

Сәулет, қала құрылысы және құрылыс
саласындағы мемлекеттік нормативтер
ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ЕРЕЖЕЛЕР ЖИНАҒЫ

Государственные нормативы в области
архитектуры, градостроительства и строительства
СВОД ПРАВИЛ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СЕЙСМИКАЛЫҚ АУДАНДАРДАҒЫ ЖЕРАСТЫЛЫҚ ИМАРАТТАР

ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

ҚР ЕЖ 2.03-107-2013
СП РК 2.03-107-2013

Ресми басылым
Издание официальное

Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің
Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер
ресурстарын басқару комитеті

Комитет по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и
управления земельными ресурсами Министерства национальной
экономики Республики Казахстан

Астана 2015

АЛҒЫ СӨЗ

- 1. ӘЗІРЛЕГЕН:** «ҚазҚСҒЗИ» АҚ, «АЗДИ» ЖШС
- 2. ҰСЫНҒАН:** Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару комитетінің Техникалық реттеу және нормалау басқармасы
- 3. БЕКІТІЛГЕН ЖӘНЕ ҚОЛДАНЫСҚА ЕНГІЗІЛДІГЕН:** Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару комитетінің 2014 жылғы 29-желтоқсандағы № 156-НҚ бұйрығымен 2015 жылғы 1-шілдеден бастап

ПРЕДИСЛОВИЕ

- 1. РАЗРАБОТАН:** АО «КазНИИСА», ТОО «АЗДИ»
- 2. ПРЕДСТАВЛЕН:** Управлением технического регулирования и нормирования Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан
- 3. УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ:** Приказом Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства Национальной экономики Республики Казахстан от 29.12.2014 № 156-НҚ с 1 июля 2015 года

Осы мемлекеттік нормативті Қазақстан Республикасының сәулет, қала құрылысы және құрылыс істері жөніндегі уәкілетті мемлекеттік органының рұқсатысыз ресми басылым ретінде толық немесе ішінара қайта басуға, көбейтуге және таратуға болмайды

Настоящий государственный норматив не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения уполномоченного государственного органа по делам архитектуры, градостроительства и строительства Республики Казахстан

МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ	IV
1 ҚОЛДАНУ САЛАСЫ	1
2 НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР	1
3 ТЕРМИНДЕР ЖӘНЕ АНЫҚТАМАЛАР	2
4 БЕЛГІЛЕНУІ	1
5 СЕЙСМИКАЛЫҚ ӘСЕРЛЕРГЕ ЕСЕП ¹⁾	4
5.1 Жалпы нұсқаулар	4
5.2 Есептің негізгі ережелері	12
5.3 Сілемнің изотропиясын ескерумен терең орналасқан туннелдердің еркін кескінді тұйық біртұтас қаптамаларын есептеу	17
5.4 Сілемнің серпінді анизотропиясын ескерумен терең орналасқан туннелдердің шеңбер кескінді тұйық біртұтас қаптамаларының есебі	20
5.5 Шеңбер кескінді туннелдердің көп қабатты қаптамаларының есебі	27
5.6 Анкерлік бекітпе есебі	28
5.7 Бүрікпе бетондық бекітпенің есебі	30
5.8 Анкерлермен бүрікпе бетон бекітпесінің есебі	33
5.9 Таяз орналасқан туннелдердің шеңберлі емес кескінді қаптамаларының есебі	34
5.10 Порталдарды және портал маңындағы тіреуіш қабырғаларды жобалау	35
6 ЖЕР СІЛКІНІСІНІҢ САЛДАРЫН ЖОЮ	37
7 ИНЖЕНЕРЛІК – СЕЙСМОМЕТРИЯЛЫҚ ҚЫЗМЕТ ¹⁾	41
А қосымшасы (ақпараттық) Топырақтың серпінді моделі	44
Б қосымшасы (ақпараттық) Жерасты құрылыстарына сейсмикалық әсерлердің параметрлерін анықтау	54
В қосымшасы (ақпараттық) Өртүрлі жыныстар (топырақтар) үшін бұзылмаған изотропты сілемдегі қалыпты және жанама кернеулер, сейсмикалық толқындардың жылдамдықтары	62
Г қосымшасы (ақпараттық) Топырақтардың және тау жыныстарының анизотроптық (трансверсалды-изотроптық) қалыңдығындағы сейсмикалық толқындардың жылдамдықтарын анықтау	65
Д қосымшасы (ақпараттық) Топырақтың анизотроптық сілемі үшін сейсмикалық бүйірлік қысымның λ с коэффициенттерін анықтау	66
Е қосымшасы (ақпараттық) Сейсмикалық әсерлерге шеңбер кескінді туннелдер қаптамаларын есептеу мысалы және алгоритмі	68
Ж қосымшасы (ақпараттық) Сейсмикалық әсерлерге шеңберлі емес көлденең қималы қаптамаларды есептеу мысалдары мен жалпы алгоритм	73
И қосымшасы (ақпараттық) П.В.Мелентьевтің графо-талдамалық тәсілімен конформдық көрсетуді құру	86
К қосымшасы (ақпараттық) Туннелдің көп қабатты шеңберлі қаптамасын есептеу мысалы және алгоритмі	89
Л қосымшасы (ақпараттық) Құрама темірбетон блоктардан тұратын айналма туннель қаптамасының пайдалану сенімділігін бағалау	95
КІТАПНАМА	133

КІРІСПЕ

Осы ережелер жинағы Қазақстан Республикасының «Автомобиль жолдарын жобалау кезіндегі қауіпсіздік талаптары», «Темір жол көлігінің және оған байланысты инфрақұрылымның қауіпсіздігіне қойылатын талаптар», «Метрополитендердің қауіпсіздігіне қойылатын талаптар», «Ғимараттар мен құрылыстардың, құрылыс материалдары мен бұйымдарының қауіпсіздігіне қойылатын талаптар», «Өрт қауіпсіздігіне қойылатын жалпы талаптар», «Темірбетон, бетон конструкцияларының қауіпсіздігіне қойылатын талаптар» техникалық регламенттері ережелерінің негізінде әзірленген.

ҚР ҚН 1.01-01-2011 «Сәулет, қала құрылысы және құрылыс саласындағы мемлекеттік нормативтер. Негізгі ережелер» сәйкес осы ережелер жинағы мемлекеттік нормативтердің міндетті талаптарын қадағалауды қамтамасыз етуге рұқсат беретін және қоғамның қажеттіліктерін қанағаттандыруға жағдай жасайтын ресми танылған және өзін іс жүзінде ақтай алған ретінде ережелерден, нормативтерден, есептеу әдістерінен, жобалау, құрылыс және реконструкция объектісінің параметрлерінен, сонымен қатар сейсмикалық аудандардағы жерасты құрылыстарының мониторингі және жер сілкінісінің салдарларын жою бойынша шаралардан тұрады

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ЕРЕЖЕЛЕР ЖИНАҒЫ
СВОД ПРАВИЛ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СЕЙСМИКАЛЫҚ АУДАНДАРДАҒЫ ЖЕРАСТЫЛЫҚ ИМАРАТТАР

ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

Енгізілген күні - 2015-07-01

1 ҚОЛДАНУ САЛАСЫ

1.1 Осы ережелер жинағы 6-9 баллдық сейсмикалық аудандарда салынатын темір жол және автожол туннелдерін, метрополитендерді жобалау бойынша нормативтік-техникалық құжаттарды дамыту үшін әзірленген.

Ескертпе – Осы ережелер жинағы автокөлік құралдарының есептік қозғалыс жылдамдығы 150 км/сағаттан асатын жүрдек автомагистральдарда және жоғары жылдамдықты (200 км/сағаттан асатын) темір жолдық жолаушы желілерінде салынатын туннелдерге тарамайды.

1.2 Сейсмикалығы 9 балдан асатын алаңдарда темір жол және автожол туннелдерін, метрополитен тораптарын жобалау және құрылысын салу мамандандырылған ғылыми-зерттеу және жобалау-іздігіру ұйымдарының жұмылдырылуымен жүзеге асырылу керек.

1.3 Осы ережелер жинағының талаптары белгіленбеген конструктивтік шешімдерді немесе технологияларды қолдануды, сонымен қатар талаптары тарамайтын инженерлік-геологиялық және сейсмологиялық шарттарда метрополитендерді және көлік туннельдерін жобалауды Қазақстан Республикасы Өңірлік даму министрлігінің Құрылыс және тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері комитеті уәкілеттендірген органмен келісілген және сараптамадан өткен техникалық шарттар бойынша жүзеге асыру керек.

2 НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Осы ережелер жинағын қолдану үшін келесі сілтемелік нормативтік құжаттар қажет:

ҚР ҚН 3.03-11-2013 Темір жол және автожол туннелдері.

ҚР ҚН 3.03-17-2013 Метрополитендер.

ҚР ҚНЖЕ 1.02-18-2004 Құрылысқа арналған инженерлік іздеулер. Негізгі ережелер.

ҚР ҚНЖЕ 2.03-30-2006 (шығ. 2008) Сейсмикалық аудандардағы құрылыс.

ҚНЖЕ II-7-81* Сейсмикалық аудандардағы құрылыс (4, 5 бөлімдер).

ҚНЖЕ 2.03.01-84* Бетон және темірбетон конструкциялар.

ҚР ҚНЖЕ 5.03-34-2005 Бетон және темірбетон конструкциялар. Негізгі ережелер.

ҚР ЕЖ 2.03-107-2013

ҚР ҚБҚ 1.02-04-2013 Құрылыс және аумақты қала құрылысына жоспарлау объектілерін жауапкершілік деңгейлеріне жатқызу.

ҚР ЕЖ 3.03-111-2013 Темір жол және автожол туннельдері.

ҚР ЕЖ 3.03-117-2013 Метрополитендер.

ВҚН 126-90 Көлік туннельдерінің және метрополитендердің құрылысы кезінде қазбаларды бүрікпе бетонмен және анкерлермен бекіту.

ВҚН 167-70 Көлік құрылысы үшін тіреуіш қабырғаларды жобалау бойынша техникалық нұсқаулар.

ВҚН 190-78 Метрополитендерді, тау теміржол және автожол туннельдерін жобалау және салу үшін инженерлік-геологиялық ізденістер бойынша нұсқаулық.

МЕМСТ 5781-82 Мемлекетаралық стандарт. Темірбетон конструкцияларды арматуралауға арналған ыстықтай тапталған болат. Техникалық шарттар.

МЕМСТ 380-94 Мемлекетаралық стандарт. Жай сапалы көміртектегі болат. Маркалар.

Ескертпе – Осы құжатты қолданған кезде сілтеме жасалатын стандарттардың және жіктегіштердің қолданыс күшін ағымдағы жыл жағдайына сәйкес келетін және ағымдағы жылы жарияланған ай сайынғы ақпараттық көрсеткіштерге сәйкес келетін ақпараттық «Стандарттау жөніндегі нормативтік құжаттар» көрсеткішіне және «Қазақстан Республикасының аумағында қолданыстағы сәулет, қала құрылысы және құрылыс саласындағы нормативтік құқықтық және нормативтік-техникалық актілердің тізімі» бойынша тексерген жөн.

Егер сілтеме жасалатын құжат ауыстырылған (өзгертілген) болса, онда осы құжатты қолданған кезде ауыстырылған (өзгертілген) стандартты басшылыққа алу қажет.

Егер сілтеме жасалатын стандарт ауыстырылмай күші жойылған болса, онда оған сілтеме берілген ереже осы сілтемені қозғамайтын бөлімде қолданылады.

3 ТЕРМИНДЕР ЖӘНЕ АНЫҚТАМАЛАР

Осы ережелер жинағында тиісті анықтамалары бар келесі терминдер қолданылады:

3.1 Әсер етуі: а) Құрылысқа әсер ететін күштер (жүктемелер) тобы (тікелей әсер); ә) Іргетастың біркелкі шөкпеуінен немесе жер сілкінісінен туындаған, салынған өзгерістердің немесе ауытқулардың тобы (жанама әсер).

3.2 Динамикалық әсер: Конструкцияның немесе конструктивті элементтің елеулі түрде ауытқуын туындататын әсер. Конструкциялардың және конструкция элементтерінің елеулі түрдегі өзгерісін және ауытқуын туындататын уақыт өте өзгеретін әсер.

3.3 Қаттылық: Материалдың өзгеріске қарсылығы.

3.4 Квазистатикалық әсер: Балама статикалық әсер ретінде есепте берілетін динамикалық әсер.

3.5 Конструкция: Жүктемелерді қабылдауға және барабар қаттылықты қамтамасыз етуге арналған өзара байланысты конструктивті элементтердің алдын-ала қарастырылған қисындасуы.

3.6 Конструктивтік жүйе: Бірлесе жұмыс істеу үшін белгілі бір тәсілмен біріктірілген құрылыстың көтергіш элементтері.

3.7 Есеп өлшемдері: Әрбір шектік жағдай үшін орындалуы тиіс шарттарды сипаттайтын сандық көрсеткіштер.

3.8 Құрылыс әдісі: Құрылысты, мысалы, біртұтас бетоннан немесе зауыттық әзірлемедегі конструкциялардан салу тәсілі.

3.9 Салу үлгісі: Жобалау және есептерді орындау кезінде қолданылатын салудың идеалды тәсілі.

3.10 Сенімділік: Пайдаланудың есептік мерзімінде белгіленген талаптарға құрылыстың немесе оның конструктивті элементінің сәйкес келу қабілеті. Сенімділік, әдетте, ықтимал шамаларда көрінеді.

3.11 Күш түсетін қабілеттілік: Конструктивтік элементтің әсерлерге механикалық бұзылусыз қарсы тұру қабілеті, мысалы, бүгілуге кедергі, тұрақтылықты жоғалтуға кедергі, керілуге кедергі.

3.12 Қаптама: Тау-кен қазбасын бекітуге және оған дөңгелек, жұмыр немесе тікбұрышты кескін беруге арналған тұрақты құрылыстық конструкция.

3.13 Құбылмалы әсер: Уақыт өте шаманың өзгеруін ескермеуге болмайтын әсер.

3.14 Тұрақты әсер: Бұл әсер шамасының өзгеруі орташа мәнмен салыстырғанда елеусіз болатын әсер немесе өзгеруі белгілі бір шектік мәнге жеткенге дейін әрдайым бірқалыпты жүретін және құрылысты пайдаланудың барлық мерзімінде бір бағытта жүретін әсер.

3.15 Шектік күй: Бұл күйден жоғарылағанда құрылыс конструкциялары жобалау нормаларының талаптарына жауап бермейтін күй.

3.16 Беріктік: Әсерлерге қарсыласу қабілетін сипаттайтын және әдетте, механикалық кернеу бірліктерінде көрінетін материалдың механикалық қасиеті.

3.17 Конструкциялардың есебі: Конструкцияның кез-келген нүктесінде әсер ету нәтижелерін (күш, сәттер, кернеулер, өзгеріс) анықтайтын процедура немесе алгоритм.

3.18 Сейсмикалық әсер: Жер сілкінісі кезінде топырақтың қозғалысынан туындаған әсер.

3.19 Имарат: Жүктемелерді көтеруге және қажетті қаттылықты қамтамасыз етуге арналған байланысқан бөлшектердің ұйымдастырылған кешені (құрылыс жұмыстарын орындау кезінде төселген үйілме топырақты қосқанда).

3.20 Кедергі: Құрылыс элементінің немесе элементтің көлденең қимасының әсерге механикалық зақымдалусыз төзу қабілеті, мысалы: топырақтың қозғалуға беріктігі, бүгілуге кедергі, бойлық бүгілу кезінде тұрақтылықты жоғалтуға кедергі, керілуге кедергі.

3.21 Статикалық әсер: Конструкцияның немесе конструктивтік элементтің елеулі түрдегі ауытқуын туындатпайтын әсер.

3.22 Жүктелу тәсілі: Күштік және кинематикалық әсерлердің қалпын, шамасын және бағытын сипаттайтын есептік тәсіл.

3.23 Туннель: Адамдарды, тау-кен массасын, материалдарды және жабдықтарды тасымалдау үшін қызмет ететін көлденең жерастылық қазба.

4 БЕЛГІЛЕНУІ

4.1 Осы ережелер жинағында келесі белгіленулер қолданылады:

γ	-	топырақтың көлемдік салмағы;
C_1	-	топырақта бойлық сейсмикалық толқындардың таралу жылдамдығы;
C_2	-	топырақта көлденең сейсмикалық толқындардың таралу жылдамдығы;
T_0	-	топырақ сілемінің сейсмикалық ауытқуының басым кезеңі;
A	-	топырақ сілемінің күтілетін максималды ауытқу амплитудасы;
E	-	топырақ серпінділігінің динамикалық модулі;
E_{CT}	-	топырақ серпінділігінің статикалық модулі;
E_0	-	топырақтың өзгеру модулі;
K_{OT}	-	тойтарыс коэффициенті;
ν_O	-	топырақтың Пуассон коэффициенті;
δ	-	туннельдің шектес телімдердің бір-біріне қатысты жапсар конструкциямен жол берілетін бойлық ауысуы;
n_0	-	үйлесім коэффициенті;
P_C	-	топырақтың инерциялық қысымының көлденең құраушысы;
k_c	-	сейсмикалық коэффициент;
γ'	-	төгетін топырақтың көлемдік массасының есептік мәні;
H	-	тіреп тұратын қабырға іргетасының табанынан топырақтың есептік бетіне дейінгі арақашықтыққа тең қабылданатын топырақтың есептік қабатының қалыңдығы;
y	-	тіреп тұратын қабырғаның жоғарғы жағынан арақашықтық;
$\sigma_{x'}^{\infty}$	-	X симметриясының тік өсіне α ерікті бұрышынан көлбеу, X' өсін бойлап бағытталған, шексіздікке изотропты сілемдегі сейсмикалық қалыпты кернеу;
$\sigma_{y'}^{\infty}$	-	Y көлденең өсіне α бұрышынан көлбеу, Y' өсін бойлап бағытталған, шексіздікке изотропты сілемдегі сейсмикалық қалыпты кернеу;
$\tau_{x'y'}^{\infty}$	-	X симметриясының тік өсіне α бұрышынан әрекет ететін, шексіздікке изотропты сілемдегі сейсмикалық жанама кернеу;
ξ	-	бүйірлік қысым коэффициенті;
	-	бетонның сығымдалған аймағының салыстырмалы биіктігі;
$\sigma_{x,\max}^c$	-	X өсіне қатысты максималды сейсмикалық кернеу;
$\sigma_{y,\max}^c$	-	Y өсіне қатысты максималды сейсмикалық кернеу;
$\sigma_{z,\max}^c$	-	Z өсіне қатысты максималды сейсмикалық кернеу;
$\tau_{x,z,\max}^c$	-	X өсіне перпендикуляр Z өсіне қатысты максималды жанама кернеу;
$\tau_{x,y,\max}^c$	-	X өсіне перпендикуляр Y өсіне қатысты максималды жанама кернеу;
$\tau_{yz,\max}^c$	-	Y өсіне перпендикуляр Z өсіне қатысты максималды жанама кернеу;
V_P	-	бойлық (сығымдау-созылу) сейсмикалық толқындарының таралу жылдамдығы;
V_{SV}	-	көлік сілемі изотропиясының жазықтығына параллель полярланған кесе көлденең (жылжу) сейсмикалық толқындардың таралу жылдамдығы;

V_{SH}	-	көлік сілемі изотропиясының жазықтығына перпендикуляр полярланған кесе көлденең (жылжу) сейсмикалық толқындардың таралу жылдамдығы;
$\xi_{\max}$	-	өлшемсіз коэффициент;
$\lambda_y^c, \lambda_{z_1}^c, \lambda_{x,z_1}^c$	-	сейсмикалық бүйірлік қысым коэффициенттері;
$\lambda_x^c, \lambda_z^c, \lambda_{x,z}^c$	-	сейсмикалық бүйірлік қысым коэффициенттері;
m_{kp}	-	конструкциялардың, қосылыстардың жұмыс істеу шарттарының коэффициенті;
g	-	еркін құлаудың жылдамдауы;
D	-	қазбаның үлкен көлденең өлшемі;
	-	шеңберлі туннельдің диаметрі;
Q	-	шексіздікке жанама сейсмикалық кернеу;
	-	көлденең күш;
$\sigma_{\theta(s\theta)}$	-	бойлық сығымдау толқынының әрекетінен α бұрышынан қазба симметриясының тік өсіне бағытталған қаптама қимасындағы қалыпты тангенциалды кернеу;
$\sigma_{\theta(s\theta\theta)}$	-	α бұрышынан қазбаның тік өсіне бағытталған көлденең жылжу толқынының әрекетінен қаптамадағы қалыпты тангенциалды кернеу;
R_n	-	қазбаның жату тереңдігіне тең қабылданатын топырақ қабатының радиусы;
P	-	топырақ қабаты қимасының сыртқы контурына салынған есептік қалыпты кернеу;
q	-	топырақ қабаты қимасының сыртқы контурына салынған есептік жанасымды кернеу;
σ_r	-	элемент қимасындағы есептік радиалдық қысқыш кернеу;
φ	-	қаптама материалының ішкі үйкелісінің бұрышы;
R_{np}	-	қаптама материалының есептік кедергісі (призмалық беріктік);
l_a	-	анкердің ұзындығы;
r_a	-	анкердің көлденең қимасының радиусы;
E_a	-	анкер материалының серпінділік модулі;
R	-	қазбаның орташа радиусы;
n	-	тегіссіздік саны;
δ	-	тегіссіздік амплитудасы (жобалық біртегіс контурдан орташа ауытқу);
Q_k	-	k нүктесіне жатқызылған қаптама элементінің салмағы;
S_k	-	сейсмикалық жүктеменің көлденең немесе тік құраушысы;
P_y	-	топырақтың белсенді қысымы;

l	-	казба ені;
f	-	қаптама бойынша топырақтың үйкелу коэффициенті, Протодеяконов бойынша топырақ беріктігінің коэффициенті;
$q_c^{верт}$	-	топырақтың сейсмикалық қысымының тік құраушысының қарқындылығы;
M	-	бүгуші сәт;
N	-	қалыпты күш;
h_1	-	опырылыс күмбезінің биіктігі;
L	-	опырылыс күмбезінің аралығы (ұзындығы);
ω	-	бетонның деформациялық сипаттамасы;
σ_s	-	арматурадағы кернеу;
e_o	-	эксцентриситет;
K	-	кор коэффициенті.

5 СЕЙСМИКАЛЫҚ ӘСЕРЛЕРГЕ ЕСЕП ¹⁾

5.1 Жалпы нұсқаулар

5.1.1 Сейсмикалық аудандарда салуға арналған жерасты құрылыстарын жобалау, әдетте, келесі негізгі кезеңдерді қамтиды:

- құрылыстың конструктивті жүйесін және оның біліктілігін алдын-ала таңдау;
- сейсмикалық жүктемелердің есептік моделін және анықтау әдістемесін таңдау;
- статикалық және сейсмикалық әсерлерге сәйкес келетін құрылыстың туннельдік қаптамасындағы кернеулерді және деформацияларды анықтау;
- конструкциялардың өлшемдерін және алдын-ала қабылданған конструктивтік шешімдерін тексеру және есеп нәтижелерін талдау. Қажет болған жағдайда алдын-ала қабылданған өлшемдер түзетілуі мүмкін және есеп қайталап орындалуы мүмкін.

5.1.2 Жерасты құрылысының сейсмикалық тұрақтылығы дегенде есептік қарқындылықтағы сейсмикалық әсерлер кезінде көлік туннелінің жұмысқа қабілеттігін және жөндеуге жарамдылығын сақтау түсініледі.

5.1.3 Темір жол және автожол туннелдері ҚР ҚБҚ 1.02-04 сәйкес жауаптылықтың I (жоғары) деңгейіне жатады.

5.1.4 Туннелдерді жобалау келесі талаптарды қанағаттандыруға бағытталуы тиіс:

- бұзылудың болмауы бойынша талап (шектік күй);
- зақымдалуды (нұқсанды) азайту бойынша талап.

5.1.5 Сейсмикалық әсердің ықтимал салдарын тұжырымдамалық жобалау кезеңінде қарастыру қажет.

5.1.6 Егер туннелдің есептік қызмет мерзімінде сейсмикалық әсердің жоғарылау ықтималдығы үлкен болса, жобалау зақымдалуларға тұрақты конструкцияларды құруға

¹⁾ 5-бөлімде ВҚН 193-81 «Тау көлік туннелдерін жобалаған кезде сейсмикалық әсерлерді есепке алу бойынша нұсқаулық» ережелері пайдаланылған [1, 2].

бағытталуы тиіс. Есептік сейсмикалық әсер кезінде зақымдалуға қабілетті туннельдік қаптаманың элементтері жер сілкінісінен кейін шұғыл құтқару қызметтері туннельді жылдам жөндеп, пайдалануға болатындай етіп жобалануы тиіс.

5.1.7 Қайталау ықтималдығы жоғары сейсмикалық әсер туннель қаптамасының екінші дәрежелі элементтерінің кішігірім зақымдалуларына әкелуі мүмкін. Жалпы туннельдік қаптама зақымдалмайтындай болуы тиіс.

5.1.8 Құрылыс ауданының, елдімекенінің сейсмикалығын ҚР ҚНЖЕ 2.03-30 нұсқаулары бойынша анықтау керек.

5.1.9 Туннельдік құрылыстарды жобалаған кезде құрылыс алаңқайының нақтыланған сейсмикалығына байланысты 1-кесте бойынша қабылданатын туннельдік конструкциялардың есептік сейсмикалығына сүйену керек.

1-кесте – Туннельдік конструкциялардың есептік сейсмикалығы

Туннельдік құрылыстың атауы	Конструкцияның есептік сейсмикалығы, балл, құрылыс алаңқайының сейсмикалығында, балл			
	6	7	8	9
1. I және II санатты темір жолдардағы ұзындығы 500 м асатын туннельдер, ерекше жауапты туннельдер, сонымен қатар метрополитеннің станциялық, эскалаторлық, аралық туннельдері және үйлескен тартымдық-бәсеңдетуші қосалқы станциялары	7*	8	9	9**
2. I және III санатты темір жолдардағы ұзындығы 500 м және одан аз, қалған жолдарда ұзындығы 500 м асатын туннельдер, жауапты туннельдік құрылыстар (туннельдер және туннельдік құрылыстар үшін пайдаланылатын келуші қазбалар, шахталардың оқпандары), портал маңындағы тіреуіш қабырғалар	-	7	8	9
3. 1 және 2 топқа жататын, жоғары балл кезінде бұзылуы құрылыстардың тұтастығына әсер етпейтін, трассадан тыс орналасқан туннельдік құрылыстар (ұңғымалар және т.с.с.)	-	-	7	8
* Құрылыстардың сейсмикалық тұрақтылығы конструктивті сейсмикаға қарсы шаралармен қамтамасыз етіледі. ** Құрылыстарды жобалаған кезде мамандандырылған ғылыми-зерттеу ұйымын тартқан орынды				

5.1.10 Құрылыс алаңқайының сейсмикалығы аспаптық бақылаулардың көмегімен жүргізілетін ықшамдап аудандастыру немесе сейсмикалық ықшамдап аудандастыру карталарының негізінде нақты инженерлік-геологиялық шарттарға байланысты нақтыланады. Құрылыс алаңқайы білдіреді: портал маңындағы телімдер үшін – порталдардың орналасқан жері, туннель үшін – туннельдік өткел трассасы бойынша таужыныстық сілем. Құрылыс алаңқайының нақтыланған сейсмикалығы жобалау үшін бастапқы деректердің құрамдас бөлігі болып табылады.

5.1.11 Сейсмикалығы 9 баллдан асатын аудандарда орналасқан ұзындығы 500 метр және одан асатын метрополитен желілерін немесе көлік туннельдерін жобалаған кезде сейсмикаға қарсы қосымша шараларды игеру керек, бұл үшін мамандандырылған ғылыми-зерттеу ұйымдарын тарту орынды болып табылады.

5.1.12 Іздестіру процесінде анықталатын, туннель трассасы бойынша топырақтардың инженерлік-геологиялық сипаттамасында туннель өткелінің терең телімдерін сейсмикалық ықшамдап аудандастыру үшін ҚР ҚНЖЕ 1.02-18 және ВҚН 190 инженерлік-геологиялық ізденістері бойынша нормативтік құжаттардың талаптарына қосымша келесі деректер көрсетілуі тиіс:

- а) туннельді қоршап жатқан топырақтардың және байырғы топырақтардың қатталу қуаттылығы, сонымен қатар олардың сейсмикалық қатаңдығы (сейсмикалық толқындардың тығыздыққа таралу жылдамдығының туындауы);
- б) сілемнің ауытқу параметрлерінің статистикалық сипаттамалары (сейсмикалық толқындардың таралу жылдамдығы, басым кезең, күтілетін амплитуда);
- в) құрылыс ауданында тектоникалық бұзылулардың болуы және сипаттамасы;
- г) тектоникалық қозғалыстардың белсенділігі және бағытталуы;
- д) тау бөктерлерінің, беткейлерінің тіктігі мен орнықтылығы және оларда көшкін құбылыстарының туындау мүмкіндігі.

Сейсмикалығы 8 балл және одан асатын аудандарда орналасқан, ұзындығы 500 м асатын метрополитендерді және туннельдерді салудың жобалық құжаттамасында қаптама элементтерінің және қоршаған сілемнің тербелісін тіркеу үшін инженерлік-сейсмометриялық станцияларды салу бойынша бөлімді қарастыру керек.

5.1.13 Көліктік туннельдің немесе метрополитеннің трассасын сейсмикалық ықшамдап аудандастыру кезінде инженерлік-геологиялық және сейсмологиялық зерттеулер кешенінің нәтижелері бойынша оларды сейсмикалық аудандарда жобалау үшін қажетті келесі бастапқы деректер алынуы тиіс [1, 2]:

- туннельдің ұзындығы бойынша және туннель маңындағы құрылыстар үшін құрылыс алаңқайының нақтыланған сейсмикалығы, балл;
- жыныстың тығыздығы γ_0 , МН/м³;
- туннельді қоршап жатқан топырақтардың және байырғы топырақтардың қатталу қуаттылығы, сонымен қатар олардың сейсмикалық қатаңдығы – бойлық (C_1) және көлденең (C_2) толқындардың, м/с, жыныстың тығыздығына таралу жылдамдығының туындауы;
- топырақтың резонанстық қасиеттері (топырақ сілемінің сейсмикалық тербелістерінің басым кезені) T_0 , с;
- құрылыс ауданында тектоникалық бұзылыстардың болуы және сипаттамасы;

- тектоникалық қозғалыстардың белсенділігі және бағытталуы, топырақ сілемі тербелісінің күтілетін ықтимал максималды амплитудалары A , см;
- серпінділіктің динамикалық модулі E , МПа;
- серпінділіктің статикалық модулі $E_{ст}$, МПа;
- деформация модулі E_0 , МПа;
- тойтарыс коэффициенті $K_{от}$, МН/м³;
- Пуассон коэффициенті ν_0 , бірлік үлесі.

5.1.14 Сейсмикалық әсер ету кезінде туннельдік конструкциялардың орнықты жұмысын қамтамасыз ету үшін жерасты құрылыстарының қаптамаларын жобалау кезінде трассалау ерекшеліктері, сейсмикалық тұрақты конструкцияларды құруға рұқсат беретін ҚР ҚН 3.03-11, ҚР ҚН 3.03-17, ҚР ЕЖ 3.03-111, ҚР ЕЖ 3.03-117 ұсынылған көлемдік жоспарлау және конструктивті шешімдер ескерілуі тиіс.

5.1.15 Туннельдің трассасын таңдаған кезде туннельді сейсмикалық қатаңдығы бойынша біртекті топырақтарда орналастыруды, жоғары жарықтанған, туннель үстіндегі топографиясы күрт өзгерген телімдерден, тектоникалық жарылым аймақтарынан, сонымен қатар әсіресе бос және цементтелмеген топырақтармен қатталған баурайлардан алыс болуды қарастыру ұсынылады.

5.1.16 Жобалау кезінде туннельдері терең салынған нұсқаларға артықшылық беру керек. Тектоникалық жарылымдарды туннельдің кесіп өтуін тиісті конструктивті шешімдерді қолданумен және қосымша сейсмикаға қарсы жапсарларды орналастырумен олардың созылуына перпендикулярлық бағытта жүзеге асыру ұсынылады.

5.1.17 Метрополитен станцияларын тектоникалық жарылымдар аймақтарынан және олардың түбінен тыс орналастыру керек, әдетте, барлық ұзындығындағы топырақ біртекті болуы тиіс.

5.1.18 Туннельдердің жағымды негізіне жартасты жыныстарды және тығыз ылғалдылығы аз ірі блокты топырақтарды жатқызу керек, ал туннельдердің жағымсыз негізіне суға қаныққан сазды және құмды топырақтарды, сонымен қатар шөгетін және тұрақсыз топырақтарды жатқызу керек.

5.1.19 Туннельдердің түбінде әлсіз топырақтар болған жағдайда олардың беріктігі және тығыздығы секілді параметрлерді, сонымен қатар қаттардың жату сипаттамасын және топырақ суларының деңгейін ескеру керек.

5.1.20 Жерасты құрылыстарының конструкциясына елеулі түрде зақым келтіруі мүмкін топырақ бұзылыстарының келесі типтері бар:

- белсенді жарылым шекараларының ауысуынан туындаған бұзылулар;
- үстіңгі беттің тектоникалық түсуі және көтерілуі;
- көшкіндер;
- топырақтың сұйылуы.

5.1.21 Егер белсенді жарылым туннельді кесіп өтетін болса, жер сілкінісінің әсерінен туннель қаптамасының жылжу деформациясының қаупі бар.

5.1.22 Жерасты суларының деңгейінен төмен топырақтарда туннельдер орналасқан кезде, егер туннельдер байланыспайтын топырақтарда (құм, саз, қиыршық тастар) орналасатын болса, топырақтың сұйылу қаупі бар. Сұйылу әсерлері келесі түрде көрінеді:

- туннельдік қаптамаға қысым жоғарылайды, бұл туннельдің бұзылуына әкеледі;

- туннельдер қалқып шығуы немесе керісінше топыраққа батуы мүмкін (туннельдің салмағы мен туннель алмастырған топырақ салмағының арақатынасына байланысты);

- туннельдер көлбеу қабаттардан төмен орналасқанда, көлденең бағыттарда қозғалуы мүмкін;

- егер кеңістікте қозғалатын, сұйылатын топырақтарда орналасқан болса, туннельдер сонымен қатар көлденең бағыттарда қозғала алады.

5.1.23 Елеулі қалдық деформацияларға немесе тіпті топырақтың нөлдік дерлік көтергіш қабілетінің күйіне әкелетін, жер сілкінісі кезіндегі топырақтың тербелісі барысында қаныққан, байланыспаған материалдардағы кеуек суы қысымының ұлғаюынан туындаған жылжуға және қаттылыққа топырақ беріктігінің төмендеуі сұйылу деп аталады.

5.1.24 Егер туннельдің негізіндегі топырақтар лайдың/саздың ұсақ фракцияларынан тұратын немесе тұрмайтын борпылдақ құмның қуатты линзаларынан немесе созылған қабаттардан тұратын болса, сонымен қатар топырақ суларының деңгейі топырақтың бетіне жақын болса, топырақтың сұйылу мүмкіндігін бағалау жүргізілуі тиіс.

5.1.25 Құрылыс алаңқайының сейсмикалығын төмендету үшін тиісті техникалық-экономикалық негіздеу кезінде әлсіз телімді нығайтумен және оның қатты қасиеттерін қалған телімнің топырағына дейін жеткізумен байланысты технологиялық шараларға немесе деформациялық жапсарлармен осы әлсіз телімді бөлектеуге жол беріледі.

5.1.26 Құрылыс алаңқайының 7 балл және одан асатын сейсмикалығы кезінде туннельдің қаптамасын қолдану міндетті. Құрылыс алаңқайының 8 балл және одан асатын сейсмикалығы кезінде тұйық қаптаманы қолдану міндетті болып табылады. Қаптама конструкциясы құрылыс алаңқайының инженерлік-геологиялық шарттарына сәйкес тандап алынады және қаптаманың геометриялық параметрлері есеппен іріктеледі.

5.1.27 Туннельдің 7 балл болатын есептік сейсмикалығында жартас топырақтарында тұрақты қаптама ретінде анкерлермен үйлестіріп бүрікпе бетонды қолдануға жол беріледі. Анкерлердің конструкциясы олардың барлық ұзындығы бойынша топырақпен ілінісуін қамтамасыз етуі және қаптаманың бетонымен біркелкі ұзақ мерзімге ие болуы тиіс.

5.1.28 Сейсмикалық тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін туннельдік конструкциялардың қаптамаларын жобалаған кезде келесі ұстанымдарды қадағалау керек:

- массалардың және қатандықтардың қима бойынша біркелкі таралу ұстанымы;
- қаптамаға сейсмикалық жүктемелердің шамаларын төмендету ұстанымы;
- туннель өсін бойлап деформациялардың жұтылу ұстанымы.

Метрополитеннің аралық туннельдері үшін массалардың және қатандықтардың қима бойынша біркелкі таралуы үшін жұмыстардың ашық тәсілінде тұтас секциялы және жабық тәсілінде шеңберлі қаптамалар ұсынылады. Станциялық туннельдер үшін бір күмбезді конструкциялар ұсынылады. Таудағы туннельдер үшін – кері күмбезбен шеңберлі немесе таға тәрізді қаптамалар ұсынылады.

Қаптамаға сейсмикалық жүктемелердің шамаларын төмендету үшін жартасты топырақтарда тау туннельдері үшін екі қабатты қаптамаларды жобалау ұсынылады, оларда негізгі көтеруші ішкі қабаттан сыртқы қабат қаптаманың ішкі көтергіш қабатына жанасымды және қалыпты созушы сейсмикалық кернеулердің берілуін жоятын төмен модульдық материалдың гидроокшаулағыш қабатымен бөлінеді. Әлсіз топырақтар кезінде, әсіресе метрополитен станциялары үшін, станцияның көлденең өлшеміне тең

болатын тереңдікке бекіту (инъекция, тығыздау, анкерлеу және т.б.) арқылы негіз топырақтарының қатандығын ұлғайтқан орынды;

Сейсмикалық әсерден туындаған тербелістер кезінде туннель қаптамасының бойлық деформацияларын жұту үшін жалпы туннельдің бұзылмауын қаптамасыз ететін сейсмикаға қарсы арнайы деформациялық жапсарларды қарастыру керек. Осындай жапсарларды біртұтас бетон немесе темірбетон қаптамаларда орнату керек.

5.1.29 Туннельдің ұзындығы бойынша қаптаманың бойлық деформациясын өтеу үшін сейсмикаға қарсы жапсарларды орнату керек, олардың арасындағы арақашықтық l , м, [3] сәйкес келесі формула бойынша анықтау ұсынылады:

$$l = \frac{\delta C_1 T_0}{4\pi A}, \quad (1)$$

мұнда δ – жапсардың конструкциясымен жол берілетін туннельдің жапсарлас телімдердің бір-біріне қатысты бойлық ауысуы, см;

C_1 – топырақтағы бойлық сейсмикалық толқындардың жылдамдығы, м/с;

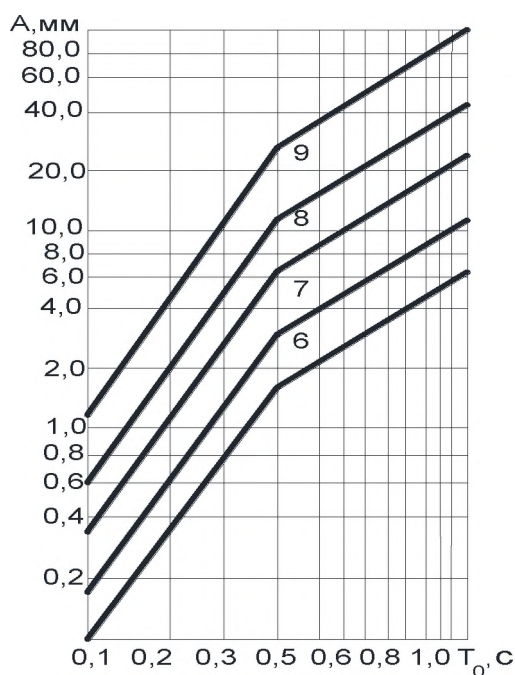
T_0 – іздестіру барысында анықталатын сілемнің сейсмикалық тербелісінің басым кезеңі, с;

A – іздестіру барысында немесе 1-суреттегі график бойынша алдын-ала есептеу үшін анықталатын сілем тербелістерінің мүмкін болатын максималды амплитудасы.

Ескертпелер

1 Сандық сипаттамалар болмаған жағдайда әлсіз топырақтардағы сейсмикаға қарсы жапсарлар арасындағы арақашықтықты 20 м тең, ал жартастық топырақтағы арақашықтықты – 30 м тең қабылдау керек.

2 Сейсмикаға қарсы жапсарлар арасындағы максималды арақашықтық бетон және темірбетон біртұтас қаптамалар үшін 40 м аспауы тиіс, сонымен бірге сейсмикаға қарсы жапсарды деформациялықпен үйлестіру керек.



1-сурет – 6÷9 баллдық қарқындылықты жер сілкінісінен туындаған топырақ тербелісі кезінде T_0 кезеңдерінің және A ауысу амплитудаларының арақатынасы

5.1.30 Таяз орналасқан көлік туннельдері, әдетте, ашық тәсілмен салынады және тікбұрышты көлденең қимаға ие. Сейсмикалық әсерлерге реакция тұрғысынан тікбұрышты көлденең қималармен қорапты конструкциялар цилиндрлік туннельдердің қасиеттерінен ерекшеленетін қасиеттерге иелік етеді және осы ерекшеліктерді ескеру ұсынылады.

5.1.31 Ашық тәсілмен салынатын туннельдер шағын тереңдікте орналасады, мұнда топырақтардың қатандығы аз болғандықтан және күндізгі бетке топырақ тербелісінің күшеюі салдарынан үлкен тереңдікке қарағанда топырақтың деформациясы жоғары.

5.1.32 Пайдалану тәжірибесі көрсеткендей, әрі қарай себумен топырақты өңдеу арқылы салынған туннельдер үлкен тереңдікте орналасқан туннельдерге қарағанда жер сілкінісі кезінде қатты зақымдалады.

5.1.33 Қорапты конструкциялар цилиндрлік конструкция секілді тиімді жұмыс істемейді, соның нәтижесінде әлдеқайда қалың қабырғаларды және аражабындарды қолдануға тура келеді. Соның салдарынан, тікбұрышты туннельдік конструкциялар, әдетте көлденең бағыттағы туннельдің шеңберлі қаптамасына қарағанда қаттырақ және топырақтың деформациясына аз бейімделеді. Бұл ерекшелік шағын тереңдікке тән болатын, жер сілкінісі кезіндегі топырақтың әлеуетті үлкен деформациясымен бірге ашық тәсілмен салынған тікбұрышты көлденең қималар туннельдерінің сейсмикалық есептері үшін туннельдік қаптаманың топырақпен өзара әрекеттесуін есепке алуды ерекше маңызды етеді.

5.1.34 Туннельдерді ашық тәсілмен салған кезде топырақ конструкцияның үстіне, сонымен қатар қол тимеген топырақ пен конструкция арасына себіледі. Себілетін топырақ

қасиеті бастапқы топырақ сілемінің қасиеттерінен ерекшеленетін материалдан жиі тұруы мүмкін. Себілетін топырақ пен бастапқы топырақтың қасиеттерін талдау кезінде ескеру ұсынылады.

5.1.35 Созылған туннелдер және біртекті емес топырақ формацияларын кесіп өтетін туннелдер үшін аралық жылжымалы түйіспелердің санын және орналасқан жерін анықтау керек.

5.1.36 Сейсмикаға қарсы жапсардың конструкциясы қаптама элементтерінің бір-біріне күш түсірмей деформациялануы кезінде қаптаманың жапсарлас телімдердің өзара бойлық жылжуына жол беруі тиіс. Қажет болған жағдайда туннелдің қаптамасын гидроокшауландыру немесе құрғату бойынша шараларды қарастыру керек.

5.1.37 Тектоникалық жарылымдардың шектерін туннелдің қиып өту орындарында сейсмикаға қарсы қосымша жапсарларды орнату керек.

5.1.38 Туннелге камералардың және басқа жерастылық қазбалардың (құрғату және желдету штольнялары және т.б.) түйіскен жерлерінде осы құрылыстар мен туннелдің арасында сейсмикаға қарсы жапсарларды қарастыру керек, олар деформациялық-шөкпе жапсарлармен үйлестірілуі мүмкін.

5.1.39 Туннелдік конструкциялардағы сейсмикаға қарсы деформациялық жапсарларды температуралық-шөкпе жапсарлармен үйлестіру ұсынылады. Егер есеп нәтижелері бойынша сейсмикаға қарсы деформациялық жапсарлар арасындағы арақашықтық температуралық-шөкпе жапсарларға карағанда қысқа болса, онда бұл жағдайда сейсмикаға қарсы қосымша деформациялық жапсарларды орнату керек.

5.1.40 Жұмыстық (есептік) арматура ретінде темірбетон конструкцияларда МЕМСТ 5781 бойынша диаметрі 10-32 мм 10ГТ маркалы А300 класты болат өзекті арматураны қолдану ұсынылады. МЕМСТ 5781 бойынша диаметр 6-40 мм 25Г2С маркалы А400 класты және ТШ 14-1-5526 бойынша [4] диаметрі 10-40 мм Ст3сп, Ст3пс, Ст3Гпс маркалы А500СП класты арматуралық болатты қолдануға жол беріледі. Конструктивті (есептік емес) арматура ретінде ВСт3сп2, ВСт3пс2, ВСт5сп2 және ВСт5пс2В маркалы МЕМСТ 5781 және МЕМСТ 380 бойынша А240 және А300 класты болатты қолдануға рұқсат етіледі.

Темірбетон конструкциялардың толтырма элементтері үшін болаттың маркалары ҚР ҚНЖЕ 5.03-34 және ҚНЖЕ 2.03.01 талаптарына сәйкес болуы тиіс.

5.1.41 Қаптамалардың тұйықталмаған көлденең қимасын орнатқан кезде қабырғалардың төменгі бөлігін конструктивті қаптамасын қамтамасыз ету керек.

5.1.42 Станциялық туннелдер қаптамаларының ішкі элементтерін олардың серпінді деформациялануын ескере отырып жобалау ұсынылады, бұл елеулі қарқындылықтағы сейсмикалық әсерлер кезінде олардың жұмыс қабілеттілігін қамтамасыз етуге рұқсат береді. Жобалау кезінде жолдардың үстінде отырғызу көпірлерін және сатылардың иілімді аспасын қарастыру ұсынылады.

5.1.43 8 және 9 баллдық сейсмикалық аудандарда топырақтың қалыңдығы қазбаның көлденең қимасының үш ең үлкен өлшемінен аз болатын туннелдердің портал маңындағы телімдерінде темірбетон қаптамаларды қолдану керек. Ерекше күрделі инженерлік-геологиялық және гидрогеологиялық шарттарда тиісті негіздеменің болуында шойын қаптамаларды қолдануға жол беріледі.

5.1.44 Құрастырушы қаптамалардың элементтерін туннельдің көлденең қимасының жазықтығында созушы байланыстармен өзара қосу қажет (түйіспелерді арматуралау, темірбетон блоктық қаптаманың радиалдық түйіспелерінде толтырма бөлшектерді дәнекерлеу, бұрандалы және қапсырмалы қосылыстарды орнату ж.т.б.).

5.1.45 Сейсмикалық әсер кезінде бір-біріне қатысты жылжуына жол берілмейтін жауапты жерастылық қазбалардың өзара қиылысуында, жобалау кезінде конструкциялардың қатты күшейтілген бірлестігін қарастыру керек.

5.2 Есептің негізгі ережелері

5.2.1 Туннельдік қаптамалардың есептері жүктемелер әсерінің келесі үйлесіміне жүргізіледі:

- негізгі үйлесімдер;
- тұрақты, ұзақ мерзімді, ықтимал қысқа мерзімді және ерекше (сейсмикалықтан басқа) жүктемелердің бірінен тұратын ерекше үйлесімдер;
- тұрақты, ұзаққа созылған жүктемелерден және сейсмикалық әсерлерден тұратын ерекше үйлесім.

5.2.2 Созылымды туннельдер құрылыстардың ұзындығы бойынша ерекшеленетін сейсмикалық әсерлерге ұшырауы мүмкін. Сондықтан осындай жағдайларда топырақ қозғалысының кеңістікті сипатын ескеру керек, өйткені туннельдік қаптамада топырақ қозғалысының кеңістікті сипатына байланысты болатын ауысулар және күштер туындауы мүмкін.

5.2.3 Топырақтарда сейсмикалық толқындар таралғанда кернеулер, әдетте, серпінділік шегінен аспайды, сондықтан есептерде серпінділіктің желілік теориясының қалпы пайдаланылуы мүмкін. А қосымшасында топырақтың серпінді үлгісі үшін тәуелділіктер берілген.

5.2.4 Терең орналасқан туннельдерді есептеу үшін туннельдік қаптаманың параметрлерін, туннель орналасқан топырақтардың сипаттамаларын және туннельдік қаптамаға түсетін сейсмикалық бойлық және көлденең толқындардың параметрлерін білу ұсынылады. Серпінді орталарда толқындардың таралу теориясының қысқаша мазмұны Б қосымшасында берілген.

5.2.5 Таяз орналасқан туннельдерді есептеу үшін туннельдік қаптама параметрлерін, туннель орналасқан топырақтардың сипаттамаларын білу ұсынылады.

5.2.6 Сейсмикалық әсерлерге туннельдік қаптамалар конструкцияларының есебін шектік күйлердің бірінші тобы бойынша жүргізу керек.

5.2.7 Сейсмикалық әсерлерге туннельдік конструкциялардың есебін қаптаманы қоршап жатқан топырақтың қасиеттерін, соның ішінде серпінді анизотропияны ескере отырып серпінділік теориясының немесе құрылыс механикасының әдістерімен жүргізу ұсынылады.

Сейсмикалық әсерлерді ескере отырып, туннельдік конструкцияларды есептеудің келесі тәртібін қадағалау ұсынылады:

- сейсмикалық ықшамдап аудандастыру карталары және ізденістер нәтижелері болған жағдайда құрылыс алаңқайының сейсмикалығы нақтыланады;

- 1-кестеге сәйкес жерасты құрылысы конструкциясының есептік сейсмикалығы анықталады;

- туннельдік құрылыс инженерлік-геологиялық және гидрогеологиялық шарттарға байланысты жекелеген телімдерге бөлінеді, жердің күндізгі бетіне дейінгі арақашықтық және телімдердің әрқайсысы үшін қолданылатын қаптама типтері анықталады;

- осы ережелер жинағының нұсқауларына сәйкес сейсмикалық әсерге туннель құрылысының әрбір телімін есептеу әдістемесі таңдап алынады;

- жүктемелер әрекетінің негізгі және ерекше үйлесімдерінің әрекетінен қаптама элементтеріндегі, порталдардағы есептік күштер анықталады;

5.2.1 сәйкес орындалған салыстырмалы есептердің нәтижелері бойынша анықталған максималды күштер бойынша қаптама конструкцияларының беріктігі тексеріледі.

5.2.8 Терең орналасқан туннельдердің қаптамалары (күмбез нүктелерін қосатын сызықтың орналасуы қазбаның үш максималды көлденең өлшемдерінен кем емес) сығылу-созылу және жылжу сейсмикалық толқындарының әрекетіне олардың туннельдің көлденең қимасының жазықтығына әсерінің барлық мүмкін болатын бағыттарын ескере отырып есептеледі.

5.2.9 Терең орналасқан туннельдер телімдердің топсалық қаптамаларының есебін біртұтас қаптамалар секілді серпінділік теориясының әдістерімен анықталатын түйіспелі кернеулердің әрекетіне жүргізуге, ал күштерді анықтауды топсаларды және т.с.с. ескере отырып құрылыс механикасының әдістерімен жүргізуге жол беріледі.

5.2.10 Егер статикалық жүктемелерге туннельдік қаптамалардың есебі құрылыс механикасының әдістерімен жүргізілетін болса, сейсмикалық әсерден болатын жүктемені серпінділік теориясының әдісімен анықтайды және оны статикалық жүктемемен жиынтықтайды.

5.2.11 Егер туннельдік қаптамалардың есебі серпінділік теориясының әдістерімен жүргізілетін болса, статикалық және сейсмикалық әсерлерден болатын кернеулі жағдайды жеке анықтайды және оларды жинақтайды.

5.2.12 Таяз орналасқан туннель телімдері қаптамаларының есебі сейсмикалық әсердің тік және көлденең бағыттарында конструкциялардың меншікті салмағынан және топырақтың массасынан инерциялық күштердің әрекетіне жүргізіледі.

5.2.13 Порталдық тіреуіш қабырғалардың есебі топырақтың массасынан және конструкциялардың меншікті салмағынан инерциялық күштердің көлденең құраушысының әрекетіне жүргізіледі.

5.2.14 Сейсмикалық әсерлерді ескерумен ерекше үйлесімге туннельдерді есептеген кезде үйлестіру коэффициентін $n_0 = 1$ тең қабылдау керек.

5.2.15 Конструкциялардың меншікті салмағынан және топырақтың массасынан инерциялық жүктемелердің есептік мәндерін ҚНжЕ II-7 сәйкес анықтау керек.

5.2.16 Портал маңындағы тіреуіш қабырғаларға топырақтың көлденең инерциялық қысымының қарқындылығын келесі формулалар бойынша анықтауға жол беріледі:

$$\left. \begin{aligned} P_c(y) &= 2k_c \gamma' y, & 0 \leq y \leq 0,5H \\ P_c(y) &= 2k_c \gamma' (H - y), & 0,5H \leq y \leq H \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

мұнда k_c - 7, 8 және 9 балл есептік сейсмикалығында сәйкесінше 0,025; 0,05 және 0,1 тең болатын сейсмикалық коэффициенті;

γ' – үйінді топырақтың көлемдік массасының есептік мәні, МН/м³;

H – тіреуіш қабырға іргетасының табанынан топырақтың есептік бетіне дейінгі арақашықтыққа тең қабылданатын топырақтың есептік қабатының қалыңдығы;

y – тіреуіш қабырғаның жоғарғы жағынан арақашықтық.

5.2.17 Сығымдайтын-созатын және жылжытатын сейсмикалық толқындардың әрекетіне туннелдерді есептеген кезде, x' және y' , еркін өзара перпендикуляр бағыттар бойынша шексіздікке изотропты сілемде туындайтын сейсмикалық қалыпты ($\sigma_{x'}^{(\infty)}$ және $\sigma_{y'}^{(\infty)}$) және жанама ($\tau_{x'y'}^{(\infty)}$) кернеулерді (2 және 3 суреттер), [5] сәйкес келесі формулалар бойынша анықтау керек:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x'}^{(\infty)} &= \pm \frac{1}{2\pi} k_c \gamma C_1 T_0, \\ \sigma_{y'}^{(\infty)} &= \frac{\nu_0}{1 - \nu_0} \sigma_{x'}^{(\infty)}, \\ \tau_{x'y'}^{(\infty)} &= \pm \frac{1}{2\pi} k_c \gamma C_2 T_0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

мұнда γ – топырақтың көлемді салмағы, МН/м³;

C_1 – бойлық толқындардың (сығымдаушы-созушы) таралу жылдамдығы, м/с;

C_2 – көлденең (жылжу) толқындарының таралу жылдамдығы, м/с;

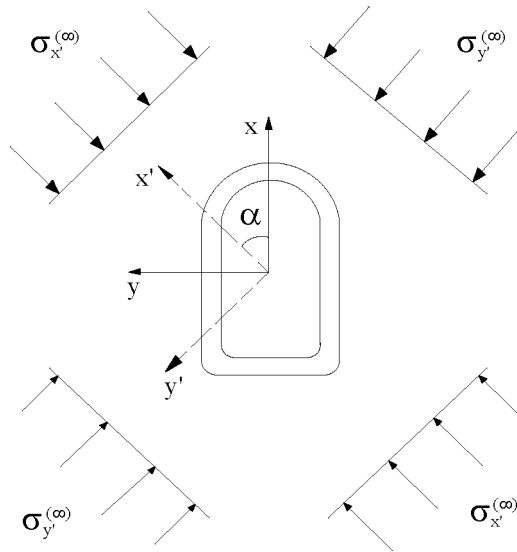
T_0 – жыныс бөлшектері тербелісінің басым кезеңі, с;

ν_0 – топырақтың Пуассон коэффициенті.

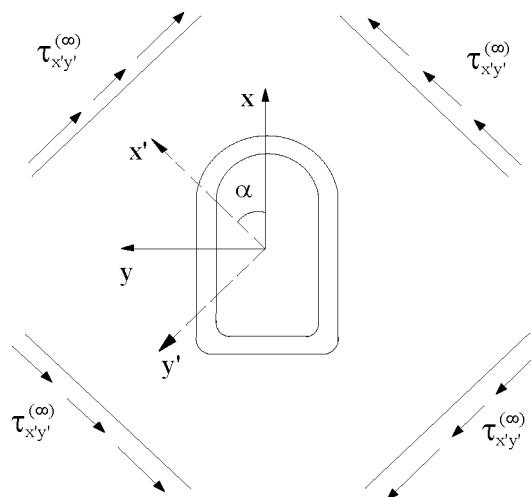
Ескертпелер

1 Топырақтың сипаттамалары туралы деректер болмаған жағдайда алдын-ала есептеулер үшін В қосымшасында берілген деректерді пайдалану ұсынылады [2].

2 Сейсмикалық қатаңдығы бойынша біртекті топырақтарда терең туннелді орналастырған жағдайда, туннелдің орналасу тереңдігі 100 м және одан асқанда сейсмикалық коэффициентін k_c 0,5 k_c дейін азайту мүмкін болады.



2-сурет – Бойлық сейсмикалық толқындардан қаптаманың кернеулі жағдайын анықтауға есептік тәсіл



3-сурет – Көлденең сейсмикалық толқындардан қаптаманың кернеулі жағдайын анықтауға есептік тәсіл

5.2.18 Топырақтардың анизотроптық (трансверсалды-изотроптық, яғни транстроптық) қалыңдығында созылатын-сығымдалатын және жылжитын сейсмикалық толқындарының әсеріне туннельдерді есептеген кезде изотроптық топырақтардан ерекшелігі «шексіздікте» сілемде туындайтын σ_i^c , τ_i^c сейсмикалық кернеулерді сілем изотропиясының жазықтығына қатысты толқындардың таралу бағытына байланысты формулалар бойынша анықтау керек [2,6]. OX_1 бағытында сейсмикалық толқындар таралған кезде (4-сурет):

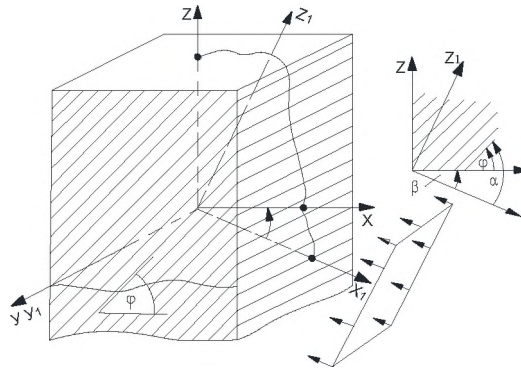
$$\sigma_{x_1 max}^c = \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c \xi_{max} V_p(x_1),$$

}

$$\sigma_{y \max}^c = \lambda_y^c \sigma_{x_1 \max}^c, \quad \sigma_{z_1 \max}^c = \lambda_{z_1}^c \sigma_{x_1 \max}^c, \quad (4)$$

$$\tau_{x_1 z_1 \max}^c = \lambda_{x_1 z_1}^c \sigma_{x_1 \max}^c \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c V_{SV},$$

$$\tau_{x_1 y \max}^c = \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c V_{SH}, \quad \tau_{yz_1}^c = 0.$$



4-сурет – ОХ₁ бағытында сейсмикалық толқындар таралымының есептік тәсілі

ОУ бағытында сейсмикалық толқындардың таралуында (5-сурет):

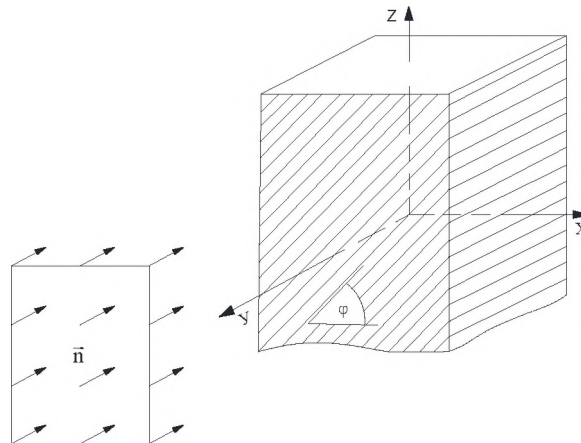
$$\left. \begin{aligned} \sigma_{y \max}^c &= \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c V_p, & \sigma_{x \max}^c &= \lambda_x^c \sigma_{y \max}^c, \\ \sigma_{z \max}^c &= \lambda_z^c \sigma_{y \max}^c, & \tau_{x z \max}^c &= \lambda_{x z}^c \sigma_{y \max}^c, \\ \tau_{yz \max}^c &= \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c V_{SV}, & \tau_{x y \max}^c &= \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c V_{SH}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

мұнда V_p – бойлық (сығылу-созылу) толқындардың таралу жылдамдығы, м/с, Γ қосымшасы бойынша анықталады;

V_{SV}, V_{SH} – транстроптық сілем изотропиясының жазықтығына сәйкесінше параллель және перпендикуляр полярландырылған көлденең (жылжу) толқынның таралу жылдамдығы Γ қосымшасы бойынша анықталады;

$\xi_{\max}$ – өлшемсіз коэффициент, оның шамасы көлік массивінде әртүрлі бағыттарда бойлық толқынның таралу жылдамдығының айырмашылығына байланысты 1,1-1,2 теңеседі;

$\lambda_y^c, \lambda_{z_1}^c, \lambda_{x_1 z_1}^c$ және $\lambda_x^c, \lambda_z^c, \lambda_{xz}^c$ – сейсмикалық бүйірлік қысымның коэффициенттері Γ қосымшасы бойынша анықталады.



5-сурет – ОУ бағытында сейсмикалық толқындар таралымының есептік тәсілі

5.2.19 Құрылыстарды, соның ішінде жерасты құрылыстарын есептеген кезде, ҚНЖЕ II-7 талаптарына сәйкес бірінші шектік жағдай бойынша есептеген кезде жұмыс шартының қосымша коэффициентін $m_{кр}$ беріктік шартына енгізумен материалдардың беріктігіне сейсмикалық жүктемелер әсерінің қысқа мерзімділігі ықпалын ескеру ұсынылады. Кейбір материалдар, конструкциялар және қосылыстар үшін коэффициент мәндері $m_{кр}$ 2-кестеде берілген.

2-кесте – Жұмыс шарты коэффициентінің мәндері

Конструкция, қосылыс	Коэффициент мәндері $m_{кр}$
1 Болат және ағаш конструкциялар	1,4
2 Өзекті және сымды арматурамен темірбетон конструкциялар (көлбеу қималардың беріктігін тексеруден басқа): - А-I, А-II, А-III, Вр-I класты арматурамен ауыр бетоннан - сол секілді, басқа класты арматурамен	1,2 1,1
3 Көлбеу қималардың беріктігі бойынша тексерілетін темірбетон конструкциялар	1,0
4 Бетон және тас конструкциялар, жұмыс істеуші: - орталықтан тыс сығылуға - жылжуға және созылуға	1,2 1,0
5 Тұрақтылыққа есептеген кезде 100-ден асатын иілімділікпен сығылған және сығылып-майысқан болат элементтер	1,0
6 Дәнекерлік қосылыстар	1,0
7 Бұрандалық қосылыстар	1,1

5.3 Сілемнің изотропиясын ескерумен терең орналасқан туннельдердің еркін кескінді тұйық біртұтас қаптамаларын есептеу

5.3.1 [2,7] сәйкес осы кіші бөлімде мазмұндалған осы есептеу әдістемесінің ережелерін қолдану облысы келесі шарттармен сипатталады:

а) топырақ сілемі деформацияланатын біртекті изотропты ортамен қабылданады,

оның механикалық қасиеттері E_0 деформациясы модулінің және Пуассон коэффициентінің ν_0 орташа шамаларымен сипатталады;

б) туннельдік қаптама топырақ сілемімен толық түйісу шарттарында серпінді кезеңде жұмыс істейтін берілген қалыңдықтағы және конфигурациядағы тұйық конструкция ретінде қарастырылады;

в) қаптама жазық деформация шарттарында есептеледі, яғни жобаланатын құрылыстың ұзындығы оның көлденең өлшемдерінен кем дегенде 5 рет асады және сейсмикалық толқындар құрылыстың көлденең қимасының жазықтығына таралады;

г) туннельдің орналасу тереңдігі оның көлденең қимасының үлкен өлшемінен кем дегенде 3 рет асып түседі, яғни жер бетінің әсері ескерілмейді;

д) топырақ бөлшектерінің басым тербеліс кезеңімен жылжудың серпінді толқындарының ұзындығы қазбаның үлкен көлденең өлшемінен кем дегенде 3 есе асып түседі, яғни топырақ сілемінің деформациялық сипаттамалары келесі шарт орындалатындай түрде болады

$$\frac{E_0 g T_0^2}{20\gamma(1+\nu_0)} \geq D^2, \quad (6)$$

мұнда E_0 - топырақ деформациясының модулі, МПа;

γ – топырақтың көлемдік салмағы, МН/м³;

T_0 - топырақ бөлшектері тербелісінің басым кезеңі, с;

g - еркін құлауды жылдамдату, м/с²;

D - қазбаның үлкен көлденең өлшемі, м.

е) 2D кем арақашықтықта жақын орналасқан құрылыстар жоқ.

5.3.2 Осы ережелер жинағының осы кіші бөлімінде мазмұндалған әдістеменің ережелерін бүрікпе бетон қаптамаларын шамалас есептеу үшін, соның ішінде осы ережелер жинағының 5.3.1 шарттарын орындаған кезде оларды анкерлермен үйлестіріп, сонымен қатар терең орналасқан туннельдердің құрама қаптамаларын шамалас есептеу үшін пайдалану мүмкін болады.

5.3.3 Қаптаманың есебі қаптамаға бір мезгілде әсер ететін сығымдаушы-созушы бойлық толқындардың және жылжытатын көлденең толқындардың кез-келген үйлесімінде және құрылыстың көлденең қимасының жазықтығындағы олардың кез-келген бағыттарында мүмкін болатыннан қаптаманың әрбір қалыпты (радиалды) қимасындағы ең жағымсыз кернеулі күйді бағалау негізінде жүргізіледі.

5.3.4 Әрбір қалыпты (радиалды) қимадағы ең жағымсыз кернеулі жағдайды іздеп табу осы қимадағы қалыпты тангенциалдық кернеулердің σ_θ экстремалды мәндерін анықтау арқылы жүргізіледі.

5.3.5 Ұзын, еркін бағытталған (туннельдің көлденең қимасының жазықтығында) бойлық сығу толқынының $\sigma_{сж}$ әрекетінен қаптаманың кернеулі жағдайын есептік тәсілге сәйкес қоршаған ортамен бірлесе жұмыс істейтін басқа деформациялық сипаттамалармен линиялық-деформацияланатын ортада ойықты нығайтатын симметрияның бір өсімен еркін нысандағы сақина үшін серпінділік теориясының жазық квазистатикалық түйіспе тапсырмасын шешу негізінде анықталады (2-суретті қар.).

Шексіздіктегі кернеулі жағдайды келесі түрде осы ережелер жинағының 5.2.17 сәйкес қабылдайды

$$P = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma C_1 T_0 \text{ и } \xi P, \text{ где } \xi = \frac{v_0}{1 - v_0}, \quad (7)$$

мұнда ξ - бүйірлік қысым коэффициенті.

Сығымдайтын (созатын) серпінді бойлық толқындардың таралу жылдамдығы C_1 , іздестіру кезінде тікелей өлшеулермен анықталады немесе келесі формула бойынша есептеледі:

$$C_1 = \sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma} \cdot \frac{1 - v_0}{(1 + v_0)(1 - 2v_0)}}, \quad (8)$$

ЕСКЕРТПЕ Алдын-ала есептер үшін В қосымшасының деректерін пайдалануға жол беріледі.

5.3.6 Қазба симметриясының тік өсіне α еркін бұрыштан бағытталған ұзын, көлденең жылжу толқынының $\sigma_{сдв}$ әрекетінен қаптаманың кернеулі жағдайын квазистатикалық түйіспелік тапсырманың шешімі негізінде анықтайды, оның есептік тәсілі 3-суретте берілген.

Осы ережелер жинағының 5.2.17 сәйкес шексіздікке жанама кернеулер келесі шамаларға ие:

$$Q = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma C_2 T_0, \quad (9)$$

Жылжудың серпінді көлденең толқындарының таралу жылдамдығын C_2 келесі формула бойынша анықтайды:

$$C_2 = \sqrt{\frac{E_0 g}{2\gamma(1 + v_0)}}, \quad (10)$$

Ескертпе – Алдын-ала есептер үшін В қосымшасының деректерін пайдалануға жол беріледі.

5.3.7 Кернеулердің экстремалды мәндері қаптаманың кез-келген қалыпты (радиалды) қимасы үшін келесі теңестірулерді шешу негізінде анықталады:

$$\frac{\partial \sigma_{\theta 1}}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{\theta 2}}{\partial \alpha} = 0, \quad (11)$$

мұнда

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta 1} &= \sigma_{\theta(сж)} + \sigma_{\theta(сдв)}, \\ \sigma_{\theta 2} &= \sigma_{\theta(сж)} - \sigma_{\theta(сдв)}. \end{aligned} \quad (12)$$

бұл жерде $\sigma_{\theta(сж)}, \sigma_{\theta(сдв)}$ - қазба симметриясының тік өсіне α бұрышынан бағытталған сығымдаудың бойлық толқынының және жылжудың көлденең толқынының әрекетінен

қаптаманың осы қимасындағы сәйкесінше қалыпты тангенциалды кернеулер.

5.3.8 σ_θ ретінде қаптаманың көлденең қимасының сыртқы және ішкі контурындағы олардың көріністері қабылданатын (11) теңдеуін шешкен кезде, әрбір қимада σ кернеулерінің төрт мәнін алады. Содан кейін конструкцияның әрбір қимасы үшін σ_θ үлкен сығымдаушы (теріс) және үлкен созушы (оң) кернеулерге сәйкес келетін σ_1 немесе σ_2 толқындарының үйлесуін және α_1 , α_2 түсу бұрыштарын анықтайды.

5.3.9 Әрбір қимадағы үлкен сығымдаушы және созушы кернеулер σ_θ есептік ретінде қабылданады. Осы кернеулерге сәйкес келетін M және N күштері әрбір қима үшін σ_θ кернеулерінің экстремалды мәндері алынған бағытта және әртүрлі сипаттағы толқындар әрекетінде есептейді.

5.3.10 Егер қаптама топыраққа анкерленбеген болса және сызаттардың түзілуіне жол берумен жобаланатын болса, онда есептік ретінде σ_θ үлкен сығымдаушы және созушы кернеулеріне сәйкес келетін M және N күштерінің екі эпюрасы қабылданады.

5.3.11 Егер қаптама сызаттарға жол бермеумен жобаланса және егер ол топыраққа анкерленсе немесе бүрікпе бетоннан жасалса, онда сығымдалуға және созылуға есептік ретінде «плюс» және «минус» белгілерімен алынған, абсолютты шама бойынша максималды σ_θ кернеулерге сәйкес келетін M және N күштерінің эпюрасын қабылдайды.

5.3.12 M және N күштерінің есептік эпюраларын қолданыстағы жүктемелердің басқа түрлерінен болатын күштермен жинақтайды және қималардың сығымдалуға және созылуға беріктігін тексеру үшін пайдаланады.

