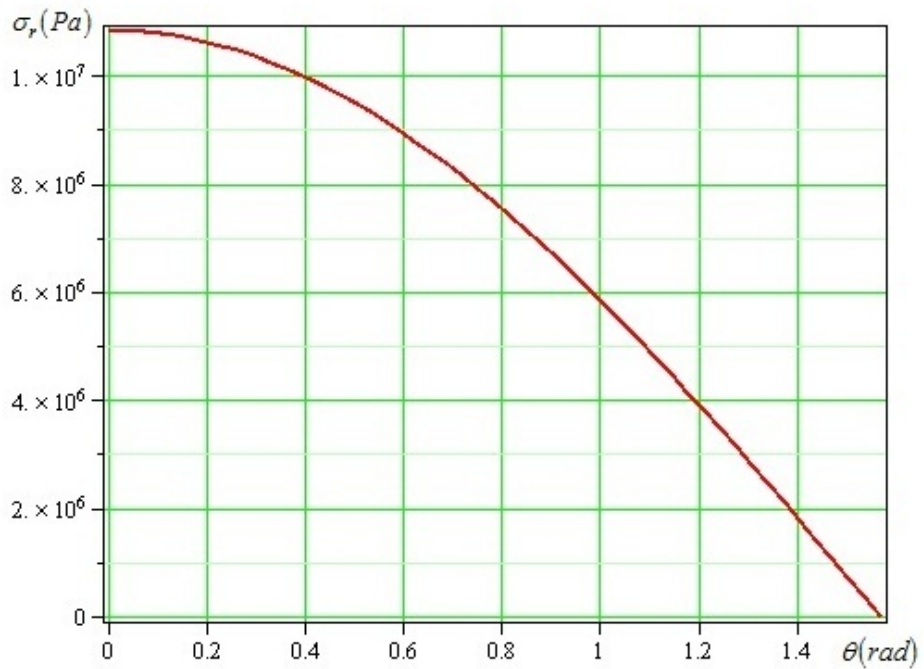
Qrafik 3.2.1-dən görüldüyü kimi eyni şərt daxilində silindrin radiusu böyüdükcə silindrin səthində hermetiklik yaratmaq üçün lazım olan xarici qüvvənin qiyməti də artır. Belə ki, bu asılılıq xətti xarakter daşıyır.

Qrafik 3.2.2-də üzərindəki dəşik nəzərə alınmaqla silindrin xarici divarı ilə kipləşdirici elementin daxili səthi arasında yaranan kontakt gərginliyin $\theta \in \left[\theta_0; \frac{\pi}{2} \right]$ polyar bucağından asılı olaraq paylanma xarakteri verilmişdir.

Qrafik 3.2.2-dən görüldüyü kimi kontakt gərginliyi θ bucağının böyüməsi ilə azalır və $\theta = \frac{\pi}{2}$ olduqda sıfır qiyməti alır.



Qrafik 3.2.1. Hermetikliyi təmin edən P xarici qüvvəsinin qiymətinin kipləşdiricinin daxili radiusundan asılılıq qrafiki



Qrafik 3.2.2. Silindrin xarici divarı ilə kipləşdirici elementin daxili səthi arasında yaranan kontakt gərginliyin paylanma xarakterinin θ polyar bucağından asılılıq qrafiki

Beləliklə, üzərindəki dəşik nəzərə alınmaqla silindrin xarici divarı ilə kipləşdirici elementin daxili səthi arasındakı kontakt gərginliyin kipləşdiricinin fiziki-mexaniki göstəricilərindən və həndəsi ölçülərindən asılı olaraq paylanma xarakterini təyin edən (3.2.22) düsturu alınmışdır.

Həmçinin bu ifadə hermetiklik yaratmaq üçün lazım olan xarici qüvvənin qiymətinin yarım silindrik səthin və kipləşdirici elementin parametrlərindən asılı olaraq tapmağa imkan verir.

3.3. İrsiliyin dəşikli yarım silindrik səth ilə kipləşdirici element arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsiri

İndi isə kipləşdirici elementin materialının irsilik xüsusiyyətinin dəşikli yarım silindrik səth ilə kipləşdirici arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsirini öyrənək [101].

Dəşikli yarım silindrik səthə baxaq. Bu səthə kipləşdirici element yarım silindrik sıxac vasitəsilə sıxılmışdır (Şəkil 3.1.1). Baxdığımız modeldə dəşiyin diametri silindrin diametri ilə müqayisədə çox kiçik olduğundan dəşiyin kontur əyrisini müstəvi əyrisi qəbul edək.

Kipləşdirici elementi irsi-elastiki cisim kimi qəbul edək və fərz edək ki, kipləşdiricinin sərhədində xarici qüvvənin və deformasiyanın dəyişməsi asta sürətlə gedir. Kipləşdirici element təbii vəziyyətdə yerləşir. Onda kipləşdirici elementin deformasiyalanma prosesini kvazistatik qəbul etmək və məsələnin həlli üçün isə elastiki analogiya metodunu seçmək olar [68], [71], [82], [91].

Qoyulmuş məsələnin elastiki halda həlli tapıldıqdan sonra (1.2.22) və (1.2.20) ifadələrindən istifadə etməklə kipləşdiricinin materialının irsi-elastiki xüsusiyyətini nəzərə alaraq deformasiya-gərginlik vəziyyətini təyin etmək olar.

§3.1-də variyasiya hesabının köməyi ilə kipləşdirici elementi elastiki cisim kimi qəbul edərək kipləşdiricinin deformasiya-gərginlik vəziyyəti öyrənilmiş, hermetiklik yaradan xarici qüvvənin qiyməti üçün (3.1.22) düsturu tapılmışdır.

Elastiki analogiya həll metoduna uyğun olaraq kipləşdiricinin oxboyu deformasiyasını (1.2.22) şəklində göstərə bilərik. Onda \bar{G} üçün (1.2.23) bərabərliyi ödənilir.