5.3.13 Шеңберлі қаптамалардың есебі [1,7] сәйкес Е қосымшасында берілген алгоритм бойынша жүргізіледі.

5.3.14 Шеңберлі емес көлденең қималы қаптамалардың есебі [7] сәйкес Ж қосымшасында берілген алгоритм бойынша жүргізіледі, ал П.В. Мелентьевпен әзірленген графо-талдамалық тәсілді пайдалану [8] И қосымшасында берілген.

5.4 Сілемнің серпінді анизотропиясын ескерумен терең орналасқан туннельдердің шеңбер кескінді тұйық біртұтас қаптамаларының есебі

5.4.1 Осы кіші бөлімде мазмұндалған есеп әдістемесінің ережелерін қолдану саласы келесі шарттармен [2,6] сипатталады:

а) жобаланатын жерасты құрылысының ұзындығы оның көлденең өлшемдерінен кем дегенде 5 есе асады;

б) туннельдің орналасу тереңдігі (күмбез нүктелерін қосатын сызықтың ораласуы) оның көлденең қимасының үлкен өлшемінен кем дегенде 3 есе асады;

в) топырақ бөлшектері тербелісінің басым кезеңімен жылжудың серпінді толқындары ұзындығының үлкен көлденең өлшемінен кем дегенде 3 есе асады, яғни топырақ сілемінің және тау жыныстарының деформациялық сипаттамалары келесі шарт орындалатындай түрде болады:

$$\frac{g \sin^2 2\alpha T^2}{40\gamma \left[\frac{1}{E_\alpha} - \frac{1}{E_1} \cos^4 \alpha - \frac{1}{E_2} \sin^4 \alpha + \frac{\nu_2}{2E_1} \sin^2 2\alpha \right]} \geq D^2, \quad (\alpha \neq 0, \alpha \neq 90^\circ), \quad (13)$$

мұнда E_1 және E_2 – изотропия жазықтығындағы топырақ деформациясының модулдері (Юнг модулі), $E_I=E_{II}$ және оған перпендикулярлы көлік үлгісінің немесе сілемнің $E_2=E_1$, МПа;

E_α – изотропия жазықтығына α бұрышы бағытында топырақ деформациясының модулі (Юнг модулі), МПа;

ν_2 – изотропия жазықтығында сығымдау (созылу) кезінде изотропия жазықтығына перпендикуляр жазықтықта көлденең созылу (сығымдау) коэффициенті, $\nu_2=\nu_{I,II}$;

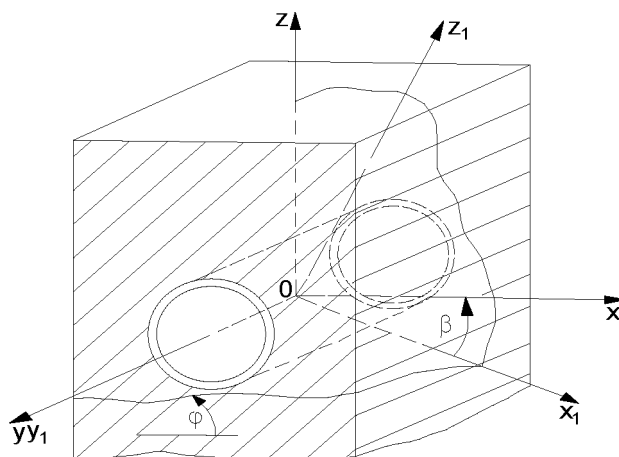
D – шеңберлі туннель диаметрі, м.

5.4.2 Топырақтың сілемі желілік-деформацияланатын, біртекті анизотропты (трансверсалды-изотропты, яғни транстропты) ортамен моделденеді, оның механикалық қасиеттері $\nu_2 = \nu_{I,II}$, изотропия жазықтығына перпендикуляр жазықтықта және изотропия жазықтығына сығымдау (созылу) кезінде $\nu_1 = \nu_{II,II}$ изотропия жазықтығында көлденең созылу (сығымдалу) коэффициенттерінің $E_I=E_{II}$, $E_2=E_1$, E_α деформациясы модульдерінің орташа мәндерімен сипатталады.

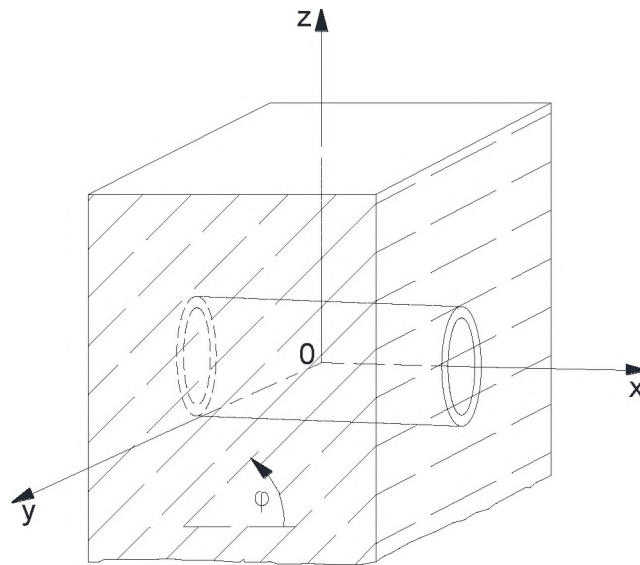
E_1 , E_2 , E_α , ν_1 және ν_2 серпінді константтарының шамаларын транстропты (катпарлы) тау жынысының үлгілерін бір өстік сығымдауға (созуға) сынақтардан немесе егер оның құраушы катпарларының тиісті сипаттамалары және жарықшақтығының параметрлері белгілі болса, сілем үшін есептік жолмен анықтайды.

5.4.3 Қаптаманы жалпақ деформация шарттарында, сондай-ақ транстроптық сілем изотропиясы жазықтығының созылу сызығына қатысты туннельдің бойлық өсінің бағдарлануына байланысты жиынтықталған жалпақ деформация шарттарында есептейді. Изотропия жазықтығының созылым сызығының жанынан өткен туннельдің көлденең қимасында (6-сурет) жазық деформация шарттары жүзеге асырылады, ал сілем изотропиясы жазықтығының созылым сызығына көлденең өткен туннельде (7-сурет) – жиынтықталған жазық деформация шарттары жүзеге асырылады.

5.4.4 Қаптама есебі сығымдау-созу толқындарының және жылжу толқындарының қаптамаға бір мезгілде әсер етуші кез-келген үйлесімдерінде және құрылыстың көлденең қимасының жазықтығындағы олардың кез-келген бағыттарында қаптаманың мүмкін болатын әрбір қалыпты (радиалды) қимасында өте қолайсыз кернеулі күйді бағалау негізінде жүргізіледі.



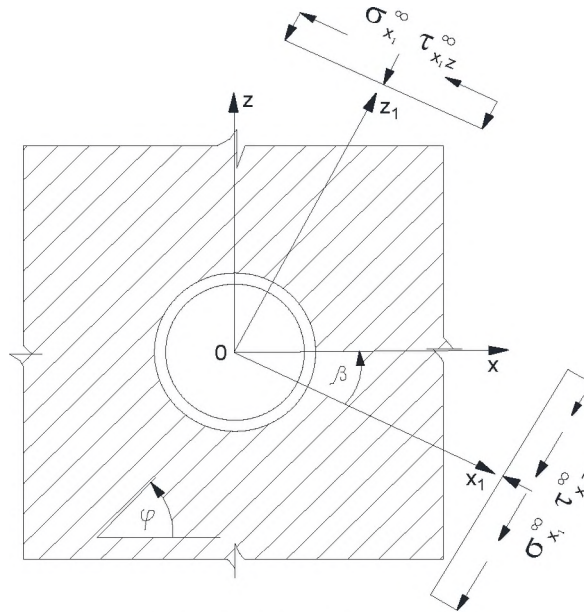
6-сурет – Есептік тәсіл



7-сурет – Есептік тәсіл

5.4.5 Әрбір қалыпты (радиалды) қимадағы ең қолайсыз кернеулі күйді бағалау осы қимадағы қалыпты тангенциалдық кернеулердің экстремалды мәндерін және оларға сәйкес келетін сығымдау-созу және жылжыту толқындары әрекеттерінің таралу және үйлесу бағыттарын іздестіру арқылы жүргізіледі.

5.4.6 Көлденең қима жазықтығында ұзын, еркін бағытталған сығымдау-созу (бойлық толқындар) және жылжыту (көлденең толқындар) толқындарының әрекетінен изотропия жазықтығының созылым сызығының жанынан өткен туннель қаптамасының кернеулі жағдайын есептік тәсілге сәйкес қоршаған ортамен бірлесіп жұмыс істейтін және басқа деформациялық сипаттамалармен сызықтық-деформацияланатын транстропты ортадағы ойықты нығайтатын сақина үшін серпінділік теориясының квазистатикалық түйіспелік тапсырмасын шешу негізінде анықтайды (8-сурет).



8-сурет – Есептік тәсіл

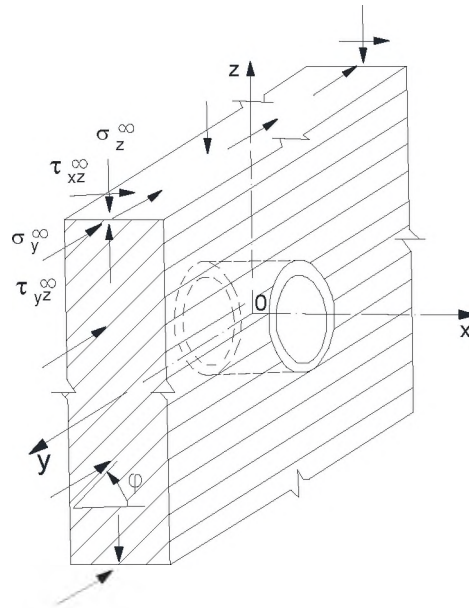
«Шексіздікке» кернеулі жағдайды келесі түрде OX_1 бағытында сейсмикалық толқындардың таралуы кезінде 5.2.18 сәйкес қабылдайды:

$$\begin{aligned}\sigma_x^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \left\{ \xi_{\max} V_p (\cos^2 \beta + \lambda_{z_1}^c \sin^2 \beta + \lambda_{x_1 z_1}^c \sin 2\beta) + V_{sv} \sin 2\beta \right\}, \\ \sigma_z^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \left\{ \xi_{\max} V_p (\sin^2 \beta + \lambda_{z_1}^c \cos^2 \beta - \lambda_{x_1 z_1}^c \sin 2\beta) + V_{sv} \sin 2\beta \right\}, \\ \tau_{xz}^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \left\{ \xi_{\max} V_p 0,5(\lambda_{z_1}^c - 1) \sin 2\beta + V_{sv} \cos 2\beta \right\}.\end{aligned}\quad (14)$$

Келесі түрде ОУ бағытында сейсмикалық толқындар таралған кезде:

$$\begin{aligned}\sigma_x^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \xi_{\max} V_p \lambda_x^c, \\ \sigma_z^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \xi_{\max} V_p \lambda_z^c, \\ \tau_{xz}^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \xi_{\max} V_p \lambda_{xz}^c.\end{aligned}\quad (15)$$

5.4.7 Көлденең қима жазықтығында және туннель өсін бойлап ұзын сығымдау-созу (бойлық толқындар) және жылжыту (көлденең толқындар) толқындарының әрекетінен изотропия жазықтығының созылым сызығына көлденең өткен туннель қаптамасының кернеулі жағдайын есептік тәсілге сәйкес қоршаған ортамен бірлесіп жұмыс істейтін және басқа деформациялық сипаттамалармен сызықтық-деформацияланатын транстропты ортадағы ойықты нығайтатын сақина үшін серпінділік теориясының квазистатикалық түйіспелік тапсырмасын шешу негізінде анықтайды (9-сурет).



9-сурет – Есептік тәсіл

«Шексіздікке» кернеулі жағдайды келесі түрде OX_1 бағытында сейсмикалық толқындардың таралуы кезінде:

$$\begin{aligned}\sigma_z^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \left[\xi_{\max} V_p (\sin^2 \beta + \lambda_{z_1}^c \cos^2 \beta - \lambda_{x_1 z_1}^c \sin 2\beta) + V_{sv} \sin 2\beta \right], \\ \sigma_y^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \lambda_y^c V_p, \quad \tau_{yz}^\infty = \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c V_{sv} \sin \beta, \quad \tau_{xy}^\infty = \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c V_{sv} \cos \beta, \\ \tau_{xz}^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \left[0,5 \xi_{\max} V_p (\lambda_{z_1}^c - 1) \sin 2\beta + V_{sv} \cos 2\beta \right].\end{aligned}\quad (16)$$

және келесі түрде OY бағытында сейсмикалық толқындардың таралуында 5.2.18 сәйкес қабылдайды:

$$\begin{aligned}\sigma_y^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c V_p, \quad \sigma_z^\infty = \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \lambda_z^c V_p, \\ \tau_{yz}^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c V_{sv}, \quad \tau_{xy}^\infty = \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c V_{sh}, \\ \tau_{xz}^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \lambda_{xz}^c V_p.\end{aligned}\quad (17)$$

5.4.8 σ_θ кернеулерінің экстремалды мәндерін θ бұрышының белгілі бір аралығы арқылы қаптаманың әрбір қалыпты (радиалды) кимасы үшін сандық есептердің негізінде анықтайды және әртүрлі үйлесімдерді қарастырады:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta 1} &= \sigma_{\theta(c\lambda c)} + \sigma_{\theta(c\partial\theta)} \\ \sigma_{\theta 2} &= \sigma_{\theta(c\lambda c)} - \sigma_{\theta(c\partial\theta)}\end{aligned}\quad (18)$$

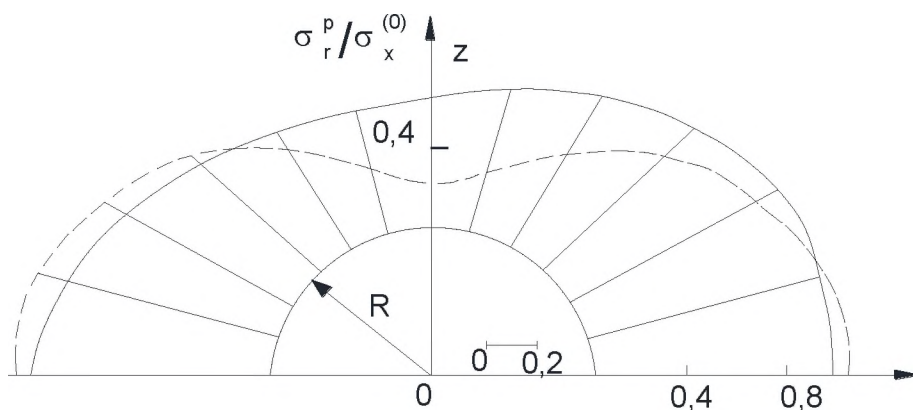
мұнда $\sigma_{\theta(\text{сж})}, \sigma_{\theta(\text{сдв})}$ - сығымдау толқынының және жылжыту толқынының әрекетінен қаптаманың осы қимасындағы сәйкесінше қалыпты тангенциалдық кернеулер (X_I бағытында толқындар таралғанда α бұрышының мәндері түрленеді).

Осындай есептердің нәтижесінде (σ_θ ретінде қаптаманың көлденең қимасының сыртқы және ішкі контурындағы олардың көріністерін қабылдайды) әрбір қимадағы σ кернеулерінің төрт мәнін алады. Содан кейін конструкцияның әрбір қимасы үшін σ_θ үлкен сығымдаушы (теріс) және үлкен созушы (оң) кернеулерге сәйкес келетін σ_1 және σ_2 толқындар әрекеттерінің үйлесімін анықтайды.

5.4.9 Қаптамалар қималарының беріктігін тексеруге арналған есептік күштерді осы ережелер жинағының 5.3.9 - 5.3.12 нұсқауларына ұқсас анықтайды.

5.4.10 Есептеу мысалы

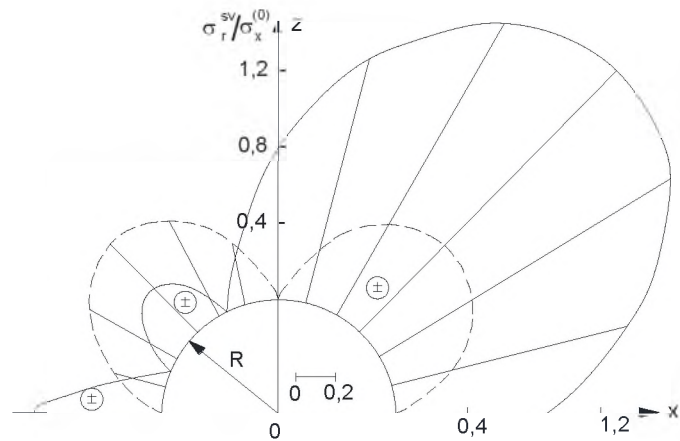
10-суретте 9 баллдық қарқындылықпен изотропия жазықтығы созылымына көлденең бағытта ($k_c = 0,1$; $\gamma = 0,025 \text{ МН/м}^3$, $T = 0,5$ с) сығымдау-созылу V_p толқындарының таралуында изотропты сілемде ($E = 0,523 \cdot 10^4$ МПа; $\nu = 0,2$; штрихты сызық) және транстропты сілемде ($E_1 = 1,074 \cdot 10^4$ МПа, $E_2 = 0,523 \cdot 10^4$ МПа; $G_2 = 0,120 \cdot 10^4$ МПа, $\nu_1 = 0,413$, $\nu_2 = 0,198$, $\varphi = 60^\circ$; бірыңғай сызық) жыныстардың созылымы бойынша өткен туннельдің қатты деформацияланбайтын қаптамасына ($E_{kp} = \infty$) сейсмикалық түйіспелік қысымның σ_z эпюралары берілген, ал 11-суретте жылжыту V_{sv} толқындарынан эпюралар σ_r берілген ($\varphi = 30^\circ$; $E = (E_1 + E_2)/2$, $\nu = 0,2$). σ_r кернеу мәндері $(T/2\pi)\gamma k_c V_p$ тең болатын $\sigma_x^{(0)}$ мәнінен үлесте берілген ($\varphi = 0$).



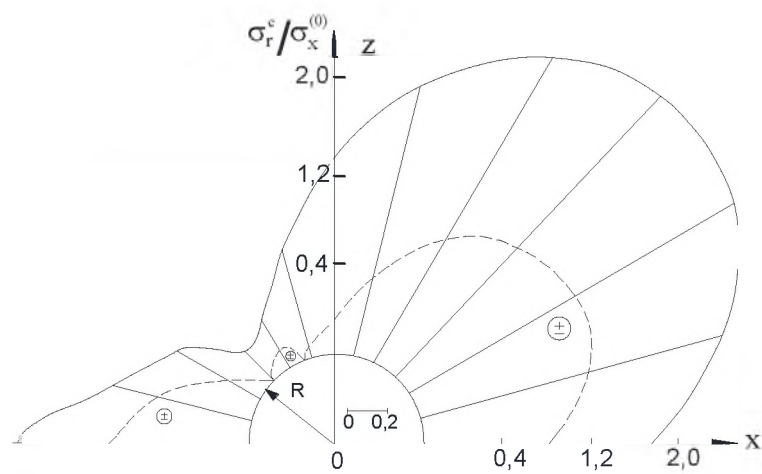
10-сурет – Есептік тәсіл

12-сурет V_p және V_{sv} толқындарының бірлескен әсерінен σ_z кернеу эпюраларынан тұрады. Көрініп тұрғандай, анизотроптық сілемдегі қаптамаға сейсмикалық қысым изотроптық сілем жағдайынан елеулі түрде ерекшеленеді.

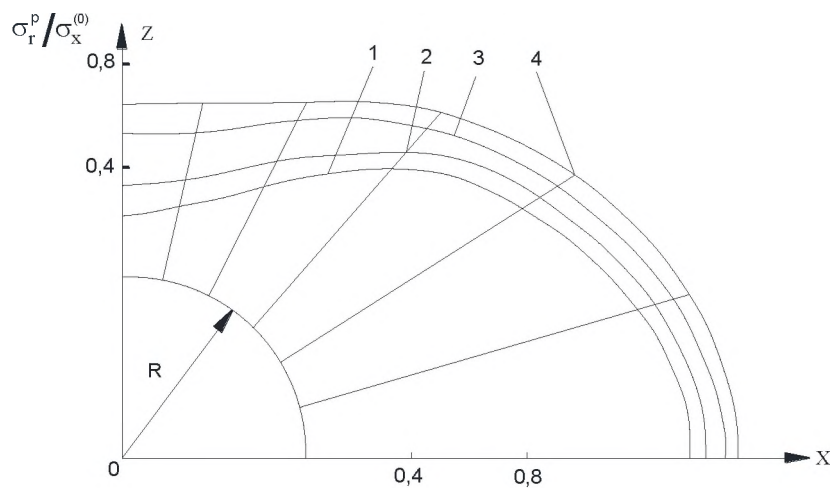
13-суретте изотропия жазықтығының әртүрлі көлбеу бұрыштарында (қисық 1 — $\varphi = 0$; 2 — $\varphi = 30^\circ$; 3 — $\varphi = 60^\circ$; 4 — $\varphi = 90^\circ$), изотропия жазықтығын бойлап көлденең таралатын созу-сығымдау толқындарынан изотропия жазықтығының созылымына көлденең өткен шеңберлі қима туннелінің қатты қаптамасына сейсмикалық түйіспелік қысымның σ_r эпюралары (үлесі $\sigma_x^{(0)} = (T/2\pi)\gamma k_c V_p$) ($\varphi = 0$) көрсетілген.



11-сурет – Есептік тәсіл



12-сурет - Есептік тәсіл



13-сурет - Есептік тәсіл

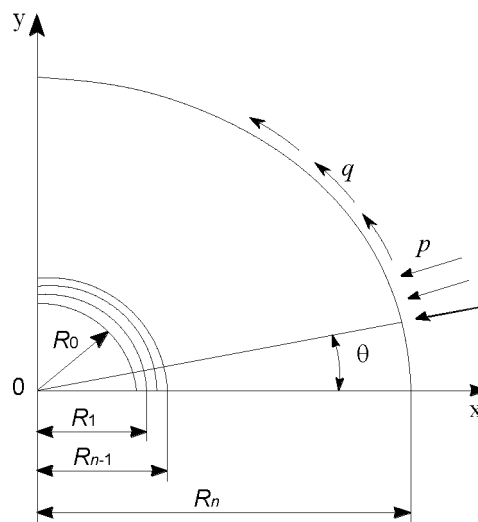
Есептер сілем изотропиясының созылым жазықтығы бойынша өткен туннель үшін алынған аталмыш бастапқы деректер үшін жүргізілген. 4-қисық сызық ($\varphi = 90^\circ$) мәні бойынша изотроптық сілем жағдайына сәйкес келеді. Көрініп тұрғандай, жыныстар изотропиясы жазықтығының созылым сызықтарына көлденең өткен туннель жағдайында

да сілем анизотропиясының шамаға ықпалы және қаптамаға сейсмикалық қысымның таралуы елеулі [2, 6].

5.5 Шеңбер кескінді туннельдердің көп қабатты қаптамаларының есебі

5.5.1 Терең орналасқан шеңберлі көлденең қималы көп қабатты туннельдік қаптамалардың және оқпандардың есебі бойынша осы кіші бөлімнің ережелері осы ережелер жинағының 5.3.1, 5.3.3, 5.3.5 және 5.3.6 көрсетілген алғышарттарға негізделеді [2, 7, 9].

5.5.2 14-суретте берілген туннельдік қаптаманың есептік тәсілі көп қабатты шеңберлі сақинаны білдіреді, оның сыртқы қабаты топырақтың сілемін моделдейді. R_n топырақ қабатының радиусы қазбаның орналасу тереңдігіне тең қабылданады.



14-сурет – Көп қабатты қаптаманың кернеулі жағдайын анықтауға есептік тәсіл

Топырақ қабаты қимасының сыртқы контурына қолданылған есептік кернеулер келесі формулалар бойынша анықталады

$$\left. \begin{aligned} P &= P_0 + P_2 \cos 2\Theta, \\ q &= Q_2 \sin 2\Theta. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\text{Мұнда} \quad P_0 = -\frac{P}{2(1-\nu_0)}, \quad P_2 = -P \frac{\sqrt{(3-4\nu_0)(1-2\nu_0)}}{2(1-\nu_0)}. \quad (20)$$

P шамасы осы ережелер жинағының 5.3.5 сәйкес анықталады.

5.5.3 Қаптаманың әрбір қабатының сыртқы және ішкі контурларындағы σ_θ кернеулерінің экстремалды мәндері $\Theta = 0$, $\Theta = 90^\circ$ мәндерінде орын алады. Көрсетілген

қималардағы σ_θ үлкен сығымдаушы және созушы кернеулері есептік ретінде қабылданады.

Қабаттардың дәлдігін тексеру серпінді кезеңде жүргізіледі.

Есептік созушы кернеулерді қаптама материалының есептік кедергісімен тікелей салыстырады.

Сығымдауға қаптама материалының беріктігін тексеру келесі формула бойынша көлемдік кернеулі күйді ескере отырып жүргізіледі

$$\left| \sigma_\theta - \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_r \right| \leq R_{np}, \quad (21)$$

мұнда σ_r – қарастырылатын қимадағы есептік радиалды сығымдаушы кернеулер (созушы радиалдық кернеулер кезінде формулаға $\sigma_r = 0$ қойылады), МПа;

φ – қаптама материалының ішкі үйкелісінің бұрышы, град;

R_{np} – қаптама материалының есептік кедергісі (призмалық беріктік), МПа.

5.5.4 Егер жобаланатын көп қабатты қаптама топыраққа анкерленген болса, онда есептік ретінде "плюс" және "минус" белгілерімен алынған абсолютты шамасы бойынша максималды кернеулерді қабылдайды.

5.5.5 Есептік кернеулерді σ_θ қолданыстағы жүктемелердің басқа түрлерінен болатын кернеулермен жиынтықтайды және жүктемелердің әртүрлі үйлесімдерінде қаптама материалының беріктігін тексеру үшін пайдаланады.

5.5.6 Туннельдердің көп қабатты шеңберлі қаптамаларының есебі К қосымшасында берілген алгоритм бойынша жүргізіледі.

5.6 Анкерлік бекітпе есебі

5.6.1 Жүктемелерді қабылдау және беру сипаты бойынша анкерлік бекітпелер ВҚН 126-90 сәйкес екі топқа бөлінеді:

- бірінші топқа бекіту күштері шпурлардан алынуына қарай сақталатын немесе ұлғаятын анкерлер (құлып типіндегі);

- екінші топқа жүктеме шектік күйге өскенде іс жүзінде ауысулар байқалмайтын анкерлер (біртұтасты) жатқызылады.

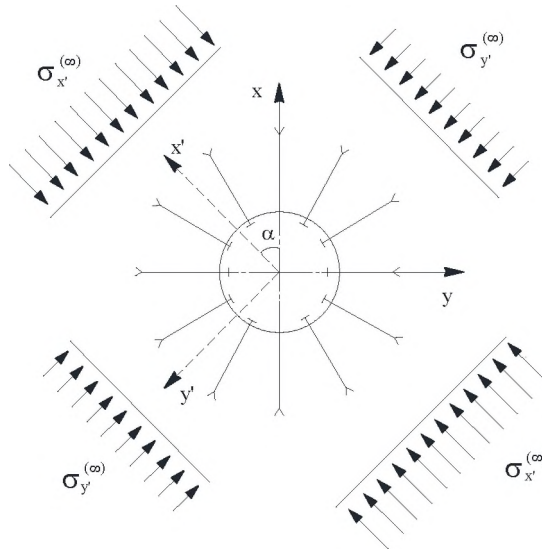
5.6.2 Төменде ұсынылатын әдістеме шеңберлі қимадағы қазбалардың құлып типіндегі анкерлік бекітпесін есептеу үшін арналған [2, 9]:

- анкерлік бекітпе анкерлердің өзара ықпалын ескере отырып «бекітпе-сілем» бірыңғай деформацияланатын жүйесінің элементі ретінде есептеледі;

- анкерлік бекітпе E_0 деформация модулімен және ν_0 Пуассон коэффициентімен сипатталатын шеңбер қималы қазбаның айналасындағы жыныстар сілемінде радиалды орналасқан l_a , r_a , E_a параметрлерімен өзектердің еркін санды жүйесі ретінде қарастырылады (l_a – анкердің ұзындығы; r_a – анкердің көлденең қимасының радиусы; E_a – анкер материалының серпінділік модулі).

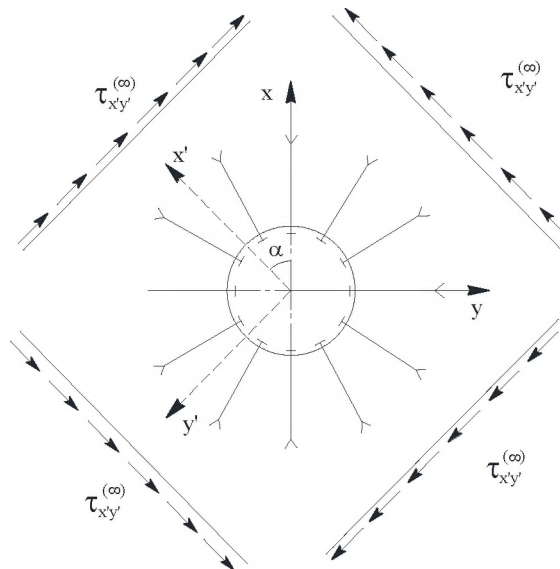
5.6.3 Сейсмикалық әсерлерге анкерлік бекітпенің есебі қазбаның көлденең қимасының жазықтығына кез-келген бағытта таралатын, бір мезгілде келетін (ең нашар жағдай) ұзын бойлық және көлденең сейсмикалық толқындардың жиынтықты әрекетінің әртүрлі үйлесімдерінде анкерлік өзектердегі максималды бойлық күштерді N_i^c анықтауға негізделеді.

5.6.4 α еркін бұрышында түсетін ұзын бойлық толқынның әрекетінен анкерлік өзектердегі күштерді анықтау үшін серпінділік теориясының жазық квазистатикалық түйіспелік тапсырмасының шешімі пайдаланылады, оның есептік тәсілі 15-суретте берілген.



15-сурет – Ұзын бойлық толқынның әрекетінен анкерлік өзектердегі бойлық күштерді анықтауға арналған есептік тәсіл

5.6.5 α еркін бұрышынан көлденеңге түсетін ұзын көлденең толқынның әрекетінен анкерлік өзектердегі бойлық күштерді анықтау үшін серпінділік теориясының жазық квазистатикалық түйіспелік тапсырмасының шешімі пайдаланылады, оның есептік тәсілі 16-суретте көрсетілген.



16-сурет – Ұзын көлденең толқынның әрекетінен анкерлік өзектердегі бойлық күштерді анықтауға арналған есептік тәсіл

5.6.6 Есептік ретінде бойлық және көлденең сейсмикалық толқындардың бір мезгілдегі әрекеті кезіндегі анкерлік өзектегі максималды созушы күш қабылданады.

Сейсмикалық толқындардың белгісіз бағытында максималды созушы күш барлық анкерлік өзектер үшін тең ықтималды болып қарастырылады және жыныстар сілемінің өзіндік салмағының әрекетімен жиынтықталады.

5.7 Бүрікпе бетондық бекітпенің есебі

5.7.1 ВҚН 126 сәйкес бүрікпе бетоннан жасалған жабын тау-кен қазбаларын бекіту, опырылудың алдын алу және тау жыныстарын мүжілуден сақтау үшін қолданылады. Бүрікпе бетоннан жасалған жабынның ұсынылатын ең төменгі қалыңдығы кем дегенде 3 см болып қабылдануы тиіс.

5.7.2 Төменде ұсынылатын әдістеме сейсмикалық әсерлерге бүрікпе бетонның бекітпесін есептеу үшін арналған [2, 7, 10]:

- бүрікпе бетон бекітпесі қазба бетінің нысанын қайталайтын және жыныстарды қоршаған сілеммен бірыңғай деформацияланатын жүйені құрайтын басқа материалдан жасалған жұқа жабын ретінде есептеледі.

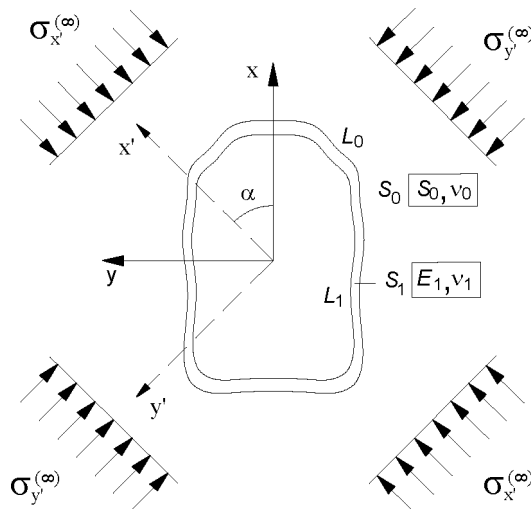
5.7.3 Бүрікпе бетон бекітпесінің параметрлері тегіссіздік саны n мен тегіссіздік амплитудасы δ (жобалық тегіс контурдан орташа ауытқу) табиғи өзгерістер деректерін статистикалық өңдеу негізінде берілетін, гипотрохоидалды қисық сызықпен жақындатылатын тегіссіздіктерге ие берілген (жобалық) қалыңдықтағы және конфигурациядағы сақина ретінде қарастырылады.

Осындай деректер болмаған жағдайда, ВҚН 126 сәйкес тегіссіздіктер саны қазбаның көлденең қимасының контуры ұзындығының контурлық теспелер арасындағы арақашықтыққа қатынасының жартысы ретінде анықталады. Бұл жағдайда тегіссіздіктер амплитудасы асып кетуден жол берілетін нормасының жартысы ретінде қабылданады.

Ескертпе – Есептеу әдістемесінің қолданылуын шектеу $\frac{(n-1)\delta}{R} \pi \leq 1$ шартын орындау болып табылады, мұнда R – қазбаның орташа радиусы.

5.7.4 Сейсмикалық әсерлерге бүрікпе бетон бекітпесінің есебі конструкцияның ішкі бетінің әрбір нүктесі үшін қазбаның көлденең қимасының жазықтығында кез-келген бағытта таралатын ұзын бойлық және көлденең толқындардың бірлесе әрекет етуші әртүрлі үйлесімдерінде мүмкін болатыннан абсолютты шамасы бойынша максималды қалыпты тангенциалдық кернеулерді σ_0 анықтаудан тұрады.

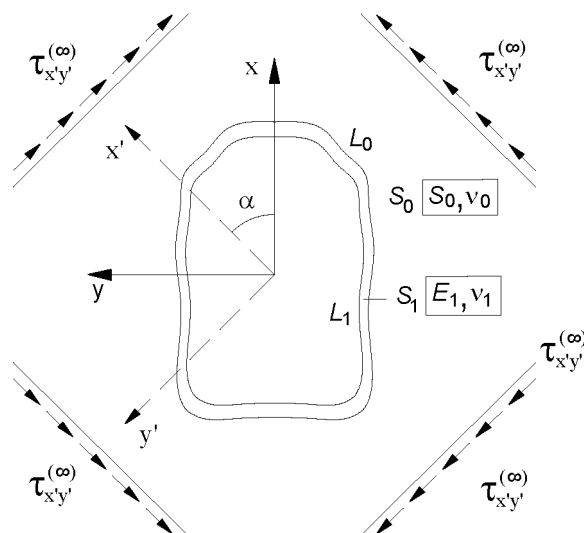
5.7.5 α еркін бұрышынан қазба симметриясының өсіне түсетін ұзын, бойлық толқынның әрекетінен бекітпедегі кернеулерді анықтау үшін $\sigma^{(p)}$ серпінділік теориясының жазық квазистатикалық түйіспелік тапсырмасының шешімі пайдаланылады, оның есептік тәсілі 17-суретте берілген.



17-сурет – Еркін бағытталған бойлық ұзын толқынның әрекетінен бекітпенің кернеулі жағдайын анықтауға арналған есептік тәсіл

Материалы E_1 деформация модуліне және Пуассон коэффициентіне ν_1 ие модульдеуші бекітпе, S_1 сақинасы E_0 және ν_0 сипаттамаларына ие жыныстардың сілемін модульдеуші S_0 ортасымен бірге құрылады, яғни L_0 түйіспе сызығында кернеулер және ауысулар векторларының үздіксіздігі шарттары қадағаланады. Сақинаның ішкі контуры сыртқы күштердің әрекеттерінен бос.

Шексіздікке кернеулер осы ережелер жинағының 5.2.17 сәйкес қабылданады.



18-сурет – Ұзын, еркін бағытталған көлденең толқынның әрекетінен бекітпенің кернеулі жағдайын анықтауға арналған есептік тәсіл

5.7.6 α еркін бұрышынан қазба симметриясының өсіне түсетін ұзын, көлденең толқынның $\sigma^{(s)}$ әрекетінен бекітпедегі кернеулерді анықтау үшін серпінділік теориясының

жазық квазистатикалық түйіспелік тапсырмасының шешімі пайдаланылады, оның есептік тәсілі 18-суретте берілген.

Шексіздікке жанама кернеулер осы ережелер жинағының 5.2.17 сәйкес анықталады.

5.7.7 Сейсмикалық әсерлерден σ_θ максималды кернеулерді анықтау бір мезгілде келетін (жағымсыз жағдай) бойлық және көлденең толқындардың бірлескен әрекетінен кернеуді сипаттайтын

$$\sigma_{\theta 1} = \sigma_{\theta}^{(p)} + \sigma_{\theta}^{(s)}, \quad \sigma_{\theta 2} = \sigma_{\theta}^{(p)} - \sigma_{\theta}^{(s)}, \quad (22)$$

формулалардың α толқындарының түсу бұрышы бойынша экстремумға зерттеу арқылы ішкі контурдың әрбір нүктесі үшін жүргізіледі.

Әрбір нүкте үшін

$$\frac{\partial \sigma_{\theta 1}}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{\theta 2}}{\partial \alpha} = 0, \quad (23)$$

теңдеулер шешімінен осы нүктедегі қалыпты тангенциалды кернеулер σ_θ абсолютты шамасы бойынша максималды болатын толқындар әрекеттерінің үйлесімі ($\sigma_{\theta 1}$ немесе $\sigma_{\theta 2}$) және олардың түсу бұрышы α , ал содан кейін максималды кернеулердің шамалары анықталады, яғни бойлық және көлденең толқындардың кез-келген үйлесімінде және бағытында σ_θ кернеулер эпюраларының орамасы құрылады.

5.7.8 Бекітпенің сыртқы бетінің нүктелеріндегі қалыпты тангенциальды кернеулер σ_θ және күштер – бекітпенің әрбір қимасындағы бойлық күштер N және бұгуші сәттер M осы қима үшін абсолютты шамасы бойынша максималды кернеулер σ_θ алынған әртүрлі сипаттағы толқындар әрекетінің үйлесімінде және бағыттарында анықталады.

5.7.9 Ішкі контурда абсолютты шамасы бойынша максималды кернеулерге σ_θ сәйкес келетін M және N табылған күштері «плюс» және «минус» белгілерімен қабылданады және статикалық жүктемелерден болатын күштермен жиынтықталады.

5.7.10 Бекітпе қимасының сығымдалуға және созылуға беріктігін тексеру үшін жиынтық күштер олардың ең жағымсыз үйлесімінде пайдаланылады, яғни бекітпенің әрбір қимасында ішкі контурдағы үлкен сығымдаушы (теріс) және созушы (оң) қалыпты тангенциалды кернеулерге σ_θ сәйкес келетін күштер жеке жиынтықталады.

Статикалық жүктемелерден және сейсмикалық әсерлерден жиынтықталған сығымдаушы және созушы қалыпты тангенциалды кернеулерді σ_θ сәйкесінше бүрікпе бетонның сығымдалуға және созылуға есептік кедергілерінің шамаларымен салыстыру арқылы бекітпенің беріктігін тексеруге жол беріледі.

5.7.11 Тұрақты бүрікпе бетон бекітпесі үшін қазба бетіндегі бұдырлардың кездейсоқ таралу сипатын есепке алу мақсатында бұдырлар амплитудасының оң мәнінде δ (күмбездің жоғарғы нүктесінде ойпанның болуына сәйкес келетін), сондай-ақ теріс мәнінде δ (күмбездің жоғарғы нүктесінде шығыңқының болуына сәйкес келетін) барлық

сипатталған есептерді орындау керек. Осы екі жағдайдағы кернеулердің алынған мәндерін бүрікпе бетонның сығымдалуға және созылуға есептік кедергілерімен салыстырады.

5.8 Анкерлермен бүрікпе бетон бекітпесінің есебі

5.8.1 Конструкцияны алдын-ала тандау және көлік туннельдері қазбаларының уақытша бекітпесі ретінде анкерлермен бүрікпе бетон бекітпесінің параметрлерін тағайындау (анкерлердің ұзындығы, олардың арасындағы арақашықтық, бүрікпе бетон жабынының қалыңдығы және т.с.с.) ВҚН 126 мазмұндалған ережелерді ескере отырып жүргізіледі.

Бекітпенің беріктігін 5.8.2 және 5.8.3 т.т. сәйкес сейсмикалық әсерлерді ескере отырып есеппен тексереді.

5.8.2 Анкерлермен бүрікпе бетон шеңберлі бекітпе есептеу кезінде көп қабатты конструкция ретінде қарастырылады, онда келесі қабаттарды бөліп шығарады:

- анкерлермен бекітілген топырақ қабаты, оның қалыңдығы $0.8 l$ тең қабылданады, мұнда l – анкерлердің ұзындығы, м;
- арматураның қалыңдығына тең қабылданатын тормен, өзектермен және т.с.с. арматураланатын бүрікпе бетон қабаты;
- меншікті бүрікпе бетонның қабаты.

Бекітпенің есебі 5.3 кіші бөлімге сәйкес жүргізіледі.

Ескертпе – Анкерлермен топырақ қабаты деформациясының модулі $1,2E_0$ тең қабылданады, мұнда E_0 – топырақтың деформациялану модулі.

5.8.3 Анкерлермен бүрікпе бетонды шеңберлі емес бекітпе біртұтас тұйық конструкция ретінде (бүрікпе бетон жабынының қалыңдығымен) 5.3 кіші бөлімге сәйкес есептеледі, әрі сілем үшін $E_{0пр}$ деформацияның берілген модулінің мәні қабылданады. $E_{0пр}$ деформациясының берілген модулі келесі түрде анықталады.

5.8.3.1 Дара шеңбер кескінінің бекітпенің көлденең қимасының ішкі контурының кескініне түрленуін беретін $a_0, \dots, a_5$ функцияларын көрсететін коэффициенттерді тапқаннан кейін (Ж қосымшасын қар.) R_1^* қатысты 5-ші деңгейдегі теңдеу шешіледі

$$a_0 R_1^{*5} + (a_1 - h_1) R_1^{*4} + a_2 R_1^{*3} + a_3 R_1^{*2} + a_4 R_1^* + a_5 = 0, \quad (24)$$

R_1^* ретінде бірліктен жоғары, осы теңдеудің түбірі алынады.

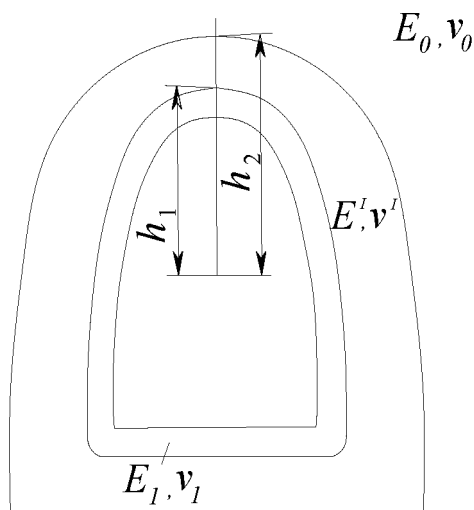
5.8.3.2 Берілген қазба радиусы анықталады:

$$R = a_0 R_1^*, \quad (25)$$

5.8.3.3 (24) теңдеуі шешіледі, мұнда h_1 орнына h_2 алынады – координаттардың басталуынан аймақтың жоғарғы нүктесіне дейінгі E', v' сипаттамаларымен арақашықтық

(19-суретті қар.). R'_1 ретінде бірліктен асатын теңдеудің нақты түбірі (24) алынады. E' , ν' сипаттамаларымен аймақтың берілген радиусы анықталады:

$$R' = a_0 R'_1, \quad (26)$$



19-сурет – Топырақтар деформациясының берілген модулін анықтауға тәсіл

5.8.3.4 δ , β және A коэффициенттерін есептеу жүргізіледі:

$$\delta = \frac{R}{R'}, \quad \beta = \frac{E'(1+\nu_0)}{E_0(1+\nu')}, \quad A = \frac{2(1-\nu')\delta^2}{1-2\nu'+\delta^2+\beta(1-\delta^2)}. \quad (27)$$

5.8.3.5 Деформацияның берілген модулінің мәні келесі формула бойынша анықталады:

$$E_{0np} = E' \frac{1-\delta^2}{1+(1-2\nu')\delta^2-2A(1-\nu')}, \quad (28)$$

5.9 Таяз орналасқан туннельдердің шеңберлі емес кескінді қаптамаларының есебі

5.9.1 Осы кіші бөлімнің талаптары күмбездің жоғарғы нүктелерін қосатын сызығынан туннельдің үшеуден аспайтын үлкен көлденең өлшемдерінің бетіне дейінгі арақашықтықта таяз орналасқан шеңберлі емес кескіндегі туннельдер қаптамаларының немесе олардың телімдердің есебіне таралады.

5.9.2 Есептеу тәртібі 5.2.7 сәйкес анықталады.

5.9.3 Қаптамаға жүктемелерді сейсмикалық әсерлердің тік және көлденең бағыттары үшін бөлек анықтайды:

а) қаптаманың меншікті салмағынан сейсмикалық жүктеменің көлденең және тік құраушыларын келесі формула бойынша есептейді:

$$S_k = Q_k k_c, \quad (29)$$

мұнда $Q_k - k$ нүктесіне жатқызылған қаптама элементінің салмағы

б) қаптама қабырғасының биіктігі шегінде қаптамаға топырақтың көлденең инерциялық қысымының қарқындылығын келесі формула бойынша анықтайды:

$$p_c(y) = p_y k_c \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right), \quad (30)$$

мұнда p_y – топырақтың белсенді қысымы, МПа;

в) қаптаманың жоғарғы бөлігіне салынған, қазба аралығының шегінде туннельдің үстіндегі үйінді топырақтың инерциялық массасының көлденең құраушысын келесі формула бойынша анықтайды:

$$P_c = \gamma H l f, \quad (31)$$

мұнда l – қазбаның ені, м;

H – күндізгі беттен арақашықтық, м;

f – қаптама бойынша топырақтың үйкелу коэффициенті.

г) тік құраушының қарқындылығын $q_c^{\text{верт}}$ келесі формулалар бойынша анықтайды

$q_c^{\text{верт}} = \gamma H k_c$ (туннельдің үстіндегі H топырақ топырақтың толық бағанының салмағынан),

немесе

$q_c^{\text{верт}} = \gamma h_1 k_c$ (күмбез түзу мүмкіндігінде, мұнда h_1 – күмбездің биіктігі).

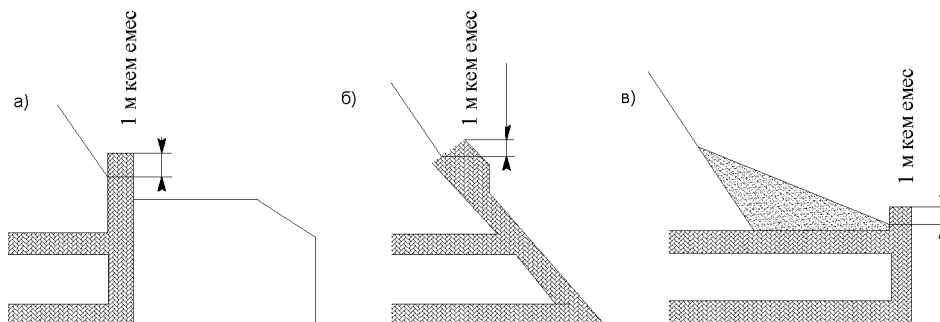
5.9.4 Топырақтың инерциялық массаларынан және меншікті салмағынан көлденең күштерді (бірінші үйлесім) және топырақтың инерциялық массаларынан және меншікті салмағынан тік жүктемелерді (екінші үйлесім) бөлек жиынтықтау жүргізіледі, бірінші және екінші үйлесім бойынша екі статикалық есеп орындалады және қаптама қималарының беріктігі тексеріледі.

5.10 Порталдарды және портал маңындағы тіреуіш қабырғаларды жобалау

5.10.1 Порталдарды ҚР ҚН 3.03-11 және ҚР ЕЖ 3.03-111 мазмұндалған ережелерге сәйкес, ал портал маңындағы тіреуіш қабырғаларды ВҚН 167 және осы ережелер жинағында мазмұндалған ережелерге сәйкес құру және есептеу керек.

5.10.2 Жер сілкінісі кезінде құрылыстың сенімділігін және пайдалануға жарамдылығын сақтау мақсаттарында тау бөктерінің маңында туннель трассасы өткенде және порталдардың үстіндегі тау бөктерлерінің тұрақтылығын тексеру ұсынылады.

5.10.3 Сейсмикалық аудандардағы туннельдердің порталдарын қиябеттердің тіктігіне, тау сілемінің бөктеріндегі топырақтардың тұрақтылығына және беріктігіне, жарықталуына, сонымен қатар туннельге кіреберістердің жағдайына байланысты ойып орнатылатын, қарсы тіреуіш қабырғамен еңісті (20, а, б сурет) немесе бөктерлер тұрақсыз болған жағдайда қарсы қиябетті теңестіру үшін (20 сурет, в) жасанды үйіндімен шығыңқы етіп жобалау ұсынылалы.



а – ойып орнатылатын, б – еңісті қарсы тіреуіш қабырғамен , в - шығыңқы
20-сурет – Сейсмикалық аудандардағы туннельдер порталдарының
конструкциялары

5.10.4 Туннельдердің порталдарын, әдетте, темірбетон етіп жобалау керек. Тұрақты жартасты топырақтарда сейсмикалығы 7 баллдан аспайтын алаңқайларда бетон порталдарды қолдануға жол беріледі. Қарсы тіреуіш қабырғаларды қиябеттің үстіңгі бетінің үстінен кем дегенде 1 м асатын қоршаушы парапет құрылғысымен темірбетоннан құру керек.

5.10.5 Портал маңындағы тіреуіш қабырғалар темірбетоннан, сонымен қатар бетоннан орындалуы мүмкін.

5.10.6 Порталдардың орналасуын белгілеген кезде портал маңындағы ойпаңдар қиябеттеріндегі тіреуіш қабырғалардың биіктігін 3-кестенің деректері бойынша қабылдау керек. Осындай талаптарды орындау мүмкін болмаған жағдайда қиябеттерді тегістеу немесе порталды шығыңқы ету қажет.

3-кесте – Тіреуіш қабырғалардың материалдары және биіктігі

Тіреуіш қабырғаның материалы	Алаңқайдың есептік сейсмикалығы, балл	Тіреуіш қабырғаның биіктігі, м
Темірбетон	8	12
	9	10
Бетон	8	12
	9	8

5.10.7 Портал маңындағы ойпаңдардың қиябеттерін қолдау үшін пайдаланылатын материалға және үстіңгі беттің көлбеу сипатына, сонымен қатар қабырғалардың биіктігіне байланысты тіреуіш қабырғалардың массивті бетон және жеңілдетілген темірбетон конструкцияларын қолдану керек. Жобаланатын қабырғаның типін, оның конструкциясын

және өлшемдерін жергілікті инженерлік-геологиялық, сейсмикалық және басқа шарттарды ескере отырып құрылатын нұсқаларды техникалық-экономикалық талдау негізінде тағайындау керек.

5.10.8 Портал маңындағы тіреуіш қабырғаларды өлшемі 15 м аспайтын, ал сейсмикалығы 8 және 9 балл болатын аудандарда – 10 м дейінгі секцияларға тік өтпелі жапсарлармен (іргетасты қосқанда) ұзындығына бөлу керек.

Әрбір секцияның табаны біртекті (сығымдалу деңгейі бойынша) топыраққа тірелетіндей түрде жапсарларды орналастыру керек.

5.10.9 Сейсмикалық әсерді ескере отырып, аударылуға қарсы тұрақтылыққа порталдарды және портал маңындағы тіреуіш қабырғаларды есептеген кезде жұмыс шарттарының коэффициентін қималар үшін қабылдайды:

а) бетон конструкциялар - 0,75;

б) консистенция коэффициентімен байланысты топырақтар үшін таяз орналасқан іргетастардың табаны бойынша $B < 0,25$ - 0,75; $0,25 < B < 0,50$ - 0,55; $B > 0,50$ - 0,40; жартастық үшін - 0,75, ылғалдылықтың әртүрлі деңгейімен байланыспайтындар үшін - 0,55, орташа тығыздықтағы байланыспайтындар үшін - 0,40.

5.10.10 Портал маңындағы тіреуіш қабырғаның сейсмикалық тұрақтылығына табанның иілгіштігінің қолайсыз әсерін болдырмау үшін сейсмикалығы 9 балл болатын аудандарда оның іргетасын жартастық немесе жартылай жартастық топыраққа дейін жеткізу керек немесе табанды жасанды түрде нығыздау керек.

5.10.11 Портал маңындағы қабырғаның ішкі шегін ойпаң қиябеті жағына қарай еңкейту керек.

5.10.12 Портал маңындағы тіреуіш қабырғалардан суды бұру үшін құрғату құрылғыларын ВҚН 167-70 ережелеріне сәйкес жобалау керек.

5.10.13 Туннельге қолданылатын жолдың төменгі құрылымының типін кем дегенде 10 м арақашықтықта порталдың шегінен тыс қарастыру керек.

6 ЖЕР СІЛКІНІСІНІҢ САЛДАРЫН ЖОЮ ²⁾

6.1 Қолданыстағы нормативтік құжаттарда күшті және қиратушы жер сілкіністерінен кейін жерасты құрылыстарында қалпына келтіру жұмыстарын жүргізу, тексеру тәртібі туралы нақты әрі анық нұсқаулар жоқ, тиісінше, сейсмикалық аудандарда нақты көлік туннельдерін салу бойынша жобалық құжаттамада қиратушы жер сілкіністерінен кейін жүргізілуі тиіс жұмыстар туралы нұсқаулар берілмеген.

Салынып жатқан және пайдаланылатын көлік туннельдерінде жер сілкіністерінің салдарын жою және қалпына келтіру жұмыстары туннельдердегі бүлінулерді дер кезінде және сапалы зерттеуге және оларды қалпына келтіру бойынша шаралар жоспарына елеулі деңгейде байланысты болады.

Төменде жер сілкіністерінің салдарын жоюмен байланысты жұмыстардың кейбір ерекшеліктері берілген.

²⁾ 6-бөлімде [1] келтірілген ережелер пайдаланылды.

6.2 Жер бетіндегі ғимараттарды және құрылыстарды зерттеумен салыстырғанда жерасты құрылыстарын зерттеудің келесі ерекшеліктері бар:

- бірінші ерекшелігі кең шепте жұмыстарды жүзеге асырудың мүмкін болмауынан тұрады, сондықтан зерттеулердің саны шектеулі;

- екінші ерекшелігі қалпына келтіру жұмыстарының орындылығы немесе орынсыздығы туралы мәселе болып табылады. Қиындық қалпына келтіру әдісін таңдауға негізделеді, яғни туннельді бастапқы түрінде қалпына келтіру, жаңадан туннель салу немесе оның орнында трассаның ашық телімдерімен терең ойпаң құру;

- үшінші ерекшелігі жер сілкінісінің кейінгі дүмпулерінде жерасты құрылыстарының ықтимал бұзылысынан алдын алу бойынша параллель жұмысты жүргізуге және тексерушілердің қауіпсіз жұмыс істеуі үшін шарттар құруға негізделеді, бұл, әрине, зерттеу мерзімдерін ұзартады.

6.3 Сейсмикалық аудандарда туннельдерді пайдалану зерттеулерді ұйымдастырудың келесі негізгі ережелерін тұжырымдауға рұқсат береді.

Қарқындылығы 3-4 балл болатын жер сілкінісінде салынып жатқан жерастылық қазбаларда жұмыс тоқтамайды. Қазбаларды ауысым қызметкерлері тексереді, жыныстардың тұрақтылығы төмен телімдер айқындалады, қажет болған жағдайда осы телімдерде қауіпсіз шарттарды құру үшін шаралар қабылданады.

Қарқындылығы 5 балл болатын жер сілкінісінде жұмыс тоқтатылады. Жыныстардың тұрақтылығына тәуелсіз қазбалар мұқият тексеріледі, тау-кен қазбаларын тексеру журналында жабынның, қабырғалардың және уақытша бекітудің жағдайы туралы, бекітілмеген телімдерде тазалауды жүргізу туралы міндетті түрде жазба жасайды. Қазбаларды қарау тау-кен телімдердің ауысым қызметкерлерімен жүзеге асырылады. Жұмыс жүргізу туралы шешім құрылыс немесе пайдалану ұйымының басшылығымен комиссиялық түрде қабылданады.

Жерасты дүмпулерінің күші 5-6 баллдан асатын жер сілкінісінде жерастылық қазбалардағы барлық жұмыстар тоқтатылады. Негізгі жұмыстарды жаңғыртуға бас инженердің, геологтың, телімнің қауіпсіздік техникасы және техқадағалау жөніндегі инженерінің қатысуымен қазбаларды комиссиялық тексеруден кейін ғана рұқсат етіледі. Барлық жерастылық қазбаларды уақытша және тұрақты бекітудің барлық деформациясының тізбесін қосып тіркеумен тексеру акті құрылады. Тау-кен қазбаларын комиссиялық тексеруден кейін бекітілмеген телімдерде және уақытша бекітпемен бекітілген телімдерде қауіпсіз шарттарды құру бойынша жұмыстарды өндіруге рұқсат беріледі.

6.4 Келесі қарқындылықпен жер сілкінісі кезінде метрополитеннің пайдаланылатын туннельдерінде:

- қоса алғанда 4 баллға дейін болғанда пойыздардың қозғалысы осы телім үшін орнатылған пайдалану режимінде жүзеге асырылады;

- 5 балл болғанда пойыздың бригадаларына пойыз диспетчері арқылы «ерекше сақтық туралы» бұйрық беріледі;

- 6 балл болғанда пойыздардың жылдамдығын 25 км/с дейін шектеу туралы ескерту берілуі тиіс;

- 7 балл және одан асқан жағдайда пойыздардың қозғалысы тоқтатылуы тиіс, бірақ трассаның қауіпті телімдеріндегі пойыздарға қауіпті аймақтан кету үшін 15 км/с дейінгі жылдамдықпен қозғалуға рұқсат етіледі.

5 және одан асатын баллдағы жер сілкіністерінде пайдалану қызметтері жолдың, түйіспелік рельстің және басқа құрылғылардың жағдайын, сонымен қатар өңірдің жақын телімдерін дереу қарауы тиіс және қажет болған жағдайда туындаған зақымдалуларды жоюы және ескертулердің күшін жою мүмкіндігі туралы хабар беруі тиіс.

5, 6, 7 баллдық және одан асатын жер сілкінісінің күші туралы ақпарат, қоршаушы және өтпелі бағдаршамдарды автоматты қосу және автоблоктау күту режимінде жұмыс істейтін туннельдердегі инженерлік-сейсмикалық станциялардан жүргізіледі.

6.5 Күші 7 балл және одан асатын жер сілкінісінде ұйымдастыру шараларын және бірнеше кезеңде жүзеге асырылатын тікелей зерттеу бойынша ұсыныстарды қамтитын арнайы әзірленген жоспар іске қосылуы тиіс.

6.6 Ұйымдастыру шаралары келесілерді қамтиды:

- жерастылық қазбаларда жұмыс істеп жатқандардың барлығын құрылыс немесе пайдалану ұйымының техқадағалау тұлғаларының басшылығымен күндізгі бетке шығару;

- құрылыс және пайдалану ұйымының, тау-кен құтқару қызметінің басшыларын шақыру, олар туннельдердегі барлық жұмыс істеушілердің шығарылғандығына көз жеткізіп, адамдардың жерастылық қазбаларға кіруіне тыйым салады;

- жер сілкінісі келтірген нұқсанды зерттеу және жою үшін жалпы басқаруға арналған штабты және тиісті уәкілетті комиссияларды (тау-кендік, көлік, материалдық ресурстар бойынша).

Штабпен көрсетілген мерзімде комиссиялар жөндеу-қалпына келтіру және апаттық жұмыстардың ведомостілерін қосып тіркеумен зерттеу актілерін құруға міндетті. Барлық телімдерде жауапты кезекшілер тағайындалады және штабпен көрсетілген орындарда бақылау бекеттері орнатылады.

6.7 Тексеруді үш кезеңде жүзеге асыру ұсынылады.

Жұмыстың бірінші кезеңінде тау-кендік комиссия жерастылық қазбаларға апаратын жолдардың жағдайын тексеруі тиіс және егер көшкінді телімдер айқындалса, оларды нығайту немесе қазбалардың, әсіресе кенеттен, су басуын болдырмау үшін оларды нығайту немесе жою бойынша шараларды әзірлеу керек. Пайдаланылатын туннельдерді тексерудің белгілі бір реттілігі қарастырылуы тиіс, ал салынып жатқан туннельдер үшін – өтпенің инженерлік-геологиялық шарттарын, уақытша және тұрақты бекітпе типін, сонымен қатар 6-7 баллдан асатын күшпен күтілетін қайталама жерасты дүмпулері бойынша болжамды ескере отырып жоспар құрады.

6.8 Жұмыстың екінші кезеңінде тау-кен комиссиясы тұрақты және уақытша бекітпенің жағдайын, жыныстардың деформациясын тексеруі, коммуникациялар мен тау-кен қазба жүргізетін жабдықтың зақымдалу дәрежесін зерттеуі тиіс. Тексеру аяқталғаннан кейін комиссия ақау ведомостілерін қосып тіркеумен акт құрады, қазбалардың жалпы жағдайы анықталады және қазбаларда қауіпсіз шарттарды құру бойынша жұмыстарды алдын-ала жүргізумен апаттық-қалпына келтіру жұмыстарына шешім беріледі. Штаб актіні растағаннан кейін жұмыстарға рұқсат бұйрықпен рәсімделеді, онда қауіпсіз шарттар құрылатын және осы жұмыстардың реті анықталатын қазбаларды тексеру кезектілігі

көрсетіледі.

Қазбаларда қауіпсіз шарттарды құру бойынша жұмыстар техқадағалаудың тікелей бақылауымен жүргізілуі тиіс. Тау-кен журналына қазбалардың атауларын, ондағы күмбездің және қабырғалардың пикеттерін көрсете отырып барлық орындалған жұмыстарды жазу, қауіпті шарттармен байланысты адамдардың өтуі тыйым салынатын барлық қазбаларды тиісті тыйым салу белгілерін қоюмен көрсету керек.

Зерттеудің бірінші кезеңдері, осылайша, таза практикалық, өндірістік мақсаттарға ие – қираулардың және бұзылыстардың сипатын, шамасын және өлшемдерін анықтау, қажетті тізбені және шаралар тәртібін белгілеу (қауіпсіз шарттарды құру бойынша жұмыстар, жөндеу-қалпына келтіру жұмыстары).

Бір мезгілде осындай зерттеу түрлері қираудың көлемдері және сипаты туралы сенімді материал береді, дегенмен бұл материалдар ішінара субъективті сипатқа ие, өйткені нәтижелерді (опырылымдардың, қирау аудандарының өлшемдері және т.с.с.) сыртынан қарап тексеру арқылы алады.

6.9 Күшті жер сілкінісінен кейін қазбаларды зерттеудің үшінші кезеңінде маркшейдер қызметімен бақылаулық геодезиялық жұмыстар жүргізіледі. Осы кезеңге қазбаларда қауіпсіз шарттарды құру бойынша жұмыстарды орындағаннан кейін ғана кіріседі. Егер бірінші екі кезеңде негізінен бұзылудың өзіндік орындарын суретке түсірумен және суретін салумен зерттеудің сыртынан қарап тексеру әдісі қолданылатын болса, онда үшінші кезеңде аспаптық әдіс негізгі болып табылады.

Үшінші кезеңнің мақсаты – күндізгі беттегі триангуляциялық пункттердің және жерастылық қазбаларда полигонометриялық белгілердің ауысуын анықтау, қазбалардың тұрақты және уақытша бекітпесінің деформациялану шамасын анықтау үшін түсірілім жүргізу және жер сілкінісінен туындаған опырылымдардың, қираулардың, тау жыныстары көшкіндерінің көлемдерін нақтылау.

Қирау өлшемдерін және элементтерін аспаптық өлшеумен арнайы тексерулер жүргізіледі:

- жарықшақтарды бақылау, оларды сызу және суретке түсіру;
- жарықшақтардың енін, тереңдігін, ұзындығын және бағдарлануын өлшеу;
- опырылымдар, тесілулер, жыныстардың жылжуы;
- жеке жартастық блоктардың деформациясы;
- жарықшақтарды ашу;
- уақытша бекітудің бұзылуы (мысалы, анкерлердің түсуі, олардың көтергіш қабілетінің төмендеуі).

6.10 Қазбалардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету бойынша жұмыстарды күші 7 баллдан төмен жалғасып отырған әлсіз жер сілкінісі кезеңінде де жүргізуге тыйым салынады.

6.11 Елеулі зақымдалуларды алған туннельдерді қалпына келтірген кезде келесі негізгі техникалық шешімдер қолданылуы мүмкін:

- екпелеумен, бүрікпе бетонмен, анкерлік бекітпемен портал маңындағы тіреуіш қабырғалардың және портал маңындағы ойпаңдардың қиябеттерін нығайту;
- портал маңындағы ойпаңдардың ұзындығын ұлғайту арқылы порталдардағы үйінділерді тазалау;

- қираған туннель телімін қазумен қираған туннель телімін ашу арқылы ашық желімен ауыстыру (бұл тәсіл таяз орналасқанда ғана мүмкін болады);
- инвентарлық жақтауларды тасалаумен бір жол бойынша екі жолдық туннельде қозғалысты қалпына келтіру.

7 ИНЖЕНЕРЛІК – СЕЙСМОМЕТРИЯЛЫҚ ҚЫЗМЕТ ³⁾

7.1 Топырақ ортасының қозғалу параметрлерін және туннельдің топырақ сілемімен өзара әрекеттесуінің есептік модельдерінде туннельдік конструкциялардың динамикалық сипаттамаларын жанама жолмен анықтайды. Сілемдегі топырақ бөлшектерінің қозғалу жылдамдығын топырақ үлгілерін зертханалық зерттеулер негізінде, ал жылжулар және жылдамдатулар туралы сандық деректерді – сейсмологиялық бақылаулар деректері бойынша нақтылайды.

7.2 Туннельдердегі инженерлік-сейсмометриялық қызметті (ТИСҚ) құрудың негізгі мақсаты әртүрлі қарқындылықтағы жер сілкінісі кезінде туннельдер конструкциясының және қоршаған топырақ сілемінің ауытқу параметрлері туралы сандық деректерді алу, осы деректерді осындай конструкцияларды жобалаған кезде әрі қарай пайдалану болып табылады.

7.3 Инженерлік-сейсмометриялық қызметтің негізгі тапсырмасы әртүрлі қарқындылықтағы жер сілкінісі кезінде туннельдер конструкциясының және қоршаған топырақтың әрекеті туралы аспаптық жазбаларды жинақтау және өңдеу және ақпаратты ғылыми және жобалық ұйымдарға беру болып табылады. Бұл ақпарат туннельдік конструкцияларда қауіпті сейсмикалық деформациялардың ықтимал дамуын болжау әдістерін игеру, жер сілкінісі кезінде жерасты конструкцияларының талдамалық жұмыс модельдерін нақтылау және туннельдің жұмысына әртүрлі топырақ шарттарының ықпалын бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін.

7.4 ТИСҚ өлшемдерінің негізгі пункттерін туннельдің трассасы бойынша орналастырады және қаптама элементтерінің, сондай-ақ туннель орналасқан топырақтың тербеліс параметрлерін өлшеу үшін сейсмикалық қабылдағыштармен жабдықтайды. Осы пункттерді конструкциялардың кернеулі жағдайын ұзақ өлшеу үшін аспаптармен және құрылғылармен жабдықтауға болады. Негізгі тармақтардың саны туннельдің ұзындығына, туннель трассасы бойынша инженерлік-геологиялық шарттардың өзгеру жиілігіне, туннель үстіндегі өңір бедерінің өзгеруіне байланысты.

7.5 Сейсмикалығы 9 балл және одан асатын аудандарда созылған көлік туннельдері, метрополитен тораптары жер сілкінісі кезінде қаптама элементтерінің және қоршаған сілемнің ығысуын, жылдамдықтарын және жылдамдауын жазу үшін инженерлік-сейсмометриялық станциялармен жабдықталады.

7.6 Инженерлік-сейсмометриялық станцияның жобасы өлшеу пункттерін және тіркеуші кешенді орналастырудың жалпы тәсіліне, жабдықтың және аспаптардың толық тізіміне, аспаптарды, көмекші жабдықты, кабель желілерін орналастырудың және

³⁾ 7-бөлімде [1]-де келтірілген ережелер пайдаланылған.

бекітудің жұмыстық сызбаларын, сонымен қатар негізгі және көмекші орындардың сызбаларын қамтитын құрылыс бөлігіне ие болуы тиіс.

7.7 Инженерлік-сейсмометриялық станцияларда сейсмометриялық аспаптарды және жабдықты жобалаудың және орнатудың жалпы тәртібі жер сілкінісі кезінде ғимараттардың және құрылыстардың тербелістерін тіркеу үшін инженерлік-сейсмометриялық қызмет станцияларын ұйымдастыру бойынша нұсқаулықтармен регламенттеледі.

7.8 Инженерлік-сейсмометриялық станцияны жобалауды станцияны пайдалану жүктелетін ұйыммен міндетті түрде келісумен техникалық тапсырма бойынша орындау керек.

7.9 Көлік туннельдеріндегі әрбір инженерлік-сейсмометриялық станция кем дегенде үш өлшеу пунктіне – порталда, туннельде және туннельдің үлкен орналасу тереңдігінің орнында ие болуы тиіс.

Сейсмометриялық аппаратура кешендерінің көбірек саны қолданыстағы тектоникалық жылжулар болғанда және басқа жағдайларда жоба кезеңінде жүргізілген арнайы техникалық-экономикалық және сейсмологиялық негіздеменің негізінде жобалануы және әртүрлі сейсмикалық қаттылықтағы топырақтардың қабатталуын қиып өтетін туннельдерде орнатылуы мүмкін.

7.10 Өлшеу пункттері сейсмикалық қабылдағыштардың қаптамамен және топырақпен сенімді қосылысын қамтамасыз етуі, сейсмикалық қабылдағыштарды монтаждау және қызмет көрсету үшін еркін қатынауды, жабдықты әртүрлі жағымсыз әсерлерден сенімді қорғауы тиіс.

7.11 ТИСК өлшеу нүктелерінде орнатылатын сейсмометриялық аппаратураға қойылатын негізгі талап келесі: сейсмоаппаратура 3-тен 9 баллға дейінгі күшпен жер сілкінісінен болатын топырақтың және конструкцияның белгілі бір нүктелерінің кішігірім бұрмалануларымен ауытқуларын қабылдауы және тіркеуі тиіс.

7.12 Туннельдегі өлшеу пунктінде қаптама және қоршаған сілем элементтерінің тербелістері бір мезгілде тіркелуі тиіс.

7.13 Егер туннель қаптамалар конструкцияларының бірнеше типіне ие болса, қаптамалардың әрбір типінде өлшеу пункттерін орнату орынды болып табылады.

7.14 Сейсмикалық қабылдағыштарды қаптамаға қатты бекітілетін (қаптаманың тербелісін тіркеу үшін) және топыраққа 0,5-1,0 м тереңдікке (топырақтың тербелісін тіркеу үшін) орнатылатын көлденең бетон негіздер болып табылатын жұмыс алаңқайларына орнатылады.