Deşikli yarımşilindrik səth ilə kipləşdirici elementin daxili səthi arasında xarici qüvvənin təsirindən yaranan kontakt gərginliyi kipləşdiricinin materialının elastiki olduğu halda (3.1.20) düsturu ilə ifadə olunmuşdur. Kipləşdirici elementin materialı irsi-elastiki olan halda (3.1.20) ifadəsində sürüşmə modulunu \bar{G} üçün alınmış (1.2.24) bərabərliyi ilə əvəz etsək, irsi-elasiki kipləşdirici elementin daxili səthi ilə deşikli yarımşilindrik səth arasında yaranan kontakt gərginliyi üçün alarıq:

$$\sigma_r = -2G \left[\left(1 - \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right] \Delta f'(r) \cos \theta \Big|_{r=R_1}. \quad (3.3.1)$$

Onda (1.2.24) ifadəsini (3.1.22)-də nəzərə alsaq, irsi-elasiki kipləşdirici elementin daxili səthi ilə deşikli yarımşilindrik səth arasında hermetiklik yaradan sıxıcı qüvvənin qiyməti üçün alarıq:

$$P = \pi G \left[\left(1 - \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right) e^{-\lambda^* t} + \frac{\nu^*}{\lambda^*} \right] \Delta l R_1 f'(R_1). \quad (3.3.2)$$

(3.3.1) və (3.3.2) düsturlarına əsasən parametrlərin aşağıdakı qiymətlərində ədədi hesabat aparılmışdır:

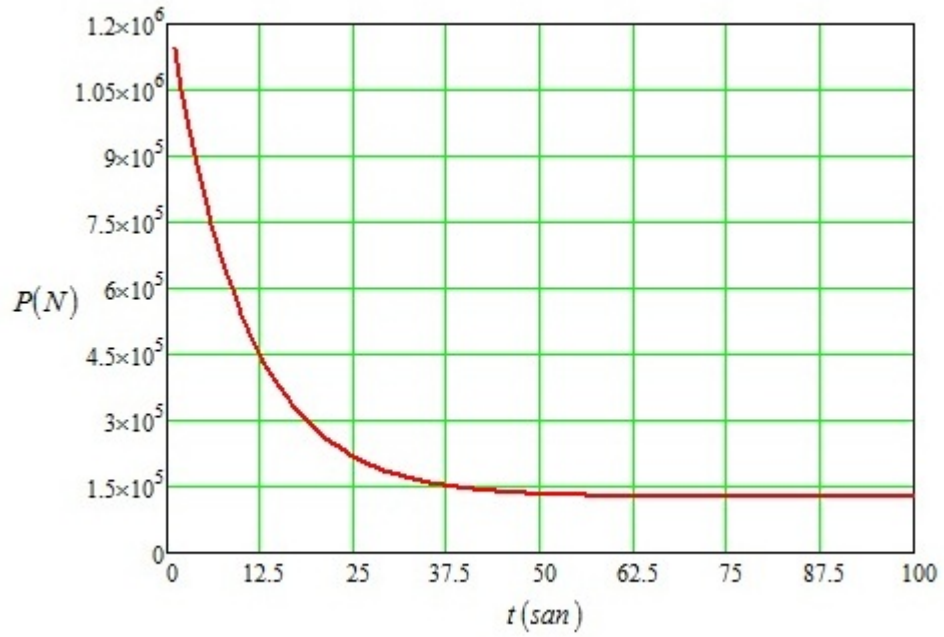
$$R_1 = 0.084 \text{ m}, \quad R_2 = R_1 + \delta, \quad \delta = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}, \quad \Delta = 0.005 \text{ m},$$

$$l = 0.3 \text{ m}, \quad \theta_0 = \frac{2\pi}{35}, \quad G = 1.3 \cdot 10^7 \text{ Pa}, \quad \nu^* = 0.01, \quad \lambda^* = 0.1.$$

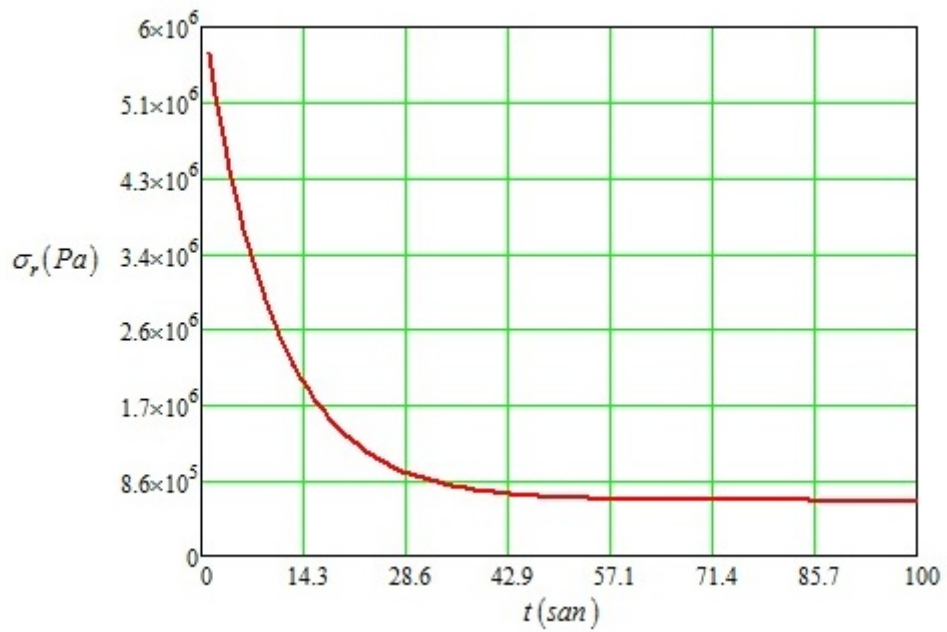
Ədədi hesabatın nəticələri Qrafik 3.3.1 və Qrafik 3.3.2-də göstərilmişdir.

Qrafik 3.3.1-dən görüldüyü kimi P oxboyu qüvvəsi zaman keçdikcə azalır və bir müddətdən sonra stabilləşir.

Kipləşdirici elementi onun daxili səthinin silindrin divarına ilk toxunana qədər sıxmaq üçün lazım olan oxboyu qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin materialının irsiliyi nəzərə alındıqda dörd dəfədən çox azalır (Qrafik 3.3.2).



Qrafik 3.3.1. Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə dəşikli yarımşilindrik səth arasında hermetiklik yaradan xarici P qüvvəsinin zamandan asılılıq qrafiki



Qrafik 3.3.2. Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə dəşikli yarımşilindrik səth arasında yaranan kontakt gərginliyinin zamandan asılılıq qrafiki

3.4. Deformasiya tempinin zamandan asılı olaraq xətti dəyişməsi halında irsiliyin dəşikli yarımşilindrik səth ilə kipləşdirici element arasında yaranan kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə təsiri

İndi də oxboyu xarici qüvvə təsiri altında nisbi deformasiya tempinin zamandan asılı olaraq xətti dəyişməsi halında (Qrafik 1.3.1) dairəvi dəşikli yarımşilindrik səth ilə kipləşdirici element arasında kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinə irsiliyin təsirinin təyini məsələsinə baxaq.

Dairəvi dəşikli yarımşilindrik səthə baxaq. Bu səthə kipləşdirici element yarımşilindrik sıxac vasitəsilə sıxılmışdır (Şəkil 3.1.1). Baxdığımız modeldə dəşiyin diametri silindrin diametri ilə müqayisədə çox kiçik olduğundan dairəvi dəşiyin kontur əyrisini müstəvi əyrisi qəbul edək. Kipləşdirici elementi irsi-elastiki cisim kimi qəbul edək və fərz edək ki, kipləşdiricinin sərhədində xarici qüvvənin və deformasiyanın dəyişməsi kiçik sürətlə gedir. Başlanğıcda kipləşdirici element təbii vəziyyətdə yerləşir. Onda kipləşdirici elementin deformasiyalanma prosesini kvazistatik qəbul edib məsələnin həlli üçün elastiki analogiya metodunu tətbiq etmək olar [68], [82], [91], [135].

Kipləşdirici elementin materialı elastiki qəbul edildiyi halda məsələnin həlli §3.1-də verilmişdir. Kipləşdirici elementin materialı irsi-elastiki qəbul edilmiş halda kipləşdiricinin ixtiyari nöqtəsindəki gərginliyi (1.2.18) düsturu ilə ifadə olunur. Kipləşdirici elementin materialının sürüşmə modulunu (1.2.22) şəklində qəbul etmək olar. Onda (1.2.22) və (1.2.20) ifadələrindən istifadə etməklə silindrik kipləşdirici elementin materialının irsi-elastiki xüsusiyyətini nəzərə alaraq elastiki analogiya metodunu tətbiq etməklə deformasiya-gərginlik vəziyyətini təyin etmək olar.

Dairəvi dəşikli yarımşilindrik səth ilə kipləşdirici elementin daxili səthi arasında xarici qüvvənin təsirindən yaranan kontakt gərginliyi kipləşdiricinin materialının elastiki olduğu halda (3.1.20) düsturu ilə ifadə olunmuşdur. Kipləşdirici elementin materialı irsi-elastiki olan halda (3.1.20) ifadəsində sürüşmə modulunu \bar{G} üçün alınmış (1.3.4) bərabərliyi ilə əvəz etsək, irsi-elastiki kipləşdirici elementin

daxili səthi ilə dəşikli yarımşilindrik səth arasında yaranan kontakt gərginliyi üçün alarıq:

$$\sigma_r = -2G \left\{ e^{-\lambda^* t} + \left[\left(\nu^* - \lambda^* \right) \left(1 - e^{-\lambda^* (t-T)} \right) - \nu^* \lambda^* (t-T) \right] H(t-T) - \left[\left(\nu^* - \lambda^* \right) \left(1 - e^{-\lambda^* t} \right) - \nu^* \lambda^* t \right] H(t) \right\} \Delta f'(r) \Big|_{r=R_1} \cos \theta, \quad (3.4.1)$$

burada T - kipləşdirici elementin yuxarı səthinin Δ qədər deformasiya olunma müddətidir.

(1.3.4) ifadəsini (3.1.22)-də nəzərə alsaq, irsi-elasiki kipləşdirici elementin daxili səthi ilə dəşikli yarımşilindrik səth arasında hermetiklik yaradan sıxıcı qüvvənin qiyməti üçün alarıq:

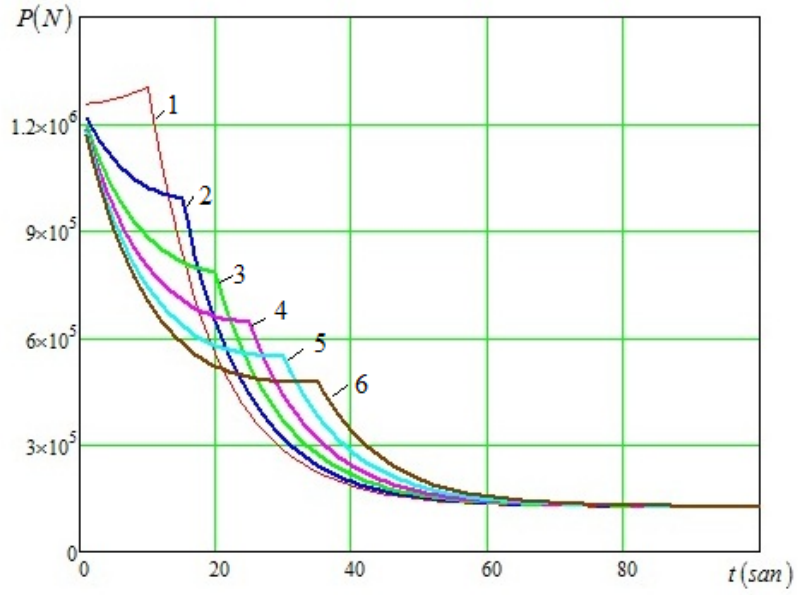
$$P = \pi G \left\{ e^{-\lambda^* t} + \left[\left(\nu^* - \lambda^* \right) \left(1 - e^{-\lambda^* (t-T)} \right) - \nu^* \lambda^* (t-T) \right] H(t-T) - \left[\left(\nu^* - \lambda^* \right) \left(1 - e^{-\lambda^* t} \right) - \nu^* \lambda^* t \right] H(t) \right\} \Delta l R_1 f'(R_1). \quad (3.4.2)$$

(3.4.1) və (3.4.2) düsturlarına əsasən parametrlərin aşağıdakı qiymətlərində ədədi hesabat aparılmışdır:

$$R_1 = 0.084 \text{ m}, \quad R_2 = R_1 + \delta, \quad \delta = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}, \quad \Delta = 0.005 \text{ m}, \quad l = 0.3 \text{ m},$$

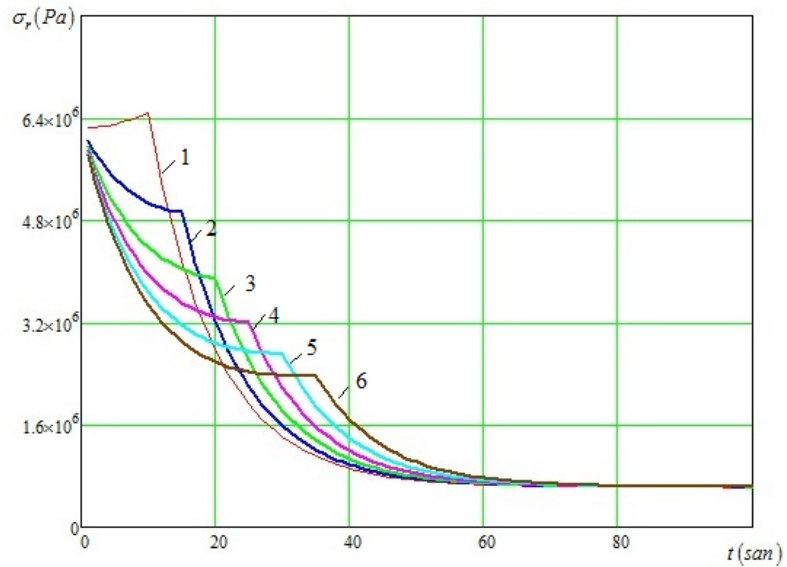
$$\theta_0 = \frac{2\pi}{35}, \quad G = 1.3 \cdot 10^8 \text{ Pa}, \quad \nu^* = 0.01, \quad \lambda^* = 0.1, \quad T = 10, 15, 20, 25, 30, 35 \text{ san}.$$

Ədədi hesabatın nəticələri Qrafik 3.4.1 və Qrafik 3.4.2-də göstərilmişdir.