7.15 Өлшеу пункттерін конструктивті рәсімдеу сейсмикалық қабылдағыштардың қаптамамен және топырақпен орнықты буындасуын, монтаждау және жөндеу үшін аспаптарға еркін қол жеткізуді, суды сүзгілеуден және топырақ пен қаптама кесектерінің құлауынан аппаратураны сенімді қорғауды, сонымен қатар аппаратураның қалыпты жұмысы үшін сәйкес температуралық және ылғалды режимді қамтамасыз етуі тиіс.

7.16 Инженерлік-сейсмометриялық станцияларға сейсмометриялық аспаптарды және жабдықтарды жобалаудың және орнатудың жалпы тәртібі жер сілкінісі кезінде ғимараттардың және құрылыстардың тербелісін тіркеу үшін инженерлік-

сейсмометриялық қызмет станцияларын ұйымдастыру бойынша нұсқаулықтармен регламенттеледі.

7.17 Сейсмометриялық аппаратураны салып алуға және оны орнатумен байланысты құрылыс-монтаж жұмыстарын орындауға жұмсалатын шығындар құрылыстарды салу сметаларында қарастырылуы тиіс.

7.18 Туннельде сейсмометриялық аппаратураны пайдалануды аймақтық сейсмологиялық қызмет қызметкерлерінің қадағалауымен жүзеге асыру ұсынылады.

А қосымшасы
(*ақпараттық*)

Топырақтың серпінді моделі

А.1 Топырақ сілемдерінің қасиеттері және сипаттамалары

А.1.1 Нақты топырақ сілемдері күрделі орта болып табылады. Топырақ сілемдерін құратын жыныстардың қасиеттері үлкен алуандығымен ерекшеленеді. Практикалық инженерлік тапсырмаларды шешу үшін топырақтар математикалық модельдермен ұсынылады, олар топырақтардың қасиеттерін және күйін сипаттайтын параметрлердің арасындағы математикалық арақатынастар түрінде сілемнің әрекетін сипаттауға рұқсат береді. Статикалық және динамикалық әсерлер кезінде топырақтардың әрекетін сипаттау үшін әртүрлі модельдер пайдаланылады, олардың арасында ең қолайлысы болып табылады: серпінді, пластикалық және реологиялық.

А.1.2 Кез-келген модель жыныстар сілемінің қасиеттерін идеал етеді. Тау-кен жыныстары механикасының жалпы қабылданған идеалды моделі математикалық мағынасында үздіксіз орта болып түсіндірілетін «*материалдық бірыңғай орта*» моделі болып табылады, бұл математикалық талдау әдістерін пайдалануға рұқсат береді. Бұл жағдайда ортаның кейбір бөлігінде материалдың үздіксіз бөлінуін скалярлы шамамен – *тығыздықпен* сипаттауға болады.

А.1.3 Жыныстау материалын жалпы қабылданған және жиі пайдаланылатын идеалдануы *біртектілік* болып табылады, ол ортаның қандай да бір шексіз шағын элементінің қасиеттері кез-келген басқа элементтің қасиеттерінен ерекшеленбейді деп шамалайды.

А.1.4 Егер орта материалының қасиеттері бағытқа байланысты болмаса, орта *изотропты* деп аталады.

А.1.5 Статикалық және динамикалық тапсырмаларды шешкен кезде топырақтардың және жерасты құрылыстарының механикасындағы жыныстар сілемінің кеңінен тараған моделі *серпінді модель* болып табылады.

А.1.6 Сыртқы әсерлер кезінде ортаның нүктелері ауысады, ортаның элементтері деформацияланады. Егер деформациялар кейбір шектерден аспаса, онда жүктемені баяу алған кезде ортаның барлық нүктелері бастапқы күйге оралады. Әсерді жылдам алған кезде уақыт өте келе тоқтайтын тербелістер туындайды. Ортаның барлық нүктелері бастапқы күйге оралады, ал ортаның элементтері бастапқы пішінде болады. Орталардың осындай қасиеті *серпінділік* деп аталады. Бастауыш көлемге әрекет ететін кернеулер комбинациясынан деформациялардың линиялық тәуелділігінің дерегі әртүрлі орталар үшін эксперименталды жолмен орнатылған.

А.1.7 Тербелістердің тоқтауы жылуға және энергияның басқа түрлеріне өтетін механикалық энергияның азаюымен байланысты. Орталардың механикалық әсерді тарқату қасиеті демпфирлеу коэффициенттерімен сипатталады.

А.1.8 Топырақтардың қасиетін анықтайтын параметрлердің мәндері далалық және зертханалық сынақтардың негізінде анықталады. Осындай деректер болмаған жағдайда

нормативтік құжаттарда берілген осындай материалдарға арналған сипаттамалар пайдаланылады.

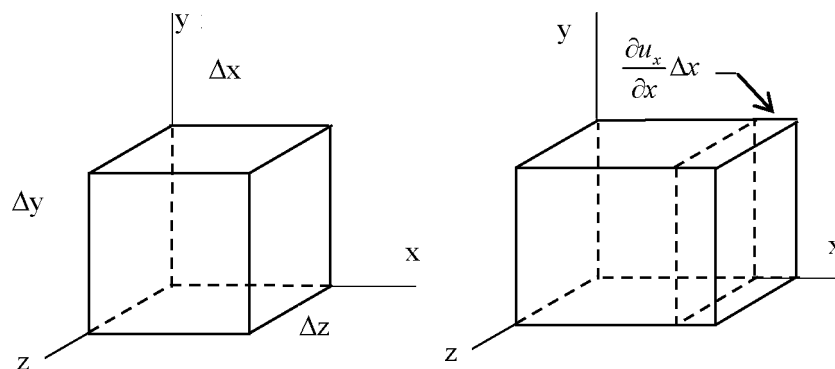
А.2 Серпінділік теориясының негізгі тендеулері

А.2.1 Ауысулар және деформациялар

А.2.1.1 Координаттардың декарттық жүйесіндегі орта нүктелерінің $\bar{u}$ ауысу векторының құрамбөліктері u_x , u_y және u_z арқылы белгіленеді. А.1-суретте Δx , Δy және Δz қырларымен қарапайым текше түріндегі орта элементі берілген. Ортаға әсер еткен кезде осы текше біртұрас ретінде қозғала алады, біртұтас ретінде айнала алады және деформацияланады.

А.2.1.2 x өсінің бағытында ғана қозғалыс жүретін жағдайды қарастырамыз және u_x ауысуы тек x -ке ғана байланысты болатын функция болып табылады. Егер текшенің сол жақ қыры u_x шамасына ауысатын болса, онда оң қырдың ауысуын $u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} \Delta x$ түрінде ұсынуға болады және текшенің x өсінің бағытында ұзаруы $\frac{\partial u_x}{\partial x} \Delta x$ тең (А.1-сурет).

А.2.1.3 Салыстырмалы ұзарту қарапайым созылу ретінде белгілі $\frac{\partial u_x}{\partial x}$ формуласымен анықталады. Қарапайым созылу (сығымдалу) үшін ε_{xx} белгіленуі қабылданған.



А.1-суреті – Деформация түрі. Қарапайым созылу

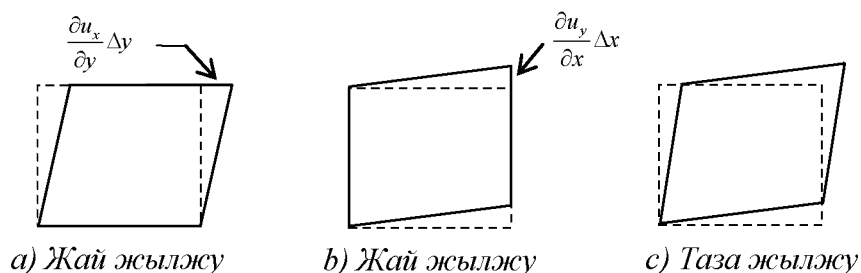
Осындай пайымдауды пайдаланып, басқа өстер бағытында да созылу (сығымдалу) деформациясын анықтауға болады: ε_{yy} және ε_{zz} . Бұл арақатынастардың орта бөлшектерінің бірлікпен салыстырғанда ауысу градиенттерінің шағындығы шартында әділетті екендігін атап көрсетеміз.

А.2.1.4 Бір айнымалыға ғана, бұл жағдайда y айнымалыға байланысты болатын

u_x ауысуын қарастырамыз. Бұл жағдайда параллелепипедтің тікбұрышты қыры ромб түріндегі пішінге ие болады (А.2а-сурет). Нысанның өзгерісінің сандық өлшемі параллелепипедтің табанына перпендикуляр болатын сызықпен және сол қыр арасындағы бұрыштың шамасымен анықталады. Бұл бұрыштың өте кішкентай екендігі себепті, оны көлденең ауысудың $\frac{\partial u_x}{\partial y} \Delta y$ параллелепипед биіктігіне Δy қатынасымен, яғни $\frac{\partial u_x}{\partial y}$ ретінде

анықтауға болады. Осындай тектегі ауысу xz жазықтығына параллель қабаттардың жылжуы болып табылады, олар бастапқы сәтте осы жазықтыққа параллель болған. Деформацияның осындай типі жай жылжу деп аталады. Осындай деформацияланған нысанда сағат тілінің жүрісі бойынша параллелепипедті $-\frac{1}{2} \frac{\partial u_x}{\partial y}$ бұрышына айналдырып және содан кейін бір диагональды ұзартып, екіншісін қысқартып симметриялық түрде параллелепипедті өзгертіп алуға болады.

А.2.1. 5 А.2b-суретте жылжулар тік жазықтық бойынша жүретін жай жылжу мысалы берілген. Тік бұрыштан ауытқуды анықтайтын бұрыш $\frac{\partial u_y}{\partial x}$ тең болады, ал айналу сағат тілінің жүрісіне қарсы жүзеге асырылады.



А.2-суреті – Жылжу деформациялары

Жылжу деформациялары үстемеленеді, сонымен бірге айналу қарама-қарсы бағытталған.

А.2.1.6 А.2с-суретте жеке туындылар тең және айналу болмайтын жағдай берілген. Деформациялардың осындай түрі таза жылжу деп аталады. Айнарудың болуына немесе болмауына тәуелсіз, жылжу деформацияларының шарасы екі жеке туынды сомасы болып табылады, ол үшін $\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$ белгілеуі қабылданған.

Осындай түрде ε_{yz} және ε_{zx} деформациялары анықталады. Келесілерді белгілейміз

$$\varepsilon_{yx} = \varepsilon_{xy}, \quad \varepsilon_{zy} = \varepsilon_{yz}, \quad \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx}.$$

А.2.1.7 Ауысу арқылы берілген деформациялардың алты құрамбөлігін келесі түрде жазуға болады:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, & \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \\
\varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y}, & \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, \\
\varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z}, & \varepsilon_{zx} = \varepsilon_{xz} &= \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}.
\end{aligned} \tag{A.1}$$

А.2.1.8 ε_{xx} , ε_{yy} және ε_{zz} қалыпты деформациялары $\frac{\Delta l}{l}$ координатты өстердің бағыттарында ортаның шексіз шағын элементін сызықтық ұзартылуын білдіреді. ε_{xy} , ε_{yz} және ε_{zx} үш параметрі тік бұрыштардың өзгеруін – жылжулардың деформациясын анықтайды.

Біркатар жұмыстарда жылжу деформациялары $\frac{1}{2}$ көбейткішімен анықталады:
 $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$ және т.б., бұл теңдеулердің тензорлық көрінісінде өте қолайлы.

А.2.1.9 Үш өстің айналуында бұрылыстың бұрыштары келесі формулалармен анықталады:

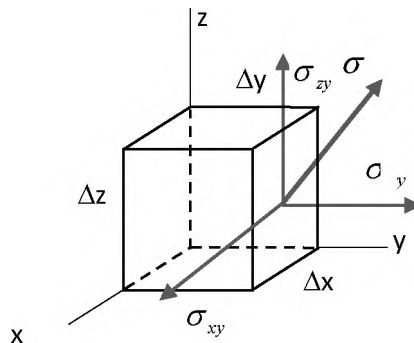
$$\theta_x = \frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z}, \quad \theta_y = \frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x}, \quad \theta_z = \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y}. \tag{A.2}$$

А.2.1.10 Көлемдік деформация $e = \frac{\Delta V}{V}$ келесі формуламен анықталады:

$$e = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}, \tag{A.3}$$

А.2.2 Кернеулер

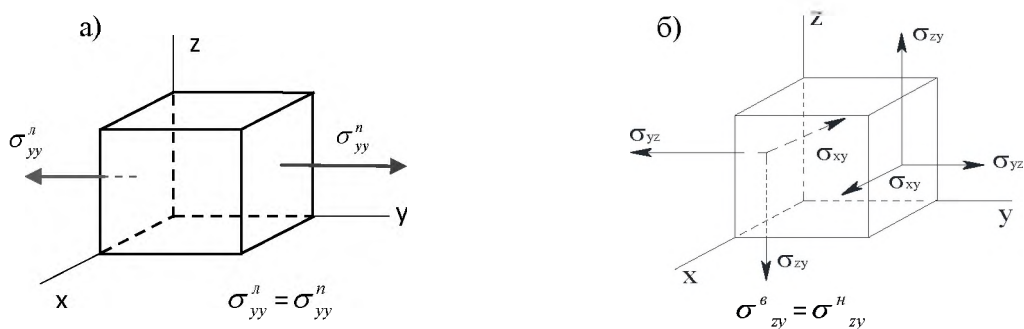
А.2.2.1 Серпінді ортадағы кернеулер ортада және уақыт пен кеңістікте өзгеруі мүмкін орта шекарасында таралған күштерге реакция ретінде туындайды. Ортадағы кернеулерді анықтау үшін қарапайым параллелепипедті қарастырамыз (А.3-сурет).



А.3-суреті – Параллелепипедтің қырына әсер ететін кернеулердің көрінісі

А.2.2.2 Қоршаған ортаның тарапынан параллелепипедтің қырына әсер ететін беткі күшті σ арқылы ұсынамыз. Координаттық өстерге осы күштің проекциялары σ_x , σ_y , σ_z арқылы белгіленген. Күш қыр бойынша біркелкі бөлінген, сондықтан кернеу болып табылады. Параллелепипедтің әрбір қырына кернеудің үш түрі әрекет етеді: қалыпты және екі тангенциалды. Бірінші индекс өстің бағытына сәйкес келеді, екіншісі кернеу әрекет ететін жазықтық қалыптылығының бағытын анықтайды.

А.2.2.3 Параллелепипедтің қырында y өсінің бағытында әрекет ететін қалыпты кернеулердің мысалы А.4а-суретте берілген.



А.4-суреті – Тепе-теңдік кезінде кернеулер арасындағы арақатынас

Егер параллелепипедтің оң қырына σ_{yy}^n кернеуі әрекет ететін болса, онда тыныштық күйінде осындай кернеулер сол қырға да әрекет етуі тиіс, яғни тепе-теңдік орындалуы тиіс: $\sigma_{yy}^l = \sigma_{yy}^n$.

Бұл осы екі әсердің тепе-теңдікке ұмтылуы тиістігінен келіп шығады, өйткені нөлге Ду ұмтылысында параллелепипед қырларындағы кернеулердегі елеусіз айырмашылық шексіз шағын массамен орта бөлшегіне түпкілікті жылдамдатуы береді. Осындай пайымдаулар x және z өсінің жанынан бағытталған σ_{xx} және σ_{zz} қалыпты кернеулері үшін де әділетті. Егер орта элементінің созылуын туындататын болса, қалыпты кернеулер оң болып саналады. Топырақтардың механикасында басқа ереже де жиі қабылданады: сығымдаушы кернеулер оң болып саналады.

А.2.2.4 Нүктеде жанама кернеулерді талдап тексеру күрделі сипатқа ие (А.4b-сурет). Біріншіден, егер параллелепипедтің оң қырында σ_{zy} жанама кернеуі әрекет ететін болса, онда параллелепипедтің сол қырында қарама-қарсы жаққа бағытталған аталмыш кернеу әрекет етуі тиіс (z өсінің бағытында жылдамдату нөліне теңестіру үшін). Екі қарама-қарсы бағытталған кернеулер күштер жұбын түзеді, ол параллелепипедті бұрыштық жылдамдату болмауы үшін қарама-қарсы бағытқа бағытталған осындай жұппен теңдестірілуі мүмкін. Демек, қарапайым параллелепипедтің жоғарғы және төменгі қырында $\sigma_{zy}^s = \sigma_{yz}^n$ арақатынасын қанағаттандыратын кернеулер әрекет етуі тиіс. Бұл жерде шығатыны, егер ортаның нүктесінде σ_{zy} жанама кернеулері болса, онда таза жылжуға

сәйкес келетін кернеулі жағдайды туындататын жанама кернеулердің басқа құрамбөліктері де міндетті түрде болады.

А.2.3 Кернеулер мен деформациялар арасындағы арақатынастар

А.2.3.1 Кернеулер мен деформациялар арасындағы арақатынастар жинақталған Гук заңы ретінде белгілі. Изотропты орталардың кернеулері мен деформациялары арасында байланыстарды сипаттау үшін пропорционалдылықтың екі коэффициенті жеткілікті, олар ретінде Юнг моделі және Пуассон коэффициенті немесе сәйкесінше созылу және жылжу кезінде серпінділік модулі қолданылады.

А.2.3.2 Линеарланған есептерді орындау үшін топырақтардың келесі сипаттамалары пайдаланылады:

- жылжу модулі - G ;
- Пуассон коэффициенті - ν ,
- тығыздық - ρ ,
- демпфирлеу коэффициенті - ξ .

А.2.3.3 Бірыңғай орталардың динамикасы тапсырмаларында Ляме параметрлері деп аталатын λ және μ серпінді константалары немесе μ - жылжу модулі ең қолайлы және жалпы қабылданған болып табылады.

Изотропты орталар үшін кернеулер мен деформациялар арасындағы арақатынастар келесі түрде берілуі мүмкін:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{zz}, \\ \sigma_{yy} &= \lambda\varepsilon_{xx} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{zz}, \\ \sigma_{zz} &= \lambda\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz}, \\ \tau_{xy} &= \mu\varepsilon_{xy}, \tau_{yz} = \mu\varepsilon_{yz}, \tau_{xy} = \mu\varepsilon_{xy}.\end{aligned}\tag{A.4}$$

Топырақтарда толқындардың таралуын талдау кезінде қолайлы Ляме параметрлерінен басқа, басқа серпінді тұрақты параметрлер қолданылады. Е Юнг модулі, ν Пуассон коэффициенті және k көлемдік деформация коэффициенті кеңінен пайдаланылады.

А.2.3.4 Тұрақты Ляме және осы константтар арасында келесі тәуелділіктер бар:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}, \quad k = \frac{3\lambda + 2\mu}{3}.\tag{A.5}$$

Осы формулалардан екі константты алып тастағанда, басқа екеуден кейін бес константтың бірін көрсететін арақатынасты алуға болады.

А.2.3.5 Серпінді константтар анықталуы бойынша оң болып табылады, сондықтан (А.4) тәуелділіктерінен алып қарағанда, Пуассон коэффициенті 0-ден 0,5 дейінгі мәндерді қабылдай алады. Шын мәнінде Пуассон коэффициенті өте берік болат жартастары үшін 0,05 –тен басталған мәндерді, жұмсақ әлсіз шоғырланған топырақтар үшін 0,45 дейінгі

ҚР ЕЖ 2.03-107-2013

мәндерді қабылдайды. Жылжуға кедергі көрсетпейтін сұйық орталар және суға қаныққан топырақтар үшін $\mu=0$ және $\nu=0,5$.

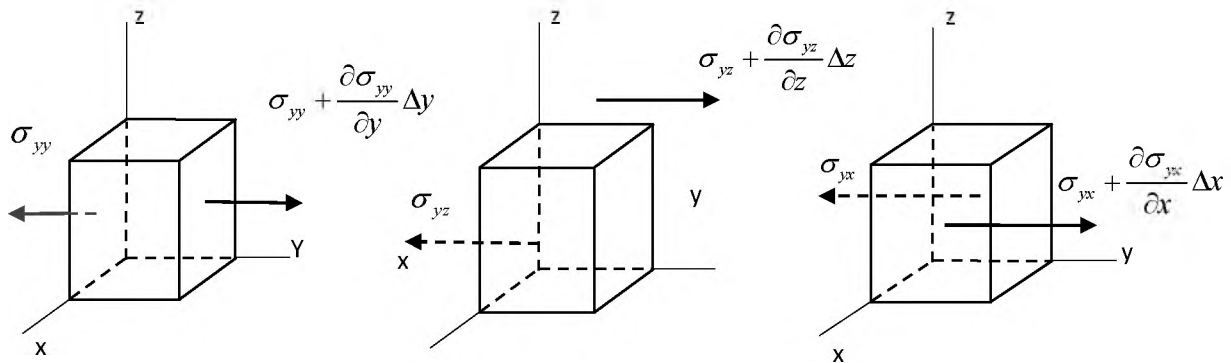
А.2.3.6 Тау-кен жыныстарының көпшілігі үшін E , k және μ константтарының мәндері $2 \cdot 10^{10}$ бастап $12 \cdot 10^{10}$ Н/м² дейінгі аралықта жатыр, мұнда E – ең үлкені, ал μ - олардың ішіндегі ең азы. Тау-кен жыныстары үшін серпінді тұрақты мәндер А.1 Кестесінде берілген.

А.1-кестесі – Серпінді тұрақтылар арасындағы арақатынас

	E	ν	k	μ	λ
(E, ν)	1	1	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
(E, k)	1	$\frac{3k-E}{6k}$	1	$\frac{3kE}{9k-E}$	$3k\left(\frac{3k-E}{9k-E}\right)$
(E, μ)	1	$\frac{E-2\mu}{2\mu}$	$\frac{\mu E}{3(3\mu-E)}$	1	$\mu\left(\frac{E-2\mu}{3\mu-E}\right)$
(ν, k)	$3k(1-2\nu)$	1	1	$\frac{3k}{2}\left(\frac{1-2\nu}{1+\nu}\right)$	$3k\left(\frac{\nu}{1+\nu}\right)$
(ν, μ)	$2\mu(1+\nu)$	1	$\frac{2\mu(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	1	$\mu\left(\frac{2\nu}{1-2\nu}\right)$
(ν, λ)	$\mu\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$	1	$\lambda\left(\frac{1+\nu}{3\nu}\right)$	$\lambda\left(\frac{1-2\nu}{2\nu}\right)$	1
(k, μ)	$\frac{9k\mu}{3k+\mu}$	$\frac{3k-2\mu}{2(3k+\mu)}$	1	1	$k-2\mu/3$
(k, λ)	$9k\left(\frac{k-\lambda}{3k-\lambda}\right)$	$\frac{\lambda}{3k-\lambda}$	1	$\frac{3}{2}(k-\lambda)$	1
(μ, λ)	$\mu\left(\frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}\right)$	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\lambda+\frac{2}{3}\mu$	1	1

А.3 Тепе-теңдікті және қозғалысты теңестіру

А.3.1 Тыныштық жағдайында ортаның қарапайым көлеміне әсер ететін барлық күштер тепе-теңдікті теңестіруді қанағаттандыруы тиіс. А.5-суретте y өсінің бағытында қарапайым параллелепипедке әрекет ететін барлық кернеулердің құрамбөлшектері көрсетілген.



А.5-суреті – y өсінің бағытында қарапайым параллелепипедке әсер ететін ернеулер

Көлем элементіне әсер ететін барлық күштердің өсіне y проекциялар жиынтығы:

$$\begin{aligned}
 & \left(\sigma_{yy} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \Delta y - \sigma_{yy} \right) \Delta x \Delta z + \left(\sigma_{yz} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \Delta z - \sigma_{yz} \right) \Delta x \Delta y + \\
 & + \left(\sigma_{yx} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} \Delta x - \sigma_{yx} \right) \Delta y \Delta z = \left(\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z,
 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

А.3.2 Осылайша x және z өсіне барлық күштер проекцияларының жиынтығын алуға болады. Массалық күштер болмаған жағдайда бірыңғай ортаның тепе-теңдігін дифференциалды теңестіру келесі түрге ие:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= 0, & \sigma_{xy} &= \sigma_{yx}, \\
 \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} &= 0, & \sigma_{yz} &= \sigma_{zy}, \\
 \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= 0, & \sigma_{zx} &= \sigma_{xz}.
 \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

А.3.3 Ортаның әрбір қарапайым көлеміне массалық күштер әсер етуі мүмкін. Мысалы, элементтің көлеміне меншікті салмақты туындатуға тең гравитациялық күштер, жылдамдатуға және элементтің массасына барабар инерциялық күштер. Кейбір материалдарда массалық күштер электрмагниттік өрістердің әсерінен туындауы мүмкін. Электр зарядына барабар массалық күштер туындайтын орталар болады (пьезоматериалдар).

А.3.4 G көлемнің бірлігіне келетін қарқындылықпен және G_x, G_y және G_z координаттық өстерінің бағытындағы құрамбөліктермен көлем күштері болған жағдайда тепе-теңдік шарттары келесі түрді қабылдайды:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + G_x &= 0, \\
\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + G_y &= 0, \\
\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + G_z &= 0.
\end{aligned} \tag{A.8}$$

А.3.5 Егер орта материалының тығыздығын ρ белгілесе, онда қарапайым параллелепипедтің массасын $\rho \Delta x \Delta y \Delta z$ түрінде беруге болады. Бірыңғай орта қозғалысын дифференциалды теңестіруді көлем элементіне әрекет етуші барлық күштерге инерция күшін қосып, Даламбер ұстанымын пайдаланып алуға болады:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + G_x &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \\
\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + G_y &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \\
\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + G_z &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}.
\end{aligned} \tag{A.9}$$

А.3.6 (А.4) теңдігін дифференциалдап және оларды (А.10) теңдігіне қойып, және оларда ауысу арқылы деформацияларды көрсетіп, (А.1) арақатынасын пайдалана отырып, ортаның тепе-теңдігін және қозғалысын теңестіруді ауысу арқылы ұсынуға болады. Көлемдік күштер нөлге тең болады.

Қозғалысты теңестіру:

$$\begin{aligned}
(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} \right) &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \\
(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} \right) &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \\
(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} \right) &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}.
\end{aligned} \tag{A.10}$$

А.3.7 (А.9) және (А.10) теңдіктер жүйесі серпінді изотропты ортадағы кернеулердің толқындары түрінде ұйытқулардың таралуын сипаттайтын толқындық теңдеулер болып табылады. Ортаның қандай да бір бөлігінде туындаған кернеулер ұйытқулардың әртүрлі көздерінен барлық бағытта таралады.

Ортаның қасиеттерін сипаттайтын параметрлерден басқа, топырақтар динамикасының тапсырмаларын шешу үшін табиғи (жер сілкінісі) және жасанды

(жылжымалы жүктеме, жерастындық және жербетіндік жарылыстар ж.т.б.) болуы мүмкін ұйытқу көздерінің математикалық сипаттамасын және шектік шарттарын беру қажет.

Ауысулардағы бірыңғай орта тепе-теңдігінің теңдеулерін алу үшін (А.10) теңдеулерінде инерциялық күштерді нөлге тең қою қажет және қажет болған жағдайда көлемдік күштерді қосу қажет.

Б қосымшасы
(ақпараттық)

Жерасты құрылыстарына сейсмикалық әсерлердің параметрлерін анықтау

Б.1 Негізгі ұғымдар

Б.1.1 Жер сілкіністері жер қабығының тектоникалық тақталарының шекараларында күрт салыстырмалы қозғалыстармен туындайды. Тақталардың бұл шекаралары жарылымдар деп аталады. Жарылымдардың шекаралары ұзаққа созылуы және үстіңгі бетке шығуы мүмкін.

Б.1.2 Шекарасында тақталардың ауысуы нәтижесінде кернеу туындайды және энергия жинақталады, ол кернеу жыныстардың беріктігі шегінен асқан кезде босатылады және жарылым аймағында жылдам салыстырмалы қозғалыс орын алады. Шөгінділер болмаған жағдайда жердің бетіне жететін жарылым беткі деп аталады.

Б.1.3 Егер соңғы 11 000 жылда (галоцен дәуірі) жер сілкіністерінің көзі болып табылса, жарылым белсенді емес болып саналады.

Б.1.4 Жер сілкіністерінің көздері сондай-ақ тектоникалық тақталардың ішінде де орналасуы мүмкін, бірақ осындай жер сілкіністерінің қарқындылығы төмен және олар тақталардың шекараларына қарағанда әлдеқайда аз жиілікпен орын алады.

Б.1.5 **Гипоцентр және эпицентр.** Гипоцентр (фокус) – жер сілкінісі өндірілетін облыс. Алаңқайға дейінгі үлкен арақашықтардың болуынан гипоцентрді жарылым жазықтығындағы нүкте ретінде қарастыруға болады. Эпицентр – гипоцентрдің үстіңгі бетке проекциясы. Жер сілкінісінің көздері әртүрлі тереңдікте жарылым бетінде орналасады.

Б.1.6 Топырақтың тербелісі жер сілкінісінің көздерінен жер қабығында таралатын сейсмикалық толқындармен түзіледі.

Б.2 Серпінді орталардағы кернеулердің жазық толқындары

Б.2.1 Жер сілкіністерінің көздерінен үлкен арақашықтықтарда (бірнеше шақырым) сейсмикалық толқындарды жазық деп санауға болады.

Б.2.2 Жер сілкінісі көздерінен үлкен арақашықтықта топырақта туындайтын кернеулердің аздығынан сейсмикалық толқындардың таралуы кезіндегі топырақтар серпінді орталар ретінде қарастырылады.

Б.2.3 Сейсмикалық әсерлер кезінде топырақтың қозғалу параметрлері (спектральды құрам, тербеліс амплитудалары, жалғастығы және т.б.) жер сілкінісі көзінің типіне, оның орналасу тереңдігіне, арақашықтыққа және сейсмикалық толқындардың таралу жолдарына байланысты.

Б.2.4 Ұйытқу көздерінен сығымдау толқындары (бойлық Р толқындар) және жылжыту толқындары (жылжытудың көлденең толқыны S) таралады. Бұл толқындар ұйытқу көзінен барлық бағытта таралады. Тербелістер тарайтын облыстар жүздеген шаршы шақырымдарды қамтуы мүмкін. Тербеліс қарқыны тербеліс көзінен алыстауына

қарай азаяды. Үстінгі бетке жеткенде бойлық және көлденең толқындар үстінгі толқындарды өндіреді: Рэле толқындары және Ляв толқындары.

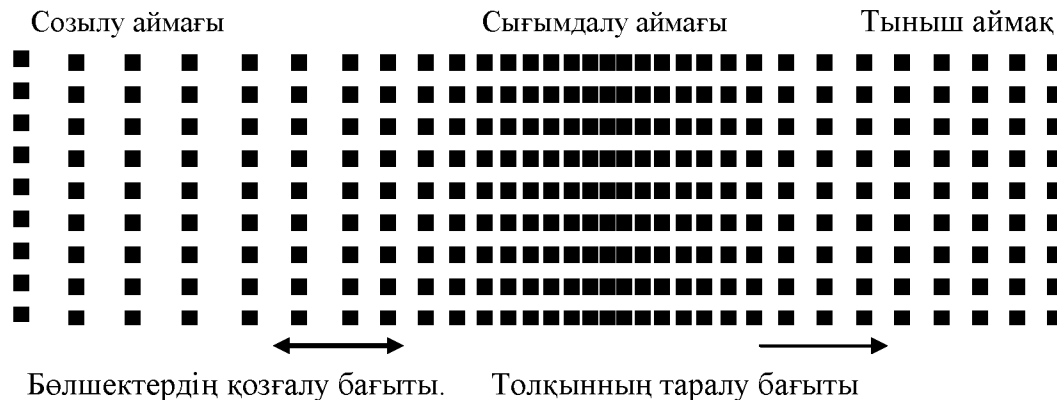
Б.2.5 Толқындардың әртүрлі типтері. Толқындар әртүрлі таралу жылдамдығына және топырақ бөлшектерінің әртүрлі қозғалысына ие: толқындардың таралу бағытына параллель, толқындардың таралу бағытына перпендикуляр, эллипс бойынша.

Б.2.5.1 Бойлық толқындар. Бұл толқындар (созу-сығымдау толқындары) ең жылдам толқындар. Толқындардың таралу жылдамдығы келесі формуламен анықталады:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad (\text{Б.1})$$

мұнда λ и μ - топырақтың Ляме параметрлері.

Топырақ бөлшектерінің қозғалысы толқындардың таралу бағытын бойлап жүреді (Б.1-суретті қар.).



Б.1-суреті – Топырақ бөлшектерінің бойлық қозғалыстары

Б.2.5.2 x өсін бойлай жазық толқынның таралуында, орта бөлшектерінің ауысуы x өсіне параллель бағытталған, u_y және u_z ауысулары нөлге тең және u_x ауысулары айнымалы y және z –ке байланысты емес. А қосымшасының (А.10) теңдеуі осындай шарттарда елеулі түрде оңайланады:

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad (\text{Б.2})$$

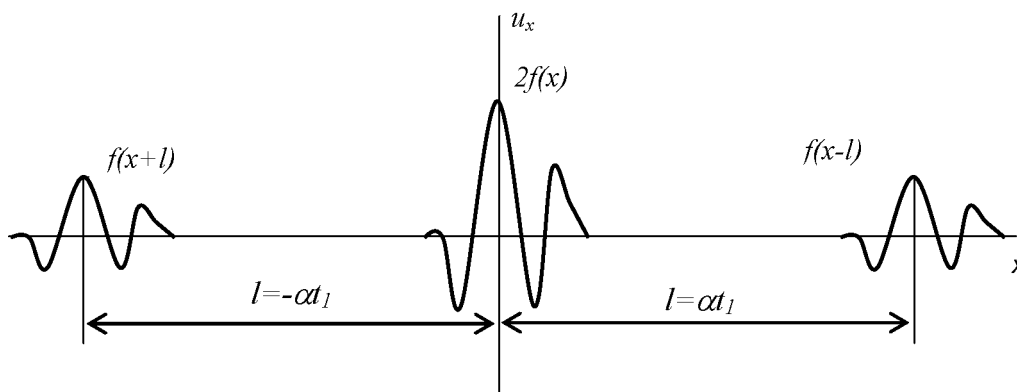
Осы теңдеудің шешімі келесі түрге ие:

$$u_x = f\left(t - \frac{x}{\alpha}\right) + f\left(t + \frac{x}{\alpha}\right), \quad (\text{Б.3})$$

Ұсынылған шешімнің бірінші мүшесі α жылдамдығымен x өсінің оң бағытында таралатын еркін нысандағы бойлық сығымдалу (созылу) толқынын сипаттайды, ал екінші мүшесі осы өстің теріс бағытында таралатын толқынды сипаттайды.

Б.2.5.3 Егер уақыттың түпкілікті аралығында берілген функция $2f(t)$ орта

нүктелерінің $x=0$ кезіндегі ауысуы (ұйытқуы) болып табылса, онда $f(t - \frac{x}{\alpha})$ және $f(t + \frac{x}{\alpha})$ функциялары координаттардың басында орналасқан ұйытқу көзінен жан-жаққа α бірдей жылдамдығымен тарайтын екі бірдей толқын болып табылады (Д.2-сурет). Осындай шешімдер *жүгірмелі толқындар* деп аталады.



Б.2-суреті – Толқынның таралу мысалы

$f(t - \frac{x}{\alpha})$ функциялары еркін нысанға ие болуы мүмкіндігін атап өту керек.

Оң бағытта таралатын толқындар үшін келесі арақатынастар бар:

$$u_x = f(t - \frac{x}{\alpha}), \quad \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{1}{\alpha} f'(t - \frac{x}{\alpha}), \quad V_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} = f'(t - \frac{x}{\alpha}),$$

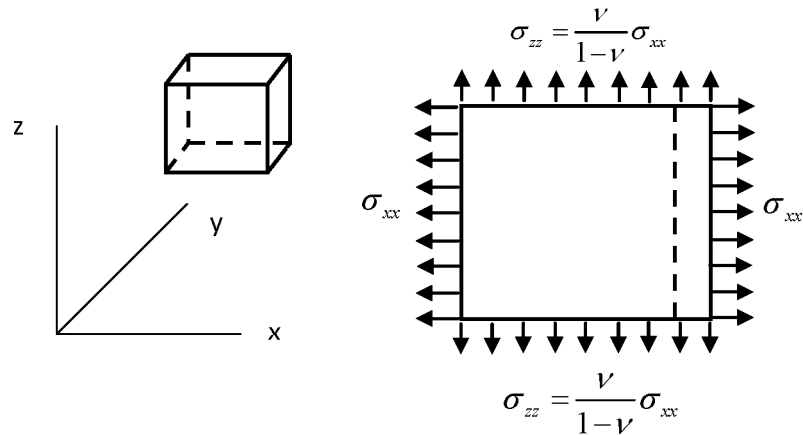
$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\rho \alpha f'(t - \frac{x}{\alpha}). \quad (\text{Б.4})$$

Жақшада жазылған көрсетулер бойынша туынды штрихпен белгіленген. Теріс бағытта таралатын толқындар үшін осындай көрсетулерді алуға болады.

Б.2.5.4 Жазық бойлық толқында орта бөлшектерінің деформациясын, кернеуін және қозғалу жылдамдығын сипаттайтын функциялар бірдей кеңістікті және уақыттық тәуелділікке ие болатындығы (Б.4) теңдеулерінен шығады, сондықтан олардың арасындағы арақатынастар қарапайым формулалармен анықталады:

$$\sigma_{xx} = \rho \alpha^2 \varepsilon_{xx}, \quad \text{и} \quad \sigma_{xx} = -\rho \alpha V_x, \quad (\text{Б.5})$$

Жазық бойлық толқынның таралуында жай созылуға немесе сығымдалуға сәйкес келетін деформацияланған жағдай жүзеге асырылады (Б.3-сурет).



Б.3-суреті – Жазық бойлық толқынның таралуы кезіндегі кернеулердің диаграммасы

Б.2.5.5 Егер жазық толқынның таралуында толқынның таралу бағытында топырақ элементіне қалыпты кернеулер σ_{xx} әсер ететін болса, толқынның таралу бағытына перпендикуляр бағыттарда ауысуларға кедергі келтіретін σ_{yy} және σ_{zz} қалыпты кернеулері міндетті түрде туындайды. Бұл кернеулер келесі формулалармен анықталады:

$$\begin{aligned}\sigma_{yy} &= \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{\lambda}{\alpha} f'(t - \frac{x}{\alpha}) = -\frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{xx}, \\ \sigma_{zz} &= \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{\lambda}{\alpha} f'(t - \frac{x}{\alpha}) = -\frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{xx}\end{aligned}\quad (\text{Б.6})$$

Б.2.6 Көлденең толқындар. Егер орта бөлшектерінің ауысуы u өсінің бағытына параллель жүретін болса ($u_x = u_z = 0$) және u_y ауысуы айнымалы u және z байланысты болмаса, осындай жағдайда (А.10) теңдеуі жеңілдетіледі және келесі түрге ие болады:

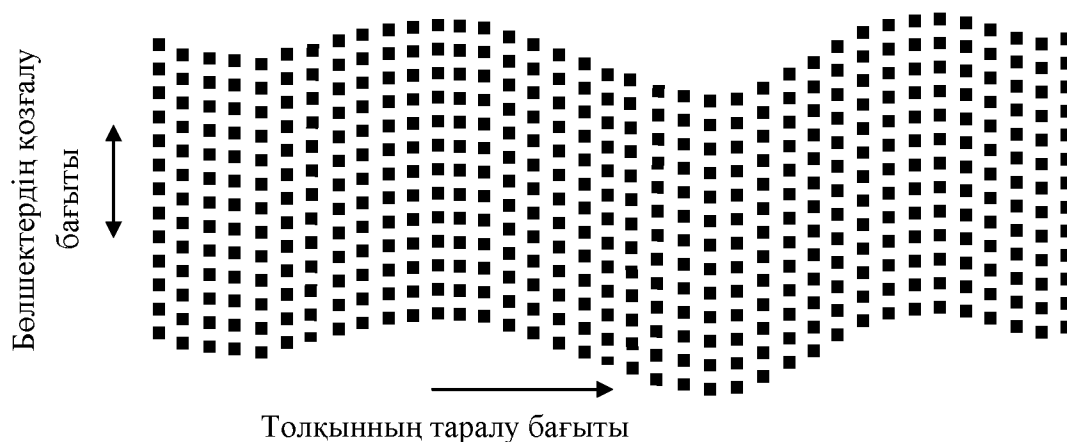
$$\mu \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \quad (\text{Б.7})$$

Б.2.6.1 (Б.7) теңдеуін шешу $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ жылдамдығымен x өсінің оң және теріс бағыттарында таралатын толқын болып табылады. Орта бөлшектерінің қозғалысы толқынның таралу бағытына перпендикуляр түрде Ou өсін бойлап жүреді.

Б.2.6.2 Оң бағытта таралатын толқындар үшін келесі арақатынастар бар:

$$\begin{aligned}u_y &= (t - \frac{x}{\beta}); \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} = -\frac{1}{\beta} f'(t - \frac{x}{\beta}), \\ V_y &= \frac{\partial u_y}{\partial t} = f'(t - \frac{x}{\beta}); \quad \sigma_{xy} = \mu \frac{\partial u_y}{\partial x} = -\rho \beta f'(t - \frac{x}{\beta}).\end{aligned}\quad (\text{Б.8})$$

Жазық көлденең толқынның таралуы кезінде орта бөлшектерінің қозғалу суреті Б.4-суретте берілген.



Б.4-суреті– Жазық көлденең толқынның таралуы кезіндегі орта бөлшектерінің ауысуы

Б.2.6.3 Орта бөлшектерінің кернеулері, деформациялары және қозғалу жылдамдықтары арасында көлденең толқындардың таралуы кезінде бойлық толқындар үшін белгіленген тәуелділіктерге ұқсас қарапайым тәуелділіктер бар:

$$\sigma_{xy} = \rho\beta^2 \varepsilon_{xy} \text{ и } \sigma_{xy} = -\rho\beta V_y, \quad (\text{Б.9})$$

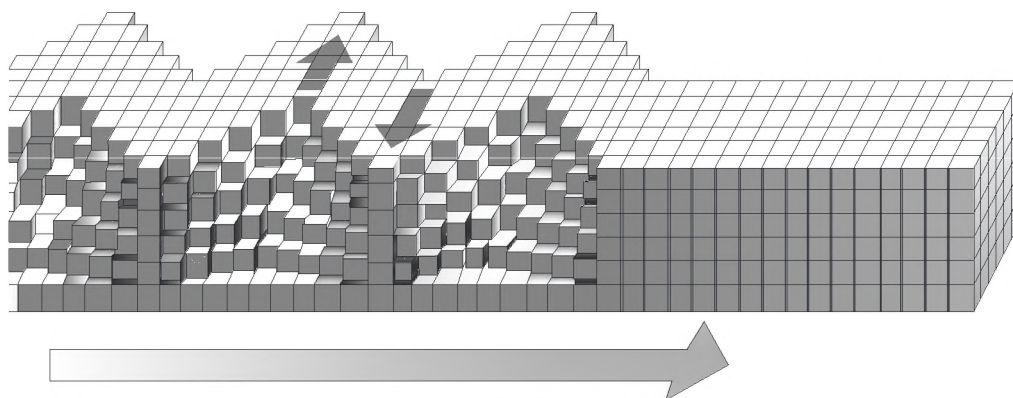
Д.2.6.4 Жазық көлденең толқынның таралуында қарапайым жылжуға сәйкес келетін деформацияланған күй орындалады, сондықтан әрбір элементтің қозғалысын таза жылжу және қатты бұрылыс комбинациясы ретінде көрсетуге болады (А қосымшасы, А.2-сурет).

Ескертпе – Бойлық толқындардың жылдамдығы көлденең толқындардың жылдамдығынан әрдайым жоғары:

$$\frac{\beta^2}{\alpha^2} = \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)} < 1, \quad (\text{Б.10})$$

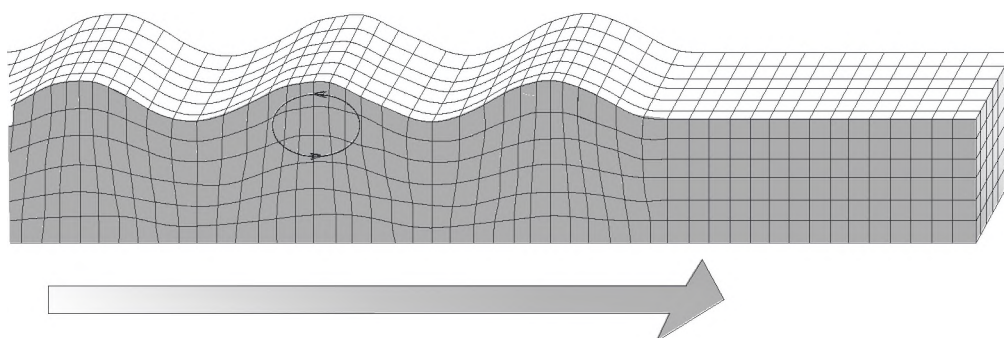
Б.2.7 Беткі толқындар: Ляв толқындары және Рэле толқындары көлемді толқындардың бос үстіңгі бетпен өзара әрекеттесуі нәтижесінде туындайды және үстіңгі беттің жанында ғана болады.

Б.2.7.1 Ляв толқындарының таралуы кезінде топырақ бөлшектерінің қозғалысы толқындардың таралу бағытына перпендикуляр топырақтың үстіңгі бетіне параллель атқарылады (Б.5-сурет). Үстіңгі беттен кетуіне қарай толқындардың қарқындылығы әлсірейді.



Б.5-суреті – Ляв толқыны таралған кезде топырақтың беткі қабаттарының деформациялануы

Б.2.7.2 Рэле толқындарының таралуы кезінде топырақ бөлшектерінің қозғалысы эллипстік траекториялар бойынша тік жазықтықта атқарылады (Б.6-сурет). Беткі қабаттан кетуімен толқындардың қарқындылығы әлсірейді.



Б.6-суреті – Рэле толқындарының таралуы кезінде топырақтың беткі қабаттарының деформациялануы

Б.2.8 Беткі толқындар көлемдік толқындарға қарағанда баяуырақ таралады, беткі толқындар болуы себепті Рэле толқындары ең баяу толқындар. Жер бетінің көлемдік толқындарына, сонымен қатар әртүрлі қасиеттерімен топырақ қабаттарына жеткенде, олар ішінара сынады және бір типтен екіншісіне түрленеді.

Б.2.8.1 Тау жыныстарында толқындардың таралу жылдамдықтары көптеген факторларға (кеуектілік, литология, цементтелу деңгейі, орналасу тереңдігі ж.т.б.) байланысты және кең ауқымдарда өзгереді.

Б.2.8.2 Суға қаныққан жыныстардағы бойлық толқындардың жылдамдығы кеуектіліктің азаюымен ұлғая отырып, 1500-ден 6500 м/с дейінгі аралықта жатыр.

Б.2.8.3 Егер тесіктердегі су ауаның бөлшектерімен ауыстырылатын болса, бұл жағдай жер бетіне жақын орын алуы мүмкін, бойлық толқындардың жылдамдығы елеулі түрде азаяды. Жерасты суларының деңгейінен жоғары, топырақтың жоғарғы қабаттарында Р-толқындары жылдамдығының мәндері кейбір жағдайда 150 м/с дейін төмендеп, 400-800 м/с құрауы мүмкін. Сейсмологияда және сейсмикалық барлауда жыныстың осындай беткі қабаттарын аз жылдамдықты аймақ деп атау қабылданған.

Б.2.8.10 Жартылай кеңістіктің бетінде жатқан шоғырландырылған жүкке әртүрлі толқындар әсерінің энергетикалық салымын салыстыру Рэле толқынының энергияның 67% әкелетіндігін, ал көлденең S – толқын 26% және бойлық P-толқын 7% әкелетіндігін көрсетті.

Б.3 Гармониялық толқындар

Б.3.1 Толқындардың уақытқа тәуелділігінің қарапайым нысанына гармониялық толқындар ие, яғни уақытқа тәуелділігі тригонометриялық функциялармен көрінетін толқындар:

$$\begin{aligned}\varphi &= A \sin \omega(t - \frac{x}{\alpha}), \quad \varphi = B \sin \omega(t - \frac{x}{\beta}), \\ \varphi &= A \sin \omega(t - \frac{x l + y m + z n}{\alpha}), \quad \varphi = B \sin \omega(t - \frac{x l + y m + z n}{\beta}).\end{aligned}\quad (\text{Б.11})$$

мұнда A, B , – толқын амплитудасы,

l, m и n – толқынның таралу бағытын анықтайтын вектордың бағыттаушы косинустары,

ω - бұрыштық жиілік, оны пайдаланып, $T=2\pi/\omega$ тербеліс кезеңін анықтауға болады. Шеңберлі жиіліктің орнына толқындардың таралуын талдаған кезде герцтегі техникалық жиілік пайдаланылады.

Кеңістіктің белгіленген нүктесінде φ функциясы $+A$ -дан $-A$ дейін өзгереді.

Гармониялық толқындарды сипаттау үшін басқа параметрлер де пайдаланылады:

$$\begin{aligned}\varphi &= A \sin \chi(x - \alpha t), \quad \varphi = B \sin \chi(x - \beta t), \\ \varphi &= A \sin \chi(x l + y m + z n - \alpha t), \\ \varphi &= (C/r) \sin \chi(r - \alpha t).\end{aligned}\quad (\text{Б.12})$$

мұнда χ - толқын саны немесе толқынның ұзындығын анықтауға болатын «кеіестікті жиілік» немесе «кеңістікті кезең» $\lambda=2\pi/\chi$.

Б.3.2 Формулалар: $\chi(x - \alpha t)$ және $\chi(x l + y m + z n - \alpha t)$, сонымен қатар $\omega(t - \frac{x}{\alpha})$ және $\omega(t - \frac{x l + y m + z n}{\alpha})$ толқынның фазасы деп аталады.

Сейсмикалық толқындар жиіліктерінің ауқымы 0,1-ден 30 герц дейінгі ауқымда жатыр. Жыныстардағы бойлық толқындардың таралу жылдамдығы 6,5 км/с дейін жетеді. Толқындардың басым ұзындығы 30-дан 500 м дейін.

Тригонометриялық функциялардан басқа гармониялық толқындарды сипаттау үшін экспоненциальды функциялар пайдаланылады:

$$\begin{aligned}\varphi &= A \exp\{i\omega(t - \frac{x}{\alpha})\}, \quad \varphi = B \exp\{i\omega(t - \frac{x}{\beta})\}, \\ \varphi &= A \exp\{i\omega(t - \frac{x l + y m + z n}{\alpha})\}, \quad \varphi = B \exp\{i\omega(t - \frac{x l + y m + z n}{\beta})\},\end{aligned}\quad (\text{Б.13})$$

$$\varphi = (C/r)\{i\omega(t - \frac{r}{\alpha})\}, \quad \varphi = (D/r)\{i\omega(t - \frac{r}{\beta})\}.$$

Б.4 Туннельге сейсмикалық толқындардың әсерін талдау кезінде пайдаланылатын жорамалдар

Б.4.1 Жалпы, толқынның іс жүзіндегі нысанын алдын-ала айту мүмкін емес, сондықтан консервативті жорамалдарды қабылдауға тура келеді.

Б.4.2 Жиі жорамалдардың бірі толығымен толқынның бір типінен тұратын ұйытқудф қарастыруға негізделеді: бойлық, көлденең немесе қандай да бір беткі.

Б.4.3 Туннельдік қаптамаға әлдеқайда жағымсыз әсер қарастырылады.

Б.4.4 Толқындар жүгіртпелі гармониялық толқындар түрінде беріледі, олардың амплитудалары пик мәндеріне тең, жиілік сейсмикалық әсердің спектріне сәйкес келеді, ал жылдамдық толқынның туннель орналасқан топырақта таралу жылдамдығына тең.

Б.4.5 Туннельдік қаптаманың деформациясы толқынның типіне және түсу бұрышына, топырақ қаттылығы мен туннельдік қаптаманың қатынасына байланысты.

Б.4.6 Туннельге әсер етуші күштер топырақпен радиалды және бойлық серіппелер арқылы топырақпен байланысатын туннельдің өсін бойлап немесе көлденең деформацияларды талдау нәтижесінде анықталады.

Б.4.7 Иілімді туннельдік қаптама және қатты топырақ үшін конструкцияның шектік деформациясын, туннельдің деформациялары сырғусыз топырақтың деформацияларына еретіндігіне сүйеніп алуға болады. Бұл жағдайда жүгіртпелі толқындар үшін формулаларды туннельдік қаптама деформациясында қайта есептеуге және оларға сәйкес келетін кернеулерді анықтауға болады.

В қосымшасы
(ақпараттық)

В.1-кестесі – Әртүрлі жыныстар (топырақтар) үшін бұзылмайтын изотропты сілемдегі қалыпты және жанама кернеулер, сейсмикалық толқындардың жылдамдықтары

Жыныс санаты	Жыныстың (топырақтың) беріктігі дәрежесі	Жыныс (топырақ)	Беріктік коэффициенті	Көлемдік масса, γ , МН/м ³	Бойлық толқын жылдамдығы, C_1 , м/с	Көлденең толқын жылдамдығы, C_2 , м/с	Баллда берілген нақтыланған сейсмикалы жыныстағы қалыпты және жанама кернеулер (МПа)					
							7		8		9	
							$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$
I	Жоғары деңгейде берік	Ең берік, тығыз және тұтқыр кварциттер және базальттар. Беріктігі бойынша ерекше басқа жыныстар	20	0,028-0,03	5600	3300	1,07-1,15	0,64-0,69	1,33-1,42	0,67-0,85	1,76-1,88	1,05-1,12
II	Өте берік	Өте берік гранитті жыныстар, кварцты порфир. Өте берік гранит. Кремнийлі тақтатас. Ең берік құмдақтар және әктастар	15	0,026-0,027	5600	3300	0,99-1,03	0,59-0,61	1,23-1,28	0,73-0,76	1,63-1,69	0,97-1,02
III	Берік	Тығыз гранит және гранитті жыныстар. Өте берік құмдақтар және әктастар. Берік конгломерат. Өте берік темір кендері	10	0,025-0,026	3500-4500	2100-2700	0,60-0,80	0,36-0,49	0,73-0,99	0,44-0,59	0,96-1,31	0,57-0,78

В.1-кестесі - Өртүрлі жыныстар (топырақтар) үшін бұзылмайтын изотропты сілемдегі қалыпты және жанама кернеулер, сейсмикалық толқындардың жылдамдықтары (жалғасы)

Жыныс санаты	Жыныстың (топырақтың) беріктігі дәрежесі	Жыныс (топырақ)	Беріктік коэффициенті	Көлемдік масса, γ , МН/м ³	Бойлық толқын жылдамдығы, C_1 , м/с	Көлденең толқын жылдамдығы, C_2 , м/с	Баллда берілген нақтыланған сейсмикалықтағы жыныстағы қалыпты және жанама кернеулер (МПа)					
							7		8		9	
							$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$
IIIa	Берік	Берік әктастар. Берік емес гранит, берік құмдақтар. Берік мрамор. Доломит. Колчедандар	8	0,025	2400- 3000	1400-1800	0,41- 0,50	0,24- 0,30	0,51- 0,62	0,30- 0,37	0,67- 0,82	0,40- 0,49
IV	Едәуір берік жыныстар	Жай құмдақ, темір кендері	6	0,024	2000- 2600	1200-1500	0,32- 0,42	0,19- 0,25	0,40- 0,52	0,24- 0,31	0,53- 0,68	0,32- 0,41
V	Беріктігі орташа	Берік сазды тақтатаас. Берік емес құмдақ және әктас. Жұмсақ конгломерат	4	0,028	1500- 2300	900-1400	0,28- 0,43	0,17- 0,26	0,35- 0,55	0,21- 0,33	0,46- 0,73	0,27- 0,44
Va	Беріктігі орташа	Өртүрлі берік емес тақтатастар. Тығыз мергель	3	0,025	1400- 1900	800-1100	0,24- 0,32	0,14- 0,19	0,30- 0,40	0,18- 0,24	0,39- 0,53	0,23- 0,32
VI	Едәуір жұмсақ	Жұмсақ тақтатаас. Жұмсақ әк. Бор, тас тұз, гипс, тоңды топырақ, антрацит, жай мергель, бұзылған құмдақ, цементтелген малтатаас, тасты топырақ	2	0,024	1300- 2100	800-1200	0,21- 0,34	0,12- 0,20	0,26- 0,43	0,16- 0,26	0,35- 0,56	0,21- 0,33

В.1-кесте - Өртүрлі жыныстар (топырақтар) үшін бұзылмайтын изотропты сілемдегі қалыпты және жанама кернеулер, сейсмикалық толқындардың жылдамдықтары (жалғасы)

Жыныс санаты	Жыныстың (топырақтың) беріктігі дәрежесі	Жыныс (топырақ)	Беріктік коэффициенті	Көлемдік масса, γ , МН/м ³	Бойлық толқын жылдамдығы, C_1 , м/с	Көлденең толқын жылдамдығы, C_2 , м/с	Баллда берілген нақтыланған сейсмикалықтағы жыныстағы қалыпты және жанама кернеулер (МПа)					
							7		8		9	
							$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$
VIa	Едәуір жұмсақ	Ұсақ тасты топырақ. Бұзылған тақтатас. Нығыздалған малтатас пен ұсақ тас. Қатайған саз. Берік тас көмір	1,5	0,018- 0,020	1200- 1900	700-1100	0,15- 0,26	0,09- 0,15	0,18- 0,32	0,11- 0,19	0,24- 0,43	0,13- 0,90
VII	Жұмсақ	Тығыз саз. Орташа тас көмір. Берік үйінді. Сазды топырақ	1,0	0,018	1100- 1700	600-1000	0,14- 0,21	0,08- 0,12	0,17- 0,27	0,10- 0,16	0,22- 0,34	0,13- 0,90
VIII	Жұмсақ	Жеңіл құмды саз, сарғыш топырақ, киыршық тас. Жұмсақ көмір $f=0,6-1,0$	0,8	0,016	1100- 1600	700-1000	---	---	---	---	---	---
IX-X	Сусымалы және қорыстар	Сусыма құм. Ұсақ киыршық тас. Үйінді жер. Өндірілген көмір. Қорыстар. Сазды топырақ. Сұйылтылған сарғыш топырақ және басқа сарғыш сұйылтылған топырақтар	0,1- 0,5	0,017	300-500	200-300	----	----	----	----	----	----

Г қосымшасы
(ақпараттық)

Топырақтардың және тау жыныстарының анизотроптық (трансверсалды-изотроптық) қалыңдығындағы сейсмикалық толқындардың жылдамдықтарын анықтау

Г.1 1-оқиға. Толқынның шебіне $\bar{n}$ қалыптылығы қалыңдық изотропиясы жазықтығының созылымы сызығына көлденең бағытталған және изотропия жазықтығымен α еркін бұрышын құрайды (4-сурет). Бұл жерде квазибойлық V_P және квазикөлденең V_{SV} және V_{SH} толқындарының барлық жылдамдығы келесі формулалармен анықталады [2, 6]:

$$V_P = \left\{ \frac{g}{\gamma} \left[\frac{E_1 (n - v_2^2)}{(1 + v_1) [n(1 - v_1) - 2v_2^2]} \cos^4 \alpha + 2 \left(\frac{E_1 v_2}{n(1 - v_1) - 2v_2^2} + 2G_2 \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \frac{E_1 (1 - v_1)}{n(1 - v_1) - 2v_2^2} \sin^4 \alpha \right] \right\}^{1/2},$$

$$V_{SV} = \left\{ \frac{g}{\gamma} \left[G_2 + \left(\frac{E_1 ((n - v_2^2) + (1 - v_1))}{(1 + v_1) [n(1 - v_1) - 2v_2^2]} - 2 \left(\frac{E_1 v_2}{n(1 - v_1) - 2v_2^2} + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 2G_2 \right) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \right] \right\}^{1/2},$$

$$V_{SH} = \left\{ \frac{g}{\gamma} \left(G_2 \sin^2 \alpha + \frac{E_1}{2(1 + v_1)} \cos^2 \alpha \right) \right\}^{1/2}.$$

мұнда γ — топырақтар және тау-кен жыныстары қалыңдығының көлемдік массасы;
 g — еркін түсудің жылдамдауы.

Г.2 2-оқиға. Толқын шебіне қалыптылық қалыңдық изотропиясы жазықтығының созылымын бойлай бағытталған (5-сурет). Бұл жағдайда квазибойлық V_P және квазикөлденең V_{SV} және V_{SH} толқындарының жылдамдығы келесі арақатынастармен көрінеді (изотропия жазықтығы α бұрышынан горизонтқа еңкейтілген) [2, 6]:

$$V_P = \left\{ \frac{g}{\gamma} \frac{E_1 (n - v_2^2)}{(1 + v_1) [n(1 - v_1) - 2v_2^2]} \right\}^{1/2},$$

$$V_{SV} = \left\{ \frac{g}{\gamma} \left[G_2 \cos^2 \phi + \frac{E_1}{2(1 + v_1)} \sin^2 \phi \right] \right\}^{1/2},$$

$$V_{SH} = \left\{ \frac{g}{\gamma} \left[G_2 \sin^2 \phi + \frac{E_1}{2(1 + v_1)} \cos^2 \phi \right] \right\}^{1/2}.$$

Д қосымшасы
(ақпараттық)

Топырақтың анизотроптық сілемі үшін сейсмикалық бүйірлік қысымның λ^c коэффициенттерін анықтау

Д.1 1-оқиға. Толқынның шебіне қалыптылық қалыңдық изотропиясы жазықтығының созылым сызығына көлденең бағытталған және изотропия жазықтығымен α бұрышын құрайды (4-сурет). Сонда сейсмикалық бүйірлік қысымның коэффициенттері λ_y^c , λ_z^c және λ_{yz}^c [2, 6]:

$$\lambda_y^c = \frac{(a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35})(a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35}) - (a_{33}a_{55} - a_{35}a_{35}^2)(a_{12}a_{55} - a_{15}a_{25})}{(a_{22}a_{55} - a_{25}^2)(a_{33}a_{55} - a_{35}^2) - (a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35})^2},$$

$$\lambda_z^c = \frac{(a_{12}a_{55} - a_{15}a_{25})(a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35}) - (a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35})(a_{22}a_{55} - a_{25}^2)}{(a_{22}a_{55} - a_{25}^2)(a_{33}a_{55} - a_{35}^2) - (a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35})^2},$$

$$\lambda_{xz}^c = \frac{-a_{15} + a_{25}\lambda_y^c + a_{35}\lambda_z^c}{a_{55}}.$$

Бұл жерде

$$a_{12} = -\frac{1}{E_1}(v_1 \cos^2 \alpha + v_2 \sin^2 \alpha),$$

$$a_{13} = -\frac{v_2}{E_1} + \left((1 + 2v_2) \left(E_1 + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_2} \right) \right) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha,$$

$$a_{15} = \left[(1 + v_2) \frac{1}{E_1} \cos^2 \alpha - \left(\frac{1}{E_2} + \frac{v_2}{E_1} \right) \sin^2 \alpha - \frac{1}{2G_2} \cos 2\alpha \right] \sin 2\alpha,$$

$$a_{22} = \frac{1}{E_1},$$

$$a_{23} = -\left(\frac{v_1}{E_1} \sin^2 \alpha + \frac{v_2}{E_1} \cos^2 \alpha \right),$$

$$a_{25} = \frac{v_2 - v_1}{E_1} \sin 2\alpha,$$

$$a_{33} = \frac{1}{E_1} \sin^4 \alpha + \left(\frac{1}{G_2} - \frac{2v_2}{E_1} \right) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \frac{1}{E_2} \cos^4 \alpha,$$

$$a_{35} = \left[\frac{1 + v_2}{E_1} \sin^2 \alpha - \left(\frac{1}{E_2} + \frac{v_2}{E_1} \right) \cos^2 \alpha + \frac{1}{2G_2} \cos 2\alpha \right] \sin 2\alpha,$$

$$a_{55} = \frac{1}{G_2} + \left(\frac{1+2\nu_2}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{G_2} \right) \sin^2 \alpha.$$

Д.2 2-оқиға. Толқындардың шебіне $\bar{n}$ қалыптылығы φ бұрышынан горизонтқа еңкейтілген изотропия жазықтығына параллель бағытталған (5-сурет). Бұл жағдайда λ_x^c , λ_z^c және λ_{xz}^c сейсмикалық қысым коэффициенттерін [2,5] сәйкес формулалармен анықтайды:

$$\lambda_x^c = \frac{(a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35})(a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35}) - (a_{33}a_{55} - a_{35}^2)(a_{12}a_{55} - a_{15}a_{25})}{(a_{11}a_{55} - a_{15}^2)(a_{35}a_{55} - a_{35}^2) - (a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35})^2},$$

$$\lambda_z^c = \frac{(a_{12}a_{55} - a_{15}a_{25})(a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35}) - (a_{11}a_{55} - a_{15}^2)(a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35})}{(a_{11}a_{55} - a_{15}^2)(a_{35}a_{55} - a_{35}^2) - (a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35})^2},$$

$$\lambda_{xz}^c = -\frac{a_{15}\lambda_x^c + a_{25} + a_{35}\lambda_z^c}{a_{55}}.$$

$\lambda_x^c, \lambda_z^c, \lambda_{xz}^c$ үшін көріністерде a_{ij} деформация коэффициенттері ($i, j=1, 2, 3, 5$) 1-оқиға формулалары бойынша анықталады, бірақ оларда α бұрышының орнына φ бұрышын қою керек.

Е қосымшасы
(ақпараттық)

Сейсмикалық әсерлерге шеңбер кескінді туннельдер қаптамаларын есептеу мысалы және алгоритмі

Е.1 Осы Е қосымшасында [1, 7] берілген сейсмикалық әсерлерге шеңбер кескінді қаптамаларды есептеу әдістемесі берілген.

Е.2 Есептеу үшін бастапқы деректер болып табылады:

r_1, r_2 – қаптаманың көлденең қимасының ішкі және сыртқы радиустары, м;

E_0, ν_0 - деформация модулі және топырақтың Пуассон коэффициенті, МПа, бірлік үлесі;

E_1, ν_1 - деформация модулі және қаптама материалының Пуассон коэффициенті, МПа, бірлік үлесі;

γ - топырақтың көлемдік массасы, МН/м³;

g – ауырлық күшінің жылдамдауы, м/с²

k_c – сейсмикалық коэффициенті;

T_0 – топырақ бөлшектері тербелістерінің басым кезеңі, с.

Е.3 Қаптаманың салыстырмалы қалыңдығы қаптама материалының және жыныстың деформациялық сипаттамалары келесі формулалар бойынша анықталады

$$R_1 = \frac{r_1}{r_2}, \quad \xi = \frac{\nu_0}{1-\nu_0}, \quad \beta = \frac{E_1(1+\nu_0)}{E_0(1+\nu_1)}, \quad \chi_0 = 3-4\nu_0, \quad \chi_1 = 3-4\nu_1,$$

$$\varrho = \sqrt{\frac{1-\xi}{2}}, \quad d = \frac{1-\beta}{1+\chi_1}, \quad t = \frac{1+\chi_0\beta}{1+\chi_1}, \quad l = 1-d, \quad s = 1-t.$$

Е.4 Көмекші шамалар келесі формулалар бойынша анықталады

$$c_1 = \frac{t-d}{1-2d(1-R_1^2)}, \quad c_3 = \frac{d(t-d)R_1^2(R_1^2-1)}{(t+sR_1^2)(dR_1^6+l)3tdR_1^2(R_1^2-1)^2},$$

$$a_1 = \frac{(dR_1^6+l)(d+lR_1^2)+3d^2R_1^2(R_1^2-1)^2}{(t+sR_1^2)(dR_1^6+l)+3tdR_1^2(R_1^2-1)^2},$$

$$B = 1-a_1 + \frac{3c_3}{d}, \quad F = d-ta_1+3c_3, \quad A = (d-ta_1)R_1^2+3c_3R_1^2.$$

Е.5 Бірлік жүктемеден қаптамада экстремалды қалыпты тангенциалды кернеулердің мәндері келесі формулалар бойынша анықталады

$$\sigma_{\theta_{внутр}} = -(1+\xi)c_1 m 4 \varrho \sqrt{1+\varrho^6},$$

$$\sigma_{\theta_{внеш}} = -\frac{(1+\xi)}{4} \times \frac{(4d-1)c_1-d+t}{d} m (4F-B) \varrho \sqrt{1+\varrho^6}.$$

Е.6 Е.5-тармақтың арақатынастарынан алынған кернеулердің төрт мәнінен ең үлкен теріс (сығымдаушы) мән таңдап алынады және түйіспелік кернеулер

$$\sigma_p = -\frac{1+\xi}{4} \times \frac{c_1 - t + d}{d} mB \sqrt{1 + \xi^2},$$

және күштердің өлшемсіз шамалары анықталады

$$M = \frac{(R_1^{-1} - 1)^2}{12} [\sigma_{\theta \text{внутр}} - \sigma_{\theta \text{внеш}}],$$

$$N = \frac{R_1^{-1} - 1}{2} [\sigma_{\theta \text{внутр}} - \sigma_{\theta \text{внеш}}].$$

Е.6-тармақтың формуласында σ_p анықтау үшін және Е.5-тармақтың формулаларында күшке арналған формулаға қойылатын кернеулерді анықтау үшін σ_θ ең үлкен теріс мән алынған екінші қосылғыштың алдындағы белгі алынады.

Е.7 Осындайды ең үлкен оң мәнге σ_θ (созушы кернеуге) сәйкес келетін M және N күштері және σ_p түйісу кернеулері алады.

Е.8 Нәтижесінде қаптаманың әрбір қимасында σ_θ үлкен сығымдаушы және созушы кернеулерге сәйкес келетін күштердің екі-екіден есептік біркелкі эпюраларын алады.

Е.9 Егер қаптама топыраққа анкерленбеген болса және сызаттардың түзілуіне жол берумен жобаланатын болса, онда алынған есептік күштердің екі нұскасын сығымдау кезінде және созылу кезінде қималардың беріктігін тексеру үшін пайдаланады.

Е.10 Түйіспелік кернеулердің шамаларын σ_p Е.6-тармағының формулалары бойынша алынған мәндерді p шамасына, бұгуші сәттерді - $pr_1^2 b$, бойлық күштерді - $pr_1 b$ көбейтумен анықтайды

$$p = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma c_1 T_0, \quad c_1 = \sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma} \cdot \frac{1 - \nu_0}{(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}},$$

мұнда b – құрылыстың бойлық бағытындағы ұзындық бірлігі.

Сейсмикалық әсерлерден алынған күштердің мәндерін жүктемелердің басқа түрлерінен алынатын күштермен жиынтықтайды және қималар беріктігін тексеруді жүргізеді.

Е.11 Егер қаптаманы сызаттардың түзілуіне жол бермей немесе топыраққа анкерленген ретінде жобалайтын болса, онда есептік ретінде абсолютты шамасы бойынша максималды σ кернеулерге сәйкес келетін күштердің мәнін қабылдайды. Бұл күштерді «плюс» және «минус» белгілерімен қабылдайды және жүктемелердің басқа түрлерінен болатын күштермен жиынтықтайды.

Е.12 Осы Е қосымшасының Е.1 және Е.2 кестелерінде E_0 және ν_0 әртүрлі мәндерімен топырақтарда орналасқан әртүрлі диаметрдегі және қалыңдықтағы ($n = r_2 / r_1$), сонымен қатар материалдағы ($E_1 \nu_1$) шеңберлі қаптамалар қатары үшін кернеулердің және күштердің өлшемсіз шамаларын (p -ден үлестерде) анықтау мысалдары берілген. Сонымен бірге Е.1-кестеде максималды сығымдаушы кернеулер мен күштер, ал Е.2-кестеде максималды созушы кернеулер мен күштер берілген.

Е.13 Есептеу мысалы

ҚР ЕЖ 2.03-107-2013

Тоғыз баллдық жер сілкінісіне арналған ($T_0=0,5$ с), сыртқы диаметрі 9 м және қалыңдығы 0,40 м ($n=1.1$) болатын, гранодиориттерде орналасқан ($\gamma=0,027$ МН/м³; $\nu_0=0,23$; $E_0=4000$ МПа; $\frac{E_0}{E_1}=0,12$) біртұтас бетон қаптама ($E_1=31500$ МПа; $\nu_1=0,15$):
 $c_1=1290$ м/с; $p=275$ кН/м².

Е.1-кесте бойынша

$$M = -\frac{4,37 p r_1^2 b}{10^3} = -\frac{4,37 \cdot 275 \cdot 4,1^2 \cdot 1,0}{10^3} = -20,2 \text{ кНм};$$

$$N = -1,27 p r_1 b = -1,27 \cdot 275 \cdot 4,1 \cdot 1,0 = -1432 \text{ кН};$$

Е.2-кесте бойынша

$$M = -\frac{3,53 p r_1^2 b}{10^3} = \frac{3,53 \cdot 275 \cdot 4,1^2 \cdot 1,0}{10^3} = 16,3 \text{ кНм};$$

$$N = 0,15 p r b = 0,15 \cdot 275 \cdot 4,1 \cdot 1,0 = 169,1 \text{ кН}.$$

Е.1-кестесі – Максималды сығымдаушы кернеулер және күштер

Есептік кернеу және күш	Қаптаманың сыртқы радиусының ішкі радиусқа қатынасы $n = r_2/r_1$	Топырақ деформациясы модулінің қаптама материалы деформациясының модуліне қатынасы E_0/E_1													
		0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\frac{\sigma_\rho}{p}$	1,05	-1,22	-0,94	-0,77	-0,66	-0,57	-0,35	-0,25	-0,2	-0,16	-0,14	-0,12	-0,10	-0,094	-0,085
	1,10	-1,36	-1,17	-1,02	-0,9	-0,81	-0,54	-0,41	-0,33	-0,27	-0,24	-0,21	-0,18	-0,16	-0,15
	1,20	-1,26	-1,21	-1,12	-1,04	-0,97	-0,72	-0,57	-0,47	-0,41	-0,35	-0,31	-0,28	-0,26	-0,24
	1,30	-1,01	-1,07	-1,05	-1,00	-0,96	-0,76	-0,62	-0,53	-0,46	-0,41	-0,36	-0,33	-0,30	-0,28
$\frac{\sigma_{\text{өңеш}}}{p}$	1,05	-23,1	-18,9	-15,8	-13,6	-11,9	-7,35	-5,32	-4,17	-3,43	-2,91	-2,53	-2,24	-2,01	-1,82
	1,10	-10,1	-10,8	-10,1	-9,27	-8,52	-5,96	-4,56	-3,70	-3,11	-2,68	-2,35	-2,10	-1,90	-1,73
	1,20	-0,31	-3,98	-4,88	-5,09	-5,07	-4,28	-3,56	-3,03	-2,63	-2,32	-2,08	-1,88	-1,72	-1,58
	1,30	+2,76	-1,17	-2,51	-3,08	-3,34	-3,32	-2,94	-2,60	-2,31	-2,08	-1,88	-1,72	-1,59	-1,47
$\frac{\sigma_{\text{ішкі}}}{p}$	1,05	-31,2	-23,2	-18,8	-15,9	-13,8	-8,32	-5,98	-4,67	-3,83	-3,25	-2,82	-2,49	-2,23	-2,02
	1,10	-24,5	-18,4	-15,3	-13,3	-11,8	-7,69	-5,75	-4,60	-3,84	-3,29	-2,88	-2,56	-2,31	-2,10
	1,20	-22,4	-16,1	-13,3	-11,6	-10,4	-7,14	-5,53	-4,54	-3,85	-3,35	-2,97	-2,66	-2,42	-2,21
	1,30	-21,3	-15,4	-12,7	-11,1	-9,94	-6,91	-5,44	-4,51	-3,87	-3,39	-3,02	-2,73	-2,49	-2,28
$\frac{M}{pr_1^2 b} 10^3$	1,05	-1,79	-0,90	-0,62	-0,48	-0,39	-0,20	-0,14	-0,10	-0,084	-0,07	-0,06	-0,053	-0,047	-0,042
	1,10	-12,0	-6,33	-4,37	-3,36	-2,74	-1,45	-0,99	-0,75	-0,61	-0,51	-0,44	-0,39	-0,34	-0,31
	1,20	-73,8	-40,4	-28,2	-21,8	-17,8	-9,52	-6,55	-5,01	-4,07	-3,42	-2,95	-2,60	-2,32	-2,10
	1,30	-180,8	-106,7	-76,5	-60,0	-49,5	-2,6,9	-18,7	-14,4	-11,7	-9,88	-8,55	-7,54	-6,74	-6,10
$\frac{N}{pr_1 b}$	1,05	-1,36	-1,05	-0,87	-0,74	-0,64	-0,39	-0,28	-0,22	-0,18	-0,15	-0,13	-0,12	-0,11	-0,096
	1,10	-1,73	-1,46	-1,27	-1,13	-1,02	-0,68	-0,52	-0,41	-0,35	-0,30	-0,26	-0,23	-0,21	-0,19
	1,20	-2,27	-2,01	-1,82	-1,67	-1,55	-1,14	-0,91	-0,76	-0,65	-0,57	-0,5	-0,45	-0,41	-0,38
	1,30	-2,79	-2,49	-2,28	-2,12	-1,99	-1,53	-1,26	-1,07	-0,92	-0,82	-0,74	-0,67	-0,61	-0,56

Е.2-кестесі – Максималды созушы кернеулер және күштер

Есептік кернеу және күш	Қаптаманың сыртқы радиусының ішкі радиусқа қатынасы $n = r_2 / r_1$	Топырақ деформациясы модулінің қаптама материалы деформациясының модуліне қатынасы E_0/E_1													
		0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$\frac{\sigma_\rho}{p}$	1,05	-0,005	0,064	0,087	0,094	0,094	0,077	0,062	0,051	0,043	0,037	0,033	0,029	0,027	0,024
	1,10	-0,14	-0,048	0,001	0,030	0,046	0,070	0,067	0,061	0,054	0,049	0,045	0,041	0,037	0,035
	1,20	-0,45	-0,29	-0,21	-0,16	-0,12	-0,028	0,002	0,015	0,021	0,023	0,024	0,024	0,024	0,023
	1,30	-0,78	-0,55	-0,43	-0,36	-0,31	-0,16	-0,10	-0,071	-0,051	-0,038	-0,029	-0,023	-0,018	-0,015
$\frac{\sigma_{\text{өнеш}}}{p}$	1,05	-2,01	0,86	1,71	2,01	2,08	1,77	1,43	1,18	1,00	0,87	0,76	0,69	0,62	0,57
	1,10	-5,77	-1,96	-0,58	0,10	0,48	0,99	0,97	0,88	0,79	0,71	0,65	0,59	0,54	0,50
	1,20	-9,19	-4,32	-2,49	-1,54	-0,96	0,14	0,41	0,49	0,50	0,49	0,47	0,44	0,42	0,40
	1,30	-9,75	-5,15	-3,26	-2,23	-1,59	-0,28	0,10	0,25	0,32	0,34	0,35	0,34	0,34	0,33
$\frac{\sigma_{\text{өнутр}}}{p}$	1,05	4,92	4,30	4,01	3,73	3,46	2,47	1,90	1,53	1,29	1,11	0,97	0,87	0,78	0,71
	1,10	7,09	4,43	3,65	3,27	3,01	2,25	1,81	1,51	1,30	1,14	1,01	0,91	0,83	0,76
	1,20	11,2	6,32	4,64	3,81	3,31	2,25	1,81	1,53	1,33	1,18	1,06	0,97	0,89	0,82
	1,30	12,6	7,46	5,45	4,40	3,75	2,39	1,87	1,57	1,37	1,21	1,09	1,00	0,91	0,85
$\frac{M}{pr_1^2 b} 10^3$	1,05	1,44	0,72	0,48	0,36	0,29	0,15	0,098	0,073	0,059	0,049	0,042	0,037	0,033	0,03
	1,10	10,7	5,32	3,53	2,64	2,10	1,05	0,70	0,53	0,42	0,35	0,30	0,27	0,24	0,21
	1,20	68,1	35,4	23,8	17,8	14,2	7,03	4,66	3,48	2,78	2,32	1,99	1,74	1,54	1,39
	1,30	167,4	94,6	65,4	49,7	40,0	20,0	13,2	9,88	7,87	6,54	5,60	4,89	4,34	3,90
$\frac{N}{pr_1 b}$	1,05	0,073	0,13	0,14	0,14	0,14	0,11	0,083	0,068	0,057	0,049	0,043	0,039	0,035	0,032
	1,10	0,066	0,12	0,15	0,17	0,17	0,16	0,14	0,12	0,10	0,093	0,083	0,075	0,069	0,063
	1,20	0,20	0,20	0,21	0,23	0,23	0,24	0,22	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12
	1,30	0,42	0,35	0,33	0,32	0,32	0,32	0,30	0,27	0,25	0,23	0,22	0,20	0,19	0,18

Ж қосымшасы
(ақпараттық)

**Сейсмикалық әсерлерге шеңберлі емес көлденең қималы қаптамаларды есептеу
мысалдары мен жалпы алгоритмі**

Ж.1 Осы Ж қосымшасында сейсмикалық әсерлерге шеңберлі емес көлденең қималы қаптамаларды есептеу әдістемесі және [7]-да берілген теміржол туннелі есебінің мысалы берілген.

Ж.2 Есептеу үшін бастапқы деректер қаптаманың көлденең қимасының берілген нысаны мен өлшемдері және шамалар болып табылады:

E_0 – топырақ деформациясының модулі, МПа;

ν_0 – топырақтың Пуассон коэффициенті;

E_1 – қаптама материалы деформациясының модулі, МПа ;

ν_1 – қаптама материалының Пуассон коэффициенті;

γ – топырақтың көлемдік массасы, МН/м³;

k_c – сейсмикалық коэффициенті;

T_0 – топырақ бөлшектері тербелісінің басым кезеңі, с.

Ж.3 Есеп үш кезеңнен тұрады:

- конформдық көріністі құрылым;
- тендеулердің негізгі жүйелерінің түбірлерін анықтау;
- қаптамадағы күштерді және есептік кернеулерді анықтау.

Ж.4 Бірінші кезең – конформдық көріністі құрылым - ζ жазықтығында $R_1 < 1$ радиусындағы шеңбердің сыртын z жазықтығындағы орта және берілген нысандағы сақина алып жатқан облысқа конформдық түрлендіруді бірлік шеңбер түйіспе сызығына өтетіндей етіп жүзеге асыратын

$$z = \omega(\zeta) = R \left(\zeta + \left(\sum_{v=1}^4 q_v \zeta^{-v} \right) \right),$$

түрдегі функцияның $q_1, \dots, q_4$ коэффициенттерін анықтаудан тұрады.

Ж.5 Конформдық көріністі құрылым екі мезгілде жүзеге асырылады: алдымен жеке шеңберлі пішінді (ζ_1 жазықтығында) көлденең қиманың ішкі контурының пішініне (ζ жазықтығында) бейнелеуді жүзеге асыратын

$$z = \omega(\zeta_1) = \sum_{v=0}^5 a_v \zeta_1^{1-v},$$

түрдегі функция іздестіріледі, сонымен бірге R_1^* f 1 радиусындағы шеңбер сыртқы контурға өтеді; әрі қарай ζ_1 жазықтығындағы R_1^* f 1 радиусты шеңбер ζ жазықтығындағы жеке шеңберге өтуінен тұратын түрлендіру жүргізеді. Сонымен бірге көлденең қималы сыртқы контур жеке шеңберге, ал ішкі контур радиустың шеңберіне өтеді

$$R_1 = \frac{1}{R_1^*} < 1,$$

Ж.6 Жеке шеңбер келбетінің қаптаманың көлденең қимасының ішкі контурының келбетіне бейнеленуі белгілі тәсілдердің кез-келгенімен орындалуы мүмкін. И қосымшасында П.В.Мелентьев әзірлеген графоталдамалық тәсілдің сипаттамасы берілген. Нәтижесінде $a_0, a_1, \dots, a_5$ коэффициенттерінің мәндерін алады.

Ж.7 Бейнелеу кезінде қаптаманың көлденең қимасының сыртқы контурына өтетін R_1^* шеңберінің радиусын анықтау үшін қаптаманың көлденең қимасының сытқы контурына өтетін шеңбер радиусын анықтау үшін келесі түрде бесінші деңгейдегі тендеуді шешеді

$$a_0 R_1^{*5} + (a_1 - h_1) R_1^{*4} + a_2 R_1^{*3} + a_3 R_1^{*2} + a_4 R_1^* + a_5 = 0,$$

мұнда h_1 – шеңбердің ішкі контурының жанында сипатталған орталық болып табылатын координаттардан бастап OX тік өсімен сыртқы контурдың қиылысу нүктесіне дейінгі арақашықтық.

R_1^* ретінде бесінші дәрежедегі тендеудің бірліктен асатын іс жүзіндегі түбірі алынады.

Ж.8 Кейінгі көрсетуді жүзеге асыратын функцияның коэффициенттерін келесі формулалар бойынша анықтайды

$$R = a_0 / R_1; \quad g_i = a_{i+1} R_1^{i+1} / a_0 \quad (i = 1, \dots, 4),$$

$$\text{мұнда } R = \frac{1}{R_1^*}.$$

Ж.9 Екінші кезең – тендеулердің негізгі жүйелерінің түбірлерін анықтау – келесі операциялардан тұрады:

а) шамаларды анықтайды:

$$\beta = \frac{E_1(1 + v_0)}{E_0(1 + v_1)}, \quad \chi_0 = 3 - 4v_0, \quad \chi_1 = 3 - 4v_1.$$

және келесі формулалар бойынша топырақ қазбасын қоршайтын және есептік арақатынасқа кіретін қаптаманың серпінді тұрақты материалының комбинациясын табады:

$$t = \frac{1 + \chi_0 \beta}{1 + \chi_1}, \quad d = \frac{1 - \beta}{1 + \chi_1}, \quad l = 1 - d; \quad s = 1 - t.$$

б) келесі формулалар бойынша көмекші шамаларды анықтайды:

$$\omega_i = \begin{cases} 1 - R_1^2 & \text{при } i = 1 \\ 0 & \text{при } i = 2 \\ g_{i-2} (1 - R_1^{4-2i}) & \text{при } i = 3, \dots, 6 \end{cases}$$

$$\omega_i^1 = i g_i \quad (i = 1, \dots, 4), \quad \omega^" = 0 \quad (i = 1, \dots, 5), \quad \omega_i^" = 0 \quad (i = 6),$$

$$\omega_{i+5}^" = \sum_{j=1}^4 \omega_j^1 \omega_{i-j+4} \quad (i = 2, \dots, 12),$$

$$\omega_i = \begin{cases} 0 & \text{npu } i = 1, 2, \\ \sum_{j=1}^6 \varpi_j \omega_{i+j-3} & \text{npu } i = 3, \dots, 14, \end{cases}$$

$$h_i = \sum_{j=1}^4 g_i \omega_{i-j+6} \quad (i = 0, 1, \dots, 4).$$

в) келесі түрдегі он сызықтық теңдеу жүйесінің матрицасын құрайды (1-жүйе):

$$\sum_{v=1}^4 c_{m,v} c_v + \sum_{v=1}^6 a_{m,v} a_v = d_m \quad (m = 1, \dots, 4),$$

$$\sum_{v=1}^4 c'_{m,v} c_v + \sum_{v=1}^6 a'_{m,v} a_v = d_m \quad (m = 1, \dots, 6).$$

Бірінші төрт теңдеулерде белгісіз c_v кезіндегі коэффициенттерді келесі формулалар бойынша анықтайды:

$$c_{m,v} = \begin{cases} -v\omega_{m+v+6} + R_1^{2m} + \frac{1}{a} & \text{npu } m = v, \\ -v\omega_{m+v+6} & \text{npu } m \neq v. \end{cases}$$

Бірінші төрт теңдеудің белгісіз a_v ($v = 1, 2, \dots, 6$) кезіндегі коэффициенттерін келесі арақатынастардан анықтайды:

$$a_{1,1} = t\omega_6 - d(h_3\omega_6 + 2h_4\omega_5), \quad a_{2,1} = t\omega_7 - d(h_3\omega_7 + 2h_4\omega_6),$$

$$a_{3,1} = t\omega_8 - d(h_3\omega_8 + 2h_4\omega_7), \quad a_{4,1} = t\omega_9 - d(h_3\omega_9 + 2h_4\omega_8),$$

$$a_{1,2} = 2(t\omega_5 - dh_4\omega_6), \quad a_{2,2} = 2(t\omega_6 - dh_4\omega_7),$$

$$a_{3,2} = 2(t\omega_7 - dh_4\omega_8), \quad a_{4,2} = 2(t\omega_8 - dh_4\omega_9),$$

$$a_{i,j} = jt\omega_{i-j+6}, \quad (i = 1, \dots, 4; \quad j = 3, \dots, 6).$$

Қалған алты теңдеулерде белгісіз c_v ($v = 1, \dots, 4$) кезіндегі коэффициенттерді келесі формула бойынша есептейді:

$$c'_{m,v} = -v\omega_{v-m+6},$$

Соңғы алты теңдеудің белгісіз a_v ($v = 1, \dots, 6$) кезіндегі коэффициенттерді келесі формулалар бойынша анықтайды:

$$a'_{1,1} = tR_1^{-2} + s - d(h_3\omega_4 + 2h_4\omega_3) + t\omega_4 - h_3(l + dR_1^{-2}),$$

$$a'_{1,2} = 2[t\omega_3 - dh_4\omega_4 - h_4(l + dR_1^{-2})],$$

$$a'_{2,1} = t\omega_3 - dh_3\omega - h_4(l + dR_1^{-4}),$$

$$a'_{2,2} = tR_1^{-4} + s - 2dh_4\omega_3,$$

$$a'_{1,3} = a'_{1,4} = a'_{1,5} = a'_{1,6} = 0,$$

$$a'_{2,3} = a'_{2,4} = a'_{2,5} = a'_{2,6} = 0,$$

$$a'_{m,k} = \begin{cases} tR_1^{-2m} + s & \text{npu } m = k \\ 0 & \text{npu } m \neq k \end{cases} \quad (m = 3, \dots, 6).$$

г) 1 теңдеулер жүйесін келесі формулалар бойынша есептелетін 1а және 1б топтарының еркін мүшелерімен екі рет шешеді:

1а еркін мүшелерінің тобы

$$d_1 = d \left(\frac{d-t}{d^2} + \sum_{j=1}^4 j h_4 \omega_{7-j} \right), \quad d_m = d \sum_{j=1}^4 j h_j \omega_{m-j+6} \quad (m=2,3,4),$$

$$d'_1 = h_1 (l + dR_1^{-2}) + d(h_1 \omega_4 + 2h_2 \omega_3),$$

$$d'_2 = h_2 (l + dR_1^{-4}) + d h_1 \omega_3, \quad d'_3 = h_3 (l + dR_1^{-6}),$$

$$d'_4 = h_4 (l + dR_1^{-8}), \quad d'_5 = d'_6 = 0.$$

1б еркін мүшелерінің тобы

$$d_m = -d \omega_{m+5}, \quad d'_1 = -(l + dR_1^{-2}) - d \omega_4,$$

$$d'_2 = -d \omega_3, \quad d'_3 = d'_4 = d'_5 = d'_6 = 0.$$

Нәтижесінде 1а және 1б түбірлерінің сәйкесінше екі тобын алады.

д) 2-теңдеулер жүйесін құрады, оның матрицасының коэффициенттері келесі формулалар бойынша 1-жүйе матрицасының тиісті коэффициенттерінен алынады:

$$c_{m,v}^{II} = c_{m,v} - 2(l + dR_1^{2m})/d \quad \text{при } m=v(m=1, \dots, 4),$$

$$a_{1,1}^{II} = -a_{1,1} + 2t\omega_6, \quad a_{1,2}^{II} = -a_{1,2} + 4t\omega_5,$$

$$a_{2,1}^{II} = -a_{2,1} + 2t\omega_7, \quad a_{2,2}^{II} = -a_{2,2} + 4t\omega_6,$$

$$a_{3,1}^{II} = -a_{3,1} + 2t\omega_8, \quad a_{3,2}^{II} = -a_{3,2} + 4t\omega_7,$$

$$a_{4,1}^{II} = -a_{4,1} + 2t\omega_9, \quad a_{4,2}^{II} = -a_{4,2} + 4t\omega_8.$$

$$a_{1,1}^{III} = -a_{1,1} + 2[t\omega_4 - h_3(l + dR_1^{-2})], \quad a_{1,2}^{III} = -a'_{1,2} + 4[t\omega_3 - h_4(l + dR_1^{-2})],$$

$$a_{2,1}^{III} = -a'_{2,1} + 2[t\omega_3 + h_4(l + dR_1^{-4})],$$

$$a_{2,2}^{III} = -a'_{2,2}, \quad a_{3,3}^{III} = -a'_{3,3}, \quad a_{4,4}^{III} = -a'_{4,4},$$

$$a_{5,5}^{III} = -a'_{5,5}, \quad a_{6,6}^{III} = -a'_{6,6}.$$

2-матрицаның қалған коэффициенттері 1-жүйедегі секілді болады.

е) 2-теңдеу жүйесін 1б тобының еркін мүшелерімен шешеді, d'_1 мүшесі бұған жатпайды, ол келесі формула бойынша есептелуі мүмкін:

$$d'_1 = l + dR_1^{-2} - d \omega_4,$$

2-жүйе шешімінің нәтижесінде түбірлердің үшінші тобын алады – $c_1(2), \dots, c_4(2), a_1(2), \dots, a_6(2)$.

1а, 1б және 2 түбірлерінің алынған үш тобы қаптамадағы кернеулерді және күштерді анықтау үшін негіз болып табылады.

Ж.10 Есептің үшінші кезеңі – қаптамадағы кернеулерді және күштерді анықтау – алдымен $\Theta = 0^\circ$ кезінде орындалатын, содан кейін 180° дейін берілген қадаммен Θ бұрышының өзгеруімен орындалатын келесі операцияларды қамтиды:

а) мәндерді есептеп шығарады

$$\begin{aligned}
A_1(1a) &= a_1(1a)h_3 + 2a_2(1a)h_4, & A_2(1a) &= a_1(1a)h, \\
A_1(1\bar{\sigma}) &= a_1(1\bar{\sigma})h_3 + 2a_2(1\bar{\sigma})h_4, & A_2(1\bar{\sigma}) &= a_1(1\bar{\sigma})h, \\
A_1(2) &= a_1(2)h_3 + 2a_2(2)h_4, & A_2(2) &= a_1(2)h.
\end{aligned}$$

б) шамаларды анықтайды

$$\begin{aligned}
A'_1(1a) &= \frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(1a) \cos(v-1)\Theta + \sum_{v=1}^2 v A_v(1a) \cos(v+1)\Theta - \\
&- \sum_{v=1}^6 v a_v(1a) \cos(v+1)\Theta + \sum_{v=1}^4 v h \cos(v+1)\Theta + \frac{t-d}{d}, \\
B'_1(1a) &= \frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(1a) \sin(v-1)\Theta - \sum_{v=1}^2 v A_v(1a) \sin(v+1)\Theta + \\
&+ \sum_{v=1}^6 v a_v(1a) \sin(v+1)\Theta - \sum_{v=1}^4 v h_v \sin(v+1)\Theta, \\
A_1(1\bar{\sigma}) &= \frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(1\bar{\sigma}) \cos(v-1)\Theta + \sum_{v=1}^2 v A_v(1\bar{\sigma}) \cos(v+1)\Theta - \\
&- \sum_{v=1}^6 v a_v(1\bar{\sigma}) \cos(v+1) - \cos 2\Theta, \\
B'_1(1\bar{\sigma}) &= \frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(1\bar{\sigma}) \sin(v-1)\Theta - \sum_{v=1}^2 v A_v(1\bar{\sigma}) \sin(v+1)\Theta + \\
&+ \sum_{v=1}^6 v a_v(1\bar{\sigma}) \sin(v+1)\Theta + \sin 2\Theta, \\
A'_1(2) &= -\frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(2) \sin(v-1)\Theta - \sum_{v=1}^2 v A_v(2) \sin(v+1)\Theta + \\
&+ \sum_{v=1}^6 v a_v(2) \sin(v+1)\Theta - \sin 2\Theta, \\
B'_1(2) &= \frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(2) \cos(v-1)\Theta - \sum_{v=1}^2 v A_v(2) \cos(v+1)\Theta + \\
&+ \sum_{v=1}^6 v a_v(2) \cos(v+1)\Theta - \cos 2\Theta.
\end{aligned}$$

в) $\rho=1$ және $\rho=R_1$ мәндерінде шамаларды есептеп шығарады

$$\begin{aligned}
c'_1 &= 1 - \sum_{v=1}^4 v g_v \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta, & d'_1 &+ \sum_{v=1}^4 v g_v \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta, \\
a'_2(1a) &= \sum_{v=1}^4 v c_v(1a) \rho^{v-1} \cos(v-1)\Theta - t \sum_{v=1}^6 v a_v(1a) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta + \\
&+ d \sum_{v=1}^2 v A_v(1a) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta + d \sum_{v=1}^4 v h_v \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta, \\
b'_2(1a) &= \sum_{v=1}^4 v c_v(1a) \rho^{v-1} \sin(v-1)\Theta + t \sum_{v=1}^6 v a_v(1a) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta - \\
&- d \sum_{v=1}^2 v A_v(1a) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta - d \sum_{v=1}^4 v h_v \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a'_2(1\delta) &= \sum_{v=1}^4 v c_v(1\delta) \rho^{v-1} \cos(v-1)\Theta - t \sum_{v=1}^6 v a_v(1\delta) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta + \\
&+ d \sum_{v=1}^2 v A_v(1\delta) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta - d \rho^{-2} \cos 2\Theta, \\
b'_2(1\delta) &= \sum_{v=1}^4 v c_v(1\delta) \rho^{v-1} \sin(v+1)\Theta + t \sum_{v=1}^6 v a_v(1\delta) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta - \\
&- d \sum_{v=1}^2 v A_v(1\delta) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta + d \rho^{-2} \sin 2\Theta, \\
a'_2(2) &= - \sum_{v=1}^4 v c_v(2) \rho^{v-1} \sin(v-1)\Theta - t \sum_{v=1}^6 v a_v(2) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta - \\
&- d \sum_{v=1}^2 v A_v(2) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta - d \rho^{-2} \sin 2\Theta, \\
b'_2(2) &= \sum_{v=1}^4 v c_v(2) \rho^{v-1} \cos(v-1)\Theta - t \sum_{v=1}^6 v a_v(2) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta - \\
&- d \sum_{v=1}^2 v A_v(2) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta - d \rho^{-2} \cos 2\Theta.
\end{aligned}$$

г) келесі формулалар бойынша $\sigma(1a)$, $\sigma(1b)$, $\sigma(2)$ кернеулі күйінің құраушыларын анықтайды

$$\sigma_\rho = \frac{c'_1 A'_1 + d'_1 B'_1}{c_1'^2 + d_1'^2} \Big|_{\rho=1}, \tau_{p\theta} = \frac{c'_1 B'_1 + d'_1 A'_1}{c_1'^2 + d_1'^2} \Big|_{\rho=1},$$

$$\sigma_{\theta_{внеш}} = \frac{4c'_1 a'_2 + d'_1 b'_2}{c_1'^2 + d_1'^2} \Big|_{\rho=1} - \sigma_p,$$

$$\sigma_{\theta_{внутр}} = 4 \frac{c'_1 a'_2 + d'_1 b'_2}{c_1'^2 + d_1'^2} \Big|_{\rho=R_1}.$$

1a, 1b және 2c тиісті топтарының A'_1 , B'_1 , a'_2 , b'_2 кіріс шамаларын қойып шығарумен.

д) шамаларды есептеп шығарады

$$\xi = \frac{v_0}{1-v_0}, \quad \varphi_0 = \sqrt{\frac{1-2v_0}{2(1-v_0)}}.$$

Және келесі формулалар бойынша қаптаманың көлденең қимасының ішкі және сыртқы контурларында экстремалды қалыпты тангенциалды кернеулердің мәндерін анықтайды:

$$A = \sigma_{\theta_{внутр}}^{(1)} = \frac{1+\xi}{4} \sigma_{\theta_{внутр}}(1a) + \sqrt{\frac{\sigma_{\theta_{внутр}}^2(1b) + \sigma_{\theta_{внутр}}^2(2)}{1+\xi}},$$

$$B = \sigma_{\theta_{внутр}}^{(2)} = \frac{1+\xi}{4} \sigma_{\theta_{внутр}}(1a) - \sqrt{\frac{\sigma_{\theta_{внутр}}^2(1b) + \sigma_{\theta_{внутр}}^2(2)}{1+\xi}},$$

$$C = \sigma_{\theta_{внеш}}^{(1)} = \frac{1+\xi}{4} \sigma_{\theta_{внеш}}(1a) + \sqrt{\frac{\sigma_{\theta_{внеш}}^2(1b) + \sigma_{\theta_{внеш}}^2(2)}{1+\xi}},$$

$$D = \sigma_{\theta_{внеш}}^{(2)} = \frac{1+\xi}{4} \sigma_{\theta_{внеш}}(1a) - \sqrt{\frac{\sigma_{\theta_{внеш}}^2(1b) + \sigma_{\theta_{внеш}}^2(2)}{1+\xi}}.$$

е) A, B, C, D мәндерінен ең үлкен теріс және ең үлкен оң мәнді таңдайды.

Егер осы немесе басқа белгінің үлкені A саны болса, онда оған сәйкес келетін толқындардың түсу бұрышын α_1 келесі формула бойынша анықтайды

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \arctg \frac{\sigma_{\theta_{внутр}}(2) - \sigma_{\theta_{внутр}}(1b)}{\sigma_{\theta_{внутр}}(1b) + \sigma_{\theta_{внутр}}(2)},$$

Және келесі арақатынастардан p шамасының үлестеріндегі $\sigma_p, \tau_{p\theta}, \sigma_{\theta_{внеш}}$ кернеуін табады

$$\sigma = \frac{1+\xi}{4} \sigma(1a) + \sqrt{\frac{\sigma^2(1b) + \sigma^2(2)}{1+\xi}} (\cos 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1) + \sqrt{\frac{\sigma^2(1b) + \sigma^2(2)}{1+\xi}} (\sin 2\alpha_1 + \cos 2\alpha_1),$$

Егер C саны ең үлкені болып шықса, онда $\sigma^p, \tau_{p\theta}, \sigma_{\theta_{внутр}}$ кернеулерін анықтау үшін соңғы формулаға $\sigma_{\theta_{внутр}}$ шамасының орнына $\sigma_{\theta_{внеш}}$ шамасы пайдаланылған «е» тармағының формуласы бойынша есептеп шығарылған α_1 бұрышының мәнін қою керек.

Егер осы немесе басқа белгінің ең үлкені B саны болса, онда тиісті бұрышты анықтайды

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \frac{\pi}{2},$$

ал $\sigma^p, \tau_{p\theta}, \sigma_{\theta_{внеш}}$ кернеулері келесі арақатынастардан анықтайды

$$\sigma = \frac{1+\xi}{4} \sigma(1a) + \sqrt{\frac{\sigma^2(1b) + \sigma^2(2)}{1+\xi}} (\cos 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_2) + \sqrt{\frac{\sigma^2(1b) + \sigma^2(2)}{1+\xi}} (\sin 2\alpha_2 + \cos 2\alpha_2),$$

Егер D саны ең үлкені болып шықса, онда α_2 анықтаған кезде $\sigma_{\theta_{внутр}}$ орнына $\sigma_{\theta_{внеш}}$ шамасын қою арқылы есептелген α_1 мәнін пайдаланады. $\sigma_p, \tau_{p\theta}, \sigma_{\theta_{внеш}}, \sigma_{\theta_{внутр}}$ кернеулерін соңғы формула бойынша анықтайды.

Нәтижесінде сығымдау және жылжыту толқындарының жиынтықты әрекеті кезінде туындауы мүмкін, қаптамадағы ең үлкен сығымдаушы (теріс) және ең үлкен созушы (оң)

калыпты тангенциалды кернеуге сәйкес келетін $\sigma_\rho, \tau_{\rho\theta}, \sigma_{\theta\text{внеш}}, \sigma_{\theta\text{внутр}}$, кернеуінің екі эпюрасынан алады.

ж) қаптаманың көлденең қималы ішкі және сыртқы контурлары нүктелерінің өлшемсіз координаттарын

$$x_{1,2} = \left[\frac{a_1 R_1}{a_0} \rho \cos \Theta + \sum_{v=1}^4 g_v \rho^{-v} \cos v\Theta \right] / \rho = R_1, 1,$$

$$y_{1,2} = \left[\rho \sin \Theta - \sum_{v=1}^4 g_v \rho^{-v} \sin v\Theta \right] / \rho = R_1, 1.$$

және қаптаманың салыстырмалы қалыңдығын

$$\delta = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2},$$

формулалар бойынша анықтайды.

и) қаптаманың кернеулі күйінің екі алынған нұсқалары үшін келесі формулалар бойынша M және N өлшемсіз шамаларын анықтайды

$$M = \frac{\delta^2}{12} [\sigma_{\theta\text{внутр}} - \sigma_{\theta\text{внеш}}],$$

$$N = \frac{\delta}{12} [\sigma_{\theta\text{внутр}} + \sigma_{\theta\text{внеш}}].$$

к) θ бұрышын берілген кадаммен, мысалы, 15° -тан кейін 0° -ден 180° дейін өлшейді және есептің үшінші кезеңін қайталайды.

Ж.11 Алынған күштер конструкцияға созушы қалыпты жүктеменің берілмейтіндігін болжаумен қаптамадағы үлкен сығымдаушы және созушы σ_θ кернеулеріне сәйкес келеді. Егер қаптама сызаттардың түзілуіне жол берумен жобаланатын болса, күштердің осы екі нұсқасын пайдалану сығымдау және созылу кезінде қималардың беріктігін тексеру үшін ұсынылады.

Егер қаптама топырақтың қоршаған сілемімен бірге жұмыс істейтіндігі жобаланса және түйіспеде қалыпты созылу болғанда (мысалы, қаптама жынысқа анкерленген болса, бүрікпе бетоннан жасалса немесе беріктіктің максималды қорымен сызаттардың пайда болуына жол бермей жобаланса), онда кернеулердің және күштердің әрбір түрі үшін алынған екі эпюрадан қаптамадағы σ_θ кернеулерге сәйкес келетін, абсолютты шамасы бойынша ең үлкенін таңдайды. Есептік ретінде «плюс» және «минус» белгілерімен алынған күштердің көрсетілген эпюраларын қиманың сығымдалған, сондай-ақ созылған кезіндегі беріктігін тексеру үшін алады.

Ж.12 Кернеулердің есептік мәндерін шамаға көбейтеді

$$p = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma c_1 T_0,$$

мұнда C_1 – келесі арақатынаспен сипатталатын,

$$C_1 = \sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma} \times \frac{1 - \nu_0}{(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}},$$

немесе сілемдегі тікелей өлшемдермен анықталатын серпінді сығымдалу (созылу) толқындарының таралу жылдамдығы;

g – ауырлық күшінің жылдамдауы.

Бүгуші сәттердің M есептік мәндерін pR^2b шамасына, ал N бойлық күштерді pRb шамасына көбейтеді, мұнда b – құрылыстың бойлық бағытындағы ұзындық бірлігі.

Ж.13 Егер қазба симметриясының тік өсіне берілген α бұрышынан түсетін сығымдау толқынының немесе жылжыту толқынының әрекетіне бөлек есептеуді жүргізу қажет болса, онда келесі формулаларды пайдалану керек:

$$\sigma_{сж} = \frac{1+\xi}{4} \sigma(1\alpha) + \frac{1-\xi}{2} [\sigma(1\delta) \cos 2\alpha + \sigma(2) \sin 2\alpha],$$

$$\sigma_{сдв} = \frac{1-\xi}{2} [\sigma(2) \cos 2\alpha - \sigma(1\delta) \sin 2\alpha].$$

мұнда σ таңбасымен жекелеген жүктемеден болатын барлық кернеулер белгіленген. Күштерді осы Ж қосымшасының Ж.10 тармағының формулалары бойынша кернеу арқылы анықтайды.

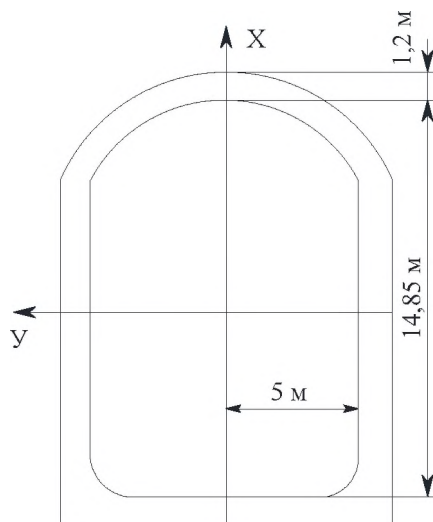
Ж.14 Есептеудің ретте келтіруші нұскасы.

Бастапқы деректер:

$$E_0 = 17600 \text{ МПа}, E_1 = 22000 \text{ МПа}, \nu_0 = 0,25, \nu_1 = 0,16, k_c = 0,1$$

$$T_0 = 0,5 \text{ с}, \gamma = 0,025 \text{ МН / м}^3, h_1 = 9,25 \text{ м}.$$

Қаптаманың көлденең қимасының нысаны және өлшемдері Ж.1-суретте берілген.

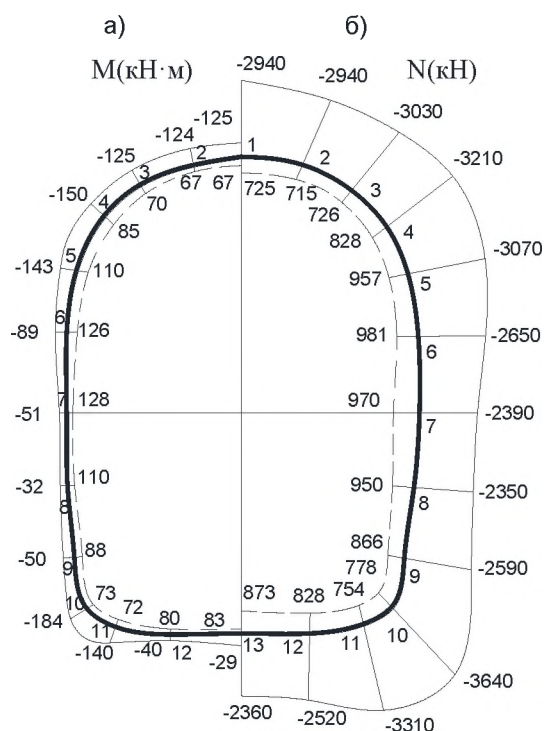


Ж.1-суреті – Есептеудің ретке келтіруші нұсқасына арналған қаптама тәсілі

Бейнелеуші функцияның коэффициенттері келесі шамаларға ие:

$$a_0=6,900833, \quad a_1=0,149705, \quad a_2=1,171667, \\ a_3=0,221667, \quad a_4=-0,688333, \quad a_5=0,253628.$$

Күштердің есептік эпюралары Ж.2 –Суретте берілген (а – кН·м –дегі бұгуші сәттер, б – кН-дегі бойлық күштер). «Плюс» және «минус» белгілерімен алынған күштер қаптаманың топырақ сілемімен толық түйісуін болжаумен және созушы қалыпты түйіспелік кернеулердің болуында қаптамадағы максималды сығымдаушы және созушы кернеулерге σ_θ сәйкес келетін күштер тұтас сызықтармен көрсетілген. Қалыпты созушы жүктеме конструкцияға берілмейтіндігін болжаумен, қаптамадағы максималды созушы кернеулерге σ_θ сәйкес келетін күштер пунктирмен көрсетілген (ең жоғары сығымдаушы кернеулерге сәйкес келетін күштер бұл жағдайда тұтас сызықтармен көрсетілгендері).



Ж.2-суреті –Есептің ретке келтіруші нұсқасы үшін күштердің есептік эпюралары (бұгуші сәттері және бойлық күштер) (пунктирлік және тұтас сызықтармен координаттардың мәндерін мәтіннен қар.)

Қаптамаға қалыпты қысымдардың σ_p/p және Ж.2-суретте көрсетілген қиылыстағы нүктелерде қаптаманың топырақпен түйісіндегі жанама кернеулердің $\tau_{p\theta}/p$, сыртқы

контурмен шамалардың, сонымен қатар Ж.2-суретте көрсетілгендер ($Q=0$ симметриясының өсінде) арасында ортасында орналасқан қималарда Q/p көлденең күштердің шамалары Ж.1-кестеде берілген.

Ж.1-кестесі – Кернеулерге және көлденең күштерге қатысты қалыпты қысымдардың мәндері

Қима нөмірі	Дара түйіспелік кернеу және көлденең күш					
	толық түйісуінде			созушы жүктемені жүзеге асыру мүмкін болмағанда		
	σ_p/p	$\tau_{p\theta}/p$	Q/p	σ_p/p	$\tau_{p\theta}/p$	Q/p
1	-0,56	0		-0,15	0	
2	-0,54	-0,05	0,01	-0,02	-0,07	0
3	-0,52	-0,05	0	-0,05	-0,15	0
4	-0,50	0,04	-0,02	0,06	0,23	0,01
5	-0,42	0,12	0,01	0,11	-0,23	0,02
6	-0,31	0,08	0,04	0,09	-0,11	0,01
7	-0,25	-0,02	0,03	0,03	0,04	0
8	-0,22	-0,13	0,01	-0,05	0,17	-0,01
9	-0,29	-0,27	-0,01	-0,11	0,27	-0,02
10	-0,61	-0,21	-0,14	0,03	0,25	-0,02
11	-0,55	0,26	0,06	-0,01	-0,11	0
12	-0,31	0,19	0,10	-0,15	-0,08	0,01
13	-0,27	0	0,01	-0,16	0	0

Түйіспелік кернеулердегі, бойлық және көлденең күштердегі «минус» белгісі сығымдалуды білдіреді, бүгуші сәттерде – сыртқы талшықтың салыстырмалы созылуын білдіреді.

Осылайша, бұл жағдайда жүктеменің $p=573 \text{ кН/м}^2$ ескере отырып, түйіспелік кернеулер σ_p 0,35 МПа дейінгі шаманы құрайды және егер осы шамалардың қаптаманың топырақпен ілінісуінен аспайтындығын есептесе (жүктемелердің басқа түрлерінің болмауында) және қаптама сызаттардың түзілуіне жол бермей немесе топыраққа анкерленген түрде жобаланатын болса, онда есептік ретінде «плюс» және «минус» белгілерімен, тұтас сызықтармен Ж.2-суретте берілген M және N күштерін қабылдау керек. Бұл күштер сейсмикалық әсерлерден қаптамадағы максималды сығымдаушы, сонымен қатар максималды созушы кернеулерді σ_θ білдіреді. Сонымен бірге қаптамаға есептік қысымдар, түйіспедегі жанама кернеулер және қаптаманың қималарындағы көлденең күштер «плюс» және «минус» белгілерімен Ж.1-кестесінің бірінші бөлігінде берілгендер болады.

Егер қаптама топыраққа анкерленбеген болса және сызаттардың түзілуіне жол берумен жобаланса, онда қаптаманың сығымдалуға беріктігін тексеру үшін есептіктер

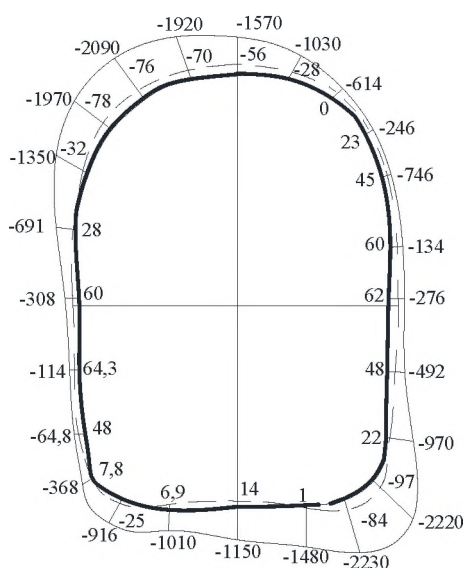
Ж.2-суретінен M және N эпюралары (тұтас сызықтар) және Кестенің бірінші бөлігіндегі Q , ал созылуға - Ж.2-суретінен M және N эпюралары (пунктир) және Ж.1-кестесінің екінші бөлігінен Q болып табылады.

Бұл жағдайда сонымен қатар созушы қалыпты түйіспелік кернеулердің пайда болуы мүмкін болады, бірақ көлденең қиманың барлық периметрі бойынша емес, оның бөлігіне ғана, оның үстіне $0,07$ МПа –дан аспайды (максималды созушы кернеулерге σ_θ сәйкес келетін түйіспелік кернеулер σ_r/p және жанама кернеулер $\tau_{r\theta}/p$ Ж.1-кестенің екінші бөлігінде берілген).

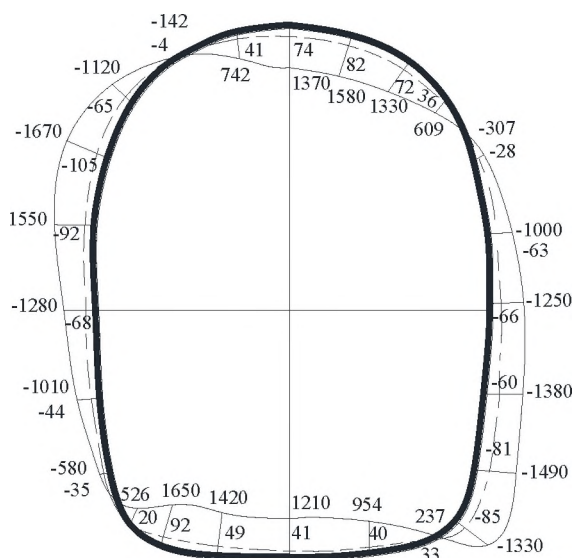
Ж.3-суретте жоғары бағытталған симметрия өсіне $\alpha=120$ бұрышынан түсетін (α бұрышы сағат тіліне қарсы есептеледі), сығымдау толқынының әсерінде қаптамадағы N (тұтас сызық) және M (пунктир) күштерінің эпюралары мысал ретінде берілген.

Ж.4-суретте жылжыту толқынының $\alpha=120^\circ$ бұрышынан түсетін N (тұтас сызық) бойлық күштерінің және M (пунктир) бұгуші сәттерінің эпюралары берілген.

Ж.3 және Ж.4-суреттерде көрініп тұрғандай, күштердің эпюралары симметрия өстеріне ие емес, өйткені толқындардың таралу бағыты тігінен, не көлденеңінен сәйкес келмейді.



Ж.3-суреті – Жоғары бағытталған симметрия өсіне 120° бұрышынан түсетін сығымдалу толқынының әсерінде қаптамадағы күштердің эпюралары (тұтас сызық және пунктир)



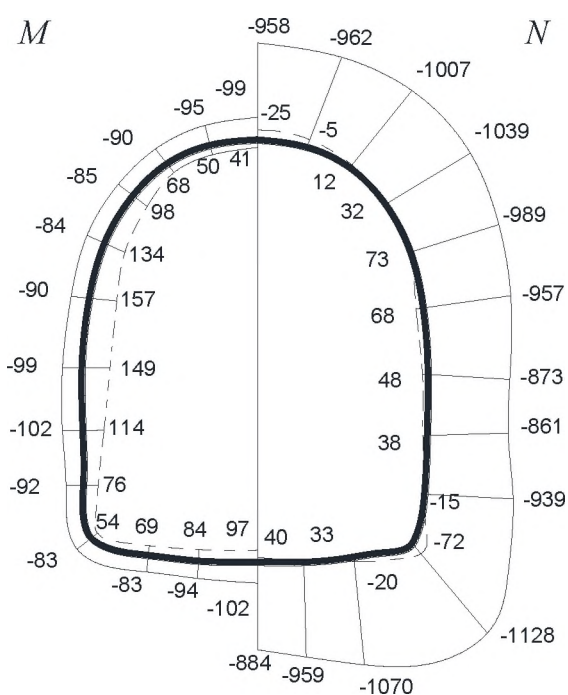
Ж.4-суреті – Қаптамадағы күштердің эпюралары (тұтас сызық және пунктир)

Ж.15 Теміржол туннелінің қаптамасы.

Бастапқы деректер:

$$E_1 = 31500 \text{ МПа}, \quad v_1 = 0,15, \quad E_0 = 700 \text{ МПа}, \quad v_0 = 0,3, \quad \gamma = 0,0263 \text{ МН} / \text{м}^3,$$

$$k_c = 0,1, \quad T_0 = 0,5 \text{ } c, \quad \delta = 0,5 \text{ } \mu.$$



**Ж.5-суреті. Теміржол туннелінің қаптамасындағы күштердің есептік
эпюралары.**

Күштердің есептік эпюралары Ж.5-суретте берілген (тұтас сызықтар – қаптамадағы максималды қысушы кернеуге, пунктир – ең жоғары созушы кернеуге сәйкес келетін күштер σ_0).

И.2.4 Контурдың жанында сипатталған және диаметрлердегі секілді ішінен контурға жанасатын шеңберлер арасында жасалған $I, \dots, V$ сәулелерінің үзінділерінде екі нүктеден контурды кесіп өтетін көмекші шеңберлерді құрады.

И.2.5 Екі қиып өту нүктесінен координаттардың басынан ең алысын таңдайды және одан сәйкес келетін сәулеге перпендикулярды түсіреді. Осы нүктеден сәулеге дейінгі арақашықтықты V_n белгілейді, ал координаттардың басталуынан перпендикулярмен қиылысқанға дейін сәуленің ұзындығын u_n белгілейді.

И.2.6 $u_n^{(0)}$ мәндерін егер контур 1:100 масштабында сызылған болса 1 см болатын бір бөлу масштабында және егер контур 1:50 масштабында берілген болса 2 см болатын бір бөлу масштабында калькада сызылған мөлдір палетка шәкілінде (И.2-сурет) оқиды. u шәкілі n – дік сәулемен, ал v шәкілі контурмен көмекші шеңбердің қиылысу нүктесінен сәулеге жіберілген перпендикулярмен сәйкес келетіндей түрде палтканы сызбанұсқаға салады.

Ескертпелер

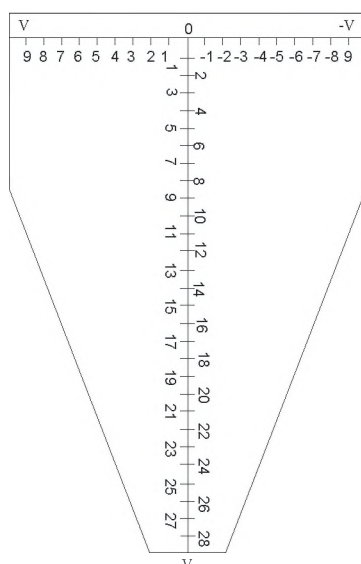
1 $v_0^{(0)}$ және $v_6^{(0)}$ шамалары нөлге тең, сондықтан $u_0^{(0)}$ және $u_6^{(0)}$ ретінде координаттардың басынан контурмен қиылысқанға дейін тиісті сәулелердің ұзындығын қабылдайды.

2 Барлық қажетті графикалық құрылымдар И.1-суретте көрсетілген.

И.2.7 Белгісіз $a_n^{(0)}$ қатысты жеті теңдеу жүйесін шешеді, одан бос мүшелер ретінде $u_n^{(0)}$ өлшенген шамаларын алады.

$a_n^{(0)}$ анықтау үшін теңдеулер жүйесінің матрицасы И.1-кестеде берілген.

И.2.8 И.2.7 теңдеулер жүйесінің түбірлері көрсетілетін функция коэффициенттерінің бірінші жуықтауын береді.



И.2-суреті - $u_n^{(0)}$ мәндерін анықтауға арналған палетка

И.2.9 И.2.7 жүйесінің шешімінен табылған $a_n^{(0)}/n=0, \dots, 6$ шамаларын келесі түрге ие $v_n^{(0)}$ анықтауы үшін формулаға қояды

$$v_n^{(0)} = -\sum_{v=0}^6 a_v^{(0)} \sin \frac{vn\pi}{6}$$

И.1-кестесі – $a_n^{(0)}$ анықтау үшін теңдеулер жүйесінің матрицасы

Функцияны көрсету коэффициенті							Еркін мүше
$a_0^{(0)}$	$a_1^{(0)}$	$a_2^{(0)}$	$a_3^{(0)}$	$a_4^{(0)}$	$a_5^{(0)}$	$a_6^{(0)}$	
1	1	1	1	1	1	1	$u_0^{(0)}$
1	0,866	0,5	0	-0,5	-0,866	-1	$u_1^{(0)}$
1	0,5	-0,5	-1	-0,5	0,5	1	$u_2^{(0)}$
1	0	-1	0	1	0	-1	$u_3^{(0)}$
1	-0,5	-0,5	1	-0,5	-0,5	1	$u_4^{(0)}$
1	-0,866	0,5	0	-0,5	0,866	-1	$u_5^{(0)}$
1	-1	1	-1	1	-1	-1	$u_6^{(0)}$

И.2.10 $u_n^{(1)}$ келесі жуықтауын табу үшін $u_1 v$ шәкілдерімен мөлдір палетканы (И.2-сурет) тиісті сәулеге салады, содан кейін сәуленің жанынан u шәкілінің жылжуымен $v_n^{(0)}$ алынған мәні v шәкілімен контурдың қиылысында болатындығына қол жеткізеді. u шәкілінде палетканың осындай қалпында $u_n^{(1)}$ мәндерін оқиды.

Ескертпе – $u_0^{(1)}$ и $u_6^{(1)}$ шамалары бұрынғысынша қалады.

И.2.11 Е.2.7, Е.2.9-тт. операцияларын қайта жүргізеді, бірақ И.2.7 тармағы жүйесінің еркін мүшелері ретінде $u_0^{(1)}$ и $u_1^{(1)} \dots u_6^{(1)}$ мәндерін алады.

И.2.12 Көрсетілген түрде көрсетуші функция коэффициенттерінің екінші жуықтауын анықтайды ж.т.б.

И.2.13 Келесі жуықтаудың құрылымы v_n шамасына елеулі түзетулерді енгізгенге дейін операциялар жалғасады.

Ескертпе – Әдетте, қаптамалардың нақты келбеттері үшін үш жуықтау жеткілікті.

И.2.14 Алынған контурдың бастапқыға сәйкестігін тексеруді нүктелердің координаттарына арналған формулалар бойынша жүзеге асырады

$$x = \sum_{n=0}^6 a_n \cos(1-n)\Theta, \quad y = \sum_{n=0}^6 a_n \sin(1-n)\Theta.$$

И.2.15 a_n коэффициенттеріне қатысты И.2.7 тармағының теңдеулер жүйесін шешеді, [8]-де берілген әдістеме бойынша бейнеленген контур нүктелерінің координаттарын және v_n шамаларын анықтайды.

К қосымшасы
(ақпараттық)

Туннельдің көп қабатты шеңберлі қаптамасын есептеу мысалы және алгоритмі

К.1 Осы К қосымшасында [9] берілген туннельдердің көп қабатты шеңберлі қаптамаларын есептеу әдістемесі және алгоритмі берілген.

К.2 Қаптаманы ($n-1$) қабатты сақина ретінде қарастырады; n - қабат – шексіз қалың сілем (осы ережелер жинағының 5.5-кіші бөліміндегі 14-сурет).

К.3 Берілетін есептік жүктемелер радиалды жүктеменің максимумы арқылы өтетін өстен есептелетін Θ бұрышы бойынша біркелкі емес

$$\sigma_r = p_0 + p_2 \cos 2\Theta,$$

$$\tau_{r\theta} = Q_2 \sin 2\Theta.$$

мұнда σ_r және $\tau_{r\theta}$ - жүктемелердің радиалды және жанама құраушылары;

p_0, p_2 және Q_2 - жүктемелердің параметрлері (берілген формулалар бойынша есептеледі немесе беріледі).

К.4 қабаттары механикалық қасиеттер бойынша біркелкі емес қаптамаларды есептеген кезде, мысалы, иілімді немесе қатты арматурамен бетондық немесе қабырғалы тубингтермен қабаттар, кернеулердің қима бойынша таралуының біркелкісіздігін ескереді. Әрбір қабаттағы материалдардың біркелкі болмауы қабат қимасының ауданына арматура қимасы ауданының қатынасымен анықталатын арматуралау коэффициентімен (дәрежесімен) сипатталады. Егер қаптаманың ішкі қабаты қабырғалар арасындағы кеңістікті толтырусыз қабырғалы тубингілер болса, онда қабырғалардың бөлінген қабатын арматуралау дәрежесін қабырғалар қимасы ауданының қабырға арасындағы кеңістіктің және қабырғалардың ауданына қатынасымен анықтайды.

К.5 Есептеу үшін бастапқы деректер

К.5.1 Сілемдегі топырақтың қасиеттері:

E_0 – деформация модулі, МПа;

ν_0 – Пуассон коэффициенті;

γ – топырақтың көлемдік массасы, МН/м³;

k_c – сейсмикалық коэффициенті;

T_0 – топырақ бөлшектері тербелістерінің басым кезеңі, с;

C_1 – сығымдау-созу серпінді толқындарының таралу жылдамдығы, см/с, келесі формула бойынша анықтайды

$$C_1 = \sqrt{\frac{980E_n(1-\nu_n)}{\gamma(1+\nu_n)(1-2\nu_n)}},$$

К.5.2 Қаптама бойынша деректер:

$n-1$ – қабаттардың саны;

R_i – қабаттар контурларының радиустары ($i = 0, 1, \dots, n-1$);

A_i – қабаттардың арматуралану дәрежесі ($i = 1, 2, \dots, n-1$);

E_i^I, E_i^{II} – қабат материалдарының деформациялану модульдері (МПа);

E_i^I – негізгі материал;

E_i^{II} – арматура;

ν_i – қабат материалдарының Пуассон коэффициенттері.

К.5.3 Сейсмикалық әсерлер:

$$p_{0c}^n = \frac{1}{4\pi(1-\nu_0)} \cdot k_c \gamma C_1 T_0,$$

$$p_{2c}^n = p_{0c}^n \sqrt{(1-2\nu_0)(3-4\nu_0)}.$$

К.5.4 Есептеу тәртібі:

$$\left. \begin{aligned} E_i &= E_i^I (1-A_i) + E_i^{II} A_i \\ x_i &= 3-4\nu_i; G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)} \end{aligned} \right\} i = 1, 2, \dots, n-1;$$

$$c_i = \frac{R_i}{R_i-1}, \quad D_i = \frac{c_i^2-1}{x_i+1}, \quad H_i = \frac{(c_i^2-1)^3}{x_i+1} \quad i = 1, 2, \dots, n-1.$$

$\{\alpha_{kl}\}, \{\beta_{kl}\}, \{\gamma_{kl}\}, \{\delta_{kl}\}$ – квадраттық матрицалар (3 x 3).

$i = 1, 2, \dots, n-1.$

$$\bar{\delta}_{21}^i = 0; \quad \delta_{22}^i = \frac{1}{H_i} (c_i^6 + 9c_i^4 + 3c_i^2 + 3) + 2,$$

$$\bar{\delta}_{23}^i = \frac{1}{H_i} (c_i^6 - 3c_i^4 - 3c_i^2 - 3) + 2,$$

$$\bar{\delta}_{31}^i = 0; \quad \delta_{32}^i = \frac{1}{H_i} (c_i^6 - 3c_i^4 - 3c_i^2 - 3) - 4,$$

$$\bar{\delta}_{33}^i = \frac{1}{H_i} (c_i^6 - 3c_i^4 + 3c_i^2 + 3) - 4,$$

$$\alpha_{kj}^i = \frac{1}{G_i} \bar{\alpha}_{kj}^i, \quad \bar{\beta}_{kj}^i = \frac{1}{G} \bar{\beta}_{kj}^i, \quad \bar{\gamma}_{kj}^i = \frac{1}{G_i} \bar{\gamma}_{kj}^i, \quad \delta_{kj}^i = \frac{1}{G_i} \bar{\delta}_{kj}^i.$$

$\bar{\alpha}, \bar{\beta}$ коэффициентінің n шексіз қабаты үшін

$$\bar{\alpha}_{11}^n = -2, \bar{\alpha}_{12}^n = 0, \bar{\alpha}_{13}^n = 0,$$

$$\bar{\alpha}_{21}^n = 0, \bar{\alpha}_{22}^n = -3(x_n + 1) + 2, \bar{\alpha}_{23}^n = 3(x_n + 1) - 4,$$

$$\bar{\alpha}_{31}^n = 0, \bar{\alpha}_{32}^n = 3(x_n + 1) - 4, \bar{\alpha}_{33}^n = -3(x_n + 1)2;$$

$$\bar{\beta}_{11}^n = x_n + 1, \bar{\beta}_{12}^n = 0, \bar{\beta}_{13}^n = 0,$$

$$\bar{\beta}_{21}^n = 0, \bar{\beta}_{22}^n = 6(x_n + 1), \bar{\beta}_{23}^n = 0,$$

$$\bar{\beta}_{31}^n = 0, \bar{\beta}_{32}^n = -6(x_n + 1), \bar{\beta}_{33}^n = 0;$$

$$A^i = \{\alpha_{kj}^i\}, B^i = \{\beta_{kj}^i\} \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

$$\bar{\alpha}_{11}^i = \frac{1}{D_i} - 2, \bar{\alpha}_{12}^i = 0, \bar{\alpha}_{13}^i = 0,$$

$$\bar{\alpha}_{21}^i = 0, \bar{\alpha}_{22}^i = -\frac{1}{H_i}(3c_i^6 + 3c_i^4 + 9c_i^2 + 1) + 2,$$

$$\bar{\alpha}_{23}^i = \frac{1}{H_i}(3c_i^6 + 3c_i^4 + 3c_i^2 - 1) - 4,$$

$$\bar{\alpha}_{31}^i = 0, \bar{\alpha}_{32}^i = \frac{1}{H_i}(3c_i^6 + 3c_i^4 - 3c_i^2 - 1) - 4 = \bar{\alpha}_{23}^i,$$

$$\bar{\alpha}_{33}^i = -\frac{1}{H_i}(3c_i^6 + 3c_i^4 - 3c_i^2 + 1) + 2,$$

$$\bar{\beta}_{11}^i = \frac{c_i^2}{D_i}, \bar{\beta}_{12}^i = 0, \bar{\beta}_{13}^i = 0,$$

$$\bar{\beta}_{21}^i = 0, \bar{\beta}_{22}^i = \frac{2}{H_i}c_i^2(3c_i^4 + 2c_i^2 + 3), \bar{\beta}_{23}^i = -\frac{2}{H_i}c_i^2(c_i^2 + 3),$$

$$\bar{\beta}_{31}^i = 0, \bar{\beta}_{32}^i = -\frac{2}{H_i}c_i^4(3c_i^2 + 1), \bar{\beta}_{33}^i = \frac{4}{H_i}c_i^4,$$

$$\bar{\gamma}_{11}^i = -\frac{1}{D_i}, \bar{\gamma}_{12}^i = 0, \bar{\gamma}_{13}^i = 0,$$

$$\bar{\gamma}_{21}^i = 0, \bar{\gamma}_{22}^i = -\frac{2}{H_i}(3c_i^4 + 2c_i^2 + 3), \bar{\gamma}_{23}^i = \frac{2}{H_i}c_i^2(3c_i^2 + 1),$$

$$\bar{\gamma}_{31}^i = 0, \bar{\gamma}_{32}^i = \frac{2}{H_i}(c_i^2 + 3), \bar{\gamma}_{33}^i = -\frac{4}{H_i}c_i^2,$$

$$\bar{\delta}_{11}^i = \frac{c_i^2}{D_i} - 2, \bar{\delta}_{12}^i = 0, \bar{\delta}_{13}^i = 0,$$

$$F^i = \{\gamma_{kj}^i\}, D^i = \{\delta_{kj}^i\} \quad i = 1, 2, \dots, n-1,$$

$$k^0 = \begin{Bmatrix} 000 \\ 000 \\ 000 \end{Bmatrix},$$

$$k^i = \left[-A^{i+1} + D^i + F^i K^{i-1} \right]^{-1} B^{i+1}.$$

мұнда $1 \leq i \leq n-1$ - сілеммен бірге қаптаманы есептеген кезде;

$$p^i = k^i p^{i+1}$$

$$p^n = \begin{Bmatrix} p_0^n \\ p_2^n \\ Q_2^n \end{Bmatrix},$$

$$s_1^i = \frac{2c_i^2}{c_i^2 - 1}, \quad s_{12}^i = -\frac{(4c_i^2 + 1)c_i^2}{(c_i^2 - 1)^2}, \quad s_{13}^i = \frac{4c_i^2}{(c_i^2 - 1)^2},$$

$$s_{21}^i = s_{11}^i, \quad s_{22}^i = -s_{12}^i, \quad s_{23}^i = -s_{13}^i,$$

$$s_{31}^i = \frac{c_i^2 + 1}{c_i^2 - 1}, \quad s_{32}^i = \frac{c_i^4 + 6c_i^2 + 1}{(c_i^2 - 1)^2}, \quad s_{33}^i = \frac{2(c_i^4 - 2c_i^2 - 1)}{(c_i^2 - 1)^2},$$

$$s_{41}^i = s_{31}^i, \quad s_{42}^i = -s_{32}^i, \quad s_{43}^i = -s_{33}^i,$$

$$t_{11}^i = -s_{31}^i, \quad t_{12}^i = s_{32}^i, \quad t_{13}^i = -\frac{2(c_i^4 + 2c_i^2 - 1)}{(c_i^2 - 1)^2},$$

$$t_{21}^i = t_{11}^i, \quad t_{22}^i = -t_{12}^i, \quad t_{23}^i = -t_{13}^i,$$

$$t_{31}^i = -\frac{s_{11}^i}{c_i^2}, \quad t_{32}^i = \frac{s_{12}^i}{c_i^2}, \quad t_{33}^i = s_{13}^i,$$

$$t_{41}^i = t_{31}^i, \quad t_{42}^i = -t_{32}^i, \quad t_{43}^i = -t_{33}^i.$$

К.5.5 Қаптама элементтеріндегі кернеулер

$$\sum_i^j = \begin{Bmatrix} \sigma_{i\theta c}^j \\ \sigma_{i\theta \delta}^j \\ \sigma_{inc}^j \\ \sigma_{in\delta}^j \end{Bmatrix} \quad (j=1,2) \quad (i=1,2,\dots,n-1),$$

"вс", "вб", "нс", "нб" белгілері келесі кернеулер анықталатын қиманы көрсетеді:

- "в" – қабаттың ішкі контурында;
- "н" – қабаттың сыртқы контурында;
- "с" - күмбезде (максималды жүктеменің әрекет ету өсі бойынша);
- "б" - бүйірлерде (максималды жүктеме әрекетінің бағытына перпендикуляр өсі бойынша).

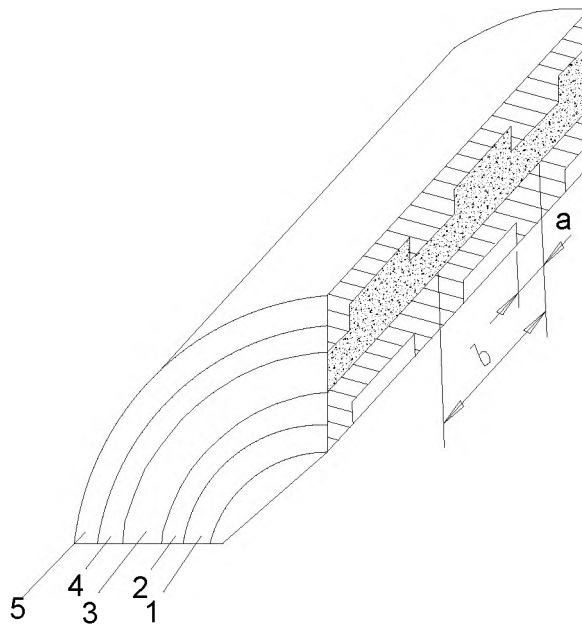
"j" жоғарғы индексі кернеулер анықталатын материалды көрсетеді: мысалы j=1-бетон, j=2 - арматура; i – қабат нөмірі.

$$\sum_i^j = \frac{E_i^j}{E_i} [\{s_{kl}\} P_{\Sigma}^i + \{t_{kl}\} P_{\Sigma}^{i-1}],$$

$$(1 \leq k \leq 4)$$

$$(1 \leq l \leq 3)$$

К.5.6 Арасы бетонмен толтырылған шойын тубингтердің екі қабатынан тұратын қаптама есебінің мысалы (К.1-суретті қар.).



1-толтырмасыз қабат; 2, 5-шойын тубингтер арқалықтарының қабаттары; 3- бетон қабаты;

4-құрама қабат (тубингтер қабырғасы және бетон толтырма)

К.1-суреті – Көп қабатты сақиналы қаптама конструкциясы

К.5.7 Сілемдегі топырақтың қасиеттері:

Деформация модулі – 700 МПа;

Пуассон коэффициенті – 0,30;

Көлемдік масса 0,0262 МН/м³;

Сейсмикалық коэффициенті – 0,1;

Тербелістердің басым кезеңі 0,5 с.

Қаптама параметрлері К.1-кестеде берілген.

Қаптама қабатына жүктемелердің параметрлері К.2-кестеде берілген.

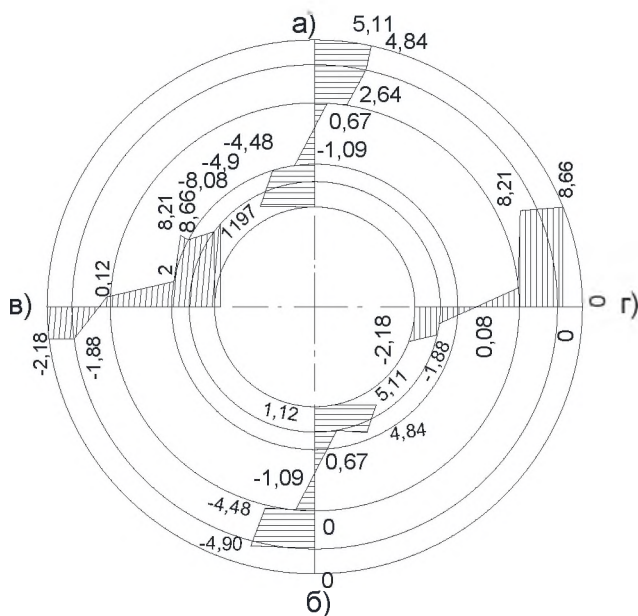
Күмбездің жоғарғы нүктелерін қосушы сызықтағы және қабырғалар мен қабырғааралық толтыру бойынша қималардағы көлденең диаметрдегі кернеулердің эпюралары К.2-суретте көрсетілген.