1- $T = 10\text{san}$, 2- $T = 15\text{san}$, 3- $T = 20\text{san}$, 4- $T = 25\text{san}$,
5- $T = 30\text{san}$, 6- $T = 35\text{san}$

Qrafik 3.4.1. Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə deşikli yarımsilindrik səth arasında hermetiklik yaradan xarici P qüvvəsinin zamandan asılılıq qrafiki



1- $T = 10\text{san}$, 2- $T = 15\text{san}$, 3- $T = 20\text{san}$, 4- $T = 25\text{san}$,
5- $T = 30\text{san}$, 6- $T = 35\text{san}$

Qrafik 3.4.2. Kipləşdirici elementin daxili səthi ilə deşikli yarımsilindrik səth arasında yaranan kontakt gərginliyinin zamandan asılılıq qrafiki

NƏTİCƏ

1. Hermetikləşdirmə prosesinin riyazi modeli qurularaq silindrik kipləşdirici elementlərin sərhəd effektləri, kipləşdiricinin fiziki-mexaniki xüsusiyyətləri, eləcə də irsiliyi nəzərə alınaraq deformasiya-gərginlik vəziyyətinin təyini metodu işlənmiş və müəyyən edilmişdir ki, hermetikliyi təmin edən oxboyu sıxıcı qüvvənin qiyməti kipləşdiricinin hündürlüyünü artırdıqca əvvəlcə azalır, hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra isə stabilləşir.

2. Kipləşdirici elementin səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin onun fiziki-mexaniki göstəricilərindən və həndəsi ölçülərindən asılı olaraq paylanma xarakterinin təyininə imkan verən analitik ifadələr alınmışdır. Göstərilmişdir ki, ən böyük kontakt gərginliyi kipləşdirici elementin aşağı oturacağına yaxın zonada yaranır, kipləşdiricinin hündürlüyü boyu yuxarı qalxdıqca azalır və hündürlüyün müəyyən qiymətindən sonra isə praktiki olaraq itir. Müəyyən edilmişdir ki, kipləşdirici elementi eyni anda hər iki tərəfdən sıxmaqla nisbətən daha az oxboyu sıxıcı qüvvə ilə hermetiklik yaradıla bilər.

3. Müəyyən edilmişdir ki, kipləşdiricinin materialının irsilik xüsusiyyətinə malik olması hermetikliyi təmin edən əvvəlcədən verilmiş oxboyu qüvvənin təsirinin az müddətdə dəfələrlə azalmasına səbəb olur. Bu isə öz növbəsində kipləşdirici elementin səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin və beləliklə də, onun hermetikləşdirmə qabiliyyətinin azalmasına səbəb olur.

4. Oxboyu qüvvənin tətbiq tempinin kipləşdirici elementin hermetikləşdirmə qabiliyyətinə təsiri tədqiq edilərək öyrənilmişdir. Göstərilmişdir ki, hermetikliyi təmin edən oxboyu qüvvənin tətbiq tempi azaldıqca kipləşdiricinin səthi ilə silindrin divarı arasında yaranan kontakt gərginliyinin relaksasiya sürəti də azalır və zamanın müəyyən həddindən sonra stabilləşir.

5. Hermetikləşdirmə prosesinin riyazi modeli qurularaq kəşik konus formalı və həlqəvi kipləşdirici elementlərin irsiliyi nəzərə alınmaqla kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinin təyini metodu işlənmişdir. Göstərilmişdir ki, oxboyu qüvvənin

tətbiq tempi azaldıqca kontakt gərginliyinin relaksasiya sürəti də azalır və müəyyən zamandan sonra isə sabitləşir.

6. İrsilik nəzərə alınaraq dairəvi deşikli yarımşilindrik səth ilə kipləşdirici element arasında yaranan kontakt gərginliyinin təyin edilmə metodu işlənmiş və kontakt gərginliyinin paylanma xarakterini təyin edən analitik ifadə alınmışdır. Göstərilmişdir ki, kontakt gərginliyi zamandan asılı olaraq əvvəlcədən nisbətən kiçik sürətlə, sonradan isə bir qədər böyük sürətlə azalır və zamanın müəyyən anından sonra stabilləşir.

İSTİFADƏ EDİLMİŞ ƏDƏBİYYAT SİYAHISI

1. Abbasov, E.M., Rüstəmov, K.O. Birtərəfli sıxılma zamanı kipləşdiricinin daxili səthi ilə borunun divarı arasındakı kontakt gərginliyin paylanması xarakterinin təyini // Akademik A.X.Mirzəcanzadənin 85 illik yubleyinə həsr olunmuş “Neftqaz sahəsində qeyri-Nyuton sistemlər” adlı Beynəlxalq Elmi Konfransın Materialları, – Bakı: – 21-22 noyabr, – 2013, – s.40-41.
2. Abbasov, E.M., Rüstəmov, K.O. Deşikli yarımsilindrik kipləşdirici element ilə silindrin xarici divarı arasında kontakt gərginliyin paylanma xarakterinin təyini // Y.Ə.Əmənzadənin 100 illik yubleyinə həsr olunmuş “Mexanikanın klassik və müasir problemləri” adlı Respublika Elmi Konfransının Materialları, – Bakı: – 22 may, – 2014, – s.9-12.
3. Rüstəmov, K.O. İkitərəfli sıxılma zamanı kipləşdiricinin daxili səthi ilə silindrin divarı arasında kontakt gərginliyinin paylanma xarakterinin təyini // Journal of Qafqaz University, – 2013. Vol.1, No 2, – p.113-122.
4. Rüstəmov, K.O. Kipləşdiricinin daxili səthi ilə borunun divarı arasındakı kontakt gərginliyin paylanması xarakterinin müəyyənəndirilməsi // Azərbaycan xalqının Ümummilli Lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 90 illiyinə həsr edilmiş Gənc Tədqiqatçıların I Beynəlxalq Elmi Konfransının Materialları, – Bakı: Nurlar nəşr, – 25-26 aprel, – 2013, – s.373.
5. Rüstəmov, K.O. Konik kipləşdiricinin daxili səthi ilə silindrik borunun divarı arasındakı kontakt gərginliyin paylanması xarakterinin təyini // Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XVIII Respublika Elmi Konfransının Materialları, – Bakı: Mütərcim, – 19-20 dekabr, – 2013, – s.14-17.
6. Аббасов, Э.М. Определение динамической нагрузки, воспринимаемой пакером при срыве башмачного клапана // Теоретические и практические основы оптимального проектирования конструкций нефтепромыслового оборудования, – 1987. – с. 18-21.

7. Аббасов, Э.М. Определение параметров уплотнительного элемента пакера при одностороннем его сжатии // Научно-техническая конференция по динамике и прочности нефтепромыслового оборудования, – Баку: – 1989, – с. 25-28.
8. Аббасов, Э.М. Определение параметров уплотнителя пакера // Повышение надежности нефтепромыслового оборудования, – 1986. – с. 125-127.
9. Аббасов, Э.М., Кахраманов, Х.Т., Рустамова, К.О. Определение контактного давления между наружной поверхностью уплотнительного кольца и шибера прямоточной задвижки // SOCAR Proceedings, – 2013. № 3, – с. 57-59.
10. Аббасов, Э.М., Рустамова, К.О. О распределении контактного давления между внутренней поверхностью уплотнителя и стенкой цилиндра // Прикладная механика, – 2015. т. 51, № 5, – с. 125-136.
11. Адамов, А.А., Методы прикладной вязкоупругости / А.А.Адамов, В.П.Матвеевко, Н.А.Труфанов, И.Н.Шардаков, – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, – 2003. – 412 с.
12. Амензаде, Р.Ю., Ахундов, М.Б. Приближенное решение задачи устойчивости многослойного линейно вязкоупругого стержня // Вестник Чувашского Государственного Педагогического Университета им. И.Я. Яковлева (серия «Механика предельного состояния»), – 2007. № 1, – с. 10-17.
13. Амензаде, Р.Ю., Ахундов, М.Б. Вариационный метод механики гетерогенных нелинейно вязкоупругих тел // Докл. РАН, – 2006. № 1, т. 410, – с. 45-48.
14. Амензаде, Р.Ю., Киясбейли, Э.Т., Фатуллаева, Л.Ф. Предельное время сжатого многослойного вязкоупругого кольца // Вестник Чувашского Государственного Педагогического Университета им. И.Я. Яковлева (серия «Механика предельного состояния»), – 2008. № 2, – с. 5-15.
15. Амензаде, Ю.А. Теория упругости / Ю.А.Амензаде. М.: Высшая школа, – 1976. – 272 с.

16. Бартенев, Г.М. К теории высокоэластической деформации резины: сб. «Исследования в области высокомолекулярных соединений» / Г.М.Бартенев, Под. ред. С.С.Медведева. – М.: изд-во АН СССР, – 1949. – 360 с.
17. Бартенев, Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г.М.Бартенев. – М.: «Химия», – 1984. – 280 с.
18. Бартенев, Г.М. Физика и механика полимеров / Г.М.Бартенев, Ю.В.Зеленев – М.: «Высшая школа», – 1983. – 391 с.
19. Безухов, Н.И. Основы теории упругости пластичности и ползучести / Н.И.Безухов. – М.: «Высшая школа», – 1968. – 512 с.
20. Белоголов, Ю.И. Совершенствование конструкций уплотнительных соединений с тонкостенными элементами: / Автореф. дис. канд. тех. наук. / – Братск, 2013. – 24 с.
21. Бидерман, В.Л. Сжатие низких резинометаллических амортизаторов и прокладок // Изв. АН СССР. Мех. и Маш., – 1962. №3, – с.154-158.
22. Бидерман, В.Л., Сухова, Н.А. Сб. Расчеты на прочность // Машиностроение, – 1968. вып. 13, – с.113-119.
23. Бидерман, В.Л. Сб. Резино-конструкционный материал современного машиностроения / В.Л.Бидерман, Н.А. Сухова – М.: Химия, – 1967. – 261 с.
24. Бленд, Д.Р. Теория линейной вязкоупругости / Д.Р.Бленд. – М.: Мир, – 1965. – 200 с.
25. Божко, Г.В., Полякова, Н.С., Продан, В.Д. Причины нарушения герметичности разъемного соединения // Вестник ТГТУ, – 2016. Т.22, №1, – с.134-141.
26. Бугаков, Н.Н. Ползучесть полимерных материалов / Н.Н.Бугаков. – М.: Наука, – 1973. – 287 с.
27. Вакулюк, В.В. О новом типе определяющих соотношений интегрального вида в нелинейной теории вязкоупругости // Упругость и неупругость.

- Материалы Международного научного симпозиума, под ред. И.А. Кийко и др., – М: Изд. Московского университета, – 2011, – с. 312-315.
28. Васидзу, К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. (Пер. с англ.) / К.Васидзу. – М.: Мир, – 1987. – 542 с.
 29. Васильцов, Э.А. Бесконтактные уплотнения / Э.А.Васильцов. – Л.: «Машиностроение» Ленинградское отделение, – 1974. – 159 с.
 30. Вольтерра, В. Теория функционалов, интегральных и интегродифференциальных уравнений / В.Вольтерра. – М.: Наука, – 1982. – 304 с.
 31. Гаджиев, В.Дж., Мусаев, И.У., Джафаров, Х.Г. Колебания неоднородно прямоугольной пластинки, лежащей на неоднородно вязко упругом основании // Теоретическая и Прикладная Механика, – 2012. с.VII, № 2 (26), – с.139.
 32. Галин, Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости / Л.А.Галин. – М.: Наука, – 1980. – 304 с.
 33. Гонца, В.Ф. Применение вариационных методов к расчету резинотехнических изделий: / Дис. ... канд. тех. наук. / – Рига, 1973. – 150 с.
 34. Гулд, С. Вариационные методы в задачах о собственных значениях. (Перевод с англ.) / С.Гулд. – М.: Мир, – 1970. – 328 с.
 35. Дымников, С.И. Об одном приближенном методе решения задач теории упругости для несжимаемого материала // Сб. Вопросы динамики и прочности, – Рига: «Зинатне», – 1967. Вып.15, – с. 42.
 36. Дымников, С.И. Расчет жесткости сварного резинометаллического шарнира при сдвиге и скручивании // Каучук и резина, – 1974. № 9, – с. 36.
 37. Дымников, С.И. Расчет резинометаллических шарниров // Сб. Вопросы динамики и прочности, – Рига: «Зинатне», – 1974. Вып.29, – с.153.
 38. Дымников, С.И., Лавендел, Э.Э. Об одном приближенном методе решения задач теории упругости для несжимаемого материала в случае больших деформаций // Механика полимеров, – 1967. №4, – с. 652.