К.1-кестесі – Қаптама параметрлері

Қабат нөмірі	Радиус, см	Қабырғаның (арматураның) көлденең қимасы ауданының барлық қабатқа қатынасы F_2/F_1	Деформация модулі, МПа		Пуассон коэффициенті
			E_1	E_2	
5	474	0	100000	100000	0,25
4	471	0,1	24000	100000	0,15
3	447	0	24000	24000	0,25
2	377	0	100000	100000	0,25
1	374	0,1	0	100000	0,15
0	350				

К.2-кестесі – Жүктемелер параметрлері

Қабат нөмірі	Жүктеме параметрі, кПа			Ескерту
	P_0	P_2	Q_2	
5	116,56	16,63	-158,41	Сыртқы жүктеме
4	107,22	-7,89	-205,19	
3	88,73	-73,43	-304,66	
2	26,91	-94,99	-204,46	
1	12,08	-45,59	-102,06	



а – қабырғалары бойынша күмбездің нүктелерін қосатын сызықтағы қима; б – сол секілді қабырғааралық толтыру бойынша; в – қабырғалар бойынша көлденең диаметрдегі қима; г – сол секілді қабырғааралық толтыру бойынша («плюс» - сығымдау, «минус» - созу)

К.2-суреті – Көп қабатты қаптама қималары бойынша кернеулердің эпюралары

Л қосымшасы
(ақпараттық)

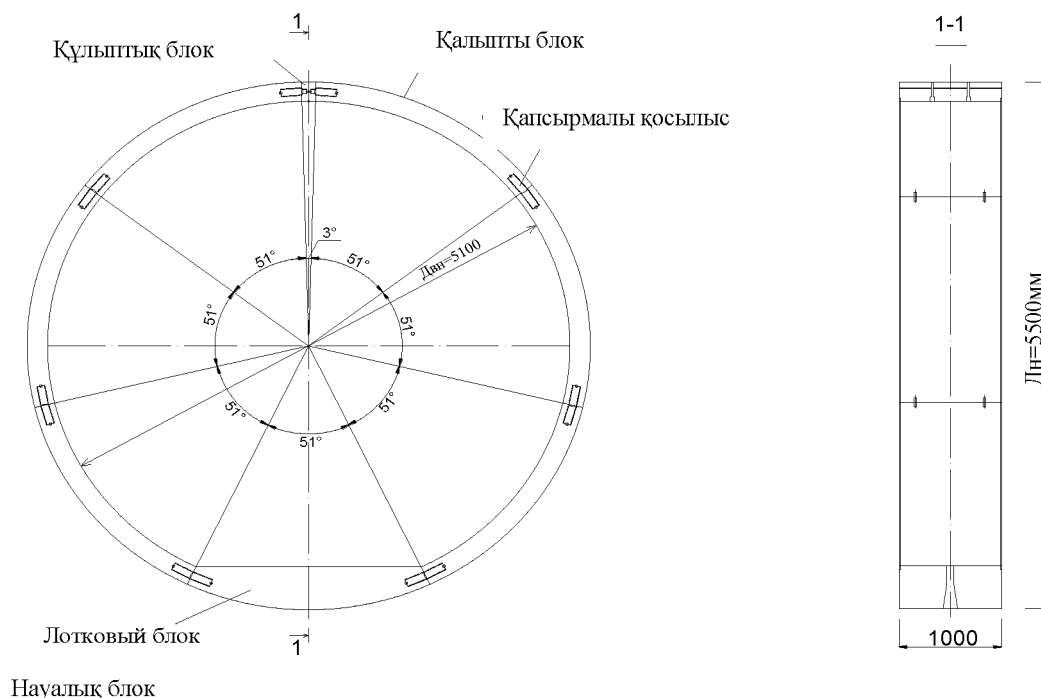
**Құрама темірбетон блоктардан тұратын айналма туннель қаптамасының
пайдалану сенімділігін бағалау**

Л.1 Жалпы нұсқаулар

Л.1.1 Осы Л қосымшасында терең орналасқан айналма туннельдің құрама темірбетон блоктарынан шеңбер пішінді салынған қаптаманың пішінін анықтау әдістемесі берілген. Аспаптық түсірілім нәтижелері бойынша өзгертілген геометриямен қаптаманың тік және көлденең эллипстілігі анықталады.

Жүктемелер әрекетінің негізгі және ерекше үйлесіміне өзгертілген геометриямен қаптама сақинасының есептері жүргізілген. Жүктемелер әрекетінің негізгі және ерекше үйлесіміне есептердің нәтижелері бойынша қаптаманың қалыпты және науалы блоктарындағы ішкі күштер анықталған. Қалыпты және науалы блоктардың көтергіш қабілетін анықтаумен байланысты есептер жүргізілген және өзгерген геометриямен қаптама сақинасының пайдалану сенімділігі бағаланды.

Л.1.2 Л.1-суретте арнайы қапсырмалармен біріктірілген, құрама темірбетон блоктардан тұратын айналма туннельдік қаптама сақинасының жобалық кескіні берілген.

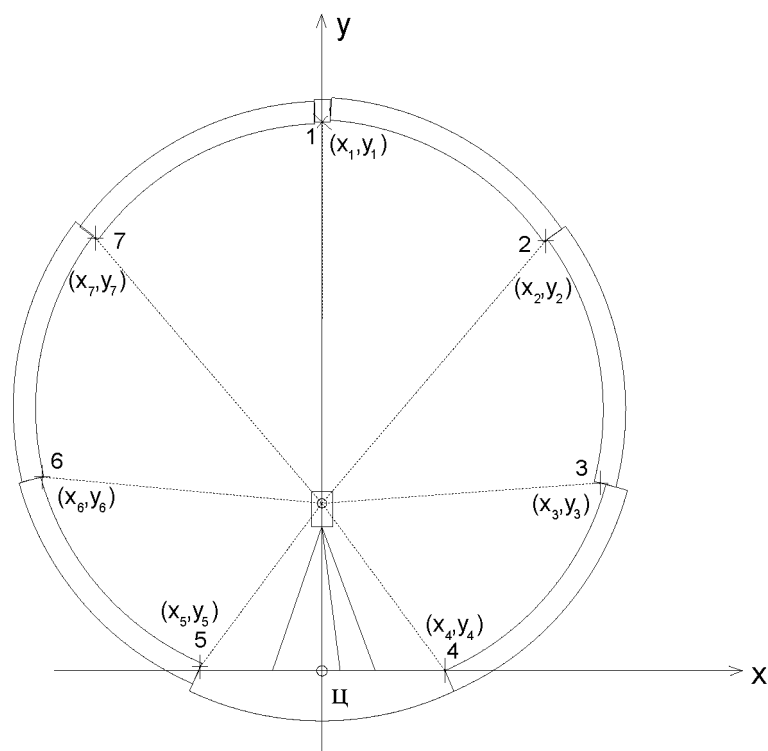


**Л.1-суреті – Құрама темірбетон блоктардан тұратын айналма туннельдік
қаптама сақинасының жобалық кескіні**

Л.2 Қаптама сақинасының радиалды түсірілімі

Л.2.1 Құрама темірбетон блоктардан салынған қаптаманың іс жүзіндегі ішкі кескінін анықтау үшін оның радиалды түсірілімі жүргізіледі. Радиалды түсірілімді электронды тахеометрдің көмегімен орындау ұсынылады. Төмендегі Л.2-кіші бөлімде өзгертілген геометриямен қаптама сақинасының іс жүзіндегі ішкі кескінін анықтау әдістемесі мазмұндалады.

Л.2.2 Л.2-суретте темірбетон сақинаның көлденең қимасы, тахеометрдің орналасқан жері және тахеометрдің (ц) орналасқан жеріне (координаттардың басталуы) қатысты қаптама сақинасы (1÷7) блоктарының (түйіспелерінің) ішкі үйлесу нүктелерінің анықталатын координаттары көрсетілген.



Л.2-суреті – Тахеометрдің төменгі нүктесіне қатысты қаптама блоктары түйіспелерінің координаттарын анықтауға:

1÷7 – блоктардың түйіспелері; ц – тахеометрдің төменгі нүктесі

Л.1-кестеде тахеометрдің төменгі нүктесіне қатысты қаптама блоктары түйіспелерінің координаттары берілген.

Л.1-кестесі – Тахеометрдің төменгі нүктесіне қатысты қаптама блоктарының түйіспелері бойынша деректер

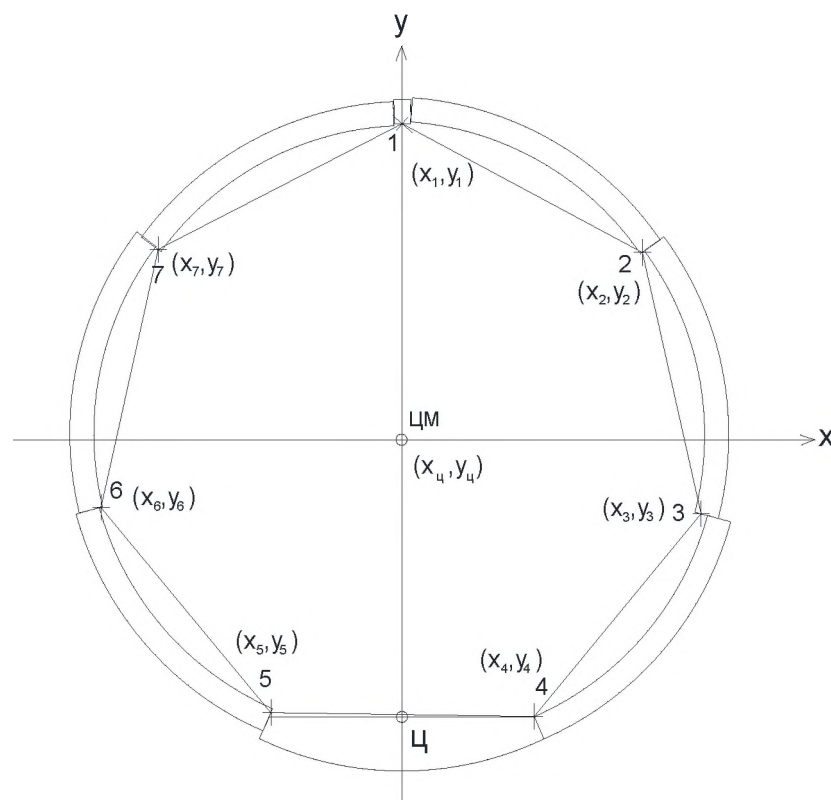
Координата	Тахеометрдің төменгі нүктесіне қатысты түйіспенің координаты, м						
	1	2	3	4	5	6	7
X	0,195	2,149	2,449	0,967	-1,248	-2,500	-1,914
Y	4,601	3,478	1,317	-0,299	-0,140	1,660	3,789

Л.2.3 Тахеометрлік түсірілім нәтижелері бойынша тахеометрдің төменгі нүктесіне қатысты түзілген көпбұрыш орталығының координаттары келесі формулалар бойынша анықталуы мүмкін

$$x_u = \frac{\sum_{i=1}^7 x_i}{7}, \quad y_u = \frac{\sum_{i=1}^7 y_i}{7}, \quad (\text{Л.1})$$

мұнда x_i, y_i – тахеометрдің төменгі нүктесіне қатысты қаптама блоктарының ішкі тоғысу нүктелерінің (түйіспелердің) координаттары.

Л.3-суретте қаптаманың көлденең қимасы, тахеометрдің төменгі нүктесіне қатысты блоктардың (түйіспелердің) ішкі тоғысу нүктелерінің координаттары және көпбұрыш орталығының координаттары көрсетілген.



Л.3-суреті – Тахеометрдің төменгі нүктесіне қатысты қаптама блоктары түйіспелерінің көпбұрыш орталығының координаттарын анықтауға:

цм – көпбұрыш орталығы; ц – тахеометрдің төменгі нүктесі

Л.2-кестеде (Л.1) формуласынан анықталған көпбұрыш орталығының координаттары берілген.

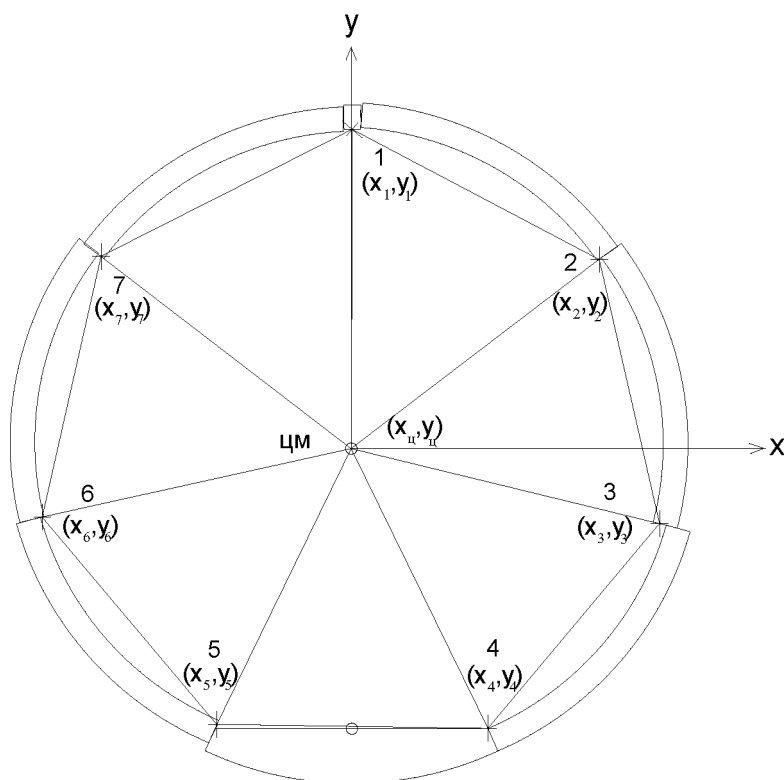
Л.2-кестесі – Қаптама блоктарының түйіспелері көпбұрышының орталығы бойынша деректер

Координат	Тахеометрдің төменгі нүктесіне қатысты блоктар түйіспелерінің көпбұрышы орталығының координаты, м
X _ц	0,010
Y _ц	2,060

Л.2.4 Келесі кезеңде келесі формулалар бойынша көпбұрыш орталығына қатысты қаптама блоктарының ішкі тоғысу (түйіспелер) нүктелерінің координаттары анықталады

$$x_{i,цм} = x_i - x_{ц}, \quad y_{i,цм} = y_i - y_{ц}. \quad (Л.2)$$

Л.2.5 Л.4-суретте көпбұрыш орталығына қатысты қаптама блоктарының анықталатын тоғысу нүктелерінің (түйіспелерінің) координаттары және қаптаманың көлденең қимасы көрсетілген.



Л.4-суреті – Көпбұрыш орталығына қатысты қаптамалар блоктарының түйіспелері координаттарын анықтауға: цм – көпбұрыш орталығы

Л.3-кестеде көпбұрыш орталығына қатысты блоктардың (түйіспелердің) тоғысу нүктелерінің координаттары берілген.

Л.3-кестесі– Көпбұрыш орталығына қатысты қаптама блоктарының түйіспелері бойынша деректер

Координат	Көпбұрыш орталығына қатысты түйіспенің координаты, м						
	1	2	3	4	5	6	7
X	0,181	2,135	2,435	0,953	-1,262	-2,514	-1,928
Y	2,543	1,420	-0,741	-2,357	-2,198	-0,398	1,731

Л.2.6 Л.5-суретте қаптаманың көлденең қимасы, анықталатын радиустар және түйіспелердің аралық бұрыштары көрсетілген.

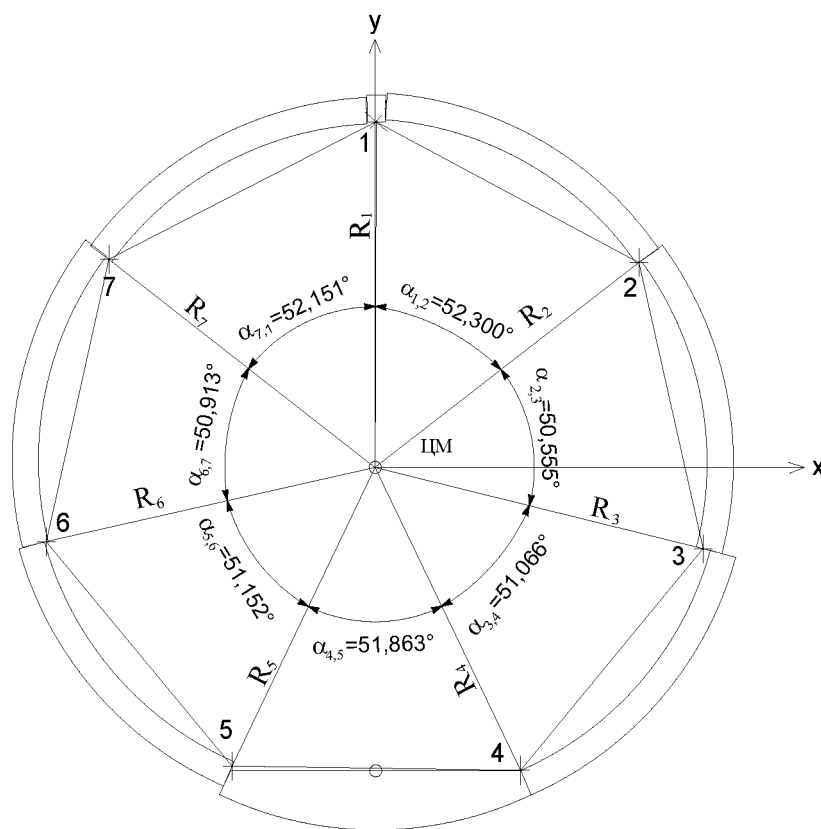
Көпбұрыштың орталығынан қаптама сақинасы блоктарының (түйіспелерінің) ішкі тоғысу нүктелеріне дейінгі радиустар келесі формула бойынша анықталуы мүмкін

$$R_i = \sqrt{(x_{i,oy} - x_y)^2 + (y_{i,oy} - y_y)^2}, \quad (\text{Л.3})$$

мұнда: $x_{i,oy}, y_{i,oy}$ – көпбұрыш орталығына қатысты түйіспелердің координаттары.

Қаптама блоктарының (түйіспелерінің) тоғысу орындарының ішкі нүктелеріне дейін бағытталған радиустар арасындағы бұрыштар келесі формула бойынша анықталуы мүмкін

$$\cos \varphi = \frac{\vec{R}_i \times \vec{R}_{i+1}}{|\vec{R}_i| \times |\vec{R}_{i+1}|} = \frac{(x_{i,oy} - x_y) \cdot (x_{i+1,oy} - x_y) + (y_{i,oy} - y_y) \cdot (y_{i+1,oy} - y_y)}{\sqrt{(x_{i,oy} - x_y)^2 + (y_{i,oy} - y_y)^2} \cdot \sqrt{(x_{i+1,oy} - x_y)^2 + (y_{i+1,oy} - y_y)^2}}, \quad (\text{Л.4})$$



Л.5-сурет і– Қаптама блоктары түйіспелерінің радиустарын және бұрыштарын анықтауға:

$R_1 \div R_7$ – түйіспелердің радиустары, $\alpha_{1,2} \div \alpha_{7,1}$ – түйіспелердің бұрыштары

Л.4-кестеде көпбұрыштың орталығына қатысты қаптама блоктары түйіспелерінің радиустары бойынша деректер берілген.

Л.4-кестесі – Қаптама блоктары түйіспелерінің радиустары бойынша деректер

Қаптама блогының түйіспесі радиусының ұзындығы, м						
R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
2,550	2,564	2,545	2,543	2,534	2,545	2,591

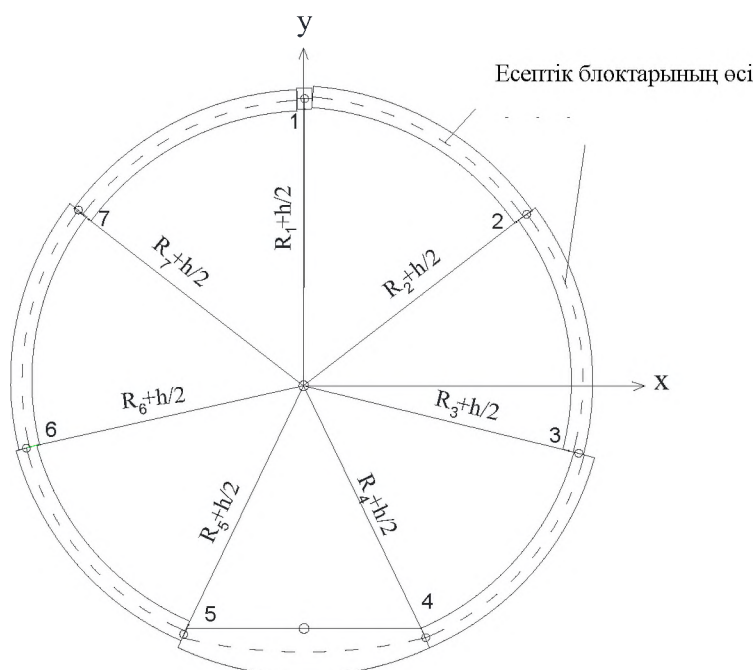
Әрі қарай көпбұрыш орталығынан қаптаманың есептік өсіндегі блоктардың (түйіспелердің) ішкі тоғысу нүктелеріне дейінгі арақашықтық анықталады (Л.6-сурет).

Көпбұрыштың орталығынан қаптама сақинасы блоктарының есептік өсіне дейінгі R'_i арақашықтығы келесі тәуелділіктен анықталады

$$R'_i = R_i + \frac{h}{2}, \quad (\text{Л.5})$$

мұнда h - қаптаманың қалыңдығы.

Қаптама сақинасының есептік өсі болып есептік қималардың бұзылмаған материалының ауырлық орталықтарының геометриялық орны болып саналады.



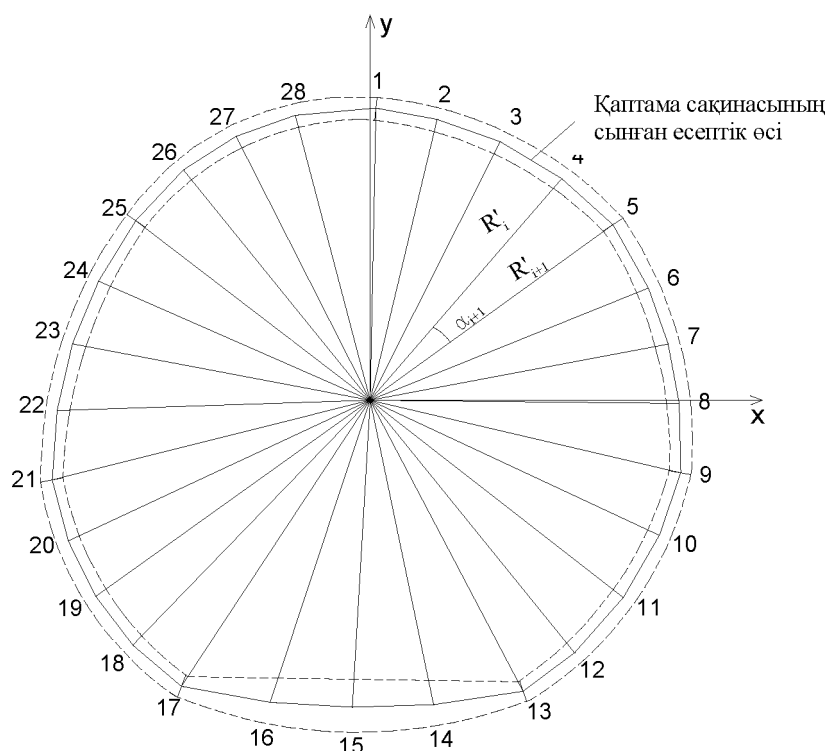
Л.6-суреті – Қаптаманың есептік өсінің қалпын анықтайтын блоктар түйіспелерінің радиустарын анықтауға

Л.2.7 Қаптаманың есептік өсінің қисық сызықты кескіні сынған сызықпен ауыстырылады. Л.7-суретте көпбұрыштың жиырма сегіз шыңымен анықталатын қаптама сақинасының есептік өсінің қалпы көрсетілген.

Осы шыңдардың координаттары келесі тәуелділіктерден анықталады

$$x_i = R'_i \sin \varphi, \quad y_i = R'_i \cos \varphi. \quad (\text{Л.6})$$

мұнда R'_i - орталықтан көпбұрыштың i -ші шыңына дейінгі радиус;
 φ - R'_i және R'_{i+1} радиустары арасындағы аралық бұрыш.



Л.7-суреті – Қаптаманың есептік өсін анықтайтын көпбұрыш шындарының аралық бұрыштарын, радиустарын және координаттарын анықтауға: 1÷28 – көпбұрыш шындары

Л.5-кестеде қаптама сақинасының есептік өсіндегі түйінді нүктелердің аралық бұрыштары, радиустары және координаттары бойынша деректер берілген.

Л.2.8 Өзгертілген геометриямен қаптама кескінін бағалау үшін оның тік және көлденең эллипстігі анықталады. Қаптаманың тік және көлденең эллипстігін анықтау үшін радиалды түсірілім нәтижелері пайдаланылады.

Қаптама сақинасының іс жүзіндегі жоғарғы тік радиусы $R_{ф.в.в}$ және қаптама сақинасының іс жүзіндегі ішкі төменгі тік радиусы $R_{ф.в.н}$ анықталады (Л.8-сурет).

Осы радиустардың жиынтығы қаптама сақинасының іс жүзіндегі ішкі тік диаметрін $D_{ф.в}$ береді

$$D_{ф.в} = R_{ф.в.в} + R_{ф.в.н}, \quad (Л.7)$$

Л.2.9 Өзгертілген геометриямен қаптама сақинасының іс жүзіндегі ішкі тік диаметрінен $D_{ф.в}$ сақинаның жобалық ішкі тік диаметрін $D_{н.в}$ шегергенде, қаптаманың тік эллипстігі анықталады

$$\mathcal{E}_в = D_{ф.в} - D_{н.в}, \quad (Л.8)$$

Радиалды түсірілім нәтижелері бойынша қаптама сақинасының көлденең эллипстігін анықтау үшін қаптама сақинасының іс жүзіндегі ішкі оң көлденең радиусы $R_{ф.з.н}$ және қаптама сақинасының іс жүзіндегі ішкі сол көлденең радиусы $R_{ф.з.л}$ табылады (Л.8-сурет). Осы радиустардың жиынтығы қаптама сақинасының іс жүзіндегі ішкі көлденең диаметрін $D_{ф.з}$ береді.

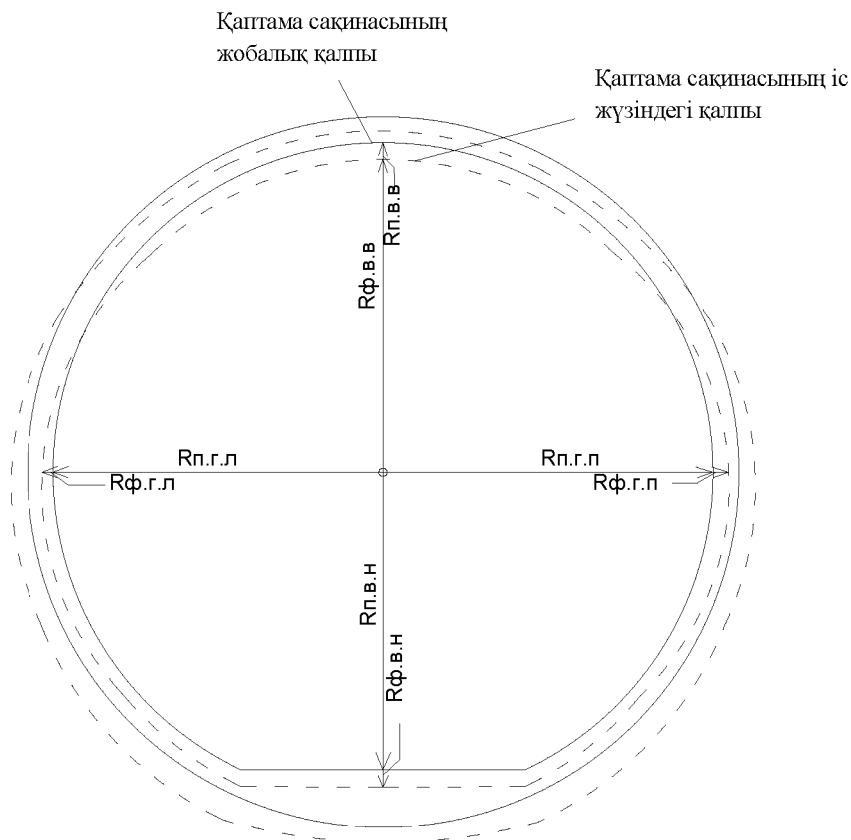
Л.5-кестесі – Қаптама сақинасының есептік өсіне түйінді нүктелердің аралық бұрыштары, радиустары және координаттары бойынша деректер

Қаптама сақинасының есептік өсіне түйінді нүктелер арасындағы аралық бұрыш				Қаптама сақинасының есептік өсіне түйінді нүктенің радиусы		Қаптама сақинасының есептік өсіне түйінді нүктенің координаты, м		
Түйінді нүктелердің нөмірі		$\alpha_{i,i+1}$, градус	$\alpha_{i,i+1}$, радиан	Радиус нөмірі R_i	Радиус ұзындығы R'_i , м	Түйінді нүкте	x	y
У өсі	1	4,077	0,071	R ₁	2,650	1	0,19	2,64
1	2	13,075	0,228	R ₂	2,653	2	0,78	2,54
2	3	13,075	0,228	R ₃	2,657	3	1,34	2,30
3	4	13,075	0,228	R ₄	2,660	4	1,82	1,94
4	5	13,075	0,228	R ₅	2,664	5	2,22	1,48
5	6	12,639	0,221	R ₆	2,659	6	2,48	0,95
6	7	12,639	0,221	R ₇	2,655	7	2,63	0,39
7	8	12,639	0,221	R ₈	2,650	8	2,64	-0,20
8	9	12,639	0,221	R ₉	2,645	9	2,53	-0,77
9	10	12,767	0,223	R ₁₀	2,645	10	2,30	-1,31
10	11	12,767	0,223	R ₁₁	2,644	11	1,95	-1,78
11	12	12,767	0,223	R ₁₂	2,643	12	1,51	-2,17
12	13	12,767	0,223	R ₁₃	2,643	13	0,99	-2,45
13	14	12,966	0,226	R ₁₄	2,543	14	0,40	-2,51
14	15	12,966	0,226	R ₁₅	2,510	15	-0,17	-2,50
15	16	12,966	0,226	R ₁₆	2,543	16	-0,74	-2,43
16	17	12,966	0,226	R ₁₇	2,634	17	-1,31	-2,28
17	18	12,788	0,223	R ₁₈	2,637	18	-1,79	-1,94
18	19	12,788	0,223	R ₁₉	2,640	19	-2,17	-1,50
19	20	12,788	0,223	R ₂₀	2,643	20	-2,45	-0,98
20	21	12,788	0,223	R ₂₁	2,645	21	-2,61	-0,41
21	22	12,728	0,222	R ₂₂	2,657	22	-2,65	0,17
22	23	12,728	0,222	R ₂₃	2,668	23	-2,56	0,76
23	24	12,728	0,222	R ₂₄	2,680	24	-2,34	1,31
24	25	12,728	0,222	R ₂₅	2,691	25	-2,00	1,80
25	26	13,038	0,228	R ₂₆	2,681	26	-1,54	2,19
26	27	13,038	0,228	R ₂₇	2,670	27	-1,00	2,48
27	28	13,038	0,228	R ₂₈	2,660	28	-0,41	2,63
28	1	13,038	0,228	R ₁	2,650	1	0,19	2,64

$$D_{\phi.э} = R_{\phi.э.н} + R_{\phi.э.л}, \quad (Л.9)$$

Қаптама сақинасының іс жүзіндегі ішкі көлденең диаметрінен сақинаның жобалық ішкі көлденең диаметрін $D_{n.э}$ шегерумен қаптама сақинасының көлденең эллипстігі анықталады

$$\Xi_e = D_{\phi.э} - D_{n.э}, \quad (Л.10)$$



$R_{п.в.в}$, $R_{п.в.н}$ – жобалық ішкі радиустар: тік жоғарғы және тік төменгі;
 $R_{п.г.л}$, $R_{п.г.п}$ – жобалық ішкі радиустар: көлденең сол және көлденең оң;
 $R_{ф.в.в}$, $R_{ф.в.н}$ – іс жүзіндегі ішкі радиустар: тік жоғарғы және тік төменгі;
 $R_{ф.г.л}$, $R_{ф.г.п}$ – іс жүзіндегі ішкі радиустар: көлденең сол және көлденең оң.

Л.8-суреті– Қаптама сақинасының тік және көлденең эллипстігін анықтауға тәсіл

Л.2.10 Л.6-кестеде эталонды сақинаның және өзгертілген геометриямен сақинаның эллипстігі бойынша деректер берілген. Өзгертілген геометриямен сақинаның эллипстігі бойынша деректерді талдау келесіні куәландырады:

- тік эллипстік «минус» 16 мм құрайды;
- көлденең эллипстік «плюс» 7 мм құрайды.

Л.6-кестесі – Тік және көлденең эллипстік бойынша деректер

Элементтің атауы	Жобалық ішкі радиус, м				Іс жүзіндегі ішкі радиус, м				Эллипстік, мм	
	Тік жоғарғы, Rп.в.в	Тік төменгі, Rп.в.н	Көлденең оң, Rп.г.п	Көлденең сол, Rп.г.л	Тік жоғарғы, Rф.в.в	Тік төменгі, Rф.в.н	Көлденең оң, Rф.г.п	Көлденең сол, Rф.г.л	тік, Эв	көлденең, Эг
Өзгертілген геометриямен қаптама сақинасы	2,550	2,302	2,550	2,550	2,550	2,286	2,550	2,557	-16	7

Л.3 Жүктеме әсерінің негізгі үйлесіміне өзгертілген геометриямен қаптама сақинасының есебі

Л.3.1 Қаптама сақинасына жүктемелерді анықтау

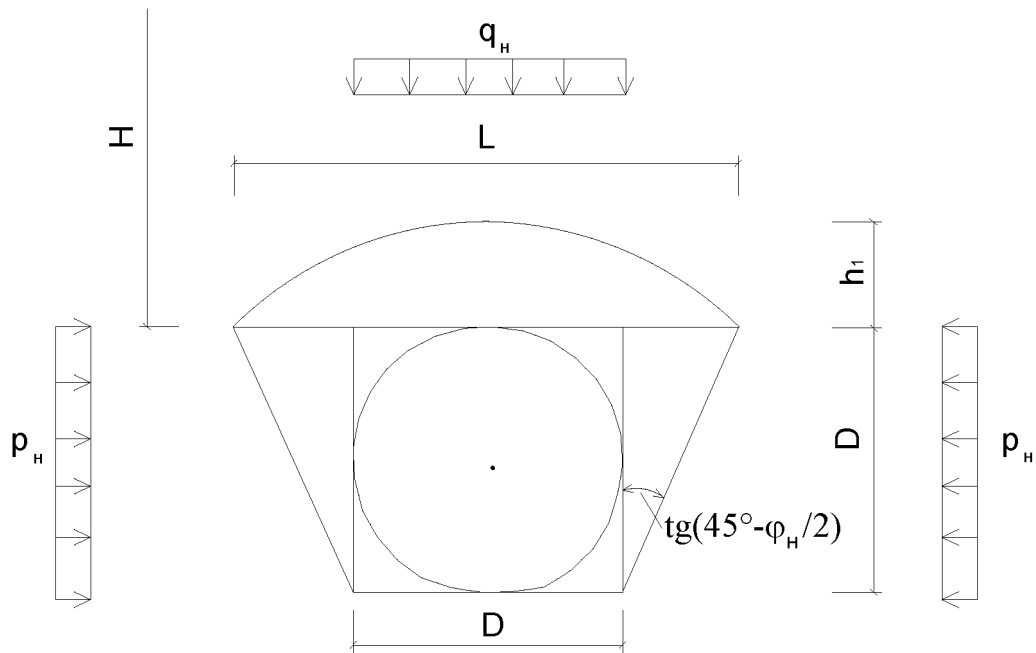
Л.3.1.1 Жүктеме әсерінің негізгі үйлесімінде ені 1,0 м болатын терең орналасқан айналма туннель қаптамасының сақинасына әсер ететін жүктемелерді есептеу әдістемесі мазмұндалады.

Л.3.1.2 Күмбез түзуге қабілетті топырақтарда, терең орналасқан туннельдердің қаптамасын есептеген кезде (күмбездің нүктелерін қосатын сызықтың орналасуы қазбаның үш максималды көлденең өлшемінен кем емес) бұзылу күмбезінен келетін жүктемені ескеру керек.

Л.3.1.3 Күмбез түзу шарттарында айналма туннель қаптамасының жоғарғы нүктесінің үстіндегі бұзылу күмбезінің биіктігі (Л.9-сурет) келесі формула бойынша анықталады

$$h_1 = \frac{L}{2f}, \quad (\text{Л.11})$$

мұнда L – (Л.12) Формула бойынша анықталатын бұзылу күмбезі аралығының шамасы



Л.9 –суреті – Қаптаманың сақинасына тау қысымын анықтауға арналған тәсіл

$$L = D + 2D \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right), \quad (\text{Л.12})$$

мұнда f – Протоdjаконов бойынша жыныс беріктігінің коэффициенті;

D – қаптама сақинасының сыртқы диаметрі;

φ_n - қаптама кимасының деңгейінде топырақтың ішкі үйкелісінің нормативтік бұрышы.

Л.3.1.4 Топырақтың біртекті қалыңдығында күмбез түзу шарттарында біркелкі бөлінген нормативті тік жүктеме келесі формула бойынша анықталады

$$q_n = \gamma_{zp} h_1, \quad (\text{Л.13})$$

мұнда γ_{zp} - топырақтың нормативті тығыздығы;

h_1 - қаптаманың жоғарғы нүктесінің үстіндегі бұзылу күмбезінің биіктігі.

Л.3.1.5 Топырақтың біртекті қалыңдығында күмбез түзілу шарттарында біркелкі бөлінген нормативті көлденең жүктеме келесі формула бойынша анықталады

$$p_n = \gamma_{zp} \cdot (h_1 + 0,5D) \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right), \quad (\text{Л.14})$$

Л.3.1.6 Жүктемелердің негізгі үйлесіміне қаптаманы есептеген кезде қаптаманың меншікті салмағы қаптаманың көлденең диаметрінің проекциясына біркелкі таралған жүктеме түрінде қабылданады.

Л.3.1.7 Беріктігі бойынша есептеген кезде тұрақты жүктемелерге сенімділік коэффициенттері қабылданады:

$\gamma_f = 1,4$ – бұзылу күмбезі топырағының әрекетінен тік жүктеме үшін;

$\gamma_f = 0,8$ – топырақтың әрекетінен көлденең жүктеме үшін;

$\gamma_f = 1,1$ – қаптама блоктарының меншікті салмағы үшін.

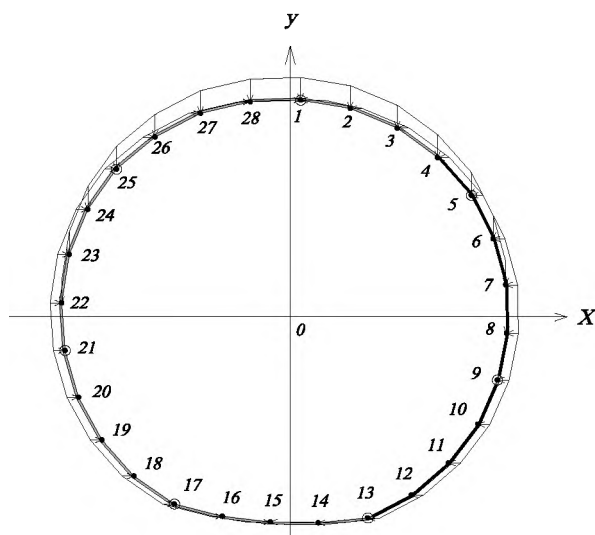
Айналма туннель қаптамасының сақинасына есептік жүктемелер жүктеме бойынша сенімділік коэффициенттеріне нормативтік жүктемелерді көбейтумен анықталады.

Л.3.1.8 Л.7-кестеде топырақтардың физикалық-механикалық сипаттамалары, жүктеме әсерінің негізгі үйлесуінде қаптама сақинасына нормативтік және есептік жүктемелер берілген.

Л.3.1.9 Л.5 және Л.8 Кестелерде қаптама сақинасының есебіне жүктемелер бойынша бастапқы деректер және түйіндердің координаттары берілген, ал Л.10 – Суретте осы жүктемелерді қаптаманың сақинасына салудың есептік тәсілі көрсетілген.

Л.7 –кестесі – Жүктеме әрекетінің негізгі үйлесімінде қаптаманың сақинасына түсетін жүктемедер және бастапқы деректер

Бастапқы деректер		Мәні
Күмбездің нүктелерін қосу сызығының орналасқан тереңдігі, м		30
Топырақтың тығыздығы, $\gamma_{гр}$, МН/м ³		0,0228
Ішкі үйкелу бұрышы φ , градус		41
Беріктік коэффициенті, f		1,20
Бұзылу күмбезінің биіктігі h_1 , м		4,38
Нормативтік жүктеме, кН/м ²	бұзылу күмбезінен тік жүктеме, q_H	99,8
	топырақтың көлденең жүктемесі, P_H	33,7
	қаптаманың меншікті салмағы $q_{H,CB}$	8,5
Есептік жүктеме, кН/м ²	бұзылу күмбезінен тік жүктеме, q_P	139,8
	топырақтың көлденең жүктемесі, P_P	27,0
	қаптаманың меншікті салмағы $q_{P,CB}$	9,4



Л.10-суреті – Қаптама сақинасының есептік тәсілі және оның жүктелуі

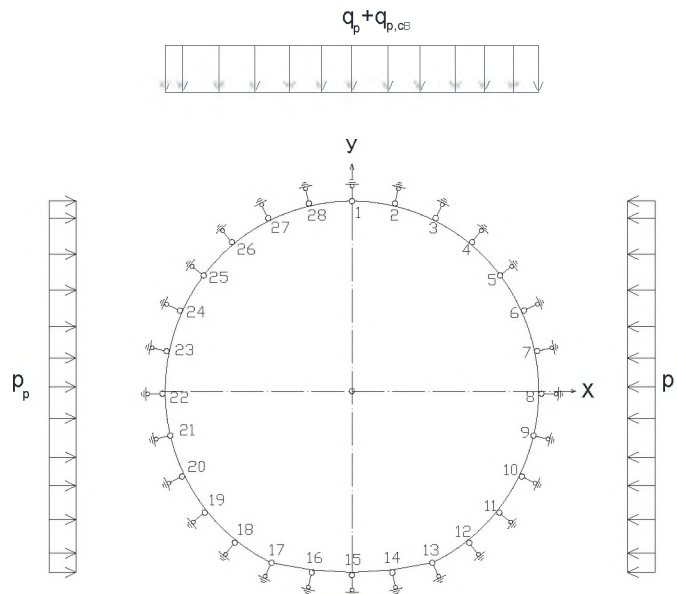
Л.8-кестесі – Жүктемелер әрекетінің негізгі үйлесуіндегі өзгертілген геометриямен қаптама сақинасының есебіне бастапқы деректер

Түйіннің нөмірі		Тік біркелкі бөлінген жүктеме, кН/м	Көлденең біркелкі бөлінген жүктеме, кН/м
элементтің басы	элементтің соңы		
1	2	149,2	27,0
2	3	149,2	27,0
3	4	149,2	27,0
4	5	149,2	27,0
5	6	149,2	27,0
6	7	149,2	27,0
7	8	149,2	27,0
8	9	0	27,0
9	10	0	27,0
10	11	0	27,0
11	12	0	27,0
12	13	0	27,0
13	14	0	27,0
14	15	0	27,0
15	16	0	-27,0
16	17	0	-27,0
17	18	0	-27,0
18	19	0	-27,0
19	20	0	-27,0
20	21	0	-27,0
21	22	0	-27,0
22	23	149,2	-27,0
23	24	149,2	-27,0
24	25	149,2	-27,0
25	26	149,2	-27,0
26	27	149,2	-27,0
27	28	149,2	-27,0
28	1	149,2	-27,0

Л.3.2 Қаптама сақинасындағы күштерді анықтау

Л.3.2.1 Л.11-суретте топырақтың серпінді тойтарысын моделдейтін, жиырма бір тірекпен жиырма сегіз тік сызықты кесінділерден тұратын, көпбұрыш болып табылатын қаптаманың есептік тәсілі берілген. Есептік тәсілдегі қалыпты және науалы блоктар

арасындағы түйіспелер қаптаманың 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25 түйіндерінде топсаларды енгізу арқылы моделденеді.



1, 5, 9, 13, 17, 21, 25 – Топсалы түйіспелермен түйіндер

Л.11-суреті – Жүктемелер әрекетінің негізгі үйлесуіндегі қаптаманың есептік тәсілі

Л.3.2.2 Топырақтың серпінді тойтарысы қаптама сақинасының барлық периметрі бойынша қабылданады. Ірі малтатасты топырақ жағдайында топырақтың серпінді тойтарысының коэффициенті $K=100 \text{ МН/м}^3$ тең қабылданады.

Л.3.2.3 Қаптама сақинасына әсер ететін тік есептік жүктеме тау-кен қысымынан және қаптаманың меншікті қысымынан болатын жүктемелердің жиынтығы болып табылады, ал көлденең есептік жүктеме сонымен қатар тау қысымынан болатын, бірақ тік жүктемеден үлестегі жүктеме болып табылады.

Л.3.2.4 Орындалған есептердің нәтижесі бойынша ауысулар және күштер анықталады (бүгілуші сәттер, жүктеме әрекетінің негізгі үйлесіміндегі қаптама сақинасының жиырма сегіз түйіндеріндегі қалыпты және көлденең күштер (Л.9-кесте).

Л.12-суретте қаптама сақинасының түйіндеріндегі ауысулардың, бүгілуші сәттердің және қалыпты күштердің эпюралары көрсетілген.

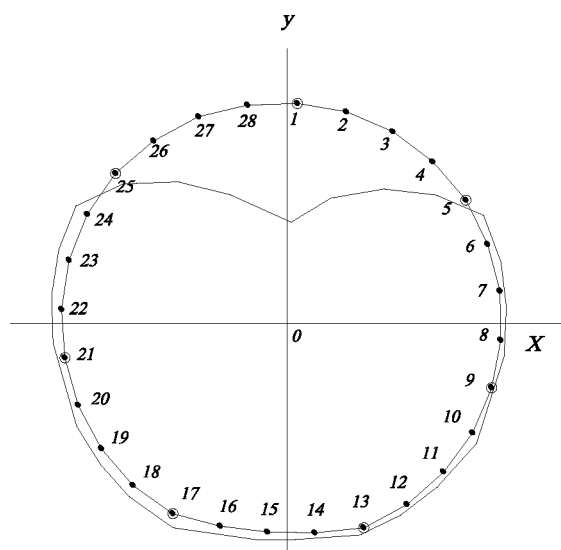
Л.3.2.5 Л.10-кестеде темірбетон блоктардағы максималды есептік күштер және қаптама контурының максималды ауысулары берілген.

ҚР ЕЖ 2.03-107-2013

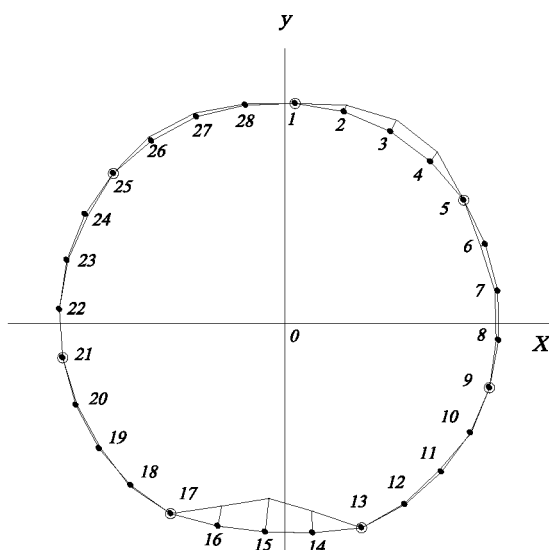
Түйін нөмірі	Элементтің басы және соңы	Бүгуші сәт, кНм		Элементтегі қалыпты күш, кН	Элементтегі көлденең күш, кН	Түйіннің ауысуы		
		элементтің басы	элементтің соңы			бұрылу бұрышы, рад	көлденең, м	тік, м
1	1-2	0	13,0	-350,8	-21,6	0	0,00048	0,01141
2	2-3	-13,0	24,7	-375,6	-19,3	-0,00480	0,00002	0,00850
3	3-4	-24,7	22,9	-409,6	3,1	-0,00421	-0,00103	0,00595
4	4-5	-22,9	0	-442,1	37,6	-0,00349	-0,00239	0,00408
5	5-6	0	-10,0	-464,7	17,0	-0,00314	-0,00385	0,00274
6	6-7	10,0	-3,9	-485,5	-10,6	0,00160	-0,00293	0,00314
7	7-8	3,9	-3,3	-493,4	-1,1	0,00139	-0,00209	0,00332
8	8-9	3,3	0	-494,3	-5,6	0,00129	-0,00130	0,00328
9	9-10	0	0,1	-497,5	-0,1	0,00124	-0,00060	0,00309
10	10-11	-0,1	-4,6	-501,4	8,0	0,00060	-0,00029	0,00291
11	11-12	4,6	-2,2	-507,7	-4,1	0,00053	-0,00005	0,00267
12	12-13	2,2	0	-514,9	-3,7	0,00043	0,00010	0,00243
13	13-14	0	-46,6	-502,6	78,6	0,00040	0,00017	0,00219
14	14-15	46,6	-60,7	-497,4	24,7	0,00023	0,00016	0,00196
15	15-16	60,7	-43,0	-496,9	-30,8	0,00006	0,00013	0,00188
16	16-17	43,0	0	-501,0	-73,0	0,00011	0,00011	0,00189
17	17-18	0	1,3	-510,0	-2,30	-0,00031	0,00011	0,00204
18	18-19	-1,3	-1,4	-503,1	4,80	-0,00050	0,00025	0,00231
19	19-20	1,4	-1,0	-496,5	-0,7	-0,00050	0,00043	0,00254
20	20-21	1,0	0	-492,8	-1,7	-0,00053	0,00067	0,00273
21	21-22	0	0,2	-492,1	-0,4	-0,00055	0,00097	0,00286
22	22-23	-0,2	-1,7	-487,7	3,1	-0,00116	0,00164	0,00295
23	23-24	1,7	-4,1	-471,2	4,1	-0,00118	0,00234	0,00290
24	24-25	4,1	0	-444,1	-6,8	-0,00127	0,00303	0,00267
25	25-26	0	9,2	-414,6	-15,3	-0,00133	0,00369	0,00227
26	26-27	-9,2	8,2	-381,5	1,6	0,00392	0,00223	0,00405
27	27-28	-8,2	1,9	-354,8	10,5	0,00419	0,00109	0,00626
28	28-1	-1,9	0	-343,5	3,1	0,00434	0,00049	0,00880

Л.9-кестесі – Қаптама сақинасы түйіндерінің ауысулары және элементтердегі ішкі күштер

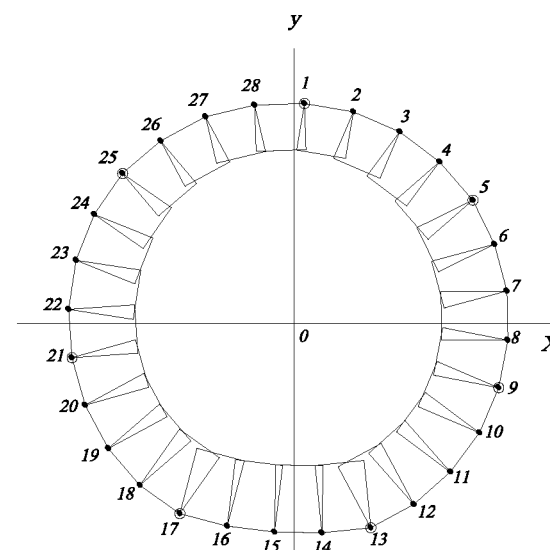
Контурға қалыптылық бойынша ауысулар



Бүгілуші сәттер



Қалыпты күштер



Л.12-суреті – Жүктеме әрекетінің негізгі үйлесімінде қаптама сақинасын есептеу нәтижелері

Л.10-кестесі – Жүктеме әрекетінің негізгі үйлесімі кезіндегі қаптама сақинасындағы максималды есептік күштер және ауысулар

Сақинаның типі	Қалыпты блок			Қалыпты блок			Науалық блок			Қаптама контурының максималды ауысуы, мм		
	макс. теріс бүгуші сәт, -М, кН·м	қалыпты күш, N, кН	қима нөмірі	макс. оң бүгуші сәт, +М, кН·м	қалыпты күш, N, кН	қима нөмірі	макс. теріс бүгуші сәт, -М, кН·м	қалыпты күш, N, кН	қима нөмірі	тік	Диаметр гориз. деңгейінде топыраққа көлденең	
										күмбездің шөгуі	сол жақ	оң жақ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Өзгертілген геометриямен сақина	-10,0	-464,7	6	24,70	-375,60	3	-60,70	-497,40	15	11,4	1,64	1,3

Л.4 Жүктеме әсерінің негізгі үйлесіміне өзгертілген геометриямен қаптама сақинасының есебі

Л.4.1 Қаптама сақинасына жүктемелерді анықтау

Л.4.1.1 Осы мысалда жүктеме әсерінің ерекше үйлесімінде туннельдік қаптама сақинасының есебі тұрақты және сейсмикалық жүктемелердің әсеріне жүргізіледі.

Л.4.1.2 Жүктеме әсерінің ерекше үйлесіміне терең орналасқан айналма туннель қаптамасының сақинасын есептеген кезде мысал ретінде келесі бастапқы деректер қабылданады:

1. Құрылыс алаңқайының сейсмикалығы - 9 балл;
2. Туннель қаптамасының темірбетон сақинасының есептік сейсмикалығы - 9 балл;
3. Топырақ табаны ретінде сейсмикалық қасиеттері бойынша II санатқа ие, ірі малтатасты дымқылдығы төмен топырақ қабылданады;
4. Бойлық сығымдалу толқындарының таралу жылдамдығы $C_1=1150$ м/сек;
5. Көлденең жылжу толқындарының таралу жылдамдығы $C_2=700$ м/сек;
6. Жыныс бөлшектері тербелісінің басым кезеңі $T_0=0,5$ сек;
7. Топырақтың Пуассон коэффициенті $\nu_0=0,27$;
8. Сейсмикалығы 9 балл болатын құрылыс алаңқайы үшін сейсмикалық коэффициенті (сейсмикалық қасиеттер бойынша II санатты топырақ) $k_c=0,1$ болып қабылданады;
9. Сейсмикалық әсерлерді ескере отырып қаптама сақинасын есептегені кездегі n_c үйлесу коэффициенті $n_c=1$.

Л.4.1.3 Пішіні шеңберге жақын болатын қаптаманың сақинасы үшін жеңілдету мақсатында, осы мысалда сейсмикалық толқындардың тік және көлденең түсуі кезіндегі есеп орындалады.

Л.13 – Суретте бойлық (сығымдау) және көлденең (жылжыту) сейсмикалық толқындарының қаптама сақинасына күштік әсерінің төрт нұсқасы көрсетілген.

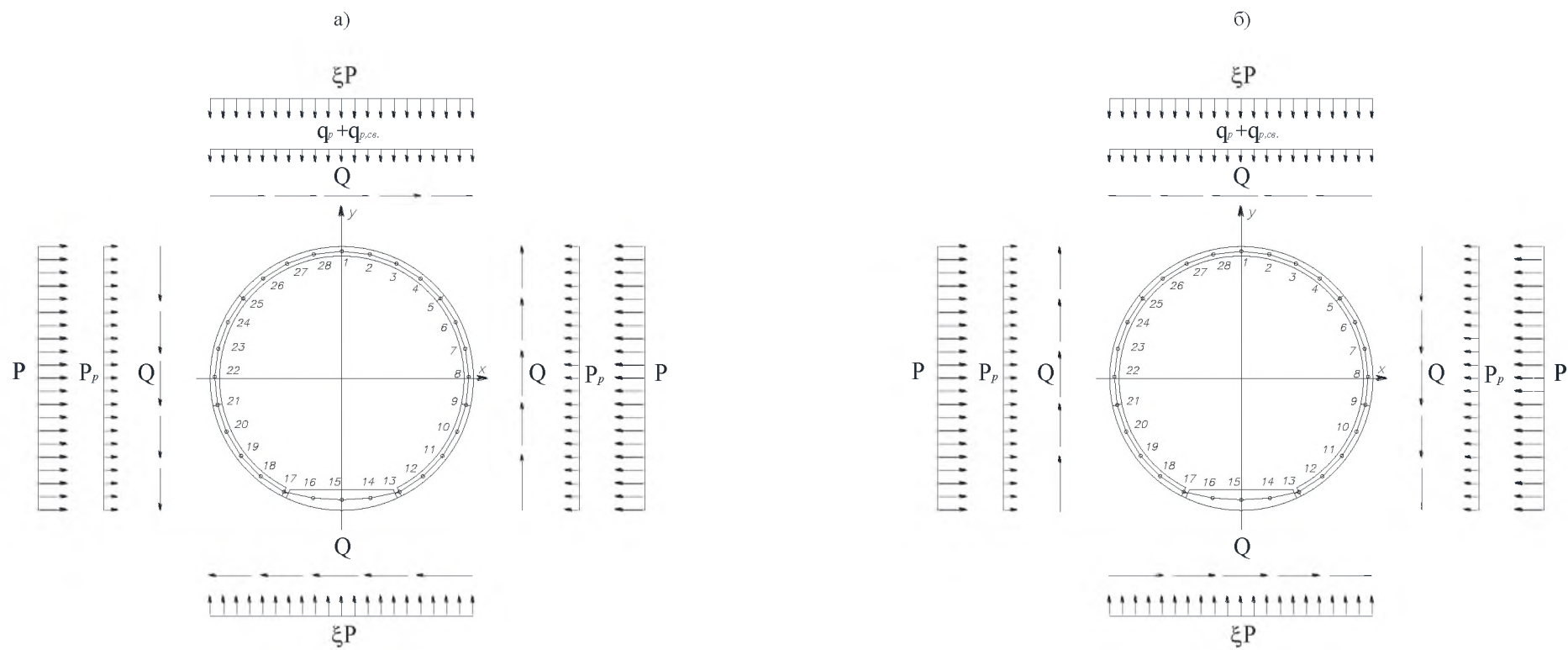
Л.4.1.4 Нығайтылған саңылаудан тұратын ортадағы сейсмикалық әсерлер кезінде туындайтын кернеулі жағдай, осы ережелер жинағының 5.2.17 сәйкес, кернеулермен шексіздікке екі өстік сығымдау және жылжытуды ескере отырып анықталады

$$P = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma_{FP} C_1 T_0, \quad \xi = \frac{\nu_0}{1 - \nu_0}, \quad (\text{Л.15})$$

$$Q = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma_{FP} C_2 T_0. \quad (\text{Л.16})$$

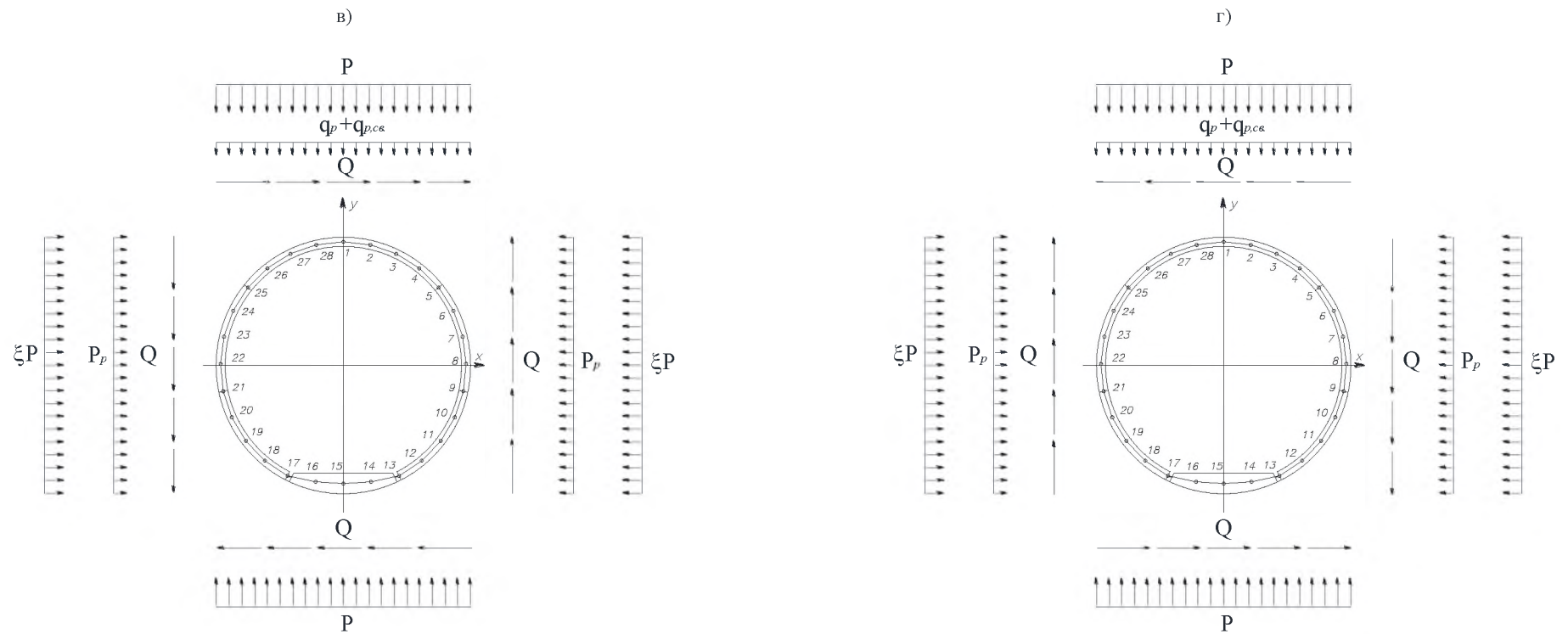
Л.4.1.5 Сығымдаудың бойлық толқындарының және жылжытудың көлденең толқындарының әртүрлі әсер ету комбинацияларында туннель қаптамасындағы ең қолайсыз кернеулі жағдайды анықтау үшін тау қысымының және қаптаманың меншікті салмағының әсері бірізгілікте ескеріледі.

Сейсмикалық толқындардың көлденең түсуі



13-суреті – Жүктемелер әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптама сакинасының есептік тәсілдері

Сейсмикалық толқындардың тігінен түсуі



13-сурет (жалғасы)

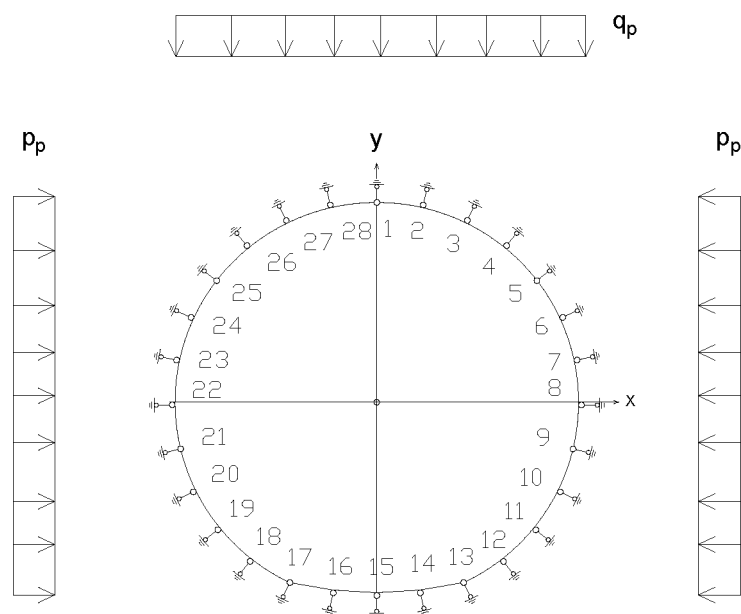
Л.4.1.6 Л.14-суретте есептік тәсіл көрсетілген, соған сәйкес қаптаманың сақинасына әсер ететін есептік тұрақты тік және көлденең жүктемелер анықталады.

Л.4.1.7 Есептік тұрақты тік q_p жүктеме $\gamma_f=1,0$ тең болатын жүктеме бойынша сенімділік коэффициенттерімен қаптаманың меншікті салмағынан $q_{н,с,б}$ және топырақтың қысымынан q_n (тау-кен қысымы) болатын нормативтік жүктемелер жиынтығына тең қабылданады

$$q = q_n + q_{н,с,б}, \quad (Л.17)$$

Есептік көлденең P_p жүктеме $\gamma_f=1,0$ тең болатын жүктеме бойынша сенімділік коэффициентімен топырақ әсерінен P_n болатын нормативтік көлденең жүктемеге тең қабылданады

$$P_p = P_n, \quad (Л.18)$$



Л.14-суреті – Тау-кен қысымының және қаптаманың меншікті салмағының әсер етуінде қаптамадағы кернеулі жағдайды анықтауға есептік тәсіл

Л.4.1.8 Л.11-кестеде жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптаманың сақинасына есептік жүктемелер берілген. Қаптама сақинасы орналасқан топырақтың физикалық-механикалық сипаттамалары Л.7-кестеде берілген.

Л.4.1.9 Л.5, Л.12 және Л.13-кестелерде қаптама сақинасының есебіне жүктемелер бойынша бастапқы деректер және түйіндердің координаттары берілген, ал Л.13-суретте рсы жүктемелердің қаптама сақинасына түсуінің есептік тәсілі көрсетілген.

Л.11-кестесі – Жүктеме әрекетінің ерекше үйлесуі кезіндегі қаптама сақинасына түсетін жүктемелер және бастапқы деректер

Сақинаның типі	Сақинаның ішкі/сыртқы диаметрі, м	Күмбез нүктелерін қосу сызығының тереңдігі, м	Есептік тік жүктеме, кН/м ²		Топырақта н болатын есептік көлденең жүктеме, Р _p кН/м ² ,	Сейсмикалық сығымдау толқынының әсері, кН/м ²		Сейсмикалық жылжыту толқынының әсері, кН/м ²
			бұзылу күмбезінен, q _p	қаптама салмағынан, q _{p,св.}		Р	ξР	Q
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Қаптама сақинасы	5,1/5,5	30	99,8	8,50	33,70	208,0	77,2	127,1

Л.12-кестесі – а) және б) есептік тәсілдерінде жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптама сақинасының есебіне бастапқы деректер

Түйін нөмірі		а) есептік тәсілінде (13-суретті қ.)		б) есептік тәсілінде (13-суретті қ.)	
		тігінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м	көлденеңінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м	тігінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м	көлденеңінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м
элемент басы	элемент соңы				
1	2	58,4	115,4	312,6	369,6
2	3	58,4	115,4	312,6	369,6
3	4	58,4	115,4	312,6	369,6
4	5	58,4	115,4	312,6	369,6
5	6	58,4	115,4	312,6	369,6
6	7	58,4	115,4	312,6	369,6
7	8	58,4	115,4	312,6	369,6
8	9	58,4	115,4	49,9	115,4
9	10	-204,3	369,6	49,9	115,4
10	11	-204,3	369,6	49,9	115,4
11	12	-204,3	369,6	49,9	115,4
12	13	-204,3	369,6	49,9	115,4
13	14	-204,3	369,6	49,9	115,4
14	15	-204,3	369,6	49,9	115,4
15	16	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
16	17	49,9	-115,4	-204,3	-369,6

Л.12-кестесі – а) және б) есептік тәсілдерінде жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптама сақинасының есебіне бастапқы деректер (жалғасы)

Түйін нөмірі		а) есептік тәсілінде (13-суретті қ.)		б) есептік тәсілінде (13-суретті қ.)	
элемент басы	элемент соңы	тігінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м	көлденеңінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м	тігінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м	көлденеңінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м
17	18	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
18	19	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
19	20	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
20	21	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
21	22	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
22	23	312,6	-369,6	58,4	-115,4
23	24	312,6	-369,6	58,4	-115,4
24	25	312,6	-369,6	58,4	-115,4
25	26	312,6	-369,6	58,4	-115,4
26	27	312,6	-369,6	58,4	-115,4
27	28	312,6	-369,6	58,4	-115,4
28	1	312,6	-369,6	58,4	-115,4

Л.13-кестесі – в) және г) есептік тәсілдерінде жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптама сақинасының есебіне бастапқы деректер

Түйін нөмірі		в) есептік тәсілінде (13-суретті қ.)		г) есептік тәсілінде (13-суретті қ.)	
элемент басы	элемент соңы	тігінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м	көлденеңінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м	тігінен біркелкі таралған жүктеме, кН /м	көлденеңінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м
1	2	444,2	238,0	190,0	-16,2
2	3	444,2	238,0	190,0	-16,2
3	4	444,2	238,0	190,0	-16,2
4	5	444,2	238,0	190,0	-16,2
5	6	444,2	238,0	190,0	-16,2
6	7	444,2	238,0	190,0	-16,2
7	8	444,2	238,0	190,0	-16,2
8	9	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
9	10	-81,7	-16,2	-335,9	238,0

Л.13-кестесі – в) және г) есептік тәсілдерінде жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптама сақинасының есебіне бастапқы деректер (жалғасы)

Түйін нөмірі		в) есептік тәсілінде (13-суретті қ.)		г) есептік тәсілінде (13-суретті қ.)	
элемент басы	элемент соңы	тігінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м	көлденеңінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м	тігінен біркелкі таралған жүктеме, кН /м	көлденеңінен біркелкі таралған жүктеме, кН/м
10	11	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
11	12	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
12	13	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
13	14	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
14	15	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
15	16	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
16	17	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
17	18	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
18	19	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
19	20	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
20	21	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
21	22	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
22	23	190,0	16,2	444,2	-238,0
23	24	190,0	16,2	444,2	-238,0
24	25	190,0	16,2	444,2	-238,0
25	26	190,0	16,2	444,2	-238,0
26	27	190,0	16,2	444,2	-238,0
27	28	190,0	16,2	444,2	-238,0
28	1	190,0	16,2	444,2	-238,0

Л.4.2 Қаптама сақинасындағы күштердің анықтамасы

Л.4.2.1 Орындалған есептердің нәтижелері бойынша жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптама сақинасындағы ауысулар және ішкі күштер анықталған.

Л.14÷Л.17-кестелерде қаптама түйіндерінің ауысулары, бұгуші сәттер, жүктеме әсерлерінің а), б), в) және г) есептік тәсілдерінде қаптама сақинасының 1÷28 түйіндеріндегі қалыпты және көлденең күштер бойынша деректер берілген.

Л.15÷Л.18-суреттерде Л.14÷Л.17-кестелерде берілген деректер бойынша қаптама сақинасының элементтеріндегі қалыпты күштердің және бұгуші сәттердің эпюралары берілген.

Л.4.2.2 Л.18-кестеде қаптама блоктарындағы ең төменгі есептік күштер және қаптама контурының ең жоғары ауысулары бойынша деректер берілген.

Л.14-кестесі - а) есептік тәсілінде қаптама сакинасы түйіндерінің ауысуы және элементтердегі ішкі күштер

Түйін нөмірі	Элементтің басы және соңы	Бүгілуші сәт, кНм		Элементтегі қалыпты күш, кН	Элементтегі көлденең күш, кН	Түйіннің ауысуы		
		элементтің басы	элементтің соңы			бұрылу бұрышы, рад	көлденең, м	тік, м
1	1-2	0	6,4	-895,5	-10,6	0	-0,00110	-0,00006
2	2-3	-6,4	0,5	-877,9	9,6	0,00024	-0,00099	0,00003
3	3-4	-0,5	-5,1	-853,9	9,4	0,00035	-0,00083	0,00017
4	4-5	5,1	0	-832,0	8,4	0,00028	-0,00065	0,00027
5	5-6	0	-2,9	-811,8	4,9	0,00020	-0,00049	0,00030
6	6-7	2,9	15,9	-801,6	-32,3	0,00017	-0,00034	0,00028
7	7-8	-15,9	15,4	-798,4	0,8	0,00036	-0,00020	0,00023
8	8-9	-15,4	0	-796,8	26,5	0,00083	0,00015	0,00016
9	9-10	0	5,2	-821,8	-8,8	0,00105	0,00070	-0,00002
10	10-11	-5,2	5,4	-864,8	-0,3	-0,00047	0,00038	0,00002
11	11-12	-5,4	-0,7	-912,1	10,3	-0,00031	0,00015	0,00009
12	12-13	0,7	0	-956,2	-1,2	-0,00024	-0,00002	0,00014
13	13-14	0	-56,5	-967,0	95,3	-0,00025	-0,00017	0,00023
14	14-15	56,5	-61,3	-969,4	8,3	-0,00003	-0,00023	0,00013
15	15-16	61,3	-39,0	-972,3	-38,7	-0,00022	-0,00028	0,00020
16	16-17	39,0	0	-962,3	-66,2	-0,00038	-0,00030	0,00038
17	17-18	0	-2,7	-946,7	4,6	-0,00056	-0,00029	0,00068
18	18-19	2,7	-3,9	-904,6	2,0	-0,00014	-0,00032	0,00079
19	19-20	3,9	-2,1	-865,9	-3,0	-0,00024	-0,00030	0,00093
20	20-21	2,1	0	-840,4	-3,5	-0,00033	-0,00019	0,00109
21	21-22	0	5,7	-833,0	-9,9	-0,00036	-0,00002	0,00122
22	22-23	-5,7	-11,7	-821,7	29,2	0,00138	-0,00079	0,00125
23	23-24	11,7	-12,5	-826,3	1,5	0,00129	-0,00159	0,00146
24	24-25	12,5	0	-843,1	-21,0	0,00093	-0,00218	0,00178
25	25-26	0	2,0	-863,2	-3,3	0,00074	-0,00252	0,00212
26	26-27	-2,0	14,4	-881,6	-20,1	-0,00142	-0,00189	0,00152
27	27-28	-14,4	13,1	-895,6	2,1	-0,00117	-0,00143	0,00084
28	28-1	-13,1	0	-897,6	21,8	-0,00075	-0,00120	0,00030

Л.15-кестесі - б) есептік тәсілінде қаптама сақинасы түйіндерінің ауысуы және элементтердегі ішкі күштер

Түйін нөмірі	Элементтің басы және соңы	Бүгілуші сәт, кНм		Элементтегі қалыпты күш, кН	Элементтегі көлденең күш, кН	Түйіннің ауысуы		
		элементтің басы	элементтің соңы			бұрылу бұрышы, рад	көлденең, м	тік, м
1	1-2	0	17,8	-931,7	-29,8	0	0,00103	-0,00025
2	2-3	-17,8	17,9	-925,7	-0,2	0,00073	0,00118	0,00006
3	3-4	-17,9	4,7	-908,3	22,1	0,00128	0,00151	0,00059
4	4-5	-4,7	0	-887,8	7,7	0,00163	0,00212	0,00125
5	5-6	0	-15,2	-868,1	25,7	0,00170	0,00295	0,00185
6	6-7	15,2	-4,6	-856,6	-18,3	-0,00117	0,00245	0,00151
7	7-8	4,6	-9,0	-856,9	-23,1	-0,00146	0,00172	0,00123
8	8-9	-9,0	0	-874,4	15,5	-0,00139	0,00087	0,00113
9	9-10	0	-0,9	-891,8	1,5	-0,00126	0,00011	0,00119
10	10-11	0,9	-6,6	-923,9	9,8	0,00034	0,00026	0,00102
11	11-12	6,6	-5,5	-966,1	-1,9	0,00023	0,00035	0,00084
12	12-13	5,5	0	-1007,6	-9,3	0,00005	0,00033	0,00072
13	13-14	0	-47,9	-1010,8	80,8	-0,00003	0,00024	0,00067
14	14-15	47,9	-65,7	-1009,2	31,2	0,00038	0,00021	0,00035
15	15-16	65,7	-54,7	-999,0	-19,1	0,00020	0,00016	0,00018
16	16-17	54,7	0	-988,3	-92,8	0	0,00010	0,00013
17	17-18	0	9,9	-971,8	-16,8	-0,00025	0,00006	0,00024
18	18-19	-9,9	8,8	-927,3	1,8	0,00031	-0,00009	0,00019
19	19-20	-8,8	0,2	-880,2	14,5	0,00059	-0,00035	0,00009
20	20-21	-0,2	0	-844,6	0,4	0,00072	-0,00074	-0,00002
21	21-22	0	24,0	-832,6	-41,3	0,00072	-0,00117	-0,00005
22	22-23	-24,0	22,7	-844,2	2,2	-0,00122	-0,00033	0,00009
23	23-24	-22,7	1,4	-849,6	36,0	-0,00052	0,00019	0,00009
24	24-25	-1,4	0	-861,4	2,3	-0,00016	0,00038	0,00011
25	25-26	0	-5,9	-881,1	9,8	-0,00014	0,00050	0,00013
26	26-27	5,9	0,7	-901,1	-10,8	-0,00024	0,00064	0,00011
27	27-28	-0,7	5,5	-922,0	-7,9	-0,00032	0,00080	-0,00001
28	28-1	-5,5	0	-934,0	9,2	-0,00022	0,00094	-0,00015

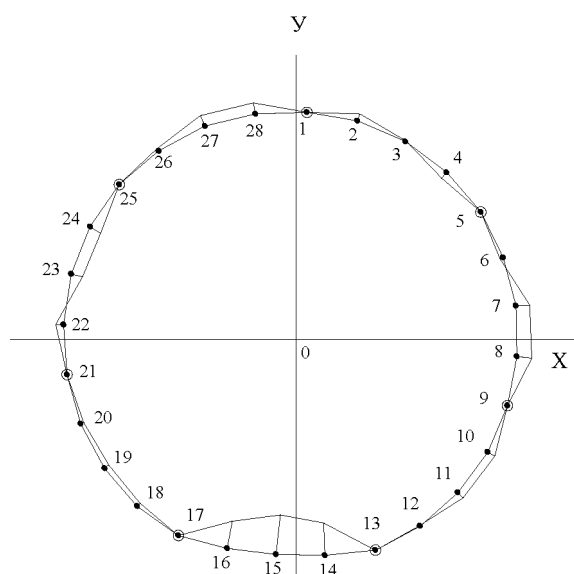
Л.16-кестесі - в) есептік тәсілінде қаптама сақинасы түйіндерінің ауысуы және элементтердегі ішкі күштер

Түйін нөмірі	Элементтің басы және соңы	Бүгілуші сәт, кНм		Элементтегі қалыпты күш, кН	Элементтегі көлденең күш, кН	Түйіннің ауысуы		
		элементтің басы	элементтің соңы			бұрылу бұрышы, рад	көлденең, м	тік, м
1	1-2	0	-38,5	-813,2	64,4	0	0,00112	0,00424
2	2-3	38,5	-40,3	-838,8	2,8	-0,00034	0,00121	0,00425
3	3-4	40,3	-24,3	-895,8	-26,6	-0,00156	0,00106	0,00369
4	4-5	24,3	0	-964,9	-39,8	-0,00254	0,00038	0,00263
5	5-6	0	-2,2	-1022,5	3,7	-0,00291	-0,00084	0,00144
6	6-7	2,2	1,1	-1056,9	-5,7	0,00035	-0,00059	0,00144
7	7-8	-1,1	-3,5	-1060,3	7,9	0,00034	-0,00038	0,00139
8	8-9	3,5	0	-1055,7	-6,1	0,00030	-0,00018	0,00129
9	9-10	0	1,3	-1033,2	-2,2	0,00025	-0,00005	0,00116
10	10-11	-1,3	-5,9	-999,7	12,4	0,00040	0,00012	0,00098
11	11-12	5,9	-4,9	-965,4	-1,7	0,00033	0,00024	0,00077
12	12-13	4,9	0	-935,1	-8,4	0,00016	0,00026	0,00060
13	13-14	0	-45,0	-897,3	75,8	0,00009	0,00021	0,00049
14	14-15	45,0	-62,4	-888,2	30,5	0,00036	0,00018	0,00019
15	15-16	62,4	-52,6	-887,2	-17,0	0,00019	0,00014	0,00003
16	16-17	52,6	0	-904,8	-8,93	0	0,00009	-0,00002
17	17-18	0	-1,2	-942,5	2,1	-0,00024	0,00005	0,00008
18	18-19	1,2	-2,5	-971,6	2,3	-0,00005	0	0,00015
19	19-20	2,5	-0,5	-999,9	-3,5	-0,00010	-0,00004	0,00025
20	20-21	0,5	0	-1023,0	-0,8	-0,00015	-0,00002	0,00038
21	21-22	0	1,7	-1036,3	-2,9	-0,00015	0,00004	0,00050
22	22-23	-1,7	3,6	-1042,1	-3,2	-0,00046	0,00031	0,00062
23	23-24	-3,6	3,9	-1016,4	12,8	-0,00038	0,00058	0,00069
24	24-25	3,9	0	-972,1	-6,6	-0,00039	0,00081	0,00070
25	25-26	0	14,1	-926,5	-23,3	-0,00044	0,00108	0,00064
26	26-27	-14,1	72,2	-889,7	-94,8	-0,00026	0,00131	0,00051
27	27-28	-72,2	61,1	-856,7	18,1	0,00108	0,00131	0,00070
28	28-1	-61,1	0	-826,3	101,9	0,00314	0,00108	0,00198

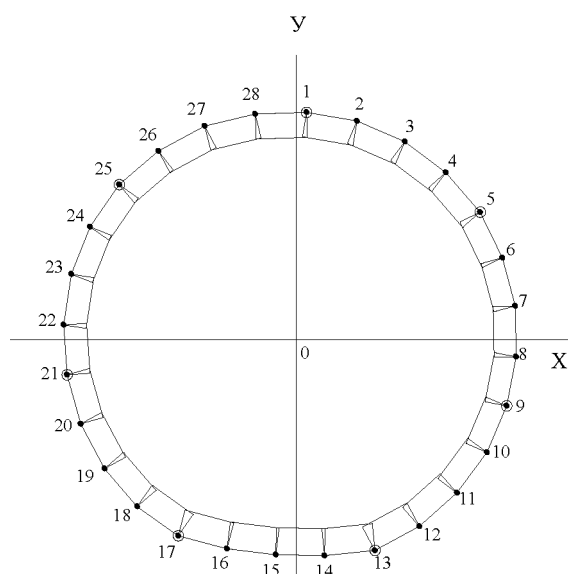
Л.17-кестесі - г) есептік тәсілінде қаптама сақинасы түйіндерінің ауысуы және элементтердегі ішкі күштер

Түйін нөмірі	Элементтің басы және соңы	Бүгілуші сәт, кНм		Элементтегі қалыпты күш, кН	Элементтегі көлденең күш, кН	Түйіннің ауысуы		
		элементтің басы	элементтің соңы			бұрылу бұрышы, рад	көлденең, м	тік, м
1	1-2	0	67,3	-875,6	-112,4	0	-0,00071	0,00415
2	2-3	-67,3	69,1	-923,1	-3,0	-0,00299	-0,00099	0,00197
3	3-4	-69,1	11,7	-960,9	95,7	-0,00088	-0,00137	0,00084
4	4-5	-11,7	0	-1000,7	19,2	0,00034	-0,00133	0,00073
5	5-6	0	-6,8	-1041,4	11,4	0,00052	-0,00105	0,00083
6	6-7	6,8	7,2	-1076,6	-24,0	0,00040	-0,00076	0,00086
7	7-8	-7,2	-0,9	-1086,4	13,7	0,00041	-0,00052	0,00082
8	8-9	0,9	0	-1068,9	-1,6	0,00050	-0,00024	0,00071
9	9-10	0	1,7	-1049,7	-2,9	0,00049	0,00002	0,00055
10	10-11	-1,7	-5,2	-1020,5	11,7	0,00021	0,00008	0,00042
11	11-12	5,2	-4,1	-989,2	-1,8	0,00016	0,00012	0,00026
12	12-13	4,1	0	-961,8	-7,0	0,00002	0,00008	0,00016
13	13-14	0	-59,3	-926,5	100,1	-0,00004	-0,00002	0,00013
14	14-15	59,3	-64,5	-920,3	9,1	0	-0,00007	0
15	15-16	64,5	-41,2	-932,2	-40,6	-0,00019	-0,00011	0,00006
16	16-17	41,2	0	-950,6	-69,9	-0,00036	-0,00013	0,00022
17	17-18	0	-2,7	-990,8	4,6	-0,00055	-0,00012	0,00051
18	18-19	2,7	-3,3	-1023,5	1,1	-0,00020	-0,00014	0,00066
19	19-20	3,3	-0,6	-1055,6	-4,7	-0,00029	-0,00010	0,00083
20	20-21	0,6	0	-1083,0	-0,9	-0,00035	0,00002	0,00101
21	21-22	0	-0,8	-1099,7	1,4	-0,00036	0,00020	0,00117
22	22-23	0,8	-1,0	-1092,9	0,4	-0,00030	0,00036	0,00129
23	23-24	1,0	2,5	-1074,1	-6,0	-0,00033	0,00056	0,00137
24	24-25	-2,5	0	-1029,8	4,2	-0,00031	0,00078	0,00140
25	25-26	0	-38,8	-959,4	64,3	-0,00027	0,00097	0,00139
26	26-27	38,8	-56,8	-891,1	29,3	0,00290	-0,00024	0,00297
27	27-28	56,8	-49,1	-846,5	-12,5	0,00142	-0,00080	0,00421
28	28-1	49,1	0	-841,3	-81,9	-0,00021	-0,00080	0,00457

Бүгуші сәттер

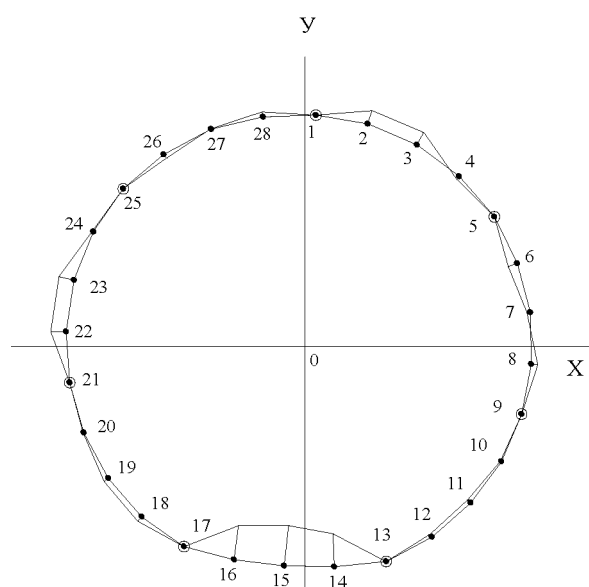


Қалыпты күштер

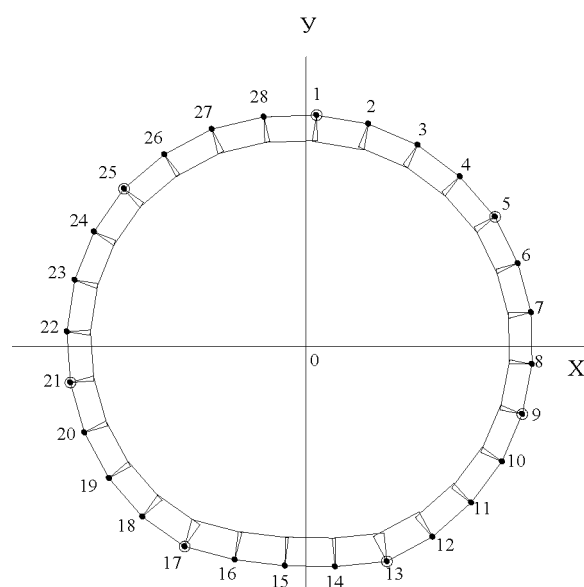


Л.15-суреті – а) есептік тәсіліне сәйкес жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптама сақинасындағы ішкі күштердің эпюралары

Бүгуші сәттер

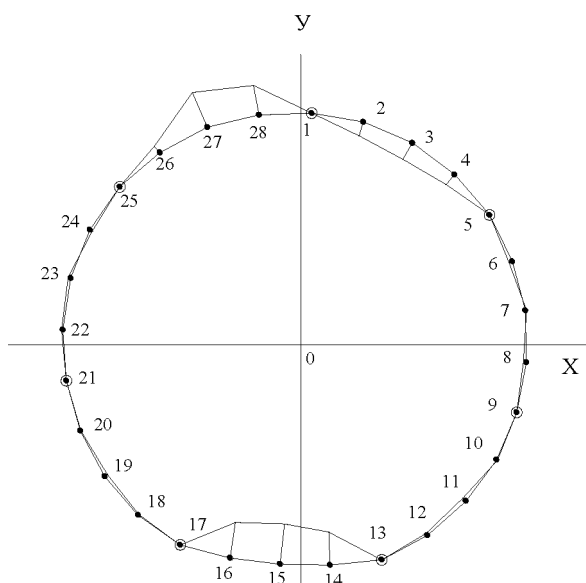


Қалыпты күштер

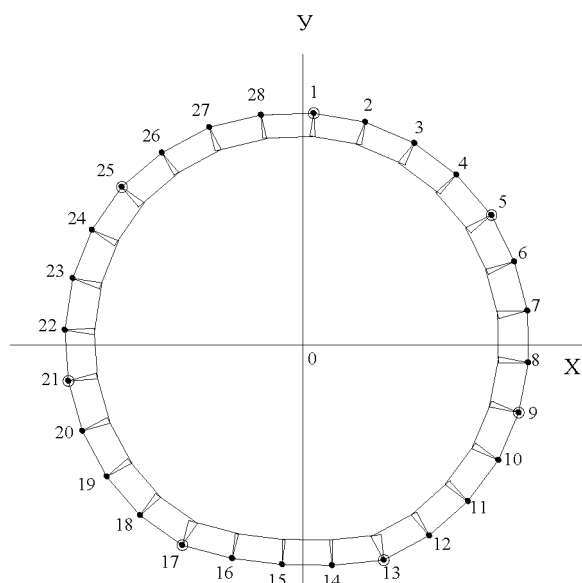


Л.16-суреті – б) есептік тәсіліне сәйкес жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптама сақинасындағы ішкі күштердің эпюралары

Бүгуші сәттер

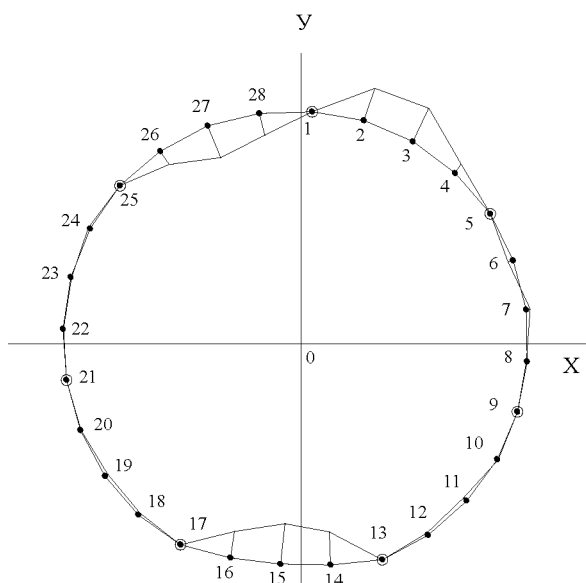


Қалыпты күштер

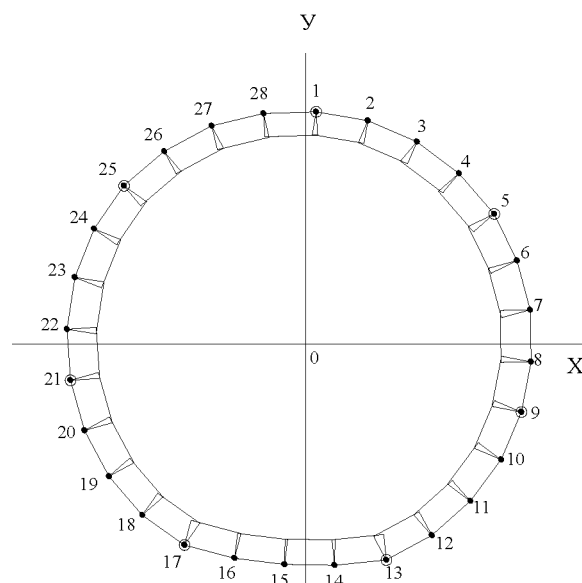


Л.17-суреті – в) есептік тәсіліне сәйкес жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптама сақинасындағы ішкі күштердің эпюралары

Бүгуші сәттер



Қалыпты күштер



Л.18-суреті – г) есептік тәсіліне сәйкес жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімінде қаптама сақинасындағы ішкі күштердің эпюралары

Л.18-кестесі – а), б), в) және г) есептік тәсілдерінде жүктемелер әрекетінің ерекше үйлесіміндегі қаптама сақинасындағы ауысулар және максималды есептік күштер

Есептік тәсіл	Қалыпты блок			Қалыпты блок			Науалы блок			Қаптама контурының максималды ауысуы, мм	
	макс. теріс бүгуші сәт, - М, кН·м	қалыпты күш, N, кН	қима нөмірі	макс. оң бүгуші сәт, +М, кН·м	қалыпты күш, N, кН	қима нөмірі	макс. бүгуші сәт, М, кН·м	қалыпты күш, N, кН	қима нөмірі	макс. шама, мм	қима нөмірі
а)	-12,5	-826,8	24	15,9	-801,6	7	-61,3	-969,4	15	2,5	25
б)	-15,2	-868,1	6	24,0	-832,6	22	-65,7	-1009,2	15	3,0	5
в)	-40,3	-838,8	3	72,2	-889,7	27	-62,4	-888,2	15	4,3	2
г)	-56,8	-891,1	27	69,1	-923,1	3	-64,5	-920,3	15	4,6	28

Л.5 Беріктікті есептеу және қаптама сақинасының сенімділігін бағалау

Л.5.1 Айналма туннель қаптамасы сақинасының темірбетон науалық және қалыпты блоктарының көтергіш қабілетін есептеу ҚНЖЕ 2.03.01-84* «Бетон және темірбетон конструкциялар» нормаларының ережелеріне сәйкес ортақ жағдай бойынша орындалады. Қалыпты және науалық блоктардың қалыптық және арматуралық сызбалары Л.19 және Л.20-суреттерде көрсетілген.

Л.5.2 Қаптама сақиналары блоктарының қалыпты қимасының көтергіш қабілеті жүйелі жуықтаулар әдісін пайдаланумен анықталады.

Л.5.3 Есептің бірінші кезеңінде x бетонның сығылған аймағының биіктігі беріледі. Әрі қарай келесі формулалар бойынша ξ_1 және ξ_2 бетонның сығылған аймағының салыстырмалы биіктіктері анықталады:

$$\xi_1 = \frac{x}{h_{01}}, \quad \xi_2 = \frac{x}{h_{02}}. \quad (\text{Л.19})$$

мұнда h_{01} , h_{02} - кима бетонының қаттырақ сығылған талшығына дейін арматураның 1- және 2-ші қатарлы қималарының ауырлық орталығы арқылы өтетін өстерден арақашықтық (Л.21- және Л.22- Суреттер).

Л.21- және Л.22-суреттерде көлденең қималар мен қалыпты және науалық блоктардың арматуралануы көрсетілген.

Әрі қарай келесі формула бойынша бетонның сығылған аймағының сипаттамасы анықталады

$$\omega = 0,85 - 0,008 \cdot R_b, \quad (\text{Л.20})$$

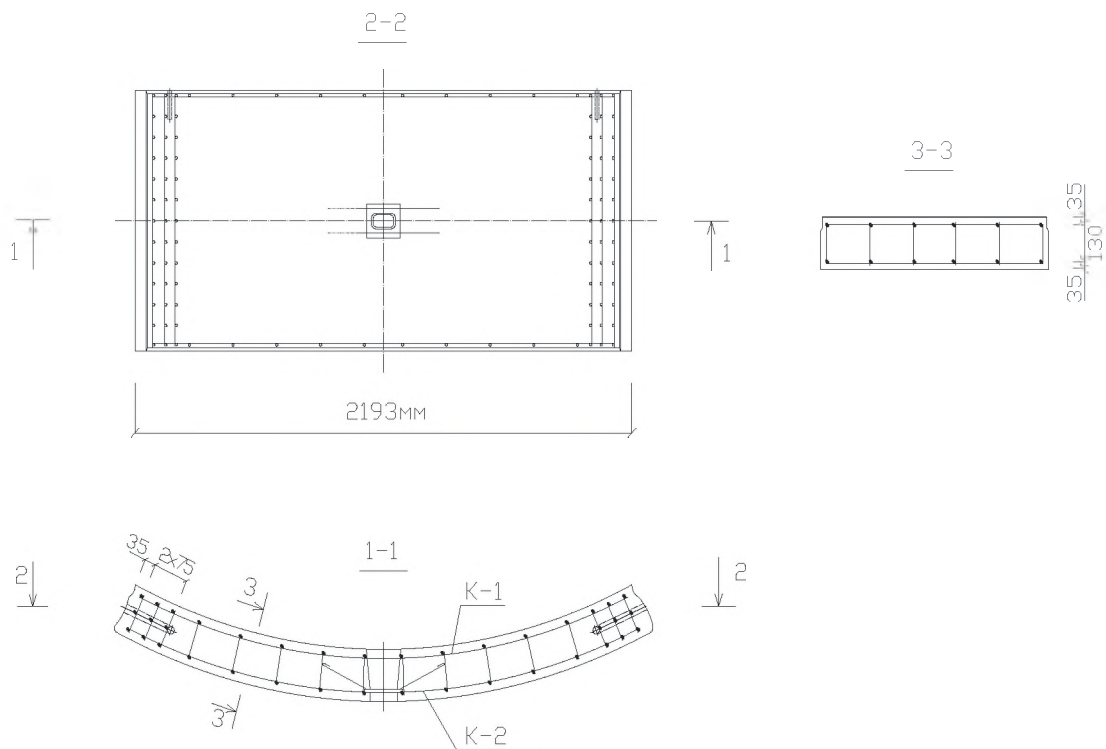
мұнда R_b - бетонның призмалық беріктігі.

Л.5.4 Есептің келесі кезеңінде келесі формулалар бойынша қаптаманың темірбетон блогының σ_{s1} және σ_{s2} арматурасының 1-ші және 2-ші қатарларындағы кернеулер анықталады

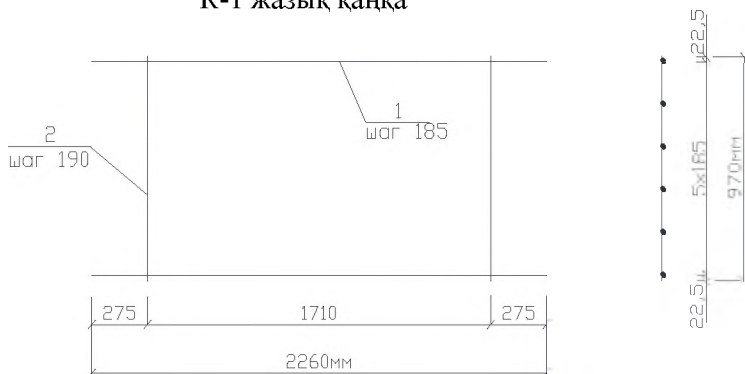
$$\sigma_{s1} = \frac{\sigma_{sc,u}}{1 - \frac{\omega}{1,1}} \cdot \left(\frac{\omega}{\xi_1} - 1 \right) \leq R_{sc}, \quad \sigma_{s2} = \frac{\sigma_{sc,u}}{1 - \frac{\omega}{1,1}} \cdot \left(\frac{\omega}{\xi_2} - 1 \right) \leq R_s. \quad (\text{Л.21})$$

мұнда $\sigma_{sc,u} = 500 \text{ МПа}$ - бетонның сығылған аймағының арматурасындағы шектік керену;

R_{sc}, R_s — сығылған және созылған кездегі арматураның есептік кедергілері.



К-1 жазық қаңқа



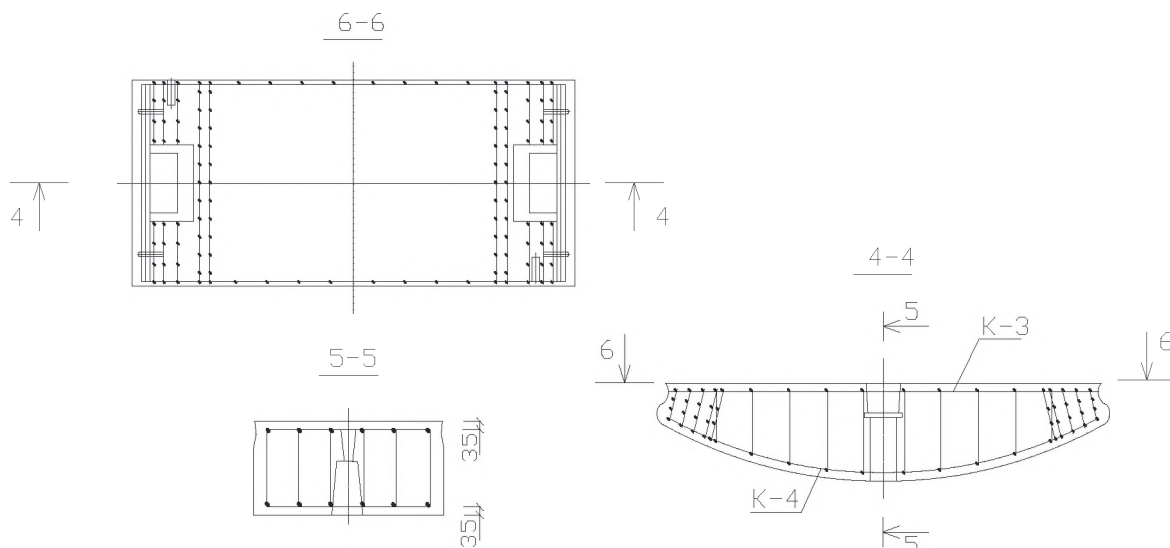
Поз.	Атауы	Сан	Ескерту
	Арматура ГОСТ 5781-82		Қаңқа саны
1	Ø12АІІ L=2260	6	К-1 Блок – 1 дана
2	Ø6АІ L=970	10	

К-2 жазық қаңқа

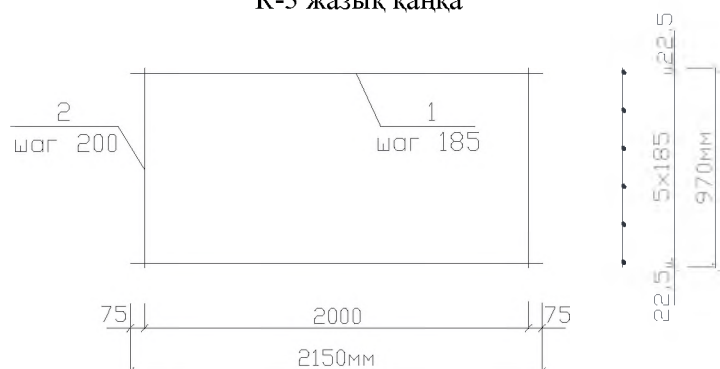


Поз.	Атауы	Сан	Ескерту
	Арматура ГОСТ 5781-82		Қаңқа саны
1	Ø8АІІ L=2370	6	К-2 Блок – 1 дана
2	Ø6АІ L=970	10	

Л.19-суреті – Қалыпты блоктың қалыптық және арматуралық сызбалары

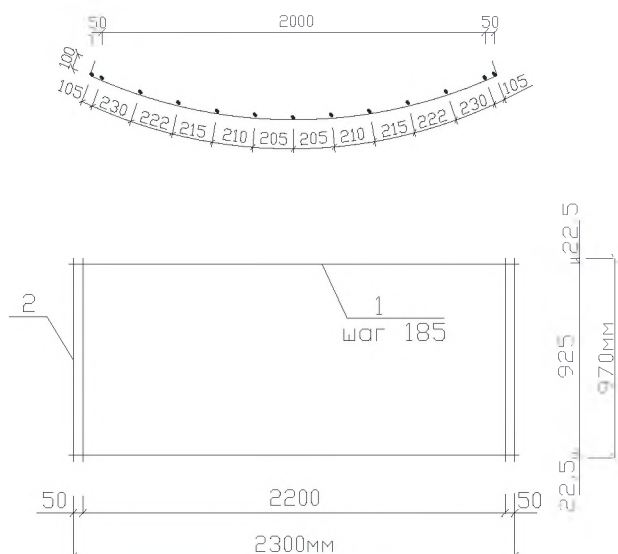


К-3 жазық қаңқа



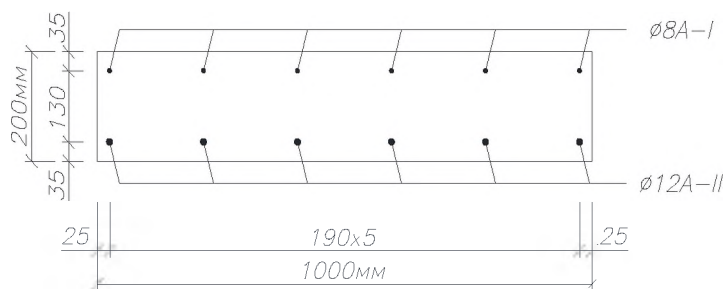
Поз.	Атауы	Сан	Ескерту
	Арматура ГОСТ 5781-82		Қаңқа саны
1	Ø12АІІ L=2150	6	К-3 Блок – 1
2	Ø6АІ L=970	10	дана

К-4 жазық қаңқа

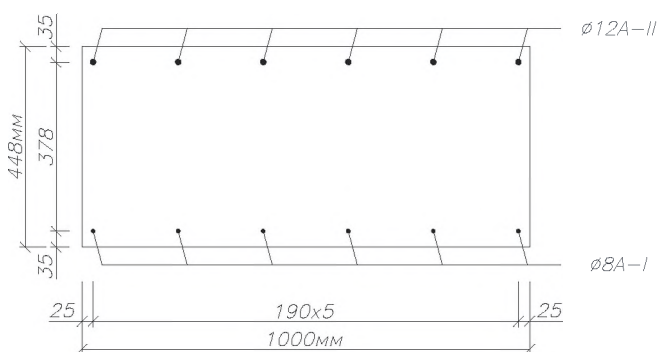


Поз.	Атауы	Сан	Ескерту
	Арматура ГОСТ 5781-82		Қаңқа саны
1	Ø8АІІ L=2695	6	К-4 Блок – 1
2	Ø6АІ L=970	10	дана

Л.20-суреті – Науалық блоктың қалыптық және арматуралық сызбалары



Л.21-сурет – Қалыпты блокты арматуралау тәсілі



Л.22-суреті – Науалық блокты арматуралау тәсілі

Л.5.5 Екі теңдеудің шешімі негізінде, олардың әрқайсысында элемент қимасының шектік күйіне сәйкес келетін қалыпты күштің шамасы N анықталады:

$$N \cdot \left(e_0 + h_{02} - \frac{h}{2} \right) = R_b \cdot S_b - \sum_{i=1}^2 \sigma_{si} \cdot S_i, \quad (\text{Л.22})$$

$$R_b \cdot A_b - \sum_{i=1}^2 \sigma_{si} \cdot A_{si} - N = 0. \quad (\text{Л.23})$$

мұнда S_b - арматураның 2-ші қатарына қатысты бетонның сығылған аймағының қимасы ауданының статикалық сәті;

S_i - арматураның 2-ші қатарына қатысты арматураның i -ші қатарының қимасы ауданының статикалық сәті;

A_b - бетонның сығылған аймағы қимасының ауданы;

h - элемент қимасының биіктігі.

Л.5.6 Қиманың ауырлық орталығына қатысты есептік жүктемелердің әрекетінен N_p қалыпты күштің эксцентриситет e_0 шамасы келесі тәуелділіктен анықталады

$$e_0 = \frac{M_p}{N_p}, \quad (\text{Л.24})$$

мұнда M_p - есептік жүктемелердің әрекетінен элементтің қимасындағы бұғуші сәт.

M_p және N_p мәндері қаптама сақинасын есептеу нәтижелері бойынша қабылданады.

Л.5.7 Жоғарыда көрсетілген екі Л.22 және Л.23 теңдеулерінің шешімінен элемент қимасының шектік күйіне сәйкес келетін қалыпты күштер N анықталады. Осы екі теңдеудің шешімінен алынған қалыпты күштер мәндерінің N сәйкес келуі шартында шешім аяқталған болып саналады.

Л.5.8 N мәндері сәйкес келмеген жағдайда, x бетонның сығылған аймағы биіктігінің жаңа мәнін беру керек және N жинақтылығына дейін шешімді қайталау керек.

Л.5.9 Есептің соңғы кезеңінде келесі формула бойынша элемент қимасы қорының коэффициенті анықталады

$$K = \frac{N}{N_p}, \quad (\text{Л.25})$$

Л.5.10 Орындалған есептердің нәтижелері бойынша қалыпты және науалық блоктардың көтергіш қабілеті анықталады және жүктемелер әрекетінің негізгі және ерекше үйлесімдерінде осы блоктарда орын алатын күштермен салыстырмалы талдау жасалады.

Л.5.11 Л.19-кестеде өзгертілген геометриямен қаптама сақинасының сенімділігі жөнінде куәландыратын, қор коэффициенттері түріндегі жүктемелердің негізгі және ерекше үйлесімдерінде блоктарда орын алатын күштермен осы блоктардың көтергіш қабілетін салыстырмалы талдау нәтижелері берілген.

Л.19-кестесі – Қалыпты және науалық блоктардағы қордың коэффициенттері

Қордың коэффициенті						
жүктеме әрекетінің негізгі үйлесімі			Есептік тәсілдің атауы	жүктеме әрекетінің ерекше үйлесімі		
қалыпты блоктағы максималды теріс бұғуші сәт кезінде	қалыпты блоктағы максималды оң бұғуші сәт кезінде	науалық блоктағы максималды бұғуші сәт кезінде		қалыпты блоктағы максималды теріс бұғуші сәт кезінде	қалыпты блоктағы максималды оң бұғуші сәт кезінде	науалық блоктағы максималды бұғуші сәт кезінде
6,8	4,6	9,0	а)	4,2	4,1	6,6
			б)	3,8	3,4	6,3
			в)	2,6	1,5	6,9
			г)	2,0	1,6	6,7

КІТАПНАМА

- [1] Дорман И.Я. Көлік туннелдерінің сейсмикалық төзімділігі. – Мәскеу, ТИМР, 2000;
- [2] Сейсмикалық аудандарда жерасты құрылыстарын жобалау бойынша басшылық. – Мәскеу, ТИМР, 1996;
- [3] Рашидов Т.Р. Жерасты құрылыстарының күрделі жүйелерінің сейсмикалық тұрақтылығының динамикалық теориясы. – Ташкент, Фан, 1973;
- [4] ТШ 14-1-5526-2006 Тиімді мерзімді профилі бар А500СП класты арматуралы прокат. Техникалық шарттар – Мәскеу, 2006;
- [5] Напетваридзе Ш. Г. Гидротехникалық құрылыстардың сейсмикалық тұрақтылығы. – Мәскеу, Госстройиздат, 1959;
- [6] Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Масанов Ж.К. Анизотроптық қатпарлы сілемдегі жерасты құрылыстарының сейсмикалық кернеулі жағдайы. – Алматы, Ғылым, 1980;
- [7] Фотиева Н.Н. Сейсмикалық белсенді аудандардағы жерасты құрылыстар бекітпелерінің есебі. – Мәскеу, Недра, 1980;
- [8] Мелентьев П. В. Жуық есептеулер. – Мәскеу, Физматгиз, 1962;
- [9] Булычев Н.С. Жерасты құрылыстарының механикасы. – Мәскеу, Недра, 1989;
- [10] Туннель қазбаларының уақытша бекітпесін есептеу бойынша әдістемелік нұсқаулар – Мәскеу, ЦНИИС, 1984.

ӘОЖ 624(574)

МСЖ 93.060

Негізгі сөздер: көлік туннелдері, жерасты құрылыстары, метрополитен желілері, инженерлік-геологиялық ізденістер, жүктемелер және әсерлер, есеп, топырақтың изотроптық қасиеттері, топырақтың анизотроптық қасиеттері, бойлық сейсмикалық толқындар, көлденең сейсмикалық жылжу толқындары, тербелістер кезеңі, жарылым аймағы, туннелдің қаптамасы, айналма туннель

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	IV
1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.....	1
2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	1
3 ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	2
4 ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	4
5 РАСЧЕТ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	6
5.1 Общие указания.....	6
5.2 Основные положения расчета.....	14
5.3 Расчет замкнутых монолитных обделок произвольного очертания тоннелей глубокого заложения с учетом изотропии массива.....	19
5.4 Расчет замкнутых монолитных обделок кругового очертания тоннелей глубокого заложения с учетом упругой анизотропии массива.....	22
5.5 Расчет многослойных обделок тоннелей кругового очертания.....	28
5.6 Расчет анкерной крепи.....	29
5.7 Расчет набрызг-бетонной крепи.....	31
5.8 Расчет набрызг-бетонной крепи с анкерами.....	34
5.9 Расчет обделок некругового очертания тоннелей мелкого заложения.....	35
5.10 Проектирование порталов и припортальных подпорных стен.....	36
6 ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ.....	38
7 ИНЖЕНЕРНО – СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКАЯ СЛУЖБА.....	42
Приложение А (информационное) Упругая модель грунта.....	44
Приложение Б (информационное) Определение параметров сейсмических воздействий на подземные сооружения.....	53
Приложение В (информационное) Скорости сейсмических волн, нормальные и касательные напряжения в ненарушенном изотропном массиве для различных пород (грунтов).....	61
Приложение Г (информационное) Определение скоростей сейсмических волн в анизотропной (трансверсально – изотропной) толще грунтов и горных пород.....	64
Приложение Д (информационное) Определение коэффициентов сейсмического бокового давления λ^c для анизотропного массива грунта.....	65
Приложение Е (информационное) Алгоритм и пример расчета обделок тоннелей кругового очертания на сейсмические воздействия.....	67
Приложение Ж (информационное) Общий алгоритм и примеры расчета обделок некругового поперечного сечения на сейсмические воздействия.....	72
Приложение И (информационное) Построение конформного отображения графо– аналитическим способом П.В. Мелентьева.....	85
Приложение К (информационное) Алгоритм и пример расчета многослойных круговых обделок тоннелей.....	88
Приложение Л (информационное) Оценка эксплуатационной надежности обделки перегонного тоннеля из сборных железобетонных блоков.....	94
БИБЛИОГРАФИЯ.....	131

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий свод правил разработан на основе положений технических регламентов Республики Казахстан «Требования безопасности при проектировании автомобильных дорог», «Требования безопасности железнодорожного транспорта и связанной с ним инфраструктуры», «Требования к безопасности метрополитенов», «Требования к безопасности зданий и сооружений, строительных материалов и изделий», «Общие требования к пожарной безопасности», «Требования к безопасности железобетонных, бетонных конструкций».

В соответствии с СН РК 1.01-01-2011 «Государственные нормативы в области архитектуры, градостроительства и строительства. Основные положения» настоящий свод правил содержит положения, нормативы, методы расчета, параметры объекта проектирования, строительства и реконструкции, а также мероприятия по ликвидации последствий землетрясений и мониторинга подземных сооружений в сейсмических районах, в качестве официально признанных и оправдавших себя на практике, которые позволят обеспечить соблюдение обязательных требований государственных нормативов, и будут способствовать удовлетворению потребностей общества.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ЕРЕЖЕЛЕР ЖИНАҒЫ
СВОД ПРАВИЛ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

UNDERGROUND STRUCTURES IN SEISMIC REGIONS

Дата введения - 2015-07-01

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1 Настоящий свод правил разработан в развитие нормативно-технических документов по проектированию железнодорожных и автодорожных тоннелей, метрополитенов, сооружаемых в районах сейсмичностью 6-9 баллов.

Примечание - Настоящий свод правил не распространяется на тоннели, сооружаемые на железнодорожных высокоскоростных (свыше 200 км/час) пассажирских линиях и на скоростных автомагистралях с расчетной скоростью движения автотранспортных средств более 150 км/час.

1.2 Проектирование и строительство железнодорожных и автодорожных тоннелей, линий метрополитена на площадках сейсмичностью более 9 баллов следует осуществлять с привлечением специализированных научно-исследовательских и проектно-изыскательских организаций.

1.3 Применение конструктивных решений или технологий, требования к которым не установлены, а также проектирование метрополитенов и транспортных тоннелей в инженерно-геологических и сейсмологических условиях, на которые требования настоящего свода правил не распространяются, следует осуществлять по техническим условиям, прошедшим экспертизу и согласованным органом, уполномоченным Комитетом по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерства регионального развития Республики Казахстан.

2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Для применения настоящего свода правил необходимы следующие ссылочные нормативные документы:

СН РК 3.03-11-2013 Тоннели железнодорожные и автодорожные.

СН РК 3.03-17-2013 Метрополитены.

СНиП РК 1.02-18-2004 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.

СНиП РК 2.03-30-2006 (изд. 2008) Строительство в сейсмических районах.

СП РК 2.03-107-2013

СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах (разделы 4, 5).

СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции».

СНиП РК 5.03-34-2005 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

РДС РК 1.02-04-2013 Отнесение объектов строительства и градостроительного планирования территорий к уровням ответственности.

СП РК 3.03-111-2013 Тоннели железнодорожные и автодорожные.

СП РК 3.03-117-2013 Метрополитены.

ВСН 126-90 Крепление выработок набрызг-бетоном и анкерами при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов.

ВСН 167-70 Технические указания по проектированию подпорных стен для транспортного строительства.

ВСН 190-78 Инструкция по инженерно-геологическим изысканиям для проектирования и строительства метрополитенов, горных железнодорожных и автодорожных тоннелей.

ГОСТ 5781-82 Межгосударственный стандарт. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия.

ГОСТ 380-94 Межгосударственный стандарт. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки.

Примечание - При пользовании настоящим документом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов и классификаторов по информационному указателю «Нормативные документы по стандартизации» и по «Перечню нормативных правовых и нормативно-технических актов в сфере архитектуры, градостроительства и строительства, действующих на территории Республики Казахстан», соответствующим состоянию на текущий год и соответствующим ежемесячно издаваемым информационным указателям, опубликованным в текущем году.

Если ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим документом следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом.

Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем своде правил применяются следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 Воздействие: а) Группа сил (нагрузок), действующих на сооружение (прямое воздействие); б) Группа приложенных деформаций или колебаний, вызванных неравномерной осадкой оснований или землетрясением (косвенное воздействие).

3.2 Динамическое воздействие: Воздействие, вызывающее существенные колебания конструкции или конструктивного элемента. Изменяющееся во времени воздействие, вызывающее существенные деформации и колебания конструкции и элементов конструкции.

3.3 Жесткость: Сопротивление материала деформациям.

3.4 Квазистатическое воздействие: Динамическое воздействие, выраженное в расчете как эквивалентное статическое воздействие.

3.5 Конструкция: Предусмотренная комбинация взаимосвязанных конструктивных элементов, предназначенных для восприятия нагрузок и обеспечения адекватной жесткости.

3.6 Конструктивная система: Несущие элементы сооружения, объединенные определенным способом для совместной работы.

3.7 Критерии расчета: Количественные показатели, описывающие условия, которые должны быть выполнены для каждого предельного состояния.

3.8 Метод строительства: Способ возведения строения, например, из монолитного бетона, или из конструкций заводского изготовления.

3.9 Модель сооружения: Идеализированная схема сооружения, применяемая при проектировании и выполнении расчетов.

3.10 Надежность: Способность сооружения или его конструктивного элемента соответствовать установленным требованиям в течение расчетного срока эксплуатации. Надежность выражается, как правило, в вероятностных величинах.

3.11 Несущая способность: Способность конструктивного элемента противостоять воздействиям без механического разрушения, например, сопротивление изгибу, сопротивление потере устойчивости, сопротивление растяжению.

3.12 Обделка: Постоянная строительная конструкция, предназначенная для закрепления горной выработки и придания ей кругового, овального или прямоугольного очертания.

3.13 Переменное воздействие: Воздействие, изменением величины во времени которого нельзя пренебречь.

3.14 Постоянное воздействие: Воздействие, изменение величины которого, по сравнению со средним значением, незначительно, или воздействие, изменение которого до достижения определенного предельного значения происходит всегда монотонно и происходит в одном направлении в течение всего срока эксплуатации сооружения.

3.15 Предельные состояния: Состояния, при превышении которых строительные конструкции не отвечают требованиям норм проектирования.

3.16 Прочность: Механическое свойство материала, характеризующее его способность сопротивляться воздействиям и, обычно, выражаемое в единицах механического напряжения.

3.17 Расчет конструкций: Процедура или алгоритм определения эффектов воздействий (силы, моменты, напряжения, деформации) в любой точке конструкции.

3.18 Сейсмическое воздействие: Воздействие, вызванное движениями грунта во время землетрясения.

3.19 Сооружение: Организованный комплекс связанных частей, (включая насыпной грунт, уложенный при выполнении строительных работ) предназначенных для того чтобы нести нагрузки и обеспечивать необходимую жесткость.

3.20 Сопротивление: Способность элемента или поперечного сечения элемента сооружения выдерживать воздействия без механических повреждений, например: прочность грунта на сдвиг, сопротивление изгибу, сопротивление потере устойчивости при продольном изгибе, сопротивление растяжению.

3.21 Статическое воздействие: Воздействие, не вызывающее существенных колебаний конструкции или конструктивного элемента.

3.22 Схема нагружения: Расчетная схема, характеризующая положения, величины и направления силовых и кинематических воздействий.

3.23 Тоннель: Горизонтальная подземная выработка, служащая для перевозки людей, горной массы, материалов и оборудования;

4 ОБОЗНАЧЕНИЯ

4.1 В настоящем своде правил применяются следующие обозначения:

γ	-	объемный вес грунта;
C_1	-	скорость распространения продольных сейсмических волн в грунте;
C_2	-	скорость распространения поперечных сейсмических волн в грунте;
T_0	-	преобладающий период сейсмических колебаний грунтового массива;
A	-	ожидаемые максимальные амплитуды колебаний грунтового массива;
E	-	динамический модуль упругости грунта;
E_{CT}	-	статический модуль упругости грунта;
E_0	-	модуль деформации грунта;
K_{OT}	-	коэффициент отпора;
ν_O	-	коэффициент Пуассона грунта;
δ	-	допускаемое конструкцией шва продольное смещение смежных участков тоннеля относительно друг друга;
n_0	-	коэффициент сочетания;
P_C	-	горизонтальная составляющая инерционного давления грунта;
k_c	-	коэффициент сейсмичности;
γ'	-	расчетное значение объемной массы грунта засыпки;
H	-	толщина расчетного слоя грунта, принимаемая равной расстоянию от подошвы фундамента подпорной стены до расчетной поверхности грунта;
y	-	расстояние от верха подпорной стены;
$\sigma_{x'}^\infty$	-	сейсмическое нормальное напряжение в изотропном массиве на бесконечности, направленное вдоль оси X' , наклонной под произвольным углом α к вертикальной оси симметрии X ;
$\sigma_{y'}^\infty$	-	сейсмическое нормальное напряжение в изотропном массиве на бесконечности, направленное вдоль оси Y' , наклонной под углом α к горизонтальной оси Y ;
$\tau_{x'y'}^\infty$	-	сейсмическое касательное напряжение в изотропном массиве на бесконечности, действующее под углом α к вертикальной оси симметрии X ;
ξ	-	коэффициент бокового давления;

$\sigma_{x,\max}^c$	- относительная высота сжатой зоны бетона;
$\sigma_{x,\max}^c$	- максимальное сейсмическое напряжение относительно оси X;
$\sigma_{y,\max}^c$	- максимальное сейсмическое напряжение относительно оси Y;
$\sigma_{z,\max}^c$	- максимальное сейсмическое напряжение относительно оси Z;
$\tau_{x,z,\max}^c$	- максимальное касательное напряжение относительно оси Z перпендикулярное к оси X;
$\tau_{x,y,\max}^c$	- максимальное касательное напряжение относительно оси Y перпендикулярное к оси X;
$\tau_{yz,\max}^c$	- максимальное касательное напряжение относительно оси Z перпендикулярное к оси Y;
V_P	- скорость распространения продольных (сжатия-растяжения) сейсмических волн;
V_{SV}	- скорость распространения поперечных (сдвига) сейсмических волн, поляризованных параллельно плоскости изотропии транспортного массива;
V_{SH}	- скорость распространения поперечных (сдвига) сейсмических волн, поляризованных перпендикулярно плоскости изотропии транспортного массива;
$\xi_{\max}$	- безразмерный коэффициент;
$\lambda_y^c, \lambda_{z_1}^c, \lambda_{x_1 z_1}^c$	- коэффициенты сейсмического бокового давления;
$\lambda_x^c, \lambda_z^c, \lambda_{x z}^c$	- коэффициенты сейсмического бокового давления;
$m_{кр}$	- коэффициент условий работы конструкций, соединений;
g	- ускорение свободного падения;
D	- наибольший поперечный размер выработки;
	- диаметр кругового тоннеля;
Q	- касательное сейсмическое напряжение на бесконечности;
	- поперечная сила;
$\sigma_{\theta(сж)}$	- нормальное тангенциальное напряжение в сечении обделки от действия продольной волны сжатия, направленное под углом α к вертикальной оси симметрии выработки;
$\sigma_{\theta(сдв)}$	- нормальное тангенциальное напряжение в сечении обделки от действия поперечной волны сдвига, направленное под углом α к вертикальной оси выработки;
R_n	- радиус грунтового слоя, принимаемый равным глубине заложения выработки;
P	- расчетное нормальное напряжение, приложенное к внешнему контуру сечения грунтового слоя;
q	- расчетное касательное напряжение, приложенное к внешнему контуру сечения грунтового слоя;
σ_r	- расчетное радиальное сжимающее напряжение в сечении элемента;

φ	-	угол внутреннего трения материала обделки;
R_{np}	-	расчетное сопротивление материала обделки (призменная прочность);
l_a	-	длина анкера;
r_a	-	радиус поперечного сечения анкера;
E_a	-	модуль упругости материала анкера;
R	-	средний радиус выработки;
n	-	число неровностей;
δ	-	амплитуда неровностей (среднее отклонение от проектного гладкого контура);
Q_k	-	вес элемента обделки, отнесенный к точке k ;
S_k	-	горизонтальная или вертикальная составляющие сейсмической нагрузки;
P_y	-	активное давление грунта;
l	-	ширина выработки;
f	-	коэффициент трения грунта по обделке, коэффициент крепости грунта по Протоdjяконову;
$q_c^{верт}$	-	интенсивность вертикальной составляющей сейсмического давления грунта;
M	-	изгибающий момент;
N	-	нормальная сила;
h_1	-	высота свода обрушения;
L	-	пролет (длина) свода обрушения;
ω	-	характеристика деформативности бетона;
σ_s	-	напряжение в арматуре;
e_o	-	эксцентриситет;
K	-	коэффициент запаса.

5 РАСЧЕТ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ¹⁾

5.1 Общие указания

5.1.1 Проектирование подземных сооружений, предназначенных для строительства в сейсмических районах, как правило, включает в себя следующие основные этапы:

- предварительный выбор конструктивной системы сооружения и его классификацию;
- выбор расчетной модели и методики определения сейсмических нагрузок;

¹⁾ В разделе 5 использованы положения ВСН 193-81 «Инструкция по учету сейсмических воздействий при проектировании горных транспортных тоннелей» и [1, 2].

- определение деформаций и напряжений в тоннельной обделке сооружения, соответствующих статическим и сейсмическим воздействиям;

- анализ результатов расчета и проверка предварительно принятых конструктивных решений и размеров конструкций. При необходимости предварительно принятые размеры могут быть скорректированы и расчет выполнен повторно.

5.1.2 Под сейсмостойкостью подземного сооружения понимается сохранение работоспособности и ремонтпригодности транспортного тоннеля при сейсмических воздействиях расчетной интенсивности.

5.1.3 Тоннели железнодорожные и автодорожные, линии метрополитена в соответствии с РДС РК 1.02-04 относятся к I (повышенному) уровню ответственности.

5.1.4 Проектирование тоннелей должно быть направлено на удовлетворение следующих требований:

- требование по отсутствию разрушений (предельное состояние);
- требование по минимизации повреждений (ущерба).

5.1.5 Возможные последствия сейсмического воздействия необходимо рассматривать на стадии концептуального проектирования.

5.1.6 Если сейсмическое воздействие имеет большую вероятность превышения в течение расчетного срока службы тоннеля, проектирование должно быть направлено на создание конструкции, устойчивой к повреждениям. Элементы тоннельной обделки, восприимчивые к повреждениям при расчетном сейсмическом воздействии, должны проектироваться так, чтобы тоннель можно было быстро отремонтировать и использовать спасательными экстренными службами сразу после землетрясения.

5.1.7 Сейсмическое воздействие с высокой вероятностью повторения может привести к небольшим повреждениям второстепенных элементов тоннельной обделки. В целом тоннельная обделка должна оставаться неповрежденной.

5.1.8 Сейсмичность района, населенного пункта строительства следует определять по указаниям СНиП РК 2.03-30.

5.1.9 При проектировании тоннельных сооружений следует исходить из расчетной сейсмичности тоннельных конструкций, принимаемых по Таблице 1 в зависимости от уточненной сейсмичности площадки строительства.

5.1.10 Сейсмичность площадки строительства уточняется в зависимости от конкретных инженерно-геологических условий на основании карт сейсмического микрорайонирования или микрорайонирования, проводимого с помощью инструментальных наблюдений. Площадка строительства означает: для припортальных участков - местоположение порталов, для тоннеля - породный массив по трассе тоннельного перехода. Уточненная сейсмичность площадки строительства является составной частью исходных данных для проектирования.

5.1.11 При проектировании линии метрополитена или транспортных тоннелей протяженностью 500 и более метров, расположенных в районах, сейсмичность которых превышает 9 баллов, следует разрабатывать дополнительные антисейсмические мероприятия, для чего целесообразно привлекать специализированные научно-исследовательские организации.

СП РК 2.03-107-2013

5.1.12 Для сейсмического микрорайонирования заглубленных участков тоннельного перехода в инженерно-геологической характеристике грунтов по трассе тоннеля, определяемой в процессе изысканий, дополнительно к требованиям нормативных документов по инженерно-геологическим изысканиям СНиП РК 1.02-18 и ВСН 190-78 должны быть отражены следующие данные:

а) мощность напластований грунтов, окружающих тоннель, и коренных грунтов, а также их сейсмическая жесткость (произведение скорости распространения сейсмических волн на плотность);

б) статистические характеристики параметров колебаний массива (скорость распространения сейсмических волн, преобладающий период, ожидаемая амплитуда);

в) наличие и характеристика тектонических нарушений в районе строительства;

г) активность и направленность тектонических движений;

д) крутизна и устойчивость склонов, косогоров и возможность возникновения в них оползневых явлений.

Таблица 1 - Расчетная сейсмичность тоннельных конструкций

Наименование тоннельного сооружения	Расчетная сейсмичность конструкции, баллы, при сейсмичности площадки строительства, баллы			
	6	7	8	9
1. Тоннели длиной более 500 м на железных дорогах I и II категорий, особо ответственные тоннели, а также станционные, эскалаторные, перегонные тоннели и совмещенные тягово-понижительные подстанции метрополитена	7*	8	9	9**
2. Тоннели длиной 500 м и менее на железных дорогах I - III категорий, длиной более 500 м на остальных дорогах, ответственные тоннельные сооружения (стволы шахт, подходные выработки, используемые для тоннелей и тоннельных сооружений) припортальные подпорные стены	-	7	8	9
3. Тоннельные сооружения, расположенные вне трассы (штольни и т.п.), разрушение которых при повышенной балльности не отразится на целостности сооружений, относящихся к группам 1 и 2	-	-	7	8
* Сейсмостойкость сооружений обеспечивается конструктивными антисейсмическими мероприятиями. ** При проектировании сооружений целесообразно привлечение специализированной научно-				

В проектной документации на строительство метрополитенов и тоннелей протяженностью более 500 м, расположенных в районах сейсмичностью 8 баллов и более, следует предусматривать раздел по устройству инженерно-сейсмометрических станций для регистрации колебаний элементов обделки и окружающего массива.

5.1.13 По результатам комплекса инженерно-геологических и сейсмологических исследований при сейсмическом микрорайонировании трассы транспортного тоннеля или метрополитена должны быть получены следующие исходные данные, необходимые для их проектирования в сейсмических районах [1,2]:

- уточненная сейсмичность площадки строительства по длине тоннеля и для притоннельных сооружений, баллы;
- плотность породы γ_0 , МН/м³;
- мощность напластований грунтов, окружающих тоннель и коренных грунтов, а также их сейсмическая жесткость - произведение скорости распространения продольных (C_1) и поперечных (C_2) волн, м/с, на плотность породы;
- резонансные свойства грунта (преобладающий период сейсмических колебаний грунтового массива) T_0 , с;
- наличие и характеристика тектонических нарушений в районе строительства;
- активность и направленность тектонических движений, ожидаемые возможные максимальные амплитуды колебаний грунтового массива A , см;
- динамический модуль упругости E , МПа;
- статический модуль упругости $E_{ст}$, МПа;
- модуль деформации E_0 , МПа;
- коэффициент отпора $K_{от}$, МН/м³;
- коэффициент Пуассона ν_0 , доли единицы.

5.1.14 При проектировании обделок подземных сооружений для обеспечения надежной работы тоннельных конструкций при сейсмических воздействиях должны учитываться особенности трассирования, объемно-планировочные и конструктивные решения, рекомендованные в СН РК 3.03-11, СН РК 3.03-17, СП РК 3.03-111, СП РК 3.03-117 позволяющие создать сейсмостойкие конструкции.

5.1.15 При выборе трассы тоннеля рекомендуется предусматривать заложение тоннеля в однородных по сейсмической жесткости грунтах, избегать участков повышенной трещиноватости, с резким изменением топографии над тоннелем, зон тектонических разломов, а также склонов, особенно сложенных слабыми и несцементированными грунтами.

5.1.16 При проектировании предпочтение следует отдавать вариантам с более глубоким заложением тоннелей. Пересечение тоннелем тектонических разломов рекомендуется осуществлять вкrest их простирацию с применением соответствующих конструктивных решений и с устройством дополнительных антисейсмических швов.

5.1.17 Станции метрополитена, следует располагать вне зон тектонических разломов и их оснований, как правило, должны быть однородные грунты на всем протяжении.

5.1.18 К благоприятному основанию тоннелей следует относить скальные породы и плотные маловлажные крупноблочные грунты, а к неблагоприятному основанию

СП РК 2.03-107-2013

тоннелей - водонасыщенные глинистые и песчаные грунты, а также просадочные и текучие грунты.

5.1.19 При наличии слабых грунтов в основании тоннелей следует учитывать и такие их параметры, как прочность и плотность, а также характер залегания пластов и уровень грунтовых вод.

5.1.20 Существуют следующие типы разрушений грунта, которые могут существенно повредить конструкции подземных сооружений:

- разрушения, вызванные перемещениями границ активного разлома;
- тектонические опускания и поднятие поверхности;
- оползни;
- разжижения грунта.

5.1.21 Если активный разлом пересекает тоннель, есть опасность, деформаций сдвига тоннельной обделки при воздействии от землетрясения.

5.1.22 При расположении тоннелей, в грунтах ниже уровня грунтовых вод, существует опасность разжижения грунтов в том случае, если тоннели располагаются в несвязных грунтах (пески, глины, гравий). Эффекты разжижения проявляются следующим образом:

- увеличивается давление на тоннельную обделку, что может привести к разрушению тоннеля;
- тоннели могут всплывать или наоборот погружаться в грунт (в зависимости от соотношения веса тоннеля и веса замещенного тоннелем грунта);
- тоннели могут перемещаться в поперечных направлениях, при расположении ниже наклонных слоев;
- тоннели так же могут смещаться в поперечных направлениях, если они расположены в разжижаемых грунтах, которые могут перемещаться в пространстве.

5.1.23 Понижение прочности грунтов на сдвиг и жесткость, вызванное увеличением давления поровой воды в насыщенных несвязных материалах в процессе колебаний грунта при землетрясении, которые приводят к значительным остаточным деформациям или даже к состоянию почти нулевой несущей способности грунта, называется разжижением.

5.1.24 Оценка возможности разжижения грунта должна производиться, в том случае, если грунты в основании тоннеля содержат протяженные слои или мощные линзы рыхлого песка, содержащие, или не содержащие мелкие фракции ила/глины, ниже уровня грунтовых вод, а также если уровень грунтовых вод находится близко от поверхности грунта.

5.1.25 При соответствующем технико-экономическом обосновании для снижения сейсмичности площадки строительства допускаются технологические мероприятия, связанные с укреплением слабого участка и доведением его жесткостных свойств до грунта остального участка или отделение данного слабого участка деформационными швами.

5.1.26 При сейсмичности площадки строительства 7 и более баллов применение обделки тоннеля обязательно. При сейсмичности площадки строительства 8 и более баллов обязательно применение замкнутой обделки. Конструкция обделки выбирается в

соответствии с инженерно-геологическими условиями площадки строительства и геометрические параметры обделки подбираются расчетом.

5.1.27 При расчетной сейсмичности тоннеля 7 баллов в качестве постоянной обделки в скальных грунтах допускается применение набрызг-бетона в сочетании с анкерами. Конструкция анкеров должна обеспечивать их сцепление с грунтом по всей длине и иметь равную долговечность с бетоном обделки.

5.1.28 При проектировании обделок тоннельных конструкций для обеспечения их сейсмостойкости следует соблюдать следующие принципы:

- принцип равномерного по сечению распределения масс и жесткостей;
- принцип снижения величин сейсмических нагрузок на обделку;
- принцип поглощения деформаций вдоль оси тоннеля.

Для перегонных тоннелей метрополитена для равномерного по сечению распределения масс и жесткостей рекомендуются круговые обделки при закрытом и цельносекционные при открытом способе работ. Для станционных тоннелей рекомендуются односводчатые конструкции. Для горных тоннелей - круговые либо подковообразные обделки с обратным сводом.

Для снижения величин сейсмических нагрузок на обделку рекомендуется для горных тоннелей в скальных грунтах проектировать двуслойные обделки, в которых наружный слой, от основного несущего внутреннего, разделяется гидроизоляционным слоем низкомолекулярного материала, устраняющим передачу касательных и нормальных растягивающих сейсмических напряжений на внутренний несущий слой обделки. При слабых грунтах, особенно для станций метрополитена, целесообразно увеличивать жесткость грунтов основания путем закрепления (инъекция, уплотнение, анкеровка и др.) на глубину, равную поперечному размеру станции;

Для поглощения продольных деформаций тоннельной обделки при колебаниях, вызываемых сейсмическим воздействием, следует предусматривать специальные антисейсмические деформационные швы, обеспечивающие неразрушаемость тоннеля в целом. Такие швы рекомендуется устраивать в монолитных бетонных или железобетонных обделках.

5.1.29 Для компенсации продольных деформаций обделки по длине тоннеля следует устраивать антисейсмические швы, расстояние между которыми l , м, согласно [3] рекомендуется определять по формуле

$$l = \frac{\delta C_1 T_0}{4\pi A}, \quad (1)$$

где

δ - допускаемое конструкцией шва продольное смещение смежных участков тоннеля относительно друг друга, см;

C_1 - скорость продольных сейсмических волн в грунте, м/с;

T_0 - преобладающий период сейсмических колебаний массива, определяемый в процессе изысканий, с;

A - возможная максимальная амплитуда колебаний массива, см, определяемая в процессе изысканий, или для предварительных расчетов по графику на Рисунке 1.

Примечания

1 При отсутствии количественных характеристик расстояние между антисейсмическими швами в слабых грунтах следует принимать равным 20 м, в скальных - 30 м.

2 Максимальные расстояния между антисейсмическими швами не должны превышать 40 м для бетонных и железобетонных монолитных обделок, при этом следует совмещать антисейсмический шов с деформационным.

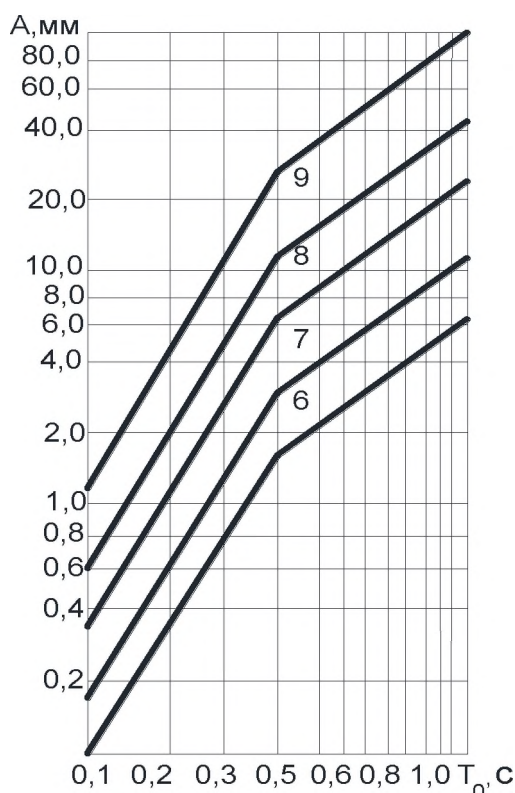


Рисунок 1 - Соотношение амплитуд смещений A и периодов T_0 при колебаниях грунта, вызванных землетрясениями интенсивностью 6 ÷ 9 баллов

5.1.30 Транспортные тоннели мелкого заложения, как правило, строятся открытым способом и имеют прямоугольное поперечное сечение. С точки зрения реакции на сейсмические воздействия коробчатые конструкции с прямоугольными поперечными сечениями обладают свойствами, отличными от свойств цилиндрических тоннелей и эти различия рекомендуется учитывать.

5.1.31 Тоннели, сооружённые открытым способом, находятся на небольшой глубине, где деформации грунта больше, чем на большой глубине, вследствие малой жесткости грунтов и усиления колебаний грунта ближе к дневной поверхности.

5.1.32 Как показывает опыт эксплуатации, тоннели, построенные путём разработки грунта с последующей засыпкой, сильнее повреждаются при землетрясениях, чем тоннели, расположенные на большей глубине.

5.1.33 Коробчатые конструкции не работают так эффективно, как работают цилиндрические, в результате чего приходится применять более толстые стены и

перекрытия. Вследствие этого, прямоугольные тоннельные конструкции, как правило, более жесткие, чем круговые обделки тоннеля в поперечном направлении и менее приспособляются к деформациям грунта. Эта особенность, вместе с потенциально большими деформациями грунта при землетрясениях, которые характерны для небольших глубин, делают учёт взаимодействия тоннельной обделки с грунтом особенно важным для сейсмических расчётов тоннелей прямоугольных поперечных сечений, построенных открытым способом.

5.1.34 При сооружении тоннелей открытым способом грунт засыпается сверху конструкции, а также между нетронутым грунтом и конструкцией. Часто насыпной грунт может состоять из материала, свойства которого отличаются от свойств первоначального грунтового массива. Свойства насыпного грунта и исходного грунта рекомендуется учитывать при анализе.

5.1.35 Для протяжённых тоннелей и тоннелей, пересекающих неоднородные грунтовые формации, следует определять количество и месторасположение промежуточных подвижных стыков.

5.1.36 Конструкция антисейсмического шва должна допускать взаимные продольные смещения смежных участков обделки при деформациях без силового воздействия элементов обделки друг на друга. В случае необходимости следует предусматривать мероприятия по гидроизоляции или осушению обделки тоннеля.

5.1.37 В местах пересечения тоннелем границ тектонических трещин следует устраивать дополнительные антисейсмические швы.

5.1.38 В местах примыкания к тоннелю камер и других подземных выработок (дренажные и вентиляционные штольни и пр.) между этими сооружениями и тоннелем следует предусматривать антисейсмические швы, которые могут быть совмещены с деформационно-осадочными швами.

5.1.39 Антисейсмические деформационные швы в тоннельных конструкциях рекомендуется совмещать с температурно-осадочными швами. Если расстояние между антисейсмическими деформационными швами по результатам расчета окажется меньше, чем между температурно-осадочными швами, то в этом случае следует устраивать дополнительные антисейсмические деформационные швы.