39. Дымников, С.И., Лавендел, Э.Э. Статический расчет некоторых видов резинометаллических амортизаторов в случае больших деформаций // Сб. Вопросы динамики и прочности, – Рига: «Зинатне», – 1968. Вып.16, – с.185.
40. Зезин, Ю.П. Исследование релаксационных свойств эластомерных композитов // Труды конференции «Наследственная механика деформирования и разрушения твердых тел – научное наследие Ю.Н. Работнова» (к 100-летию со дня рождения), – М.: ИМАШ РАН, – 2014, – с. 47-52.
41. Ильюшин, А.А. Метод аппроксимаций для расчета конструкций по линейной теории термо-вязко-упругости // Механика полимеров, – 1968. № 2, – с. 37-43.
42. Ильюшин, А.А. Труды. Том 3. Теория термовязкоупругости / А.А.Ильюшин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, – 2007. – 288 с.
43. Ильюшин, А.А., Огибалов, П.М. Квазилинейная теория вязко-упругости и метод малого параметра // Механика полимеров, – 1966. № 2.
44. Ильюшин, А.А. Основы математической теории термовязкоупругости / А.А.Ильюшин, Б.Е.Победря – М.: Наука, – 1970. – 280 с.
45. Исаев, Ф.Г., Аббасов, Э.М., Рустамова, К.О. Уплотнение полуцилиндрической поверхности с отверстием // Journal of Qafqaz University, – 2015. Vol. 3, No 2, – p. 121-130.
46. Калабеков, И.Г., Божко, Г.В., Продан, В.Д. Герметичное фланцевое соединение с параллельным включением уплотнительного элемента // Химическое и нефтяное машиностроение, – 1991. № 6, – с.22-23.
47. Канторович, Л.В., Крылов В.И. Приближенные методы высшего анализа / Л.В.Канторович, В.И.Крылов – Л.: Физматгизд., – 1962. – 708 с.
48. Качанов, Л.М. Некоторые вопросы теории ползучести / Л.М.Качанов. – М.: Гостехиздат, – 1949.
49. Качанов, Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР, ОТН, – 1955. № 8.

50. Качанов, Л.М. Теория ползучести / Л.М.Качанов. – М.: Гос. Изд-во Физико-Математической Литературы, – 1960. – 455 с.
51. Колтунов, М.А. Влияние режимов нагружения на механические характеристики, ползучесть и релаксацию стеклопластика // Вестник Моск. Ун-та, – 1965, – т. 4.
52. Колтунов, М.А. К вопросу выбора ядер при решении задач с учетом ползучести и релаксации // Механика полимеров, –1968. № 4.
53. Колтунов, М.А. О выделении главной части наследственных функций влияния для описания релаксационных процессов в начальный период // Механика полимеров, – 1967. № 4.
54. Колтунов, М.А. Определение характеристик упруго-вязких сред по данным квазистатических опытов // Механика полимеров, – 1967. № 5.
55. Колтунов, М.А. Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов/ М.А.Колтунов, В.П.Майборода, В.Г.Зубчанинов – М.: «Машиностроение», – 1983. – 239 с.
56. Кристенсен, Р. Введение о теорию вязкоупругости / Р.Кристенсен. – М.: Мир, – 1974. – 338 с.
57. Лавандел, Э.Э. Применение вариационных методов к несжимаемому материалу // Сб. Вопросы динамики и прочности. Под ред. Я.Г. Пановко, – Рига: Изд-во АН ЛатвССР, – 1962. Вып. VIII, – с.103.
58. Лавандел, Э.Э. Расчет коротких резинометаллических шарниров // Сб. Вопросы динамики и прочности. Под ред. Я.Г. Пановко, – Рига: Изд-во АН ЛатвССР, – 1963. Вып. X, – с.153
59. Лавандел, Э.Э. Расчет резинотехнических изделий / Э.Э.Лавандел. – М.: Машиностроение, – 1976. – 232 с.
60. Лавандел, Э.Э. Расчет цилиндрических резинометаллических амортизаторов сжатия // Изв. АН ЛатвССР, – 1960. №4, – с.153.
61. Лавандел, Э.Э. Формулы расчета резинометаллических амортизаторов // Сб. Вопросы динамики и прочности, – Рига: «Зинатне», –1964. Вып.11, – с.199.

62. Лейбензон, Л.С. Курс теории упругости / Л.С.Лейбензон. – М.: Гос. Издат. Тех.-Теор. Лит., – 1947. – 464 с.
63. Лепетов, В.А. Расчеты и конструирование резиновых изделий / В.А.Лепетов, Л.Н.Юрцев – Л.: Химия, 1977. – 408 с.
64. Лурье, А.И. Теория упругости / А.И.Лурье. – М.: «Наука», – 1970. – 939 с.
65. Макаров, Г.В. Уплотнительные устройства. Изд. 2-е, переработ. и доп. / Г.В.Макаров. – Л.: «Машиностроение», – 1973. – 232 с.
66. Малинин, Н.Н. Некоторые одномерные задачи неустановившейся ползучести. Сб. «Расчеты на прочность, жесткость и ползучесть элементов машиностроительных конструкций» / Н.Н.Малинин. – М.: Машгиз, – 1952.
67. Малинин, Н.Н. Основы расчетов на ползучесть / Н.Н.Малинин. – М.: Машгиз, – 1948.
68. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н.Малинин. – М.: «Машиностроение», – 1975. – 399 с.
69. Малинин, Н.Н. Расчет на ползучесть вращающихся неравномерно нагретых дисков переменной толщины. Сб. «Вопросы прочности материалов и конструкций» / Н.Н. Малинин. – М.: Изд-во АН СССР, – 1959.
70. Михлин, С.Г. Вариационные методы в математической физике / С.Г.Михлин. – М.: «Наука», – 1970. – 512 с.
71. Москвитин, В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов / В.В.Москвитин. – М.: «Наука», – 1972. – 327 с.
72. Мусхелешвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И.Мусхелешвили. – М.: Наука, – 1966. – 707 с.
73. Победря, Б.Е. Математическая теория нелинейной вязкоупругости // Упругость и неупругость, – М.: Изд-во МГУ, – 1973. Вып. 3, – с. 95-173.
74. Победря Б.Е. Модели линейной теории вязкоупругости // Известия РАН., МГТ, – 2003. №3, – с.120-134.
75. Победря, Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности / Б.Е.Победря. – М.: Изд-во МГУ, – 1995. – 366 с.