5.1.40 В железобетонных конструкциях в качестве рабочей (расчетной) арматуры рекомендуется применять стержневую арматуру из стали класса А300 марки 10ГТ диаметром 10-32 мм по ГОСТ 5781. Допускается применение арматурной стали класса А400 марки 25Г2С диаметром 6-40 мм по ГОСТ 5781 и А500СП марки Ст3сп, Ст3пс, Ст3Гпс диаметром 10-40 мм по ТУ 14-1-5526 [4]. В качестве конструктивной (нерасчетной) арматуры разрешается применять сталь класса А240 и А300 по ГОСТ 5781 и ГОСТ 380 марок ВСт3сп2, ВСт3пс2, ВСт5сп2 и ВСт5пс2.

Марки сталей для закладных элементов железобетонных конструкций должны соответствовать требованиям СНиП РК 5.03-34 и СНиП 2.03.01.

5.1.41 При устройстве незамкнутого поперечного сечения обделок следует обеспечивать конструктивную заделку нижней части стен.

5.1.42 Внутренние элементы обделок станционных тоннелей, рекомендуется проектировать с учетом их упругого деформирования, что позволит обеспечить их работоспособность при сейсмических воздействиях значительной интенсивности. При

проектировании рекомендуется предусматривать гибкую подвеску лестниц и пересадочных мостов над путями.

5.1.43 В районах сейсмичностью 8 и 9 баллов на припортальных участках тоннелей, где налегающая толща грунта менее трех наибольших размеров поперечного сечения выработки, следует применять железобетонные обделки. В особо сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях при соответствующем обосновании допускается применение обделок из чугуна.

5.1.44 Элементы сборных обделок необходимо соединять между собой связями растяжения в плоскости поперечного сечения тоннеля (армирование стыков, сварка закладных деталей в радиальных стыках железобетонной блочной обделки, установка болтовых и скобовых соединений и т.п.).

5.1.45 При взаимном пересечении подземных выработок ответственного назначения, когда при сейсмическом воздействии не допускается их смещение относительно друг друга, при проектировании следует предусматривать жесткое усиленное объединение конструкций.

5.2 Основные положения расчета

5.2.1 Расчеты тоннельных обделок проводятся на следующие сочетания действия нагрузок:

- основные сочетания;
- особые сочетания, состоящие из постоянных, длительных, возможных кратковременных и одной из особых (кроме сейсмических) нагрузок;
- особое сочетание, состоящее из постоянных, длительных нагрузок и сейсмического воздействия.

5.2.2 Протяжённые тоннели, могут подвергаться сейсмическим воздействиям, отличающимся по длине сооружений. Поэтому в таких случаях рекомендуется учитывать пространственный характер движения грунта, так как в тоннельной обделке могут возникнуть перемещения и усилия, зависящие от пространственного характера движения грунта.

5.2.3 При распространении сейсмических волн в грунтах напряжения, как правило, не превышают предела упругости, поэтому в расчётах могут использоваться положения линейной теории упругости. В приложении А приведены зависимости для упругой модели грунта.

5.2.4 Для расчёта тоннелей глубокого заложения рекомендуется знать параметры тоннельной обделки, характеристики грунтов, в которых расположен тоннель и параметры сейсмических продольных и поперечных волн, падающих на тоннельную обделку. Краткое изложение теории распространения волн в упругих средах представлено в Приложении Б.

5.2.5 Для расчёта тоннелей мелкого заложения рекомендуется знать параметры тоннельной обделки, характеристики грунтов, в которых расположен тоннель.

5.2.6 Расчет конструкций тоннельных обделок на сейсмические воздействия следует проводить по первой группе предельных состояний.

5.2.7 Расчет тоннельных конструкций на сейсмические воздействия рекомендуется проводить с учетом свойств окружающих обделку грунтов, в том числе упругой анизотропии, методами теории упругости или строительной механики.

Рекомендуется соблюдать следующий порядок расчетов тоннельных конструкций с учетом сейсмических воздействий:

- уточняется при наличии карт сейсмического микрорайонирования и результатов изысканий сейсмичность площадки строительства;

- определяется расчетная сейсмичность конструкции подземного сооружения согласно Таблицы 1;

- тоннельное сооружение разбивается на отдельные участки в зависимости от инженерно-геологических и гидрогеологических условий, определяются расстояния до дневной поверхности земли и типы применяемой обделки для каждого из участков;

- выбирается методика расчета каждого участка тоннельного сооружения на сейсмическое воздействие в соответствии с указаниями настоящего свода правил;

- определяются расчетные усилия в элементах обделки, порталах от действия основных и особых сочетаний действия нагрузок;

- проверяется прочность конструкций обделки по максимальным усилиям, определяемым по результатам сравнительных расчетов, выполненных согласно п.5.2.1.

5.2.8 Обделки тоннелей глубокого заложения (заложение шельги свода не менее трех максимальных поперечных размеров выработки) рассчитывают на действие сейсмических волн сжатия-растяжения и сдвига с учетом всех возможных направлений их действия в плоскости поперечного сечения тоннеля.

5.2.9 Расчет шарнирных обделок участков тоннелей глубокого заложения допускается производить на действие контактных напряжений, определяемых методами теории упругости как для монолитных обделок, а определение усилий производить методами строительной механики с учетом шарниров и т.п.

5.2.10 В случае, если расчет тоннельных обделок на статические нагрузки ведется методами строительной механики, нагрузку от сейсмического воздействия определяют методом теории упругости и суммируют ее со статической нагрузкой.

5.2.11 В случае, если расчет тоннельных обделок ведется методами теории упругости, напряженное состояние от статических и сейсмических воздействий определяют отдельно и суммируют их.

5.2.12 Расчет обделок участков тоннелей мелкого заложения проводится на действие инерционных сил от масс грунта и собственного веса конструкций при вертикальном и горизонтальном направлениях сейсмического воздействия.

5.2.13 Расчет порталных подпорных стен проводится на действие горизонтальной составляющей инерционных сил от массы грунта и собственного веса конструкций.

5.2.14 При расчете тоннелей на особое сочетание с учетом сейсмических воздействий коэффициент сочетания следует принимать равным $n_0 = 1$.

5.2.15 Расчетные значения инерционных нагрузок от собственного веса конструкций и от массы грунта следует определять в соответствии с СНиП II-7-81.

5.2.16 Интенсивность горизонтального инерционного давления грунта на припортальные подпорные стены допускается определять по формулам:

$$\left. \begin{aligned} P_c(y) &= 2k_c \gamma' y, & \text{при } 0 \leq y \leq 0,5H \\ P_c(y) &= 2k_c \gamma' (H - y), & \text{при } 0,5H \leq y \leq H \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где k_c - коэффициент сейсмичности, равный 0,025; 0,05 и 0,1 при расчетной сейсмичности 7, 8 и 9 баллов соответственно;

γ' – расчетное значение объемной массы грунта засыпки, МН/м³;

H – толщина расчетного слоя грунта, принимаемая равной расстоянию от подошвы фундамента подпорной стены до расчетной поверхности грунта;

y – расстояние от верха подпорной стены.

5.2.17 При расчете тоннелей на действия сейсмических волн сжатия-растяжения и сдвига, сейсмические нормальные ($\sigma_{x'}^{(\infty)}$ и $\sigma_{y'}^{(\infty)}$) и касательные ($\tau_{x'y'}^{(\infty)}$) напряжения, возникающие в изотропном массиве на бесконечности по произвольным взаимно-перпендикулярным направлениям x' и y' , (Рисунки 2 и 3), согласно [5] следует определять по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x'}^{(\infty)} &= \pm \frac{1}{2\pi} k_c \gamma C_1 T_0, \\ \sigma_{y'}^{(\infty)} &= \frac{\nu_0}{1 - \nu_0} \sigma_{x'}^{(\infty)}, \\ \tau_{x'y'}^{(\infty)} &= \pm \frac{1}{2\pi} k_c \gamma C_2 T_0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где γ – объемный вес грунта, МН/м³;

C_1 – скорость распространения продольных (сжатия-растяжения) волн, м/с;

C_2 – скорость распространения поперечных (сдвиги) волн, м/с;

T_0 – преобладающий период колебаний частиц породы, с;

ν_0 – коэффициент Пуассона грунта.

Примечания

1 Для предварительных расчетов в случае отсутствия данных о характеристиках грунтов рекомендуется использовать данные, приведенные в Приложении В [2].

2 При расположении тоннеля глубокого заложения в однородных по сейсмической жесткости грунтах возможно уменьшение коэффициента сейсмичности k_c до $0,5 k_c$ при глубине заложения тоннеля в 100 м и более.

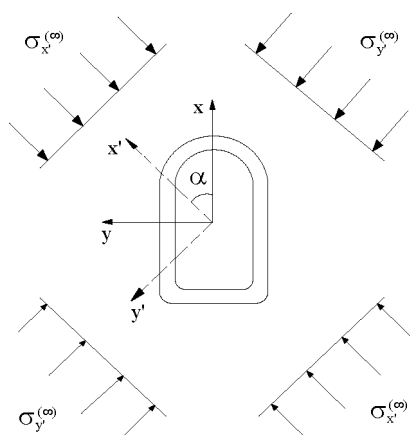


Рисунок 2 – Расчетная схема к определению напряженного состояния обделки от продольных сейсмических волн

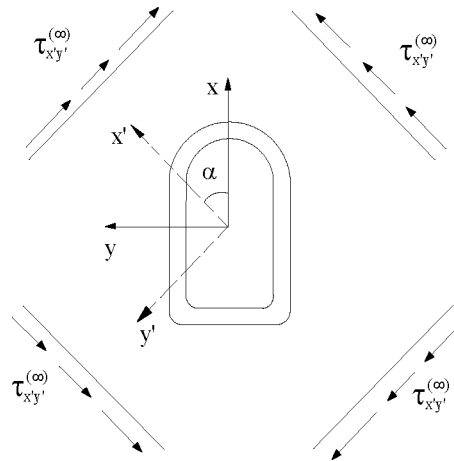


Рисунок 3 – Расчетная схема к определению напряженного состояния обделки от поперечных сейсмических волн

5.2.18 При расчете тоннелей в анизотропной (трансверсально-изотропной, т.е. транстропной) толще грунтов на действие сейсмических волн растяжения-сжатия и сдвига в отличие от изотропных грунтов сейсмические напряжения σ_i^c , τ_i^c , возникающие в массиве на «бесконечности», следует определять по формулам в зависимости от направления распространения волн относительно плоскости изотропии массива [2, 6]. При распространении сейсмических волн в направлении OX_1 (Рисунок 4):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x_1 \max}^c &= \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c \xi_{\max} V_p(x_1), \\ \sigma_{y \max}^c &= \lambda_y^c \sigma_{x_1 \max}^c, \quad \sigma_{z_1 \max}^c = \lambda_{z_1}^c \sigma_{x_1 \max}^c, \\ \tau_{x_1 z_1 \max}^c &= \lambda_{x_1 z_1}^c \sigma_{x_1 \max}^c \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c V_{SV}, \\ \tau_{x_1 y \max}^c &= \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c V_{SH}, \quad \tau_{yz_1}^c = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

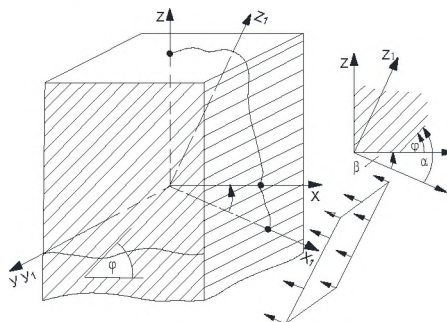


Рисунок 4 – Расчетная схема распространения сейсмических волн в направлении OX_1

При распространении сейсмических волн в направлении OY (Рисунок 5):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{y \max}^c &= \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c V_p, & \sigma_{x \max}^c &= \lambda_x^c \sigma_{y \max}^c, \\ \sigma_{z \max}^c &= \lambda_z^c \sigma_{y \max}^c, & \tau_{xz \max}^c &= \lambda_{xz}^c \sigma_{y \max}^c, \\ \tau_{yz \max}^c &= \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c V_{SV}, & \tau_{xy \max}^c &= \pm \frac{T_0}{2\pi} \gamma k_c V_{SH}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Здесь V_p – скорость распространения продольных (сжатия-растяжения) волн, м/с, определяется по Приложению Г;

V_{SV}, V_{SH} – скорости распространения поперечных (сдвига) волн, поляризованных, соответственно параллельно и перпендикулярно плоскости изотропии транстропного массива, определяются по Приложению Г;

$\xi_{\max}$ – безразмерный коэффициент, величина которого в зависимости от различия скоростей распространения продольной волны в разных направлениях в транспортном массиве равняется 1,1 - 1,2;

$\lambda_y^c, \lambda_{z_1}^c, \lambda_{x_1 z_1}^c$ и $\lambda_x^c, \lambda_z^c, \lambda_{xz}^c$ – коэффициенты сейсмического бокового давления, определяются по Приложению Д.

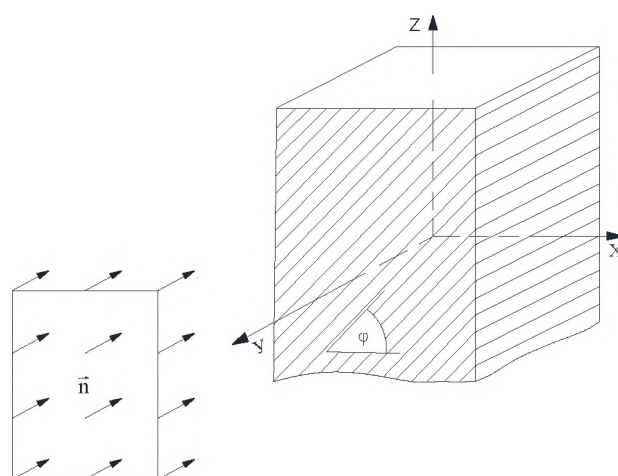


Рисунок 5 – Расчетная схема распространения сейсмических волн в направлении OY

5.2.19 При расчете сооружений, в том числе подземных сооружений, в соответствии с требованиями СНиП II-7 рекомендуется учитывать влияние кратковременности действия сейсмических нагрузок на прочность материалов введением в условие прочности при расчете по первому предельному состоянию дополнительного коэффициента условия работы $m_{кр}$. Для некоторых материалов, конструкций и соединений значения коэффициента $m_{кр}$ приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента условий работы

Конструкция, соединение	Значения коэффициента $m_{кр}$
1 Стальные и деревянные конструкции	1,4
2 Железобетонные конструкции со стержневой и проволочной арматурой (кроме проверки прочности наклонных сечений): - из тяжелого бетона с арматурой классов А-I, А-II, А-III, Вр-1 - то же, с арматурой других классов	1,2 1,1
3 Железобетонные конструкции, проверяемые по прочности наклонных сечений	1,0
4 Бетонные и каменные конструкции, работающие: - на внецентренное сжатие - на сдвиг и растяжение	1,2 1,0
5 Сжатые и сжато – изогнутые стальные элементы гибкостью свыше 100 при расчете на устойчивость	1,0
6 Сварные соединения	1,0
7 Болтовые соединения	1,1

5.3 Расчет замкнутых монолитных обделок произвольного очертания тоннелей глубокого заложения с учетом изотропии массива

5.3.1 Область применения положений настоящей методики расчета, изложенной в данном подразделе согласно [2, 7], характеризуется следующими условиями:

а) грунтовый массив принимается линейно - деформируемой однородной изотропной средой, механические свойства которой характеризуются средними величинами модуля деформации E_0 и коэффициента Пуассона ν_0 ;

б) тоннельная обделка рассматривается как замкнутая конструкция заданной толщины и конфигурации, работающая в упругой стадии в условиях полного контакта с грунтовым массивом;

в) обделка рассчитывается в условиях плоской деформации, т.е. считается, что длина проектируемого сооружения превосходит его поперечные размеры не менее чем в 5 раз и сейсмические волны распространяются в плоскости поперечного сечения сооружения;

г) глубина заложения тоннеля превосходит наибольший размер его поперечного сечения не менее чем в 3 раза, т.е. влияние земной поверхности не учитывается;

д) длина упругих волн сдвига с преобладающим периодом колебаний частиц грунта превосходит наибольший поперечный размер выработки не менее чем в 3 раза, т.е. деформационные характеристики массива грунта таковы, что выполняется условие

$$\frac{E_0 g T_0^2}{20\gamma(1+\nu_0)} \geq D^2, \quad (6)$$

где E_0 - модуль деформации грунта, МПа;

γ - объемный вес грунта, МН/м³;

T_0 - преобладающий период колебаний частиц грунта, с;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

D - наибольший поперечный размер выработки, м.

е) не имеется близко расположенных сооружений на расстоянии менее $2D$.

5.3.2 Положения методики, изложенной в данном подразделе настоящего свода правил, возможно использовать для приближенного расчета набрызг-бетонных обделок, в том числе – в сочетании их с анкерами, при выполнении условий п.5.3.1 настоящего свода правил, а также для приближенного расчета сборных обделок тоннелей глубокого заложения.

5.3.3 Расчет обделки проводится на основании оценки наиболее неблагоприятного напряженного состояния в каждом нормальном (радиальном) сечении обделки из возможных при любых сочетаниях одновременно действующих на обделку продольных волн сжатия-растяжения и поперечных волн сдвига и любых их направлениях в плоскости поперечного сечения сооружения.

5.3.4 Отыскание наиболее неблагоприятного напряженного состояния в каждом нормальном (радиальном) сечении проводится путем определения экстремальных значений нормальных тангенциальных напряжений σ_θ в данном сечении и соответствующих им направлений распространения и сочетаний действия продольных волн сжатия-растяжения и поперечных волн сдвига.

5.3.5 Напряженное состояние обделки от действия длинной, произвольно направленной (в плоскости поперечного сечения тоннеля) продольной волны сжатия $\sigma_{сж}$ определяют на основании решения плоской квазистатической контактной задачи теории упругости для кольца произвольной формы с одной осью симметрии, подкрепляющего вырез в линейно-деформируемой среде с другими деформационными характеристиками, работающего совместно с окружающей средой в соответствии с расчетной схемой (см. рисунок 2).

Напряженное состояние на бесконечности принимают согласно п.5.2.17 настоящего свода правил в виде

$$P = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma C_1 T_0 \text{ и } \xi P, \text{ где } \xi = \frac{v_0}{1 - v_0}, \quad (7)$$

где ξ - коэффициент бокового давления.

Скорость распространения упругих продольных волн сжатия (растяжения) C_1 , определяется непосредственными измерениями при изысканиях, или вычисляется по формуле

$$C_1 = \sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma} \cdot \frac{1 - v_0}{(1 + v_0)(1 - 2v_0)}}, \quad (8)$$

Примечание - Для предварительных расчетов допускается использовать данные Приложения В.

5.3.6 Напряженное состояние обделки от действия длинной, направленной под

произвольным углом α к вертикальной оси симметрии выработки поперечной волны сдвига $\sigma_{сдв}$ определяют на основании решения квазистатической контактной задачи, расчетная схема которой приведена на Рисунке 3.

Касательные напряжения на бесконечности в соответствии с п.5.2.17 настоящего свода правил имеют величины

$$Q = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma C_2 T_0, \quad (9)$$

Скорость распространения упругих поперечных волн сдвига C_2 , определяется по формуле

$$C_2 = \sqrt{\frac{E_0 g}{2\gamma(1+\nu_0)}}, \quad (10)$$

Примечание - Для предварительных расчетов допускается использовать данные Приложения В.

5.3.7 Экстремальные значения напряжений σ_θ определяются на основании решения следующих уравнений для каждого нормального (радиального) сечения обделки

$$\frac{\partial \sigma_{\theta 1}}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{\theta 2}}{\partial \alpha} = 0, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta 1} &= \sigma_{\theta(сж)} + \sigma_{\theta(сдв)}, \\ \sigma_{\theta 2} &= \sigma_{\theta(сж)} - \sigma_{\theta(сдв)}. \end{aligned} \quad (12)$$

здесь $\sigma_{\theta(сж)}$, $\sigma_{\theta(сдв)}$ - соответственно нормальные тангенциальные напряжения в данном сечении обделки от действия продольной волны сжатия и поперечной волны сдвига, направленных под углом α к вертикальной оси симметрии выработки.

5.3.8 При решении уравнений (11), где в качестве σ_θ принимаются их выражения на внешнем и на внутреннем контуре поперечного сечения обделки, получают четыре значения напряжений σ в каждом сечении. Затем для каждого сечения конструкции определяют те сочетания действия волн σ_1 или σ_2 и те углы их падения α_1 , α_2 , которые соответствуют наибольшему сжимающим (отрицательным) и наибольшему растягивающим (положительным) напряжениям σ_θ .

5.3.9 Наибольшие сжимающие и растягивающие напряжения σ_θ в каждом сечении принимаются за расчетные. Усилия M и N , соответствующие этим напряжениям, вычисляют для каждого сечения именно при тех сочетаниях действия волн разного характера и том их направлении, при которых получены экстремальные значения напряжений σ_θ .

5.3.10 Если обделка не прианкерена к грунту и проектируется с допущением образования трещин, то за расчетные принимают обе эпюры усилий M и N , соответствующие наибольшему сжимающим и растягивающим напряжениям σ_θ .

5.3.11 Если обделка проектируется без допущения трещин и если она прианкерена к

грунту или выполнена из набрызг-бетона, то за расчетные на сжатие и растяжение принимают эпюры усилий M и N , соответствующие напряжениям σ_θ максимальным по абсолютной величине, взятые со знаками «плюс» и «минус».

5.3.12 Расчетные эпюры усилий M и N суммируют с усилиями от других видов действующих нагрузок и используют для проверки прочности сечений на сжатие и на растяжение.

5.3.13 Расчет круговых обделок согласно [1,7] проводится по алгоритму, приведенному в Приложении Е.

5.3.14 Расчет обделок некругового поперечного сечения согласно [7] проводится по алгоритму, приведенному в приложении Ж, а использование графо – аналитического способа, разработанного П.В. Мелентьевым [8], приведено в Приложении И.

5.4 Расчет замкнутых монолитных обделок кругового очертания тоннелей глубокого заложения с учетом упругой анизотропии массива

5.4.1 Область применения положений методики расчета, изложенной в данном подразделе характеризуется следующими условиями [2, 6]:

а) длина проектируемого подземного сооружения превосходит его поперечные размеры не менее чем в 5 раз;

б) глубина заложения тоннеля (заложение щельги свода) превосходит наибольший размер его поперечного сечения не менее чем в 3 раза;

в) длина упругих волн сдвига с преобладающим периодом колебаний частиц грунта превосходит наибольший поперечный размер выработки не менее чем в 3 раза, т.е. деформационные характеристики массива грунтов и горных пород таковы, что выполняется условие

$$\frac{g \sin^2 2\alpha T^2}{40\gamma \left[\frac{1}{E_\alpha} - \frac{1}{E_1} \cos^4 \alpha - \frac{1}{E_2} \sin^4 \alpha + \frac{\nu_2}{2E_1} \sin^2 2\alpha \right]} \geq D^2, \quad (\alpha \neq 0, \alpha \neq 90^\circ), \quad (13)$$

где E_1 и E_2 - модули деформации (модули Юнга) грунта в плоскости изотропии, $E_I=E_{II}$ и перпендикулярно к ней $E_2=E_1$ транстропного образца или массива, МПа;

E_α - модуль деформации (модуль Юнга) грунта в направлении под углом α к плоскости изотропии, МПа;

ν_2 - коэффициент поперечного растяжения (сжатия) в плоскости, перпендикулярной к плоскости изотропии при сжатии (растяжении) в плоскости изотропии, $\nu_2=\nu_{I,II}$;

D - диаметр кругового тоннеля, м.

5.4.2 Массив грунта моделируется линейно-деформируемой, однородной анизотропной (трансверсально-изотропной, т.е. транстропной) средой, механические свойства которой характеризуются средними значениями модулей деформации $E_I=E_{II}$, $E_2=E_1$, E_α , коэффициентов поперечного растяжения (сжатия) в плоскости, перпендикулярной к плоскости изотропии, $\nu_2 = \nu_{I,II}$ и в плоскости изотропии $\nu_1 = \nu_{II,II}$ при сжатии (растяжении) в плоскости изотропии.

Величины упругих констант E_1 , E_2 , E_α , ν_1 и ν_2 определяют из испытаний на

одноосное сжатие (растяжение) транстропных (слоистых) породных образцов либо расчетным путем для массива, если известны соответствующие характеристики составляющих его слоев и параметры трещиноватости.

5.4.3 Обделку рассчитывают как в условиях плоской деформации, так и в условиях обобщенной плоской деформации в зависимости от ориентации продольной оси тоннеля относительно линии простирания плоскости изотропии транстропного массива. В поперечном сечении тоннеля, пройденного вдоль линии простирания плоскости изотропии (Рисунок 6), реализуются условия плоской деформации, а тоннеля, пройденного вкрест линии простирания плоскости изотропии массива (Рисунок 7), - условия обобщенной плоской деформации.

5.4.4 Расчет обделки проводится на основании оценки наиболее неблагоприятного напряженного состояния в каждом нормальном (радиальном) сечении обделки из возможных при любых сочетаниях одновременно действующих на обделку волн сжатия-растяжения и волн сдвига и любых их направлениях в плоскости поперечного сечения сооружения.

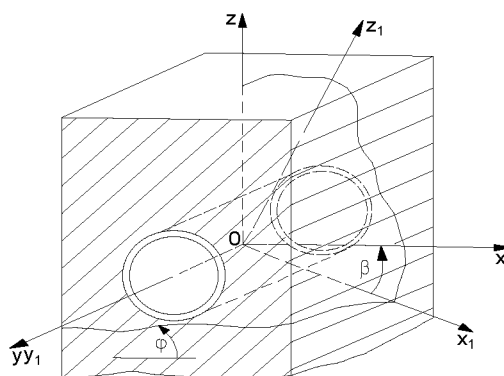


Рисунок 6 – Расчетная схема

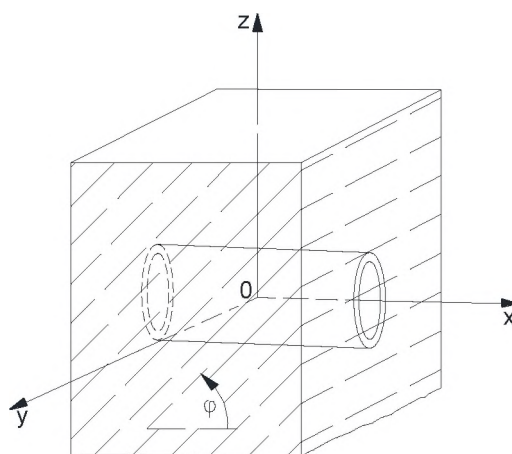


Рисунок 7 – Расчетная схема

5.4.5 Оценка наиболее неблагоприятного напряженного состояния в каждом нормальном (радиальном) сечении проводится путем отыскания экстремальных значений нормальных тангенциальных напряжений в данном сечении и соответствующих им

направлений распространения и сочетаний действия волн сжатия-растяжения и сдвига.

5.4.6 Напряженное состояние обделки тоннеля, пройденного вдоль линии простирания плоскости изотропии, от действия длинных произвольно направленных в плоскости поперечного сечения волн сжатия-растяжения (продольных волн) и сдвига (поперечных волн) определяют на основании решения квазистатической контактной задачи теории упругости для кольца, подкрепляющего вырез в линейно-деформируемой транстропной среде с другими деформационными характеристиками и работающего совместно с окружающей средой в соответствии с расчетной схемой (Рисунок 8).

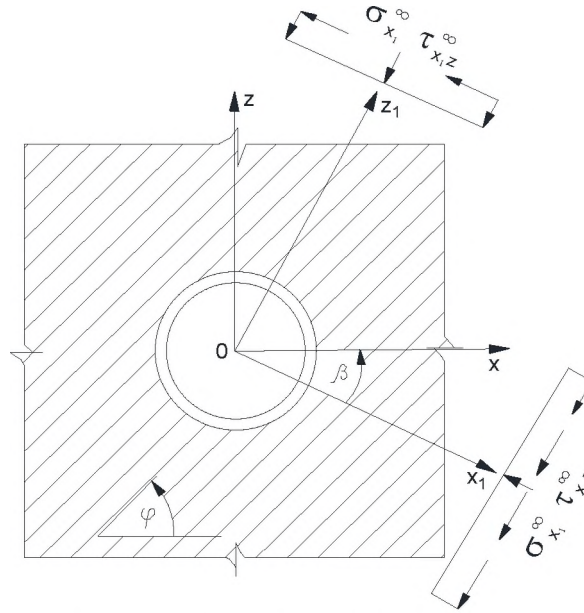


Рисунок 8 – Расчетная схема

Напряженное состояние на «бесконечности» принимают согласно 5.2.18 при распространении сейсмических волн в направлении OX_1 в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_x^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \left\{ \xi_{\max} V_p (\cos^2 \beta + \lambda_{z_1}^c \sin^2 \beta + \lambda_{x_1 z_1}^c \sin 2\beta) + V_{sv} \sin 2\beta \right\}, \\ \sigma_z^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \left\{ \xi_{\max} V_p (\sin^2 \beta + \lambda_{z_1}^c \cos^2 \beta - \lambda_{x_1 z_1}^c \sin 2\beta) + V_{sv} \sin 2\beta \right\}, \\ \tau_{xz}^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \left\{ \xi_{\max} V_p 0, 5(\lambda_{z_1}^c - 1) \sin 2\beta + V_{sv} \cos 2\beta \right\}.\end{aligned}\quad (14)$$

При распространении сейсмических волн в направлении OY в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_x^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \xi_{\max} V_p \lambda_x^c, \\ \sigma_z^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \xi_{\max} V_p \lambda_z^c, \\ \tau_{xz}^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \xi_{\max} V_p \lambda_{xz}^c.\end{aligned}\quad (15)$$

5.4.7 Напряженное состояние обделки тоннеля, пройденного вкост линии простирания плоскости изотропии, от действия длинных в плоскости поперечного сечения

и вдоль оси тоннеля волн сжатия-растяжения (продольных волн) и сдвига (поперечных волн) определяют на основании решения квазистатической контактной задачи теории упругости для кольца, подкрепляющего вырез в линейно-деформируемой транстропной среде с другими деформационными характеристиками и работающего совместно с окружающей средой в соответствии с расчетной схемой (Рисунок 9).

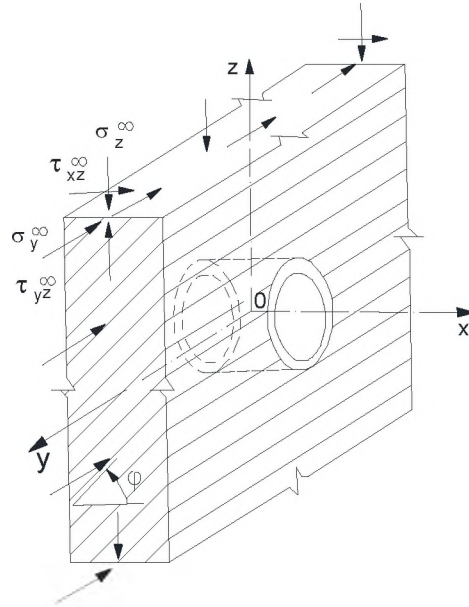


Рисунок 9 – Расчетная схема

Напряженное состояние на «бесконечности» принимают согласно п.5.2.18 настоящего свода правил при распространении сейсмических волн в направлении OX_I в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_z^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \left[\xi_{\max} V_p (\sin^2 \beta + \lambda_{z_1}^c \cos^2 \beta - \lambda_{x_1 z_1}^c \sin 2\beta) + V_{sv} \sin 2\beta \right], \\ \sigma_y^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \lambda_y^c V_p, \quad \tau_{yz}^\infty = \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c V_{sv} \sin \beta, \quad \tau_{xy}^\infty = \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c V_{sv} \cos \beta, \\ \tau_{xz}^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \left[0,5 \xi_{\max} V_p (\lambda_{z_1}^c - 1) \sin 2\beta + V_{sv} \cos 2\beta \right].\end{aligned}\quad (16)$$

и при распространении сейсмических волн в направлении OY в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_y^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c V_p, \quad \sigma_z^\infty = \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \lambda_z^c V_p, \\ \tau_{yz}^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c V_{sv}, \quad \tau_{xy}^\infty = \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c V_{sh}, \\ \tau_{xz}^\infty &= \pm \frac{T}{2\pi} \gamma k_c \lambda_{xz}^c V_p.\end{aligned}\quad (17)$$

5.4.8 Экстремальные значения напряжений σ_θ определяют на основании численных

расчетов для каждого нормального (радиального) сечения обделки через определенный интервал угла θ и рассматривают различные сочетания:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta 1} &= \sigma_{\theta(cж)} + \sigma_{\theta(cдв)} \\ \sigma_{\theta 2} &= \sigma_{\theta(cж)} - \sigma_{\theta(cдв)}\end{aligned}\quad (18)$$

где $\sigma_{\theta(cж)}, \sigma_{\theta(cдв)}$ - соответственно нормальные тангенциальные напряжения в данном сечении обделки от действия волны сжатия и волны сдвига (при распространении волн в направлении X_I варьируются значения угла α).

В результате таких расчетов (в качестве σ_θ принимают их выражения на внешнем и внутреннем контуре поперечного сечения обделки) получают четыре значения напряжений σ в каждом сечении. Затем для каждого сечения конструкции определяют сочетания действия волн σ_1 и σ_2 , которые соответствуют наибольшим сжимающим (отрицательным) и наибольшим растягивающим (положительным) напряжениям σ_θ .

5.4.9 Расчетные усилия для проверки прочности сечений обделок определяют аналогично указаниям п.п.5.3.9 - 5.3.12 настоящего свода правил.

5.4.10 Пример расчета.

На Рисунке 10 приведены эпюры сейсмического контактного давления σ_z на жесткую недеформируемую обделку ($E_{кр} = \infty$) тоннеля, пройденного по простиранию пород в транстропном массиве ($E_I = 1,074 \cdot 10^4$ МПа, $E_2 = 0,523 \cdot 10^4$ МПа; $G_2 = 0,120 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_I = 0,413$, $\nu_2 = 0,198$, $\varphi = 60^\circ$; сплошная линия) и изотропном массиве ($E = 0,523 \cdot 10^4$ МПа; $\nu = 0,2$; штриховая линия) при распространении волн сжатия-растяжения V_p в направлении вкрест простирания плоскости изотропии с интенсивностью в 9 баллов ($k_c = 0,1$; $\gamma = 0,025$ МН/м³, $T = 0,5$ с), а на Рисунке 11 — эпюры σ_r от волн сдвига V_{sv} ($\varphi = 30^\circ$; $E = (E_I + E_2)/2$, $\nu = 0,2$). Значения напряжений σ_r представлены в долях от значения $\sigma_x^{(0)}$, равного $(T/2\pi)\gamma k_c V_p$ (при $\varphi = 0$).

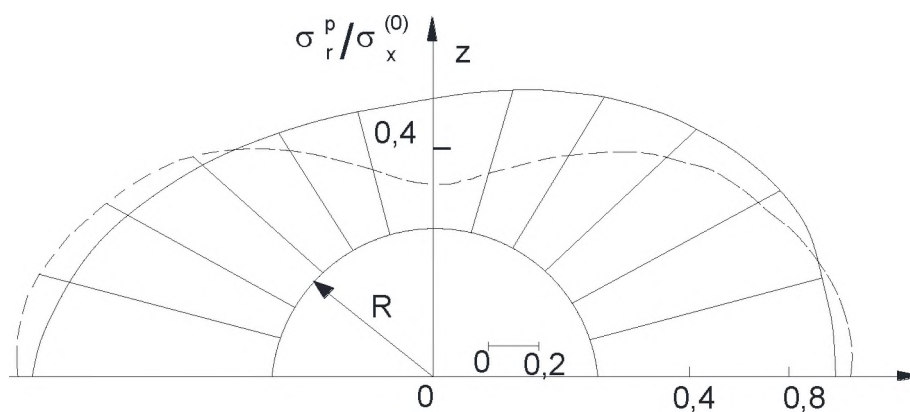


Рисунок 10 - Расчетная схема

Рисунок 12 содержит эпюры напряжения σ_z от совместного воздействия волн V_p и V_{sv} . Как видно, сейсмическое давление на обделку в анизотропном массиве существенно отличается от случая изотропного массива.

На Рисунке 13 показаны эпюры сейсмического контактного давления σ_r (в долях от

$\sigma_x^{(o)} = (T/2\pi)\gamma k_c V_p$ (при $\varphi=0$) на жесткую обделку тоннеля кругового сечения, пройденного вкрест простирания плоскости изотропии от волн растяжения-сжатия, распространяемых горизонтально вдоль плоскости изотропии, при разных углах наклона плоскости изотропии (кривая 1 — при $\varphi = 0$; 2 — при $\varphi = 30^\circ$; 3 — при $\varphi = 60^\circ$; 4 — при $\varphi = 90^\circ$).

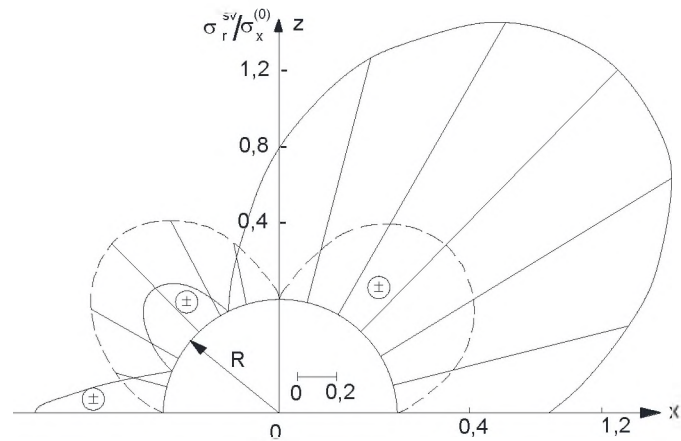


Рисунок 11 - Расчетная схема

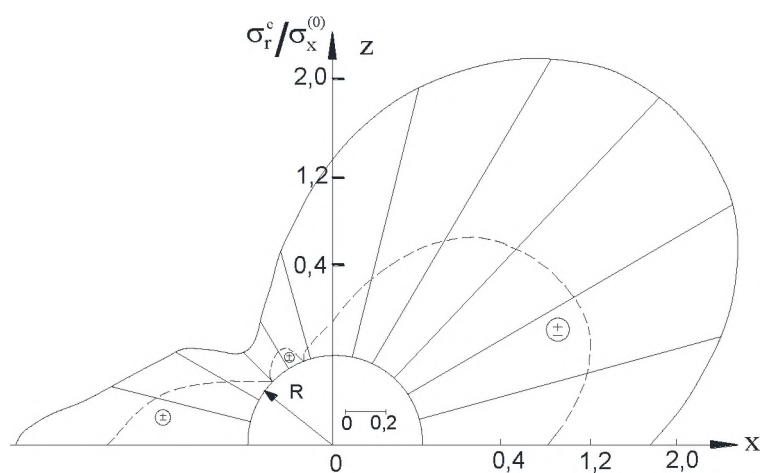


Рисунок 12 - Расчетная схема

Расчеты проведены для тех же исходных данных, взятых для тоннеля, пройденного по плоскости простирания изотропии массива. Кривая 4 ($\varphi = 90^\circ$) по существу соответствует случаю изотропного массива. Как видно, и в случае тоннеля, пройденного вкрест линии простирания плоскости изотропии пород, влияние анизотропии массива на величину и распределение сейсмического давления на обделку существенное [2, 6].

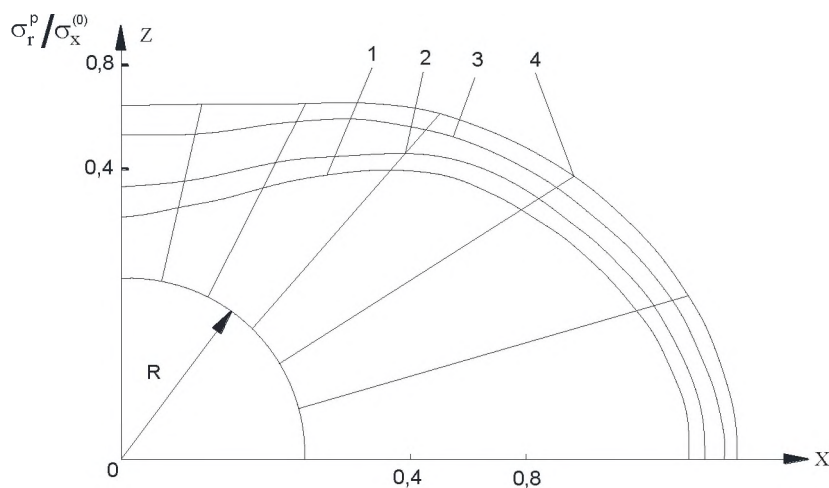


Рисунок 13 - Расчетная схема

5.5 Расчет многослойных обделок тоннелей кругового очертания

5.5.1 Положения настоящего подраздела по расчету многослойных тоннельных обделок кругового поперечного сечения глубокого заложения и стволов основываются на предпосылках, указанных в п.п. 5.3.1, 5.3.3, 5.3.5 и 5.3.6 настоящего свода правил [2, 7, 9].

5.5.2 Расчетная схема тоннельной обделки, представленная на Рисунке 14, представляет собой многослойное круговое кольцо, наружный слой которого моделирует массив грунта. Радиус грунтового слоя R_n принимается равным глубине заложения выработки.

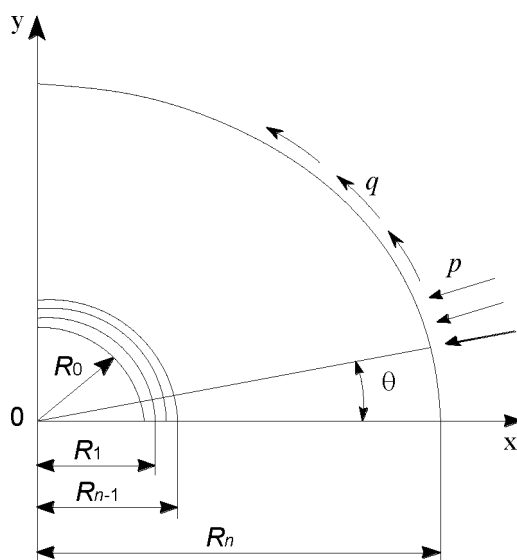


Рисунок 14 - Расчетная схема к определению напряженного состояния многослойной обделки

Расчетные напряжения, приложенные к внешнему контуру сечения грунтового слоя, определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} P &= P_0 + P_2 \cos 2\Theta, \\ q &= Q_2 \sin 2\Theta. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\text{Здесь} \quad P_0 = -\frac{P}{2(1-\nu_0)}, \quad P_2 = -P \frac{\sqrt{(3-4\nu_0)(1-2\nu_0)}}{2(1-\nu_0)}. \quad (20)$$

Величина P определяется согласно п.5.3.5 настоящего свода правил.

5.5.3 Экстремальные значения напряжений σ_θ на внешнем и внутреннем контурах каждого слоя обделки имеют место при значениях $\Theta = 0$, $\Theta = 90^\circ$. Наибольшие сжимающие и растягивающие напряжения σ_θ в указанных сечениях принимаются за расчетные.

Проверка прочности слоев производится в упругой стадии.

Расчетные растягивающие напряжения непосредственно сравнивают с расчетным сопротивлением материала обделки.

Проверка прочности материала обделки на сжатие производится с учетом объемного напряженного состояния по формуле

$$\left| \sigma_\theta - \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_r \right| \leq R_{np}, \quad (21)$$

где σ_r - расчетные радиальные сжимающие напряжения в рассматриваемом сечении (при растягивающих радиальных напряжениях в формулу подставляется $\sigma_r = 0$), МПа;

φ - угол внутреннего трения материала обделки, град;

R_{np} - расчетное сопротивление материала обделки (призматическая прочность), МПа.

5.5.4 Если проектируемая многослойная обделка прианкерена к грунту, то за расчетное принимают максимальные по абсолютной величине напряжения σ_θ , взятые со знаками "плюс" и "минус".

5.5.5 Расчетные напряжения σ_θ суммируют с напряжениями от других видов действующих нагрузок и используют для проверки прочности материала обделки при различных сочетаниях нагрузок.

5.5.6 Расчет многослойных круговых обделок тоннелей производится по алгоритму, приведенному в Приложении К.

5.6 Расчет анкерной крепи

5.6.1 По характеру восприятия и передачи нагрузок анкерные крепи в соответствии с ВСН 126 подразделяются на две группы:

- к первой группе относятся анкера (замкового типа), усилия закрепления которых сохраняются или увеличиваются по мере извлечения их из шпуров;
- к второй группе относятся анкера (омоноличиваемые) в которых при возрастании нагрузки до предельной практически не наблюдается перемещений.

5.6.2 Рекомендуемая ниже методика предназначена для расчета анкерной крепи замкового типа выработок круглого сечения [2, 9]:

- анкерная крепь рассчитывается как элемент единой деформируемой системы «крепь-массив» с учетом взаимного влияния анкеров;

- анкерная крепь рассматривается как система произвольного числа n стержней с параметрами l_a , r_a , E_a (l_a – длина анкера; r_a – радиус поперечного сечения анкера; E_a – модуль упругости материала анкера), радиально расположенных в массиве пород вокруг выработки круглого сечения, характеризуемом модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0 .

5.6.3 Расчет анкерной крепи на сейсмические воздействия заключается в определении максимальных продольных сил N_i^c в анкерных стержнях при различных сочетаниях совокупного действия одновременно приходящих (худший случай) длинных продольных и поперечных сейсмических волн, распространяющихся в любом направлении к плоскости поперечного сечения выработки.

5.6.4 Для определения сил в анкерных стержнях от действия длинной продольной волны, падающей под произвольным углом α , используется решение плоской квазистатической контактной задачи теории упругости, расчетная схема которой приведена на Рисунке 15.

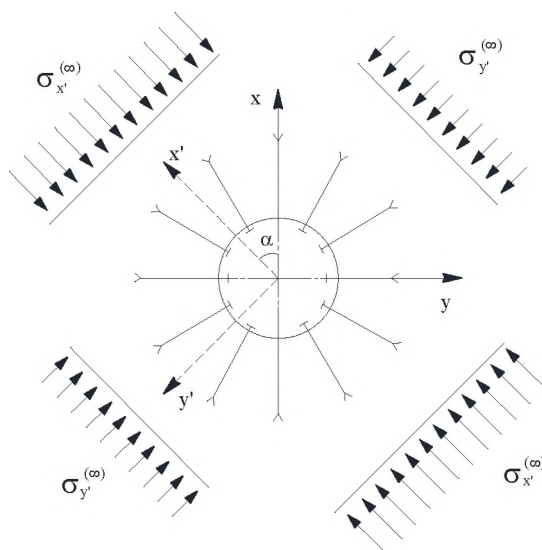


Рисунок 15 – Расчетная схема для определения продольных сил в анкерных стержнях от действия длинной продольной волны

5.6.5 Для определения продольных сил в анкерных стержнях от действия длинной поперечной волны, падающей под произвольным углом α к горизонтали, используется решение плоской квазистатической контактной задачи теории упругости, расчетная схема которой показана на Рисунке 16.

5.6.6 В качестве расчетного принимается максимальное растягивающее усилие в анкерном стержне при одновременном действии продольной и поперечной сейсмических волн.

При заведомо неизвестном направлении сейсмических волн максимальное растягивающее усилие рассматривается как равновероятное для всех анкерных стержней и суммируется с усилиями от действия собственного веса массива пород.

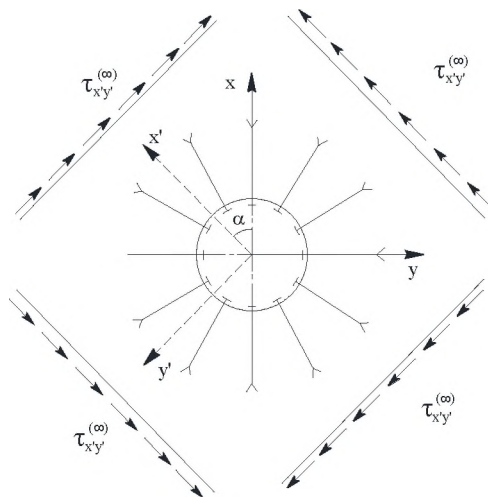


Рисунок 16 – Расчетная схема для определения продольных сил в анкерных стрижнях от действия длинной поперечной волны

5.7 Расчет набрызг-бетонной крепи

5.7.1 Покрытие из набрызг-бетона согласно ВСН 126 применяется для крепления горных выработок, предотвращения вывалов и предохранения породы от выветривания. Рекомендуемая минимальная толщина покрытия из набрызг-бетона должна приниматься не менее 3 см.

5.7.2 Рекомендуемая ниже методика предназначена для расчета набрызг-бетонной крепи на сейсмические воздействия [2, 7, 10]:

- набрызг-бетонная крепь рассчитывается как тонкое покрытие из другого материала, повторяющее форму поверхности выработки и составляющее с окружающим массивом пород единую деформируемую систему.

5.7.3 Набрызг-бетонная крепь рассматривается как кольцо заданной (проектной) толщины и конфигурации, имеющее неровности, аппроксимируемые гипотрохоидальной кривой, параметры которой – число неровностей n и амплитуда неровностей δ (среднее отклонение от проектного гладкого контура) задаются на основе статистической обработки данных натурных измерений.

При отсутствии таких данных, число неровностей согласно ВСН 126 определяется как половина отношения длины контура поперечного сечения выработки к расстоянию между контурными шпурами. В этом случае амплитуда неровностей принимается как половина допустимой нормы перебора.

Примечание - Ограничением применения методики расчета является выполнение условия $\frac{(n-1)\delta}{R} \pi \leq 1$, где R – средний радиус выработки.

5.7.4 Расчет набрызг-бетонной крепи на сейсмические воздействия состоит в определении для каждой точки внутренней поверхности конструкции максимальных по абсолютной величине нормальных тангенциальных напряжений σ_θ из возможных при

различных сочетаниях совместного действия длинных продольных и поперечных волн, распространяющихся в любом направлении в плоскости поперечного сечения выработки.

5.7.5 Для определения напряжений в крепи от действия длинной, падающей под произвольным углом α к оси симметрии выработки продольной волны $\sigma^{(p)}$ используется решение плоской квазистатической контактной задачи теории упругости, расчетная схема которой приведена на Рисунке 17.

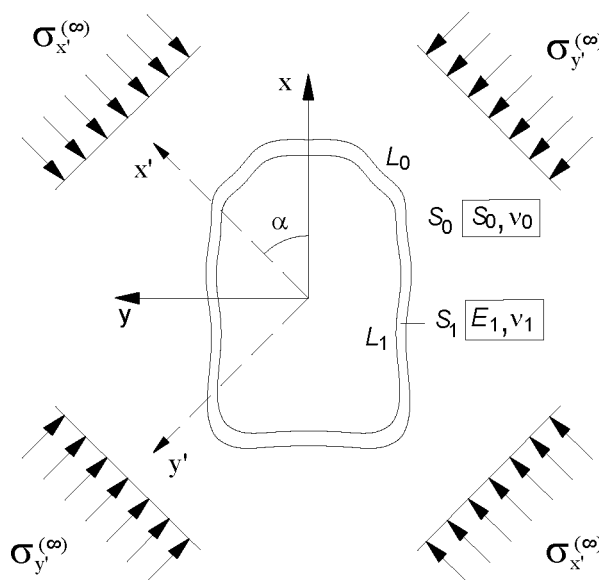


Рисунок 17 – Расчетная схема для определения напряженного состояния крепи от действия длинной произвольно направленной продольной волны

Кольцо S_1 , моделирующее крепь, материал которого имеет модуль деформации E_1 и коэффициент Пуассона ν_1 , деформируется совместно со средой S_0 , моделирующей массив пород, имеющей характеристики E_0 и ν_0 , т.е. на линии контакта L_0 соблюдаются условия непрерывности векторов напряжений и смещений. Внутренний контур кольца свободен от действия внешних сил. Напряжения на бесконечности принимаются согласно 5.2.17 настоящего свода правил.

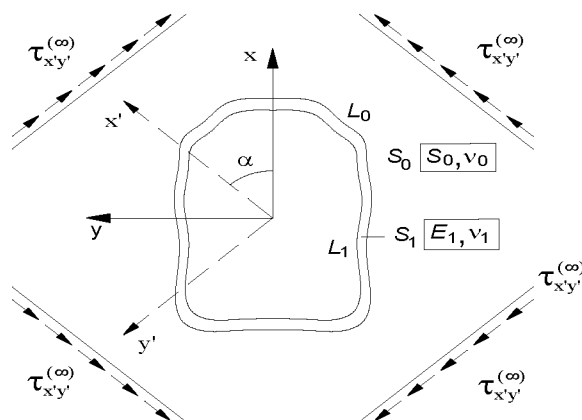


Рисунок 18 – Расчетная схема для определения напряженного состояния крепи от действия длинной произвольно направленной поперечной волны

5.7.6 Для определения напряжений в крепи от действия длинной падающей под произвольным углом α к оси симметрии выработки поперечной волны $\sigma^{(s)}$ используется решение плоской квазистатической контактной задачи теории упругости, расчетная схема которой приведена на Рисунке 18.

Касательные напряжения на бесконечности определяются согласно п.5.2.17 настоящего свода правил.

5.7.7 Определение максимальных напряжений σ_θ от сейсмических воздействий производится для каждой точки внутреннего контура путем исследования на экстремум по углу падения волн α выражений

$$\sigma_{\theta 1} = \sigma_{\theta}^{(p)} + \sigma_{\theta}^{(s)}, \quad \sigma_{\theta 2} = \sigma_{\theta}^{(p)} - \sigma_{\theta}^{(s)}, \quad (22)$$

характеризующих напряжения от совместного действия одновременно приходящих (неблагоприятный случай) продольных и поперечных волн.

Из решения уравнений

$$\frac{\partial \sigma_{\theta 1}}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{\theta 2}}{\partial \alpha} = 0, \quad (23)$$

для каждой точки определяются то сочетание действия волн ($\sigma_{\theta 1}$ или $\sigma_{\theta 2}$) и тот угол их падения α , при которых нормальные тангенциальные напряжения σ_θ в данной точке максимальны по абсолютной величине, а затем и величины максимальных напряжений, т.е. строится огибающая эпюр напряжений σ_θ при любых сочетаниях и направлениях продольных и поперечных волн.

5.7.8 Нормальные тангенциальные напряжения σ_θ в точках внешней поверхности крепи и усилия – изгибающие моменты M и продольные силы N в каждом сечении крепи определяются именно при тех сочетаниях и направлениях действия волн разного характера, при которых для данного сечения получены максимальные по абсолютной величине напряжения σ_θ .

5.7.9 Найденные усилия M и N , соответствующие максимальным по абсолютной величине напряжениям σ_θ на внутреннем контуре, принимаются со знаками «плюс» и «минус» и суммируются с усилиями от статических нагрузок.

5.7.10 Для проверки прочности сечения крепи на сжатие и на растяжение используются суммарные усилия в их наиболее неблагоприятном сочетании, т.е. в каждом сечении крепи отдельно суммируются усилия, соответствующие наибольшим сжимающим (отрицательным) и растягивающим (положительным) нормальным тангенциальным напряжениям σ_θ на внутреннем контуре.

Допускается производить проверку прочности крепи путем сравнения суммарных сжимающих и растягивающих нормальных тангенциальных напряжений σ_θ от

статических нагрузок и сейсмических воздействий соответственно с величинами расчетных сопротивлений набрызг-бетона сжатию и растяжению.

5.7.11 Для постоянной набрызг-бетонной крепи с целью учета случайного характера распределения неровностей поверхности выработки следует выполнить все описанные расчеты как при положительном значении амплитуды неровностей δ (соответствующем наличию впадины в верхней точке свода), так и при отрицательном значении δ (соответствующем наличию выступа в верхней точке свода). Полученные значения напряжений в этих двух случаях сравнивают с расчетными сопротивлениями набрызг-бетона сжатию и растяжению.

5.8 Расчет набрызг-бетонной крепи с анкерами

5.8.1 Предварительный выбор конструкции и назначение параметров набрызг-бетонной крепи с анкерами (длины анкеров, расстояния между ними, толщины набрызг-бетонного покрытия и т.п.) в качестве временной крепи выработок транспортных тоннелей производится с учетом положений, изложенных в ВСН 126.

Прочность крепи проверяют расчетом с учетом сейсмических воздействий в соответствии с п.п. 5.8.2 и 5.8.3.

5.8.2 Набрызг-бетонная круговая крепь с анкерами рассматривается при расчете как многослойная конструкция, в которой выделяются следующие слои:

- слой грунта, закрепленный анкерами, толщина которого принимается равной $0.8 l$, где l - длина анкеров, м;
- слой набрызг-бетона, армированный сеткой, стержнями и т.п., принимаемый равным толщине арматуры;
- слой собственного набрызг-бетона.

Расчет крепи производится в соответствии с подразделом п.5.3.

Примечание - Модуль деформации слоя грунта с анкерами принимается равным $1,2E_0$, где E_0 - модуль деформации грунта.

5.8.3 Набрызг-бетонная некруговая крепь с анкерами рассчитывается в соответствии с подразделом п.5.3 как монолитная замкнутая конструкция (с толщиной набрызг-бетонного покрытия), причем для массива принимается значение приведенного модуля деформации $E_{0пр}$. Приведенный модуль деформации $E_{0пр}$ определяется следующим образом.

5.8.3.1 После нахождения коэффициентов, отображающих функций $a_0, \dots, a_5$, дающих преобразование внешности единичной окружности на внешность внутреннего контура поперечного сечения крепи (см. Приложение Ж), решается уравнение 5-й степени относительно R_1^*

$$a_0 R_1^{*5} + (a_1 - h_1) R_1^{*4} + a_2 R_1^{*3} + a_3 R_1^{*2} + a_4 R_1^* + a_5 = 0, \quad (24)$$

В качестве R_1^* берется корень этого уравнения, больший единицы.

5.8.3.2 Определяется приведенный радиус выработки

$$R = a_0 R_1^*, \quad (25)$$

5.8.3.3 Решается уравнение (24), где вместо h_1 , берется h_2 - расстояние от начала координат до верхней точки зоны с характеристиками E' , ν' (см. Рисунок 19). В качестве R_1' берется действительный корень уравнения (24), больший единицы. Определяется приведенный радиус зоны с характеристиками E' , ν' .

$$R' = a_0 R_1', \quad (26)$$

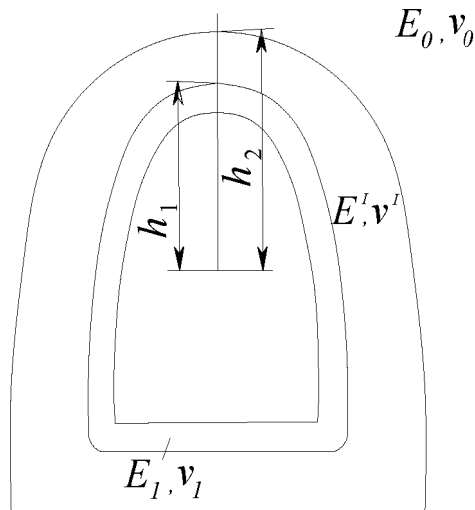


Рисунок 19 – Схема к определению приведенного модуля деформации грунтов

5.8.3.4 Производятся вычисления коэффициентов δ , β и A

$$\delta = \frac{R}{R'}, \quad \beta = \frac{E'(1+\nu_0)}{E_0(1+\nu')}, \quad A = \frac{2(1-\nu')\delta^2}{1-2\nu'+\delta^2+\beta(1-\delta^2)}. \quad (27)$$

5.8.3.5 Значение приведенного модуля деформации определяется по формуле

$$E_{0np} = E' \frac{1-\delta^2}{1+(1-2\nu')\delta^2-2A(1-\nu')}, \quad (28)$$

5.9 Расчет обделок некругового очертания тоннелей мелкого заложения

СП РК 2.03-107-2013

5.9.1 Требования настоящего подраздела распространяются на расчет обделок тоннелей некругового очертания мелкого заложения или их участков при расстоянии от шельги свода до поверхности не более трех наибольших поперечных размеров тоннеля.

5.9.2 Порядок расчета определяется в соответствии с п.5.2.7.

5.9.3 Нагрузки на обделку определяют отдельно для вертикального и горизонтального направлений сейсмических воздействий:

а) горизонтальную и вертикальную составляющие сейсмической нагрузки от собственного веса обделки вычисляют по формуле

$$S_k = Q_k k_c, \quad (29)$$

где Q_k – вес элемента обделки, отнесенный к точке k .

б) интенсивность горизонтального инерционного давления грунта на обделку в пределах высоты стены обделки определяют по формуле

$$p_c(y) = p_y k_c \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right), \quad (30)$$

где p_y – активное давление грунта, МПа;

в) горизонтальную составляющую инерционной массы грунта засыпки над тоннелем в пределах пролета выработки, приложенную к верхней части обделки, определяют по формуле

$$P_c = \gamma H l f, \quad (31)$$

где l – ширина выработки, м;

H – расстояние от дневной поверхности, м;

f – коэффициент трения грунта по обделке.

г) интенсивность вертикальной составляющей $q_c^{\text{верт}}$ определяют по формулам

$$q_c^{\text{верт}} = \gamma H k_c \quad (\text{от веса полного столба грунта } H_{\text{грунта}} \text{ над тоннелем}),$$

или

$$q_c^{\text{верт}} = \gamma h_1 k_c \quad (\text{при возможности сводообразования, где } h_1 \text{ – высота свода}).$$

5.9.4 Производится раздельное суммирование горизонтальных сил от собственного веса и инерционных масс грунта (первое сочетание) и вертикальных нагрузок от собственного веса и инерционных масс грунта (второе сочетание), выполняются два статических расчета по первому и второму сочетанию и проверяется прочность сечений обделки.

5.10 Проектирование порталов и припортальных подпорных стен

5.10.1 Конструировать и рассчитывать порталы следует в соответствии с положениями, изложенными в СН РК 3.03-11 и СП РК 3.03-111, а припортальные

подпорные стены в соответствии с положениями, изложенными в ВСН 167 и настоящего свода правил.

5.10.2 Рекомендуется выполнять проверку устойчивости склонов над порталами и при прохождении трассы тоннеля вблизи склонов в целях сохранения надежности и эксплуатационной пригодности сооружения при землетрясении.

5.10.3 Порталы тоннелей в сейсмических районах в зависимости от крутизны откосов, трещиноватости, крепости и устойчивости грунтов склона горного массива, а также состояния подходов к тоннелю рекомендуется проектировать врезными, наклонными с лобовой подпорной стеной (Рисунок 20, а, б) или выносными с искусственной засыпкой для уположивания лобового откоса (Рисунок 20, в) в случае неустойчивости склонов.

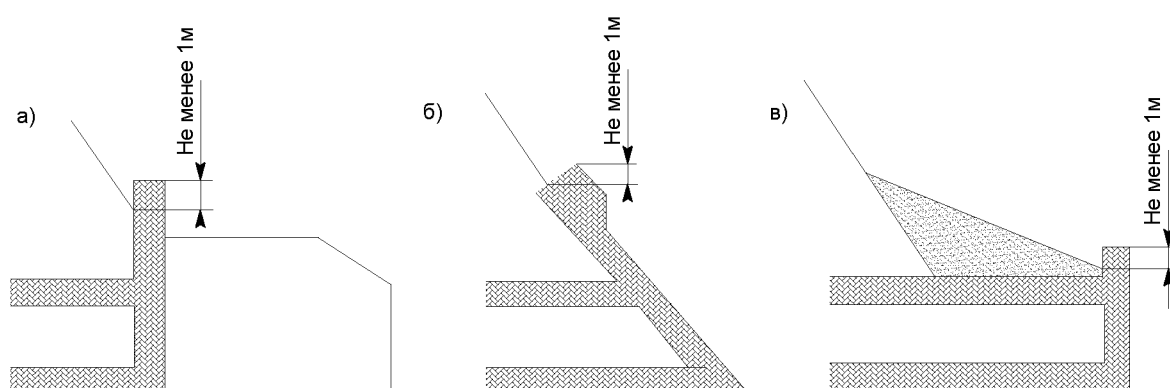


Рисунок 20 - Конструкции порталов тоннелей в сейсмических районах
а – врезной, б - с наклонной лобовой подпорной стеной, в - выносной

5.10.4 Порталы тоннелей следует проектировать, как правило, железобетонными. Допускается применение бетонных порталов на площадках сейсмичностью не более 7 баллов при устойчивых скальных грунтах. Лобовые подпорные стены следует конструировать из железобетона с устройством ограждающего парапета, возвышающегося над поверхностью откоса не менее чем на 1 м.

5.10.5 Припортальные подпорные стены могут выполняться как из железобетона, так и из бетона.

5.10.6 При назначении расположения порталов высоту подпорных стен у откосов припортальных выемок следует принимать по данным Таблицы 3. При невозможности выполнения таких требований необходимо уположивать откосы или выносить портал.

Таблица 3 – Материалы и высота подпорных стен

Материал подпорной стены	Расчетная сейсмичность площадки, баллы	Высота подпорной стены, м
Железобетон	8	12
	9	10
Бетон	8	12
	9	8

5.10.7 Для поддержания откосов припортальных выемок в зависимости от используемого материала и характера наклона поверхности, а также высоты стен следует применять массивные бетонные и облегченные железобетонные конструкции подпорных стен. Тип проектируемой стены, ее конструкцию и размеры следует назначать на основании технико-экономического анализа вариантов, составляемых с учетом местных инженерно-геологических, сейсмических и других условий.

5.10.8 Припортальные подпорные стены следует разделять на длине сквозными вертикальными швами (включая фундамент) на секции размером не более 15 м, а в районах сейсмичностью 8 и 9 баллов - до 10 м.

Швы следует располагать так, чтобы подошва каждой секции опиралась на однородный (по степени сжимаемости) грунт.

5.10.9 При расчете порталов и припортальных подпорных стен на устойчивость против опрокидывания с учетом сейсмического воздействия коэффициент условий работы принимают для сечений:

а) бетонных конструкций - 0,75;

б) по подошве фундаментов мелкого заложения для грунтов, связанных с коэффициентом консистенции $B < 0,25$ - 0,75; $0,25 < B < 0,50$ - 0,55; $B > 0,50$ - 0,40; скальных - 0,75, несвязных с разной степенью влажности - 0,55, несвязных, средней плотности - 0,40.

5.10.10 В районах сейсмичностью 9 баллов для предотвращения неблагоприятного влияния податливости основания на сейсмостойкость припортальной подпорной стенки ее фундамент следует доводить до скального или полускального грунта или искусственно уплотнять основание.

5.10.11 Внутренней грани припортальной стены следует придавать наклон в сторону откоса выемки.

5.10.12 Дренажные устройства для отвода воды из-за припортальных подпорных стен следует проектировать в соответствии с положениями ВСН 167-70.

5.10.13 Тип нижнего строения пути, применяемый в тоннеле, следует предусматривать и за пределом портала на расстоянии не менее 10 м.

6 ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ²⁾

6.1 В действующих нормативных документах нет конкретных и четких указаний о порядке обследования, проведения восстановительных работ в подземных сооружениях после сильных и разрушительных землетрясений, соответственно, в проектной документации по строительству конкретных транспортных тоннелей в сейсмических районах отсутствуют указания о тех работах, которые должны быть проведены после разрушительных землетрясений.

Ликвидационные и восстановительные работы как в строящихся, так и в эксплуатируемых транспортных тоннелях последствий землетрясений в значительной

²⁾ В разделе 6 использованы положения, приведенные в [1].

степени зависят от своевременного и качественного обследования повреждений в тоннелях и плана мероприятий по их восстановлению.

Ниже приведены некоторые особенности работ, связанные с ликвидацией последствий землетрясений.

6.2 Имеются следующие особенности обследований подземных сооружений по сравнению с обследованием наземных зданий и сооружений:

- первая особенность состоит в невозможности осуществления работ на широком фронте, поэтому число обследований ограничено;

- второй особенностью является вопрос о целесообразности или нецелесообразности восстановительных работ. Сложность заключается в выборе метода восстановления, т.е. восстанавливать ли тоннель в первоначальном виде, сооружать ли новый тоннель либо на его место образовать глубокую выемку с открытыми участками трассы;

- третья особенность заключается в проведении параллельной работы по предотвращению от возможных обрушений подземных сооружений при последующих толчках землетрясения и созданию условий для безопасной работы обследователей, что естественно удлиняет сроки обследования.

6.3 Эксплуатация тоннелей в сейсмических районах позволяет сформулировать следующие основные правила организации обследований.

При землетрясении интенсивностью 3 - 4 балла работы в строящихся подземных выработках не прекращаются. Производится осмотр выработок сменным персоналом, выявляются участки с пониженной устойчивостью пород, при необходимости на этих участках принимаются меры для создания безопасных условий.

При землетрясении интенсивностью 5 баллов работы прекращаются. Производится тщательный осмотр выработок вне зависимости от устойчивости пород, в журнале осмотра горных выработок обязательно делают запись о состоянии кровли, стен и временного крепления, о проведении обделки незакрепленных участков. Осмотр выработок осуществляется сменным персоналом горных участков. Решение о проведении работ принимается комиссионно руководством строительной или эксплуатационной организации.

При землетрясении силой подземных толчков более 5 - 6 баллов прекращаются все работы в подземных выработках. Возобновление основных работ разрешается только после комиссионного осмотра выработок с участием главного инженера, геолога, инженера по технике безопасности и технадзора участка. Составляется акт осмотра с приложением перечня всех деформаций временного и постоянного крепления всех подземных выработок. После комиссионного осмотра горных выработок дается разрешение на производство работ по созданию безопасных условий на незакрепленных участках и участках, закрепленных временной крепью.

6.4 В эксплуатируемых тоннелях метрополитена при землетрясении интенсивностью:

- до 4 баллов включительно движение поездов осуществляется в режиме эксплуатации, установленном для этого участка;

- 5 баллов поездным бригадам через поездного диспетчера выдается приказ «об особой бдительности»;

СП РК 2.03-107-2013

- 6 баллов должно выдаваться предупреждение об ограничении скоростей движения поездов до 25 км/ч;

- 7 баллов и более движение поездов должно быть остановлено, но поездам, находящимся на опасных участках трассы, разрешается движение для ухода из опасной зоны со скоростью до 15 км/ч.

При землетрясениях 5 баллов и более эксплуатационные службы должны немедленно осмотреть состояние пути, контактного рельса и других устройств, а также прилегающие участки местности и при необходимости устранить возникшие повреждения и дать сообщение о возможности отмены предупреждений.

Информация о силе землетрясений 5, 6, 7 баллов и более, автоматическое включение заградительных и проходных светофоров и автоблокировка производится от инженерно-сейсмометрических станций на тоннелях, работающих в ждущем режиме.

6.5 При землетрясении силой 7 баллов и более должен вступать в действие специально разработанный план, включающий организационные мероприятия и рекомендации по непосредственному обследованию, осуществляемому в несколько этапов.

6.6 Организационные мероприятия в себя включают:

- вывод всех работающих в подземных выработках на дневную поверхность под руководством лиц технадзора строительной или эксплуатационной организации;

- вызов руководителей строительной и эксплуатационной организации, горноспасательной службы, которые убедившись в выводе всех находившихся в тоннелях работающих, запрещают доступ людей в подземные выработки;

- создание штаба для общего руководства и соответствующих полномочных комиссий (горная, по транспорту, материальным ресурсам) для обследования и ликвидации ущерба, причиненного землетрясением.

Комиссии в указанные штабом сроки обязаны составить акты обследования с приложением ведомостей ремонтно-восстановительных и аварийных работ. На всех участках назначаются ответственные дежурные и устанавливаются посты наблюдения в указанных штабом местах.

6.7 Обследование рекомендуется осуществлять в три этапа.

На первом этапе работы горная комиссия должна обследовать состояние подъездных путей к подземным выработкам и, если выявлены оползневые участки, разработать мероприятия по их укреплению или ликвидации для предотвращения затопления выработок, особенно внезапного. Составляют план, в котором должна предусматриваться определенная последовательность осмотра эксплуатируемых тоннелей, а для строящихся тоннелей - с учетом инженерно-геологических условий проходки, типа временной и постоянной крепи, а также прогноза по ожидаемым повторным подземным толчкам силой более 6 - 7 баллов.