76. Потураев, В.Н. Резиновые и резинометаллические детали машин / В.Н.Потураев. – М.: «Машиностроение», – 1966. – 299 с.
77. Потураев, В.Н. Экспериментальное исследование динамических параметров резинометаллических деталей // Изв. ВУЗов, серия «Машиностроение», – 1963. №9, – с.50-59.
78. Продан, В.Д. Исследование вопросов механизма герметизации плоских упругих неподвижных уплотнений: / Дис. ... канд. тех. наук. / Москва, – 1968. – 112 с.
79. Продан, В.Д., Румянцев, О.В. Исследование условий герметизации плоских упругих неподвижных уплотнений // Химическое и нефтяное машиностроение, – 1971. № 4, – с. 3-5.
80. Продан В.Д. Герметичность оборудования / В.Д.Продан, Г.В.Божко – М.: Университет машиностроения, – 2014. – 109 с.
81. Работнов, Ю.И., Рабинович, В.П. О прочности дисков в условиях ползучести // Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, – 1959.
82. Работнов, Ю.И. Механика деформируемого твердого тела / Ю.И.Работнов. – М.: «Наука», – 1988. – 712 с.
83. Работнов, Ю.И. Некоторые вопросы теории ползучести // Вестник МГУ, – 1948. № 10.
84. Работнов, Ю.И. Ползучесть элементов конструкций / Ю.И.Работнов. – М.: «Наука», – 1966. – 752 с.
85. Работнов, Ю.И. Расчет деталей машин на ползучесть // Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, – 1948. № 6.
86. Работнов, Ю.И. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю.И.Работнов. – М.: Наука, – 1977. – 384 с.
87. Работнов, Ю.Н. О разрушении вследствие ползучести // ПМТФ, – 1963. № 2.
88. Регель, В.Р. Разрушение и усталость полимеров / В.Р.Регель и др. // Механика полимеров, – 1972. № 4, – с. 597-611.

89. Резиновский, М.М., Бродский, Г.И. К вопросу истирания резины при трении по относительно гладким поверхностям // Каучук и резина, – 1961. № 7, – с. 18.
90. Резиновский, М.М. Механические испытания каучука и резины / М.М.Резиновский, А.И.Лукомская – М.: «Химия», – 1964. – 525 с.
91. Ржаницын, А.Р. Теория ползучести / А.Р.Ржаницын. – М.: Изд-во литературы по строительству, – 1968. – 418 с.
92. Рустамова, К.О. Влияние наследственности на характер распределения контактного давления между внутренней поверхностью уплотнителя и стенкой цилиндра // Вестник Бакинского Университета, серия физико-математических наук, – 2016. № 3, – с. 116-124.
93. Рустамова, К.О. Математическое моделирование влияния наследственности на характер распределения контактного давления между внутренней поверхностью коническое уплотнителя и стенкой цилиндра // Вестник Бакинского Университета, серия физико-математических наук, – 2018. № 4, – с. 103-114.
94. Рустамова, К.О. Математическое моделирование определения характера распределения контактного давления между внутренней поверхностью конического уплотнителя и стенкой цилиндра // Известия Коми научного центра УрО РАН, – 2015. Вып.1(21), – с. 73-82.
95. Рустамова, К.О. Математическое моделирование определения характера распределения контактного давления между внутренней поверхностью конического уплотнителя и стенкой цилиндра // Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2014», – Ухта: Типография УГТУ, –26-28 марта, – 2014, – с.225-228.
96. Рустамова К.О. Математическое моделирование распределения контактного давления между полуцилиндрической поверхностью с отверстием и уплотнительным элементом // VI Молодежная научно-практическая конференция «Моделирование газовых и

- нефтегазоконденсатных месторождений», Москва: «Газпром ВНИИГАЗ», – 22-23 октября, – 2014, – с.79.
97. Талыблы, Л.Х. К вопросу деформирования и разрушения вязкоупругих тел при наличии температурного поля // изв. Ан ссср. Механика твердого тела, – 1990. №2, – с.127-139.
98. Тимошенко, С.П. Теория упругости (Перевод с англ.) / С.П.Тимошенко, Дж.Гудьер – М.: «Наука», – 1975. – 575 с.
99. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Под ред. А.И. Голубева и Л.А. Кондакова. – М.: «Машиностроение», – 1986. – 464 с.
100. Ферри, Дж. Вязкоупругие свойства полимеров (Перевод с англ.) / Дж.Ферри. – М.: Издательство Иностранной Литературы, – 1963. – 535 с.
101. Abbasov, E.M., Rustamova, K.O. Mathematical simulation of heredity effect on character of contact pressure distribution between semi-cylindrical surface with a hole and sealing element // Transactions of NAS of Azerbaijan, series of Physical-Technical & Mathematical Science, Issue Mechanics, – 2019. 39 (7), – p. 3-11.
102. Abbasov, E.M., Rustamova, K.O., Darishova, A.O. Contact pressure between the outside surface of the sealer and cylinder wall // Journal of Applied Mathematics and Physics, – 2020. Vol.8, No.2, – p.349-366. DOI: 10.4236/jamp.2020.82027
103. Abbasov, E.M., Rustamova, K.O., Darishova, A.O. Influence of viscous-elastic properties of the cylindrical sealing element on its sealing ability // Journal of Theoretical and Applied Mechanics (JTAM), – 2021. 59 (3), – p. 481–492. DOI: 10.15632/jtam-pl/140228
104. Aidy, A., Hosseini, M., Sahari, B.B. A review of constitutive models for rubber-like materials // American J. of Engineering and Applied Sciences, – 2010. 3 (1), – p. 232-239.
105. Anders, K. Olsson Finite element procedures in modeling the dynamic properties of rubber:/ Doctoral Thesis / – Sweden, 2007. – 136 p.

106. Bauman, J.T. Fatigue, Stress and Strain of Rubber Components: Guide for Design Engineers / J.T.Bauman. – Munich: Carl Hanser Verlag, – 2008.
107. Brown, R. Physical Testing of Rubber. 4th ed. / R.Brown. – New York: Springer, – 2006. – 387 p.
108. Cassenti, B.N., Staroselsky, A. Deformation and stability of compressible rubber O-rings // International Journal of Mechanical and Materials Engineering, – 2017. 12, 5. DOI: 10.1186/s40712-017-0072-8
109. Chagnon, G., Marckmann, G., Verron, E. A comparison of the Hart-Smith model with the Arruda-Boyce and Gent formulations for rubber elasticity // Rubber Chemistry and Technology, American Chemical Society, – 2004. 77 (4), – p.724-735.
110. David, S., Jakub, J. Numerical Analysis of Shape Stability of Rubber Boot // International Journal of Mechanics, – 2013. Vol.7, No 3, – p.293-301.
111. Deladi, E.L. Static Friction in Rubber-Metal Contacts with Application to Rubber Pad Forming Processes: / dissertation of the doctor's degree / – The Netherlands, 2006. – 183 p.
112. Dickens, J.D. Phase velocity of rubber element in vibration isolator under static load // Journal of Sound and Vibration, – 2000. 234(1), – p.21-42.
113. Dymnikov, S.I., Lavendelis, E.E. Calculations of rigidity of rubber elastic elements of arched and conical rubber-metal shock absorbers // Scientific Proceedings of Riga Technical University. Series 6: Transport and Engineering (Mechanics), – 2002. Vol.7, – p.164-169.
114. Dymnikov, S.I., Lavendelis, E.E. Diagram's of calculations of compression of rubber shock absorber of large course // Scientific Proceedings of IUTAM/IFTOMM Symposium "Elastomers'99", – Dneptopetrovsk, – 1999, – p.37.
115. Dymnikov, S.I., Lavendelis, E.E. Models of physically nonlinear mediums for accounts of the rubber-metal elastic elements // Scientific Proceedings of Riga Technical University. Series 6: Transport and Engineering (Mechanics), – 2002. Vol.7, – p.170-175.

116. Garcia, M.J. Engineering rubber bushing stiffness formulas including dynamic amplitude dependence: / Licentiate Thesis / – Stockholm, 2006. – 28 p.
117. Gent, A.N. Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components. 3rd ed. / A.N.Gent. – Munich: Hanser, – 2012. – 433 p.
118. Gent, A.N. Extensibility of Rubber under Different Types of Deformation // Journal of Rheology, – 2005. Vol.49, – p.271-275.
119. Gonca, V., Polukoshko, S., Lavendelis, E. Tuneable Elastomeric Vibration Isolator // Engineering of Rural Development, – 2015. – p. 389-395.
120. Gonca, V., Shvabs, J. Application of variation methods for calculation elastomeric elements of a difficult configuration // 7th International DAAAM Baltic Conference “Industrial Engineering”, –Tallinn, Estonia, – 2010, – p.222-226.
121. Gonca, V., Shvabs, J. Definition of Poisson’s Ratio of Elastomers / 10th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” Proceedings, – Jelgava, – 2011, – p.428-434.
122. Gonca, V., Shvabs, J. Projecting Elastomeric Shock Absorbers with Variable Stiffness // Journal of Vibroengineering, – 2010. Vol.12, issue 3, – p. 347-354.
123. Gonca, V., Shvabs, J., Kobrinecs, R. Rigidity of Rubber-Metal Elements with Thin Layers at Compression // Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference, – Rezekne, – 2009, – p.222-226.
124. Gonca, V., Shvabs, J., Noskov, S. Projecting elastomeric shock absorbers with moving side stop // Proceedings of the 8th International DAAAM Baltic Conference “Industrial Engineering”, – Tallin, Estonia, – 2012, – pp. 39-45.
125. Gross, B. Mathematical Structure of the Theories of Viscoelasticity / B.Gross. – P.: Hermann, – 1953. – 74 p.
126. Guedes, R.M., Singh, A., Pinto, V., 2017, Viscoelastic modeling of creep and stress relaxation behavior in PLA-PCL fibers // Fibers and Polymers, – 2017. 18, – p. 2443-2453. DOI: 10.1007/s12221-017-7479-y

127. Ilyasov, M.H, On one mathematical method for solution of dynamical viscoelasticity problems // Istanbul Univ. Fen Fak. Mat. Der., – 1993. 52, – p. 47-58.
128. Ilyasov, M.H. Dynamical Torsion of Viscoelastic Cone // TWMS Jour. Pure Appl. Math., – 2011. Vol. 2, No 2, – p. 203-220.
129. Lan, Wj. Sealing properties and structure optimization of packer rubber under high pressure and high temperature / Wj.Lan, Hx.Wang, X.Zhang [et al.] // Petroleum Science, – 2019. 16, – p. 632-644. DOI: 10.1007/s12182-018-0296-0
130. Leonardo, H., Rogerio, J.M. A new constitutive model for rubber-like materials // Asociacion Argentina de Mecanica Computacional, – 2010. Vol 29, – p.2759-2773.
131. Liu, Y. Design and Experimental Research on Sealing Structure for a Retrievable Packer / Y.Liu, Zh.Lian, J.Chen [et al.] // Shock and Vibration, – 2020. DOI: 10.1155/2020/7695276
132. Mark, J.E. Rubber Elasticity // Rubber Chemistry and Technology, – 1982. Vol.55, – p.1123-1136.
133. Martins C., Pinto V., Guedes R.M., Marques A.T. Creep and stress relaxation behavior of PLA-PCL fibres – A linear modeling approach // Procedia Engineering 114, 768-775 Conference: 1st International Conference on Structural Integrity, – Funchal, Madeira, Portugal, – September, 2015. DOI: [10.1016/j.proeng.2015.08.024](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.024)
134. Naser, B. Durability Simulations of Elastomeric Structures. In: Constitutive Models for Rubber IV, Austrell, P.E. and L. Kari (Eds.) / B.Naser, M.Kaliske, M.Andre – AA Balkema Publishers, UK., – ISBN: 10: 0415383463, – 2005. – p. 45-50.
135. Papanicolaou, G.C., Zaoutsos, S.P. Viscoelastic constitutive modeling of creep and stress relaxation in polymers and polymer matrix composites, Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites (Second Edition) // Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering – 2019. – p. 3-59. DOI: [10.1016/B978-0-08-102601-4.00001-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102601-4.00001-1)

136. Payne, A.R. Engineering Design with Rubber / A.R.Payne, T.R.Scott – London: New York, – 1960. – 216 p.
137. Reissner, E. On Some Variational Theorems in Elasticity. Problems of Continuum Mechanics / E. Reissner. – Philadelphia, – 1961. – 354 p.
138. Rustamova, K.O. Mathematical simulation of heredity effect on character of contact pressure distribution between semi-cylindrical surface with a hole and sealing element // Proceedings of the International Conference “Modern Problems of Innovative Technologies in Oil and Gas Production and Applied Mathematics” dedicated to the 90th anniversary of Academician A.Kh.Mirzajanzade, – Baku, – 13-14 december, – 2018, – p.84-87.
139. Rustamova, K.O., Darishova, A.O. Stress Relaxation Behavior of the Annular Sealing Element - A Linear Modeling Approach // Journal of Contemporary Applied Mathematics, – 2020. Vol. 10, No.1, – p.24-37.
140. Shvab, Y., Gonca, V. Regularization of the boundary value problems for incompressible material // Scientific Works of Riga Technical University. Mechanical Engineering. Nanotechnology. Composite and Rubber Materials, – 2012. – p.77-81.
141. Shvab, Y., Gonca, V. Thin rubber-metal element’s stiffness at compression // Scientific Works of Riga Technical University. Mechanical Engineering. Nanotechnology. Composite and Rubber Materials, – 2012. – pp.87-90.
142. Shvabs, J. The Methods of Spatial Rubber Technical Products Optimal Synthesis Problems Solution: / Summary of Thesis of Candidate for a doctor’s degree in the program “Mechanical Engineering” / – Riga, 2013. – 38 p.
143. Singh, A. Experiment and modelling of the strain-rate-dependent response during in vitro degradation of PLA fibres / A.Singh, R.M.Guedes, D.Paiva [et al.] // SN Applied Sciences 2, – 2020. 177. DOI: 10.1007/s4252-020-1964-4
144. Talibli, L.Kh. Boussinesq’s viscoelastic problem on normal concentrated force on a half-space surface // Mechanics of Time-Depend Materials, – 2010. Vol.14 No. 3, – p.253-259.