6.8 На втором этапе работы горная комиссия должна обследовать состояние постоянной и временной крепи, деформацию пород, определить степень повреждения коммуникаций и горнопроходческого оборудования. После окончания обследований комиссией составляется акт с приложением дефектных ведомостей, определяется общее состояние выработок и дается решение на аварийно-восстановительные работы с предварительным проведением работ по созданию безопасных условий в выработках. После утверждения штабом акта допуск к работам оформляется приказом, в нем

указывается очередность обследования выработок, в которых создаются безопасные условия и определяется порядок этих работ.

Работы по созданию безопасных условий в выработках должны проводиться под непосредственным наблюдением технадзора. В горный журнал следует записывать все выполненные работы с указанием наименования выработок, пикетов свода и стен в нем, указывать все выработки, через которые в связи с опасными условиями запрещается проход людей, с установкой соответствующих запрещающих знаков.

Первые этапы обследований, таким образом, преследуют чисто практические, производственные цели - определить характер, величину и размеры разрушений и нарушений, наметить необходимый перечень и порядок мероприятий (работы по созданию безопасных условий, ремонтно-восстановительные работы).

Одновременно такие виды обследований дают в первом приближении достоверный материал о характере и размерах разрушений, хотя эти материалы носят частично субъективный характер, ибо результаты (размеры вывалов, площади разрушений и т.п.) получают путем визуальных осмотров.

6.9 На третьем этапе обследования выработок после сильного землетрясения маркшейдерской службой производятся контрольные геодезические работы. Приступают к этому этапу только после выполнения работ по созданию безопасных условий в выработках. Если на первых двух этапах применяют в основном визуальный метод обследования с выполнением зарисовок и фотосъемки характерных мест нарушения, то на третьем этапе основным является инструментальный метод.

Цель третьего этапа - определить смещение триангуляционных пунктов на дневной поверхности и полигонометрических знаков в подземных выработках, произвести съемку для определения величины деформации постоянной и временной крепи выработок и уточнить объемы вывалов, обрушений, оползней породы, вызванных землетрясением.

Проводятся специальные обследования с инструментальными измерениями элементов и размеров разрушений:

- наблюдение трещин, их зарисовка и фотографирование;
- замер ширины, глубины, длины и ориентировки трещин;
- вывалы, сколы, смещения пород;
- деформация отдельных скальных блоков;
- раскрытие трещин;
- нарушение временного крепления (например, выпадение анкеров, уменьшение их несущей способности).

6.10 Работы по обеспечению безопасности выработок запрещается производить в период продолжающегося даже слабого землетрясения силой менее 7 баллов.

6.11 При восстановлении тоннелей, получивших значительные повреждения могут быть применены следующие основные технические решения:

- укрепление откосов припортальных выемок и припортальных подпорных стен инъектированием, набрызбетоном, анкерный крепью;
- расчистка завалов у порталов с увеличением длины припортальных выемки;
- замена разрушенного тоннельного участка открытой линией путем раскрытия разрушенного тоннельного участка в выемку (это способ возможен только при

неглубоком заложении);

- восстановление движения в двухпутном тоннеле по одному пути под прикрытием инвентарных рам.

7 ИНЖЕНЕРНО – СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКАЯ СЛУЖБА ³⁾

7.1 Параметры движения грунтовой среды и динамические характеристики тоннельных конструкций в расчетных моделях взаимодействия тоннеля с массивом грунта определяют косвенным путем. Скорость движения частиц грунта в массиве уточняют на основании лабораторных исследований образцов грунта, а количественные данные о смещениях и ускорениях – по данным сейсмологических наблюдений.

7.2 Основным назначением создания инженерно-сейсмометрической службы на тоннелях (ИССТ) является получение количественных данных о параметрах колебаний конструкций тоннелей и окружающего грунтового массива при землетрясениях различной интенсивности для дальнейшего использования этих данных при проектировании аналогичных конструкций.

7.3 Основной задачей инженерно-сейсмометрической службы является накопление и обработка инструментальных записей о поведении конструкций тоннелей и окружающего грунта во время землетрясений различной интенсивности и выдача информации научным и проектным организациям. Эта информация может быть использована для разработки методов прогнозирования возможного развития опасных сейсмических деформаций в тоннельных конструкциях, уточнения аналитических моделей работы подземных конструкций во время землетрясения и оценки влияния различных грунтовых условий на работу тоннеля.

7.4 Основные пункты измерений ИССТ располагают по трассе тоннеля и оборудуют сейсмоприемниками для измерения параметров колебаний как элементов обделки, так и грунта, в котором расположен тоннель. Эти же пункты можно оборудовать приборами и устройствами для длительного измерения напряженного состояния конструкций. Число основных пунктов зависит от длины тоннеля, частоты изменения инженерно-геологических условий по трассе тоннеля, изменения рельефа местности над тоннелем.

7.5 Протяженные транспортные тоннели, линии метрополитена, расположенные на площадках сейсмичностью 9 баллов и более оборудуются инженерно – сейсмометрическими станциями для записи смещений, скоростей и ускорений элементов обделки и окружающего массива во время землетрясений.

7.6 Проект инженерно – сейсмометрической станции должен иметь общую схему размещения измерительных пунктов и регистрирующего комплекса, полный перечень оборудования и приборов, строительную часть, включающую рабочие чертежи размещения и крепления приборов, вспомогательного оборудования, кабельных линий, а также чертежи основных и вспомогательных помещений.

7.7 Общий порядок проектирования и установки сейсмометрических приборов и оборудования на инженерно – сейсмометрических станциях регламентируются

³⁾ В разделе 7 использованы положения, приведённые в [1].

инструкциями по организации станций инженерно – сейсмометрической службы для регистрации колебаний зданий и сооружений при землетрясениях.

7.8 Проектировать инженерно – сейсмометрическую станцию следует по техническому заданию, с обязательным согласованием организацией, на которую возлагается эксплуатация станции.

7.9 Каждая инженерно – сейсмометрическая станция на транспортных тоннелях должна иметь, как минимум, три измерительных пункта – у портала, в тоннеле и над тоннелем в месте наибольшей глубины заложения тоннеля.

Большее количество комплектов сейсмометрической аппаратуры может быть запроектировано и установлено в тоннелях, пересекающих напластования грунтов различной сейсмической жесткости, при наличии действующих тектонических подвижек и в других случаях на основании специального технико-экономического и сейсмологического обоснования проведенного на стадии проекта.

7.10 Измерительные пункты должны обеспечивать надежное соединение сейсмоприемников с обделкой и грунтом, обеспечивать свободный доступ для монтажа и обслуживания сейсмоприемников, надежную защиту оборудования от различных неблагоприятных воздействий.

7.11 Основное требование, предъявляемое к сейсмометрической аппаратуре, устанавливаемой в измерительных точках ИССТ, следующее: сейсмоаппаратура должна воспринимать и регистрировать с малыми искажениями колебания грунта и определенных точек конструкции, возбуждаемые землетрясениями силой от 3 до 9 баллов.

7.12 В измерительном пункте в тоннеле одновременно должны фиксироваться колебания элементов обделки и окружающего массива.

7.13 Если тоннель имеет несколько типов конструкций обделок, целесообразно устраивать измерительные пункты на каждом типе обделок.

7.14 Сейсмоприемники устанавливают на рабочих площадках, представляющих собой горизонтальные бетонные постаменты, жестко прикрепляемые к обделке (для фиксации колебаний обделки), и заглубляемые на 0,5-1,0 м в грунт (для фиксации колебаний грунта).

7.15 Конструктивное оформление измерительных пунктов должно обеспечивать надежное сочленение сейсмоприемников с обделкой и грунтом, свободный доступ к приборам для их монтажа и наладки, надежную защиту аппаратуры от фильтрации воды и падения кусков грунта и обделки, а также соответствующий температурный и влажностный режим для нормальной работы аппаратуры.

7.16 Общий порядок проектирования и установки сейсмометрических приборов и оборудования на инженерно-сейсмометрических станциях регламентируются инструкциями по организации станций инженерно-сейсмометрической службы для регистрации колебаний зданий и сооружений при землетрясениях.

7.17 Расходы на приобретение сейсмометрической аппаратуры и на выполнение строительно-монтажных работ, связанных с ее установкой, должны предусматриваться в сметах на строительство сооружений.

7.18 Эксплуатацию сейсмометрической аппаратуры в тоннеле рекомендуется осуществлять под надзором работников региональной сейсмологической службы.

Приложение А
(информационное)

Упругая модель грунта

А.1 Свойства и характеристики грунтовых массивов

А.1.1 Реальные грунтовые массивы представляют собой сложную среду. Свойства пород, слагающих массивы грунтов, отличаются большим многообразием. Для решения практических инженерных задач грунты представляются математическими моделями, которые позволяют описать поведение массива в виде математических соотношений между параметрами, характеризующими свойства и состояние грунтов. Для описания поведения грунтов при статических и динамических воздействиях используются различные модели, среди которых наиболее приемлемыми являются: упругие, пластические и реологические.

А.1.2 Любая модель идеализирует свойства массива пород. Общепринятой идеализированной моделью механики горных пород является модель «*материальной сплошной среды*», которая трактуется как непрерывная среда в математическом смысле, что позволяет использовать методы математического анализа. В таком случае непрерывное распределение материала в некоторой части среды можно охарактеризовать скалярной величиной – *плотностью*.

А.1.3 Общепринятой и часто используемой идеализацией материала пород является *однородность*, которая предполагает, что свойства какого либо бесконечно малого элемента среды не отличаются от свойств любого другого элемента.

А.1.4 Среда называется *изотропной*, если свойства материала среды не зависят от направления.

А.1.5 Наиболее распространённой моделью массива пород в механике грунтов и подземных сооружений при решении статических и динамических задач является *упругая модель*.

А.1.6 При внешних воздействиях точки среды перемещаются, элементы среды деформируются. Если деформации не превышают некоторых пределов, то при медленном снятии нагрузки все точки среды возвращаются в первоначальное состояние. При быстром снятии воздействия возникают колебания, которые с течением времени прекращаются. Все точки среды возвращаются в первоначальное состояние, а элементы среды принимают первоначальную форму. Такое свойство сред называется *упругостью*. Факт, линейной зависимости деформаций от комбинации напряжений, действующих на элементарный объём установлен экспериментальным путём для различных сред.

А.1.7 Прекращение колебаний связано с уменьшением механической энергии, которая переходит в тепло и другие виды энергии. Свойство сред рассеивать механическую энергию характеризуется коэффициентами демпфирования.

А.1.8 Значения параметров, определяющих свойства грунтов определяются на основе полевых и лабораторных испытаний. При отсутствии таких данных используются характеристики для аналогичных материалов, приведенные в нормативных документах.

А.2 Основные уравнения теории упругости

А.2.1 Перемещения и деформации

А.2.1.1 Компоненты вектора перемещений $\bar{u}$ точек среды в декартовой системе координат обозначаются через: u_x , u_y и u_z . На Рисунке А.1 представлен элемент среды в виде элементарного куба с гранями Δx , Δy и Δz . При воздействии на среду этот куб может перемещаться как единое целое, вращаться как единое целое и деформироваться.

А.2.1.2 Рассмотрим случай, когда происходит движение только в направлении оси x и перемещение u_x является функцией, зависящей только от x . Если левая грань куба переместится на величину u_x , тогда перемещение правой грани можно представить в виде $u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} \Delta x$ и удлинение куба в направлении оси x равно $\frac{\partial u_x}{\partial x} \Delta x$ (Рисунок А.1).

А.2.1.3 Относительное удлинение определится выражением: $\frac{\partial u_x}{\partial x}$, которое известно как простое растяжение. Для простого растяжения (сжатия) принято обозначение ε_{xx} .

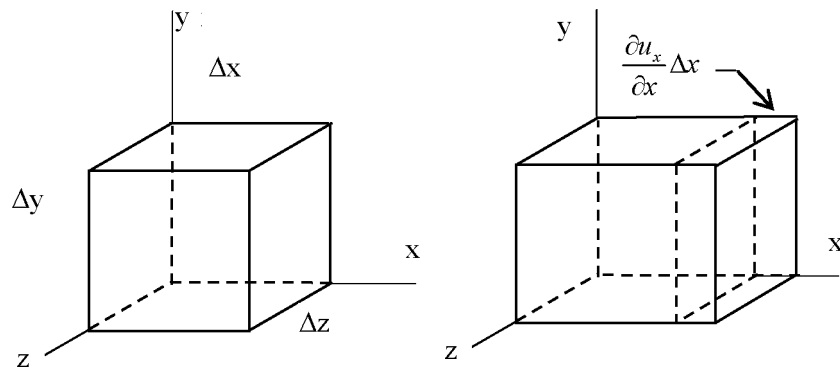


Рисунок А.1 – Вид деформации. Простое растяжение

Используя подобные рассуждения можно определить деформации растяжения (сжатия) и в направлении других осей: ε_{yy} и ε_{zz} . Отметим, что эти соотношения справедливы при условии малости градиентов перемещений частиц среды по сравнению с единицей.

А.2.1.4 Рассмотрим перемещение u_x , зависящее только от одной переменной, в данном случае от переменной y . В этом случае прямоугольная грань параллелепипеда приобретает ромбовидную форму (Рисунок А.2а). Количественная мера изменения формы определяется величиной угла между левой гранью и линией, перпендикулярной основанию параллелепипеда. Ввиду того, что этот угол очень мал, его можно определить отношением горизонтального перемещения $\frac{\partial u_x}{\partial y} \Delta y$ к высоте параллелепипеда Δy , т.е.

как $\frac{\partial u_x}{\partial y}$. Такого рода перемещения представляют собой скольжения слоёв, параллельно плоскости xz , которые в начальный момент были параллельны этой плоскости. Такого типа деформации называются простым сдвигом. Такую же деформированную форму можно получить, вращая параллелепипед по ходу часовой стрелки на угол $-\frac{1}{2} \frac{\partial u_x}{\partial y}$ и затем деформируя параллелепипед симметричным образом, удлиняя одну диагональ и укорачивая другую.

А.2.1.5 На Рисунке А.2b представлен пример простого сдвига, при котором сдвиги происходят по вертикальным плоскостям. Угол, определяющий отклонение от прямого угла, равен $\frac{\partial u_y}{\partial x}$, а вращение совершается против хода часовой стрелки.

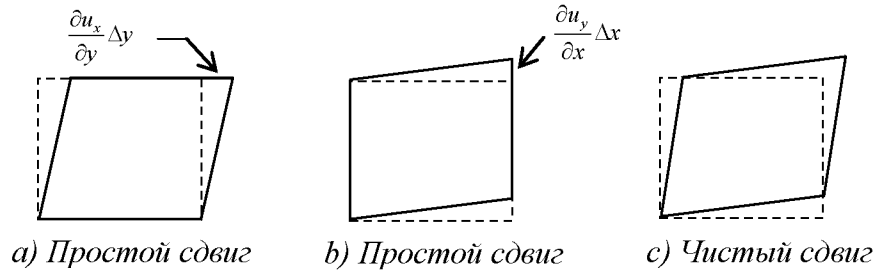


Рисунок А.2 – Деформации сдвига

Деформации сдвига аддитивны, в то время как вращения противоположно направлены.

А.2.1.6 На Рисунке А.2с представлен случай, когда частные производные равны и вращение отсутствует. Такой вид деформаций называется чистым сдвигом. Независимо от того присутствует ли вращение или нет, мерой деформаций сдвига является сумма двух частных производных, для которой принято обозначение $\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$.

Таким же образом определяются деформации ε_{yz} и ε_{zx} . Отметим, что

$$\varepsilon_{yx} = \varepsilon_{xy}, \quad \varepsilon_{zy} = \varepsilon_{yz}, \quad \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx}.$$

А.2.1.7 Шесть компонент деформаций, выраженные через перемещения можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, & \varepsilon_{xy} &= \varepsilon_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y}, & \varepsilon_{yz} &= \varepsilon_{zy} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z}, & \varepsilon_{zx} &= \varepsilon_{xz} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}. \end{aligned} \tag{А.1}$$

А.2.1.8 Нормальные деформации ε_{xx} , ε_{yy} и ε_{zz} выражают линейные удлинения бесконечно малого элемента среды в направлениях координатных осей $\frac{\Delta l}{l}$. Три параметра ε_{xy} , ε_{yz} и ε_{zx} определяют изменения прямых углов - деформации сдвигов.

В ряде работ деформации сдвига определяются с множителем $\frac{1}{2}$:
 $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$ и т.д., что более удобно при тензорном представлении уравнений.

А.2.1.9 Углы поворота при вращении вокруг трёх осей определяются выражениями:

$$\theta_x = \frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z}, \quad \theta_y = \frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x}, \quad \theta_z = \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y}. \quad (\text{A.2})$$

А.2.1.10 Объёмная деформация $e = \frac{\Delta V}{V}$ определяется выражением:

$$e = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}. \quad (\text{A.3})$$

А.2.2 Напряжения

А.2.2.1 Напряжения в упругой среде возникают как реакция на силы, которые распределены в среде и на границе среды, которые могут изменяться во времени и пространстве. Для определения напряжений в среде рассмотрим элементарный параллелепипед (Рисунок А.3).

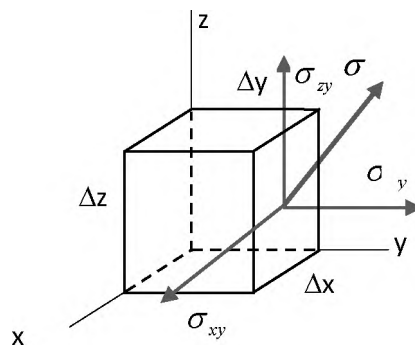


Рисунок А.3 – Представление напряжений, действующих на грань параллелепипеда

А.2.2.2 Поверхностную силу, действующую на грань параллелепипеда со стороны окружающей среды, представим через σ . Проекции этой силы на координатные оси обозначены через σ_x , σ_y , σ_z . Сила равномерно распределена по грани, поэтому

представляет собой напряжение. На каждую грань параллелепипеда действуют три вида напряжений: нормальное и два тангенциальных. Первый индекс соответствует направлению оси, второй определяет направление нормали плоскости, в которой действуют напряжения.

А.2.2.3 Пример нормальных напряжений, действующих в направлении оси y на грани параллелепипеда, представлен на Рисунок А.4а.

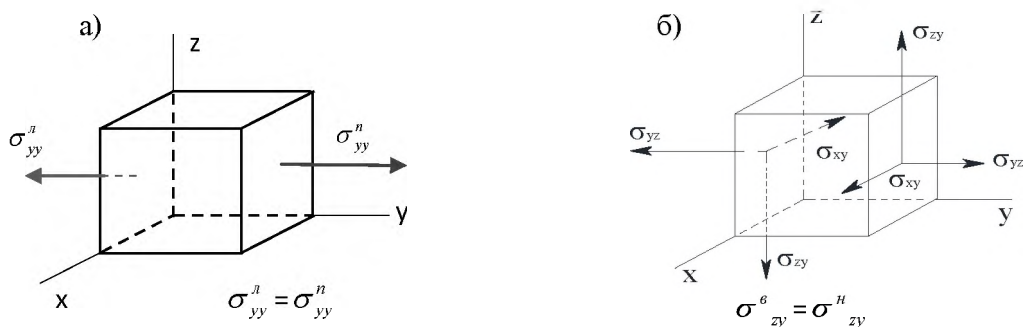


Рисунок А.4 – Соотношения между напряжениями при равновесии

Если на правую грань параллелепипеда действуют напряжения σ_{yy}^n , то в состоянии покоя такие же напряжения должны действовать и на левую грань, то есть должно выполняться равенство: $\sigma_{yy}^n = \sigma_{yy}^n$.

Это следует из того, что оба эти воздействия должны стремиться к равенству, так как при стремлении Δy к нулю незначительная разница в напряжениях на гранях параллелепипеда, придаст конечное ускорение частице среды с бесконечно малой массой. Подобные рассуждения справедливы и для нормальных напряжений σ_{xx} и σ_{zz} , направленных вдоль оси x и z . Нормальные напряжения считаются положительными, если они вызывают растяжение элемента среды. В механике грунтов часто принимается и другое правило: положительными считаются сжимающие напряжения.

А.2.2.4 Детализация касательных напряжений в точке имеет более сложный характер (Рисунок А.4б). Во первых, если на правой грани параллелепипеда действует касательное напряжение σ_{zy} , то на левой грани параллелепипеда должно действовать такое же напряжение, направленное в противоположную сторону (для равенства нулю ускорения в направлении оси z). Два противоположно направленных напряжений создают пару сил, которая для отсутствия углового ускорения параллелепипеда, должна быть уравновешена такой же парой, направленной в противоположную сторону. Следовательно, на верхней и нижней грани элементарного параллелепипеда, должны действовать напряжения, удовлетворяющие соотношению: $\sigma_{zy}^s = \sigma_{yz}^s$. Отсюда следует, если в точке среды существуют касательные напряжения σ_{zy} , то обязательно присутствуют и другие компоненты касательных напряжений, создающих напряжённое состояние, соответствующее чистому сдвигу.

А.2.3 Соотношения между напряжениями и деформациями

А.2.3.1 Соотношения между напряжениями и деформациями известны как обобщённый закон Гука. Для описания зависимостей между напряжениями и деформациями изотропных сред достаточно двух коэффициентов пропорциональности, в качестве которых используются модуль Юнга и коэффициент Пуассона, либо модули упругости, соответственно, при растяжении и сдвиге.

А.2.3.2 Для выполнения линеаризованных расчётов используются следующие характеристики грунтов:

- модуль сдвига - G ;
- коэффициент Пуассона - ν ,
- плотность - ρ ,
- коэффициент демпфирования - ξ .

А.2.3.3 В задачах динамики сплошных сред более удобными и общепринятыми являются упругие константы λ и μ , называемые параметрами Ляме, или μ - модуль сдвига.

Для изотропных сред соотношения между напряжениями и деформациями могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{zz}, \\ \sigma_{yy} &= \lambda\varepsilon_{xx} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{zz}, \\ \sigma_{zz} &= \lambda\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz}, \\ \tau_{xy} &= \mu\varepsilon_{xy}, \quad \tau_{yz} = \mu\varepsilon_{yz}, \quad \tau_{zy} = \mu\varepsilon_{zy}.\end{aligned}\tag{A.4}$$

Кроме параметров Ляме, которые удобны при анализе распространения волн в грунтах, применяются и другие упругие постоянные. Наиболее широко используются модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν и коэффициент объёмной деформации k .

А.2.3.4 Между постоянными Ляме и этими константами существуют следующие зависимости:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}, \quad k = \frac{3\lambda + 2\mu}{3}.\tag{A.5}$$

Исключая две константы из этих выражений, можно получить соотношения, выражающие одну из пяти констант через две других.

А.2.3.5 Упругие константы по определению положительные, поэтому как следует из зависимостей (А.4), коэффициент Пуассона может принимать значения от 0 до 0,5. В реальности коэффициент Пуассона принимает значения от 0,05 для очень крепких скальных пород, до 0,45 для мягких слабо консолидированных грунтов. Для жидких сред и водонасыщенных грунтов, не оказывающих сопротивление сдвигу $\mu=0$ и $\nu=0,5$.

А.2.3.6 Для большинства горных пород значения констант E , k и μ лежат в интервале от $2 \cdot 10^{10}$ до $12 \cdot 10^{10}$ Н/м², причём E – наибольшая, а μ - наименьшая из них. Значения упругих постоянных для горных пород представлены в Таблице А.1.

Таблица А.1 – Соотношения между упругими постоянными

	E	ν	k	μ	λ
(E, ν)	1	1	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	$\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
(E, k)	1	$\frac{3k-E}{6k}$	1	$\frac{3kE}{9k-E}$	$3k\left(\frac{3k-E}{9k-E}\right)$
(E, μ)	1	$\frac{E-2\mu}{2\mu}$	$\frac{\mu E}{3(3\mu-E)}$	1	$\mu\left(\frac{E-2\mu}{3\mu-E}\right)$
(ν, k)	$3k(1-2\nu)$	1	1	$\frac{3k}{2}\left(\frac{1-2\nu}{1+\nu}\right)$	$3k\left(\frac{\nu}{1+\nu}\right)$
(ν, μ)	$2\mu(1+\nu)$	1	$\frac{2\mu(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	1	$\mu\left(\frac{2\nu}{1-2\nu}\right)$
(ν, λ)	$\mu\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$	1	$\lambda\left(\frac{1+\nu}{3\nu}\right)$	$\lambda\left(\frac{1-2\nu}{2\nu}\right)$	1
(k, μ)	$\frac{9k\mu}{3k+\mu}$	$\frac{3k-2\mu}{2(3k+\mu)}$	1	1	$k-2\mu/3$
(k, λ)	$9k\left(\frac{k-\lambda}{3k-\lambda}\right)$	$\frac{\lambda}{3k-\lambda}$	1	$\frac{3}{2}(k-\lambda)$	1
(μ, λ)	$\mu\left(\frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}\right)$	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\lambda+\frac{2}{3}\mu$	1	1

А.3 Уравнения равновесия и движения

А.3.1 В состоянии покоя все силы, действующие на элементарный объем среды, должны удовлетворять уравнениям равновесия. На Рисунке А.5 показаны компоненты всех напряжений, действующих на элементарный параллелепипед в направлении оси y .

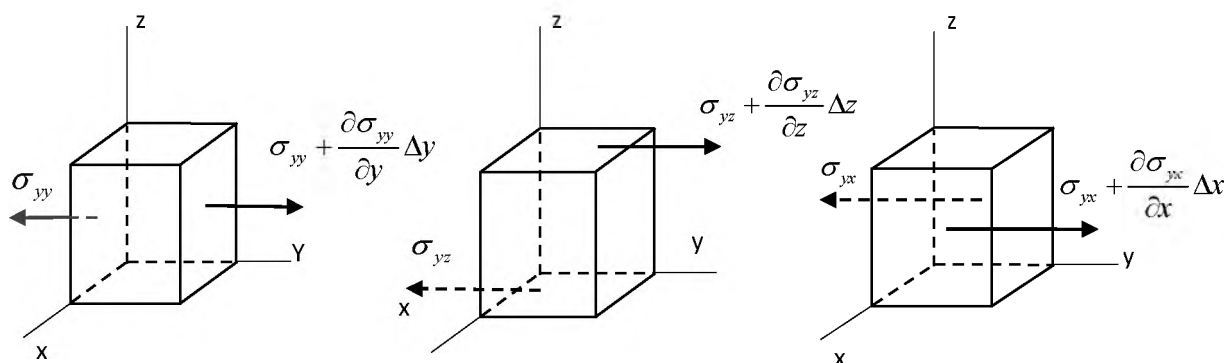


Рисунок А.5 – Напряжения, действующие на элементарный параллелепипед в направлении оси y

Сумма проекций на ось y всех действующих на элемент объёма сил:

$$\begin{aligned} & (\sigma_{yy} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \Delta y - \sigma_{yy}) \Delta x \Delta z + (\sigma_{yz} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \Delta z - \sigma_{yz}) \Delta x \Delta y + \\ & + (\sigma_{yx} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} \Delta x - \sigma_{yx}) \Delta y \Delta z = (\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}) \Delta x \Delta y \Delta z, \end{aligned} \quad (A.6)$$

А.3.2 Аналогичным образом можно получить суммы проекций всех сил на оси x и z . При отсутствии массовых сил дифференциальные уравнения равновесия сплошной среды имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= 0, & \sigma_{xy} &= \sigma_{yx}, \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} &= 0, & \sigma_{yz} &= \sigma_{zy}, \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= 0, & \sigma_{zx} &= \sigma_{xz}. \end{aligned} \quad (A.7)$$

А.3.3 На каждый элементарный объём среды могут действовать массовые силы. Например, гравитационные силы, равные произведению удельного веса на объём элемента, инерционные силы, пропорциональные ускорению и массе элемента. В некоторых материалах массовые силы могут возникать под действием электромагнитных полей. Существуют среды, в которых возникают массовые силы, пропорциональные электрическому заряду (пьезоматериалы).

А.3.4 При наличии объёмных сил с интенсивностью, приходящейся на единицу объёма G , и с компонентами в направлении координатных осей G_x , G_y и G_z , условия равновесия принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + G_x &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + G_y &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + G_z &= 0. \end{aligned} \quad (A.8)$$

А.3.5 Если обозначить плотность материала среды ρ , тогда массу элементарного параллелепипеда можно представить в виде $\rho \Delta x \Delta y \Delta z$. Дифференциальные уравнения движения сплошной среды можно получить, воспользовавшись принципом Даламбера, добавив ко всем силам, действующим на элемент объёма, силы инерции:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + G_x &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \\
\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + G_y &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \\
\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + G_z &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}.
\end{aligned} \tag{A.9}$$

А.3.6 Продифференцировав уравнения (А.4), и подставив их в уравнение (А.10) и выразив в них деформации через перемещения, используя соотношения (А.1) уравнения равновесия и движения среды можно представить через перемещения. Объёмные силы полагаются равными нулю.

Уравнение движения:

$$\begin{aligned}
(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} \right) &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \\
(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} \right) &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \\
(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} \right) &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}.
\end{aligned} \tag{A.10}$$

А.3.7 Система уравнений (А.9) и (А.10) представляют собой волновые уравнения, описывающие распространение возмущений в виде волн напряжений в упругой изотропной среде. Напряжения, возникшие в какой либо части среды, распространяются во всех направлениях от различных источников возмущений.

Для решения задач динамики грунтов, кроме параметров, характеризующих свойства среды, необходимо задать граничные условия и математическое описание источников возмущений, которые могут иметь как природное (землетрясения), так и искусственное (подвижная нагрузка, подземные и наземные взрывы и т.д.) происхождение.

Для получения уравнений равновесия сплошной среды в перемещениях необходимо в уравнениях (А.10) положить инерционные силы равными нулю и при необходимости добавить объёмные силы.

Приложение Б *(информационное)*

Определение параметров сейсмических воздействий на подземные сооружения

Б.1 Основные понятия

Б.1.1 Землетрясения вызываются резкими относительными движениями на границах тектонических плит земной коры. Эти границы плит называются разломами. Границы разломов могут иметь большую протяжённость и выходить на поверхность.

Б.1.2 В результате смещения плит на границах его возникают напряжения и накапливается энергия, которая высвобождается в тот момент, когда напряжения превышают предел прочности пород и происходит быстрое относительное смещение в зоне разлома. Разлом, который достигает поверхности земли при отсутствии отложений, называется поверхностным.

Б.1.3 Разлом считается неактивным, если являлся источником землетрясений в течение последних 11 000 лет (эпоха галогена).

Б.1.4 Источники землетрясений также могут быть расположены и внутри тектонических плит, но интенсивность таких землетрясений меньше и происходят они с гораздо меньшей частотой, чем на границах плит.

Б.1.5 **Гипоцентр и эпицентр.** Гипоцентр (фокус) - область, в которой генерируются землетрясения. Ввиду больших расстояний до площадки, гипоцентр, можно рассматривать как точку на плоскости разлома. Эпицентр - проекция гипоцентра на поверхность. Источники землетрясений располагаются на поверхности разлома на разной глубине.

Б.1.6 Колебания грунта создаются сейсмическими волнами, распространяющимися в земной коре от источников землетрясений.

Б.2 Плоские волны напряжений в упругих средах

Б.2.1 На больших расстояниях от источников землетрясений (порядка нескольких километров) сейсмические волны можно считать плоскими.

Б.2.2 Ввиду малости напряжений, возникающих в грунтах на больших расстояниях от источников землетрясений, грунты при распространении сейсмических волн рассматриваются как упругие среды.

Б.2.3 Параметры движения грунта (спектральный состав, амплитуды колебаний, продолжительность и т.д.) при сейсмических воздействиях зависят от типа источника землетрясения, глубины его расположения, расстояния и путей распространения сейсмических волн.

Б.2.4 От источников возмущения распространяются волны сжатия (продольные Р волны) и сдвиговые волны (поперечные волны сдвига S). Эти волны распространяются во всех направлениях от источника возмущения. Области, на которые распространяются колебания, могут охватывать сотни квадратных километров. Интенсивность колебаний

уменьшается по мере удаления от источника колебаний. При достижении поверхности продольные и поперечные волны генерируют поверхностные волны: волны Рэлея и волны Лява.

Б.2.5 Различные типы волн. Волны имеют разные скорости распространения и различные движения частиц грунта: параллельно направлению распространения волн, перпендикулярно направлению распространения волн, по эллипсу.

Б.2.5.1 Продольные волны. Данные волны (волны растяжения – сжатия) самые быстрые волны. Скорость распространения волн определяется выражением:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad (\text{Б.1})$$

где λ и μ - параметры Ляме грунта.

Движение частиц грунта происходит вдоль направления распространения волн (см. Рисунок Б.1).

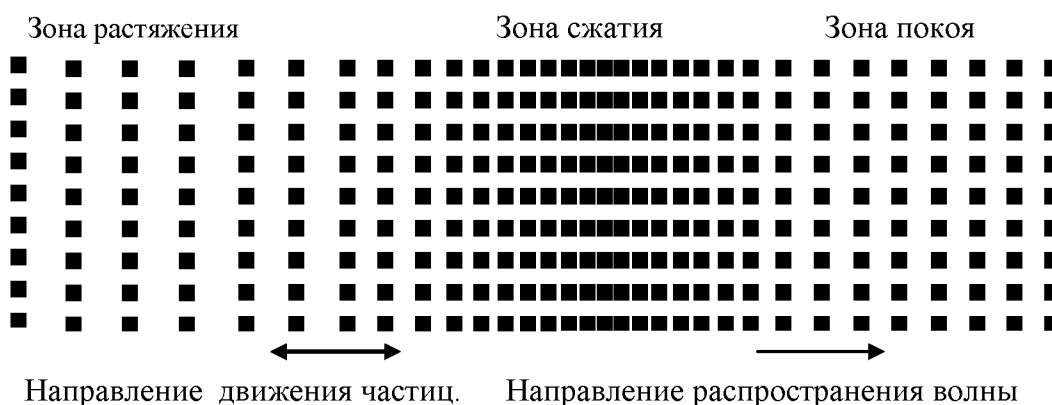


Рисунок Б.1 – Продольные движения частиц грунта

Б.2.5.2 При распространении плоской волны вдоль оси x , перемещения частиц среды направлены параллельно оси x , перемещения u_y и u_z равны нулю и перемещения u_x не зависят от переменных y и z . Уравнения (А.10) Приложения А при таких условиях существенно упрощаются:

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad (\text{Б.2})$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$u_x = f\left(t - \frac{x}{\alpha}\right) + f\left(t + \frac{x}{\alpha}\right), \quad (\text{Б.3})$$

Первый член представленного решения описывает продольную волну сжатия (растяжения), произвольной формы, распространяющуюся в положительном направлении

оси x со скоростью α , второй член описывает волну, распространяющуюся в отрицательном направлении этой же оси.

Б.2.5.3 Если, заданная на конечном интервале времени функция $2f(t)$ представляет собой перемещения точек (возмущение) среды при $x=0$, тогда функции $f(t - \frac{x}{\alpha})$ и $f(t + \frac{x}{\alpha})$ представляют собой две одинаковые волны, распространяющиеся с одинаковыми скоростями α в разные стороны от источника возмущения, расположенного в начале координат (Рисунок Д.2). Такие решения называются *бегущими волнами*.

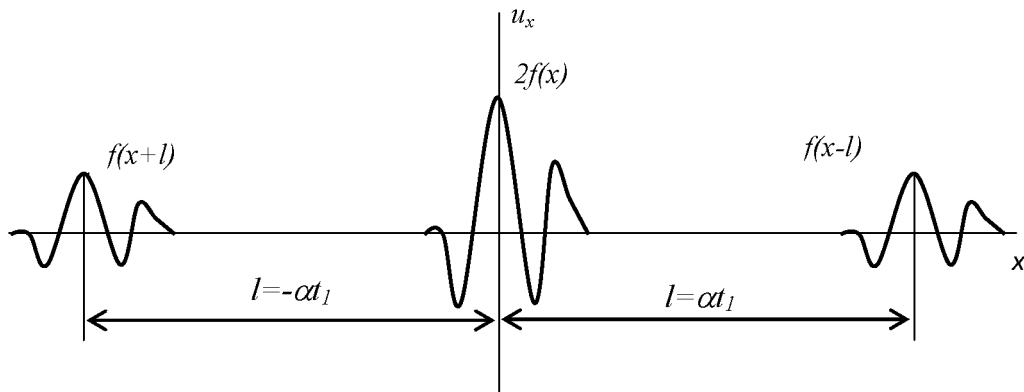


Рисунок Б.2 – Пример распространения волн

Следует отметить, что функции $f(t - \frac{x}{\alpha})$ могут иметь произвольную форму.

Для волн, распространяющихся в положительном направлении, существуют следующие соотношения:

$$u_x = f(t - \frac{x}{\alpha}), \quad \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{1}{\alpha} f'(t - \frac{x}{\alpha}), \quad V_x = \frac{\partial u_x}{\partial t} = f'(t - \frac{x}{\alpha}),$$

$$\sigma_{xx} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\rho \alpha f'(t - \frac{x}{\alpha}). \quad (\text{Б.4})$$

Штрихом обозначена производная по выражению, записанному в скобках. Для волн, распространяющихся в отрицательном направлении, можно получить аналогичные выражения.

Б.2.5.4 Из уравнений (Б.4) следует, что в плоской продольной волне функции, описывающие деформации, напряжения и скорости движения частиц среды, имеют одинаковую пространственную и временную зависимость, поэтому соотношения между ними определяются простыми выражениями:

$$\sigma_{xx} = \rho \alpha^2 \varepsilon_{xx}, \quad \text{и} \quad \sigma_{xx} = -\rho \alpha V_x, \quad (\text{Б.5})$$

При распространении плоской продольной волны реализуется деформированное состояние, соответствующее простому растяжению или сжатию (Рисунок Б.3).

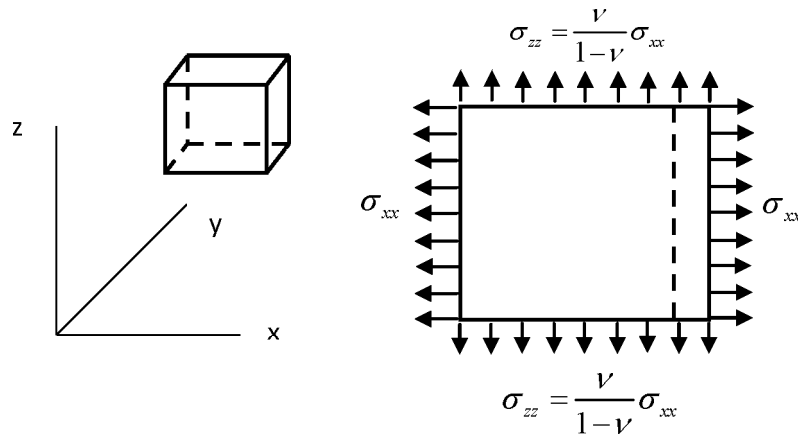


Рисунок Б.3 – Диаграмма напряжений при распространении плоской продольной волны

Б.2.5.5 Если при распространении плоской волны в направлении распространения волны на элемент грунта действуют нормальные напряжения σ_{xx} , обязательно возникают нормальные напряжения σ_{yy} и σ_{zz} , препятствующие перемещениям в направлениях, перпендикулярных направлению распространения волны. Эти напряжения определяются выражениями:

$$\begin{aligned}\sigma_{yy} &= \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{\lambda}{\alpha} f'(t - \frac{x}{\alpha}) = -\frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{xx}, \\ \sigma_{zz} &= \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{\lambda}{\alpha} f'(t - \frac{x}{\alpha}) = -\frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{xx}\end{aligned}\quad (\text{Б.6})$$

Б.2.6 Поперечные волны. Если перемещения частиц среды происходят параллельно направлению оси y ($u_x = u_z = 0$) и перемещения u_y не зависят от переменных y и z , уравнения (А.10) при таких условиях упрощаются и принимают вид:

$$\mu \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \quad (\text{Б.7})$$

Б.2.6.1 Решение уравнения (Б.7) представляет собой волны, распространяющиеся в положительном и отрицательном направлениях оси x со скоростью $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$. Движение частиц среды происходит вдоль оси Oy перпендикулярно направлению распространения волны.

Б.2.6.2 Для волн, распространяющихся в положительном направлении, существуют следующие соотношения:

$$u_y = \left(t - \frac{x}{\beta}\right); \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} = -\frac{1}{\beta} f' \left(t - \frac{x}{\beta}\right),$$

$$V_y = \frac{\partial u_y}{\partial t} = f' \left(t - \frac{x}{\beta}\right); \quad \sigma_{xy} = \mu \frac{\partial u_y}{\partial x} = -\rho \beta f' \left(t - \frac{x}{\beta}\right). \quad (\text{Б.8})$$

Иллюстрация движения частиц среды при распространении плоской поперечной волны представлена на Рисунок Б.4.

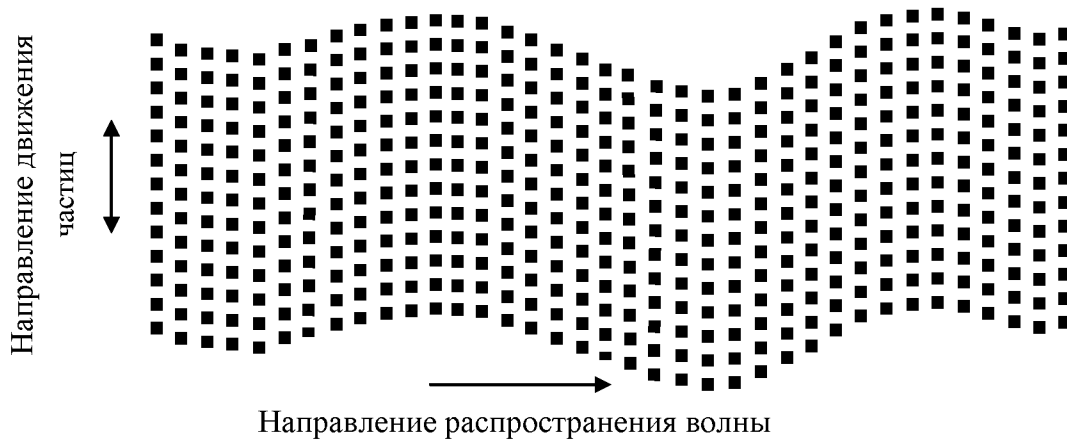


Рисунок Б.4 – Перемещения частиц среды при распространении плоской поперечной волны

Б.2.6.3 При распространении поперечных волн между напряжениями, деформациями и скоростями движения частиц среды существуют простые зависимости, аналогичные зависимостям, установленным для продольных волн:

$$\sigma_{xy} = \rho \beta^2 \varepsilon_{xy} \text{ и } \sigma_{xy} = -\rho \beta V_y, \quad (\text{Б.9})$$

Б.2.6.4 При распространении плоской поперечной волны реализуется деформированное состояние, соответствующее простому сдвигу, поэтому движение каждого элемента можно представить как комбинацию чистого сдвига и жёсткого поворота (Приложение А, Рисунок А.2).

Примечание - Скорость продольных волн всегда больше скорости поперечных волн:

$$\frac{\beta^2}{\alpha^2} = \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)} < 1, \quad (\text{Б.10})$$

Б.2.7 Поверхностные волны: Волны Лява и волны Рэлея возникают в результате взаимодействия объёмных волн со свободной поверхностью и существуют только вблизи поверхности.

Б.2.7.1 Движение частиц грунта при распространении волн Лява совершаются параллельно поверхности грунта перпендикулярно направлению распространения волн (Рисунок Б.5). С удалением от поверхности интенсивность волн ослабевает.

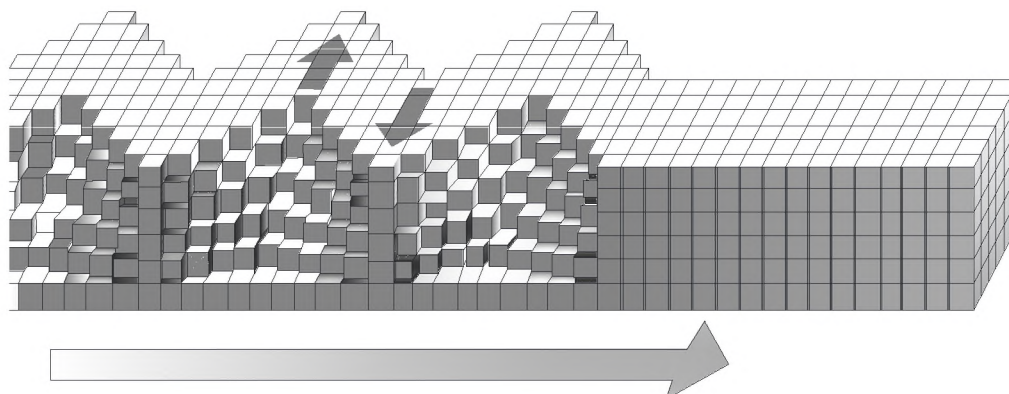


Рисунок Б.5 – Деформирование поверхностных слоёв грунта при распространении волн Лява

Б.2.7.2 Движение частиц грунта при распространении волн Рэлея совершаются в вертикальной плоскости по эллиптическим траекториям (Рисунок Б.6). С удалением от поверхности интенсивность волн ослабевает.

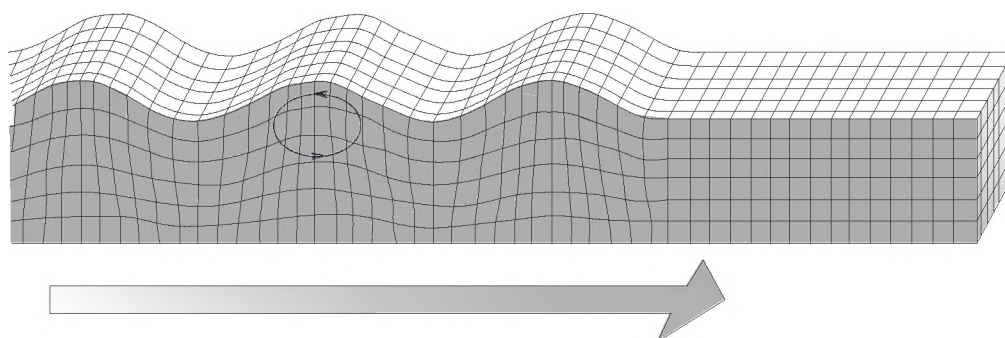


Рисунок Б.6 – Деформирование поверхностных слоёв грунта при распространении волн Рэлея

Б.2.8 Поверхностные волны распространяются более медленно, чем объёмные волны, и из поверхностных волн, волны Рэлея самые медленные. При достижении объёмных волн поверхности земли, а так же слоёв грунта с различными свойствами, они частично отражаются, частично преломляются и преобразуются из одного типа в другой.

Б.2.8.1 Скорости распространения волн в горных породах зависят от многих факторов (пористости, литологии, степени сцементированности, глубины залегания и т.д.) и изменяются в широких диапазонах.

Б.2.8.2 Скорости продольных волн в водонасыщенных породах лежат в интервале от 1500 до 6500 м/с, увеличиваясь с уменьшением пористости.

Б.2.8.3 Скорость продольных волн существенно уменьшается, если вода в порах замещается частицами воздуха, что может иметь место вблизи земной поверхности. В верхних слоях грунта, выше уровня грунтовых вод, значения скоростей Р-волн могут

составлять 400-800 м/с, понижаясь в некоторых случаях до 150 м/с. В сейсмологии и сейсморазведке такие приповерхностные слои породы принято называть зоной малых скоростей.

Б.2.8.10 Сопоставление энергетического вклада воздействия различных волн на сосредоточенный груз, лежащий на поверхности полупространства, показало, что волны Рэлея переносят 67% энергии, а поперечные S - волны 26% и продольные Р-волны 7%.

Б.3 Гармонические волны

Б.3.1 Простейшую форму зависимости волн от времени имеют гармонические волны, т.е. волны, зависимость которых от времени выражается тригонометрическими функциями:

$$\begin{aligned}\varphi &= A \sin \omega(t - \frac{x}{\alpha}), \quad \varphi = B \sin \omega(t - \frac{x}{\beta}), \\ \varphi &= A \sin \omega(t - \frac{xl + ym + zn}{\alpha}), \quad \varphi = B \sin \omega(t - \frac{xl + ym + zn}{\beta}).\end{aligned}\quad (Б.11)$$

где A, B – амплитуды волн,

l, m и n – направляющие косинусы вектора, определяющего направление распространения волны,

ω – угловая частота, используя которую можно определить период колебаний $T = 2\pi/\omega$. При анализе распространения волн вместо круговой частоты используется техническая частота в герцах $f = \omega/2\pi$.

В фиксированной точке пространства функция φ изменяется от $+A$ до $-A$.

Для описания гармонических волн используются и другие параметры:

$$\begin{aligned}\varphi &= A \sin \chi(x - \alpha t), \quad \varphi = B \sin \chi(x - \beta t), \\ \varphi &= A \sin \chi(xl + ym + zn - \alpha t), \\ \varphi &= (C/r) \sin \chi(r - \alpha t).\end{aligned}\quad (Б.12)$$

где χ – волновое число или «пространственная частота», через которую можно определить длину волны или «пространственный период» $\lambda = 2\pi/\chi$.

Б.3.2 Выражения: $\chi(x - \alpha t)$ и $\chi(xl + ym + zn - \alpha t)$, а также $\omega(t - \frac{x}{\alpha})$ и $\omega(t - \frac{xl + ym + zn}{\alpha})$ называются фазой волны.

Диапазон частот сейсмических волн лежит в диапазоне от 0,1 до 30 герц. Скорости распространения продольных волн в породах достигают до 6,5 км/с. Преобладающие длины волн от 30 до 500 м.

Кроме тригонометрических функций для описания гармонических волн используются экспоненциальные функции:

$$\varphi = A \exp\{i\omega(t - \frac{x}{\alpha})\}, \quad \varphi = B \exp\{i\omega(t - \frac{x}{\beta})\},$$

$$\varphi = A \exp\{i\omega(t - \frac{x l + y m + z n}{\alpha})\}, \quad \varphi = B\{i\omega(t - \frac{x l + y m + z n}{\beta})\}, \quad (\text{Б.13})$$

$$\varphi = (C/r)\{i\omega(t - \frac{r}{\alpha})\}, \quad \varphi = (D/r)\{i\omega(t - \frac{r}{\beta})\}.$$

Б.4 Допущения, используемые при анализе воздействия сейсмических волн на тоннели

Б.4.1 В целом, не представляется возможным предсказать фактическую форму волны, поэтому приходится принимать консервативные допущения.

Б.4.2 Одно из частых допущений заключается в рассмотрении возмущения, состоящего полностью из одного типа волны: продольной, поперечной или какой либо поверхностной.

Б.4.3 Рассматривается наиболее неблагоприятное воздействие на тоннельную обделку.

Б.4.4 Волны представляются в виде бегущих гармонических волн, амплитуды которых равны пиковым значениям, частота соответствует спектру сейсмического воздействия, а скорость равна скорости распространения волн в грунте, в котором находится тоннель.

Б.4.5 Деформация тоннельной обделки зависит от типа и угла падения волны, от отношения жёсткости грунта и тоннельной обделки.

Б.4.6 Силы, действующие на тоннель, определяются в результате анализа деформаций вдоль или поперек оси тоннеля, который связан с грунтом через радиальные и продольные пружины.

Б.4.7 Для гибкой тоннельной обделки и жёсткого грунта можно получить предельные деформации конструкции, полагая что деформации тоннеля следуют деформациям грунта без проскальзывания. В таком случае выражения для бегущих волн можно пересчитать в деформации тоннельной обделки и определить соответствующие им напряжения.

Приложение В
(информационное)

Таблица В.1 - Скорости сейсмических волн, нормальные и касательные напряжения в ненарушенном изотропном массиве для различных пород (грунтов)

Категория породы	Степень крепости породы (грунта)	Порода (грунт)	Коэффициент крепости	Объемная масса, γ , МН/м ³	Скорость продольной волны, C_1 , м/с	Скорость поперечной волны, C_2 , м/с	Нормальные и касательные напряжения в породе (МПа) при уточненной сейсмичности в баллах					
							7		8		9	
							$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$
I	В высшей степени крепкие	Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты и базальты. Исключительные по крепости другие породы	20	0,028- 0,03	5600	3300	1,07- 1,15	0,64- 0,69	1,33- 1,42	0,67- 0,85	1,76- 1,88	1,05- 1,12
II	Очень крепкие	Очень крепкие гранитовые породы, кварцевый порфир. Очень крепкий гранит. Кремнистый сланец. Самые крепкие песчаники и известняки	15	0,026- 0,027	5600	3300	0,99- 1,03	0,59- 0,61	1,23- 1,28	0,73- 0,76	1,63- 1,69	0,97- 1,02
III	Крепкие	Плотные гранит и гранитовые породы. Очень крепкие песчаники и известняки. Крепкий конгломерат. Очень крепкие железные руды	10	0,025- 0,026	3500- 4500	2100-2700	0,60- 0,80	0,36- 0,49	0,73- 0,99	0,44- 0,59	0,96- 1,31	0,57- 0,78

Таблица В.1 - Скорости сейсмических волн, нормальные и касательные напряжения в ненарушенном изотропном массиве для различных пород (грунтов) (продолжение)

Категория пород	Степень крепости породы (грунта)	Порода (грунт)	Коэффициент крепости	Объемная масса, γ , МН/м ³	Скорость продольной волны, C_1 , м/с	Скорость поперечной волны, C_2 , м/с	Нормальные и касательные напряжения в породе (МПа) при уточненной сейсмичности в баллах					
							7		8		9	
							$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$
IIIa	Крепкие	Крепкие известняки. Некрепкий гранит, крепкие песчаники. Крепкий мрамор. Доломит. Колчеданы	8	0,025	2400-3000	1400-1800	0,41-0,50	0,24-0,30	0,51-0,62	0,30-0,37	0,67-0,82	0,40-0,49
IV	Довольно крепкие породы	Обыкновенный песчаник, железные руды	6	0,024	2000-2600	1200-1500	0,32-0,42	0,19-0,25	0,40-0,52	0,24-0,31	0,53-0,68	0,32-0,41
V	Средней крепости	Крепкий глинистый сланец. Некрепкий песчаник и известняк. Мягкий конгломерат	4	0,028	1500-2300	900-1400	0,28-0,43	0,17-0,26	0,35-0,55	0,21-0,33	0,46-0,73	0,27-0,44
Va	Средней крепости	Разнообразные некрепкие сланцы. Плотный мергель	3	0,025	1400-1900	800-1100	0,24-0,32	0,14-0,19	0,30-0,40	0,18-0,24	0,39-0,53	0,23-0,32
VI	Довольно мягкие	Мягкий сланец. Мягкий известняк. Мел, каменная соль, гипс, мерзлый грунт, антрацит, обыкновенный мергель, разрушенный песчаник, сцементированная галька, каменистый грунт	2	0,024	1300-2100	800-1200	0,21-0,34	0,12-0,20	0,26-0,43	0,16-0,26	0,35-0,56	0,21-0,33

Таблица В.1 - Скорости сейсмических волн, нормальные и касательные напряжения в ненарушенном изотропном массиве для различных пород (грунтов) (продолжение)

Категория породы	Степень крепости породы (грунта)	Порода (грунт)	Коэффициент крепости	Объемная масса, γ , МН/м ³	Скорость продольной волны, C_1 , м/с	Скорость поперечной волны, C_2 , м/с	Нормальные и касательные напряжения в породе (МПа) при уточненной сейсмичности в баллах					
							7		8		9	
							$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$	$\sigma_{x'}$	$\tau_{x'y'}$
VIa	Довольно мягкие	Щебенистый грунт. Разрушенный сланец. Слежавшаяся галька и щебень. Отвердевшая глина. Крепкий каменный уголь	1,5	0,018- 0,020	1200-1900	700-1100	0,15-0,26	0,09-0,15	0,18-0,32	0,11-0,19	0,24-0,43	0,13-0,90
VII	Мягкие	Глина плотная. Средний каменный уголь. Крепкий нанос. Глинистый грунт	1,0	0,018	1100-1700	600-1000	0,14-0,21	0,08-0,12	0,17-0,27	0,10-0,16	0,22-0,34	0,13-0,90
VIII	Мягкие	Легкая песчаная глина, лесс, гравий. Мягкий уголь $f=0,6-1,0$	0,8	0,016	1100-1600	700-1000	---	---	---	---	---	---
IX-X	Сыпучие и плывуны	Песок-осыпи. Мелкий гравий. Насыпная земля. Добытый уголь. Плывуны. Болотистый грунт. Разжиженный лесс и другие разжиженные грунты	0,1- 0,5	0,017	300-500	200-300	----	----	----	----	----	----

Приложение Г
(информационное)

**Определение скоростей сейсмических волн в анизотропной
(трансверсально-изотропной) толще грунтов и горных пород**

Г.1 Случай 1. Нормаль $\bar{n}$ к фронту волны направлена вкост линии простираения плоскости изотропии толщи и составляет произвольный угол α с плоскостью изотропии (Рисунок 4). Здесь скорости квазипродольной V_P и квазипоперечных V_{SV} и V_{SH} волн определяются следующими формулами [2, 6]:

$$V_P = \left\{ \frac{g}{\gamma} \left[\frac{E_1 (n - v_2^2)}{(1 + v_1) [n(1 - v_1) - 2v_2^2]} \cos^4 \alpha + 2 \left(\frac{E_1 v_2}{n(1 - v_1) - 2v_2^2} + 2G_2 \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \frac{E_1 (1 - v_1)}{n(1 - v_1) - 2v_2^2} \sin^4 \alpha \right] \right\}^{1/2},$$

$$V_{SV} = \left\{ \frac{g}{\gamma} \left[G_2 + \left(\frac{E_1 ((n - v_2^2) + (1 - v_1))}{(1 + v_1) [n(1 - v_1) - 2v_2^2]} - 2 \left(\frac{E_1 v_2}{n(1 - v_1) - 2v_2^2} + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 2G_2 \right) \right) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \right] \right\}^{1/2},$$

$$V_{SH} = \left\{ \frac{g}{\gamma} \left(G_2 \sin^2 \alpha + \frac{E_1}{2(1 + v_1)} \cos^2 \alpha \right) \right\}^{1/2}.$$

где γ — объемная масса толщи грунтов и горных пород;

g — ускорение свободного падения.

Г.2 Случай 2. Нормаль к фронту волны направлена вдоль простираения плоскости изотропии толщи (Рисунок 5). В этом случае скорости квазипродольных V_P и квазипоперечных V_{SV} и V_{SH} волн выражаются следующими соотношениями (плоскость изотропии наклонена под углом α к горизонту) [2, 6]:

$$V_P = \left\{ \frac{g}{\gamma} \frac{E_1 (n - v_2^2)}{(1 + v_1) [n(1 - v_1) - 2v_2^2]} \right\}^{1/2},$$

$$V_{SV} = \left\{ \frac{g}{\gamma} \left[G_2 \cos^2 \phi + \frac{E_1}{2(1 + v_1)} \sin^2 \phi \right] \right\}^{1/2},$$

$$V_{SH} = \left\{ \frac{g}{\gamma} \left[G_2 \sin^2 \phi + \frac{E_1}{2(1 + v_1)} \cos^2 \phi \right] \right\}^{1/2}.$$

Приложение Д
(информационное)

**Определение коэффициентов сейсмического бокового давления
 λ^c для анизотропного массива грунта**

Д.1 Случай 1. Нормаль к фронту волны направлена вкрест линии простираения плоскости изотропии толщи и составляет угол α с плоскостью изотропии (Рисунок 4). Тогда коэффициенты сейсмического бокового давления λ_y^c , λ_z^c и λ_{yz}^c [2, 6]:

$$\lambda_y^c = \frac{(a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35})(a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35}) - (a_{33}a_{55} - a_{55}a_{35}^2)(a_{12}a_{55} - a_{15}a_{25})}{(a_{22}a_{55} - a_{25}^2)(a_{33}a_{55} - a_{35}^2) - (a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35})^2},$$

$$\lambda_z^c = \frac{(a_{12}a_{55} - a_{15}a_{25})(a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35}) - (a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35})(a_{22}a_{55} - a_{25}^2)}{(a_{22}a_{55} - a_{25}^2)(a_{33}a_{55} - a_{35}^2) - (a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35})^2},$$

$$\lambda_{xz}^c = \frac{-a_{15} + a_{25}\lambda_y^c + a_{35}\lambda_z^c}{a_{55}}.$$

Здесь

$$a_{12} = -\frac{1}{E_1}(v_1 \cos^2 \alpha + v_2 \sin^2 \alpha),$$

$$a_{13} = -\frac{v_2}{E_1} + \left((1 + 2v_2) \left(E_1 + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_2} \right) \right) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha,$$

$$a_{15} = \left[(1 + v_2) \frac{1}{E_1} \cos^2 \alpha - \left(\frac{1}{E_2} + \frac{v_2}{E_1} \right) \sin^2 \alpha - \frac{1}{2G_2} \cos 2\alpha \right] \sin 2\alpha,$$

$$a_{22} = \frac{1}{E_1},$$

$$a_{23} = -\left(\frac{v_1}{E_1} \sin^2 \alpha + \frac{v_2}{E_1} \cos^2 \alpha \right),$$

$$a_{25} = \frac{v_2 - v_1}{E_1} \sin 2\alpha,$$

$$a_{33} = \frac{1}{E_1} \sin^4 \alpha + \left(\frac{1}{G_2} - \frac{2v_2}{E_1} \right) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \frac{1}{E_2} \cos^4 \alpha,$$

$$a_{35} = \left[\frac{1 + v_2}{E_1} \sin^2 \alpha - \left(\frac{1}{E_2} + \frac{v_2}{E_1} \right) \cos^2 \alpha + \frac{1}{2G_2} \cos 2\alpha \right] \sin 2\alpha,$$

$$a_{55} = \frac{1}{G_2} + \left(\frac{1 + 2v_2}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{G_2} \right) \sin^2 \alpha.$$

Д.2 Случай 2. Нормаль $\vec{n}$ к фронту волн направлена параллельно плоскости изотропии, наклоненной к горизонту под углом φ (Рисунок 5). В этом случае коэффициенты сейсмического давления λ_x^c , λ_z^c и λ_{xz}^c согласно [2,5] определяют формулами:

$$\lambda_x^c = \frac{(a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35})(a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35}) - (a_{33}a_{55} - a_{35}^2)(a_{12}a_{55} - a_{15}a_{25})}{(a_{11}a_{55} - a_{15}^2)(a_{33}a_{55} - a_{35}^2) - (a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35})^2},$$

$$\lambda_z^c = \frac{(a_{12}a_{55} - a_{15}a_{25})(a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35}) - (a_{11}a_{55} - a_{15}^2)(a_{23}a_{55} - a_{25}a_{35})}{(a_{11}a_{55} - a_{15}^2)(a_{33}a_{55} - a_{35}^2) - (a_{13}a_{55} - a_{15}a_{35})^2},$$

$$\lambda_{xz}^c = -\frac{a_{15}\lambda_x^c + a_{25} + a_{35}\lambda_z^c}{a_{55}}.$$

Коэффициенты деформации a_{ij} ($i, j=1, 2, 3, 5$) в выражениях для $\lambda_x^c, \lambda_z^c, \lambda_{xz}^c$ определяются по формулам случая 1, но в них вместо угла α следует подставлять угол φ .

Приложение Е
(информационное)

Алгоритм и пример расчета обделок тоннелей кругового очертания на сейсмические воздействия

Е.1 В настоящем приложении Е дана методика расчета обделок кругового очертания на сейсмические воздействия, приведенная в [1, 7].

Е.2 Исходными данными для расчета являются:

r_1, r_2 - внутренний и внешний радиусы поперечного сечения обделки, м;

E_0, ν_0 - модуль деформации и коэффициент Пуассона грунта, МПа, доли единицы;

E_1, ν_1 - модуль деформации и коэффициент Пуассона материала обделки, МПа, доли единицы;

γ - объемная масса грунта, МН/м³;

g - ускорение силы тяжести, м/с²

k_c - коэффициент сейсмичности;

T_0 - преобладающий период колебаний частиц грунта, с.

Е.3 Определяется относительная толщина обделки и деформационные характеристики материала обделки и породы по формулам

$$R_1 = \frac{r_1}{r_2}, \quad \xi = \frac{\nu_0}{1-\nu_0}, \quad \beta = \frac{E_1(1+\nu_0)}{E_0(1+\nu_1)}, \quad \chi_0 = 3-4\nu_0, \quad \chi_1 = 3-4\nu_1,$$

$$\varrho_0 = \sqrt{\frac{1-\xi}{2}}, \quad d = \frac{1-\beta}{1+\chi_1}, \quad t = \frac{1+\chi_0\beta}{1+\chi_1}, \quad l = 1-d, \quad s = 1-t.$$

Е.4 Определяются вспомогательные величины по формулам

$$c_1 = \frac{t-d}{1-2d(1-R_1^2)}, \quad c_3 = \frac{d(t-d)R_1^2(R_1^2-1)}{(t+sR_1^2)(dR_1^6+l)3tdR_1^2(R_1^2-1)^2},$$

$$a_1 = \frac{(dR_1^6+l)(d+lR_1^2)+3d^2R_1^2(R_1^2-1)^2}{(t+sR_1^2)(dR_1^6+l)+3tdR_1^2(R_1^2-1)^2},$$

$$B = 1-a_1 + \frac{3c_3}{d}, \quad F = d-ta_1+3c_3, \quad A = (d-ta_1)R_1^2+3c_3R_1^2.$$

Е.5 Определяются значения экстремальных нормальных тангенциальных напряжений в обделке от единичной нагрузки по формулам

$$\sigma_{\text{внутр}} = -(1+\xi)c_1 m 4\varrho_0 \sqrt{1+\varrho_0^6},$$

$$\sigma_{\text{внеш}} = -\frac{(1+\xi)}{4} \times \frac{(4d-1)c_1-d+t}{d} m(4F-B)\varrho_0 \sqrt{1+\varrho_0^6}.$$

Е.6 Из четырех значений напряжений, полученных из соотношений пункта Е.5, выбирается наибольшее отрицательное (сжимающее) и определяются контактные напряжения

$$\sigma_p = -\frac{1+\xi}{4} \times \frac{c_1 - t + d}{d} m B \sqrt{1 + \xi^2},$$

и безразмерные величины усилий

$$M = \frac{(R_1^{-1} - 1)^2}{12} [\sigma_{\theta \text{ внутр}} - \sigma_{\theta \text{ внеш}}],$$

$$N = \frac{R_1^{-1} - 1}{2} [\sigma_{\theta \text{ внутр}} - \sigma_{\theta \text{ внеш}}].$$

причем в формуле пункта Е.6 для определения σ_p и в формулах пункта Е.5 для определения напряжений, подставляемых в выражения для усилий, берется тот знак перед вторыми слагаемыми, при котором получено наибольшее отрицательное значение σ_θ .

Е.7 Аналогично получают контактные напряжения σ_p и усилия M и N , соответствующие наибольшему положительному значению σ_θ (растягивающему напряжению).

Е.8 В результате получают по две расчетные равномерные эпюры усилий, соответствующие наибольшим сжимающим и растягивающим напряжениям σ_θ в каждом сечении обделки.

Е.9 Если обделка не прианкерена к грунту и проектируется с допущением образования трещин, то полученные оба варианта расчетных усилий используют для проверки прочности сечений при сжатии и при растяжении.

Е.10 Величины контактных напряжений σ_p определяют умножением полученных по формулам пункта Е.6 значений на величину p , изгибающих моментов - на $pr_1^2 b$, продольных сил - на $pr_1 b$

$$p = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma c_1 T_0, \quad c_1 = \sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma} \cdot \frac{1 - \nu_0}{(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}},$$

где b - единица длины в продольном направлении сооружения.

Полученные значения усилий от сейсмических воздействий суммируют с усилиями от других видов нагрузок и проводят проверку прочностей сечений.

Е.11 Если обделку проектируют без допущения образования трещин или прианкеренной к грунту, то в качестве расчетных принимают значения усилий, соответствующие напряжениям σ , максимальным по абсолютной величине. Эти усилия принимают со знаками «плюс» и «минус» и суммируют с усилиями от других видов нагрузок.

Е.12 В Таблицах Е.1 и Е.2 настоящего Приложения Е даны примеры определения безразмерных величин напряжений и усилий (в долях от p) для ряда круговых обделок различного диаметра и толщины ($n = r_2/r_1$), а также материала ($E_1 \nu_1$), расположенных в грунтах с различными значениями E_0 и ν_0 . При этом в Таблице Е.1 даны максимальные сжимающие напряжения и усилия, а в Таблице Е.2 - максимальные растягивающие напряжения и усилия.

Е.13 Пример расчета.

Бетонная монолитная обделка ($E_1=31500$ МПа; $\nu_1=0,15$) наружным диаметром 9 м и толщиной 0,40 м ($n=1.1$), расположенная в гранодиоритах ($\gamma=0,027$ МН/м³; $\nu_0=0,23$; $E_0=4000$ МПа; $\frac{E_0}{E_1}=0,12$) для девятибалльного землетрясения (при $T_0=0,5$ с): $c_1=1290$ м/с; $p=275$ кН/м².

По Таблице Е.1

$$M = -\frac{4,37 p r_1^2 b}{10^3} = -\frac{4,37 \cdot 275 \cdot 4,1^2 \cdot 1,0}{10^3} = -20,2 \text{ кНм};$$

$$N = -1,27 p r_1 b = -1,27 \cdot 275 \cdot 4,1 \cdot 1,0 = -1432 \text{ кН};$$

По Таблице Е.2

$$M = -\frac{3,53 p r_1^2 b}{10^3} = -\frac{3,53 \cdot 275 \cdot 4,1^2 \cdot 1,0}{10^3} = 16,3 \text{ кНм};$$

$$N = 0,15 p r b = 0,15 \cdot 275 \cdot 4,1 \cdot 1,0 = 169,1 \text{ кН}.$$

Таблица Е.1 – Максимальные сжимающие напряжения и усилия

Расчетное напряжение и усилие	Отношение внешнего радиуса обделки к внутреннему $n = r_2/r_1$	Отношение модуля деформации грунта к модулю деформации материала обделки E_0/E_1													
		0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\frac{\sigma_\rho}{p}$	1,05	-1,22	-0,94	-0,77	-0,66	-0,57	-0,35	-0,25	-0,2	-0,16	-0,14	-0,12	-0,10	-0,094	-0,085
	1,10	-1,36	-1,17	-1,02	-0,9	-0,81	-0,54	-0,41	-0,33	-0,27	-0,24	-0,21	-0,18	-0,16	-0,15
	1,20	-1,26	-1,21	-1,12	-1,04	-0,97	-0,72	-0,57	-0,47	-0,41	-0,35	-0,31	-0,28	-0,26	-0,24
	1,30	-1,01	-1,07	-1,05	-1,00	-0,96	-0,76	-0,62	-0,53	-0,46	-0,41	-0,36	-0,33	-0,30	-0,28
$\frac{\sigma_{\theta_{внеш}}}{p}$	1,05	-23,1	-18,9	-15,8	-13,6	-11,9	-7,35	-5,32	-4,17	-3,43	-2,91	-2,53	-2,24	-2,01	-1,82
	1,10	-10,1	-10,8	-10,1	-9,27	-8,52	-5,96	-4,56	-3,70	-3,11	-2,68	-2,35	-2,10	-1,90	-1,73
	1,20	-0,31	-3,98	-4,88	-5,09	-5,07	-4,28	-3,56	-3,03	-2,63	-2,32	-2,08	-1,88	-1,72	-1,58
	1,30	+2,76	-1,17	-2,51	-3,08	-3,34	-3,32	-2,94	-2,60	-2,31	-2,08	-1,88	-1,72	-1,59	-1,47
$\frac{\sigma_{\theta_{внутр}}}{p}$	1,05	-31,2	-23,2	-18,8	-15,9	-13,8	-8,32	-5,98	-4,67	-3,83	-3,25	-2,82	-2,49	-2,23	-2,02
	1,10	-24,5	-18,4	-15,3	-13,3	-11,8	-7,69	-5,75	-4,60	-3,84	-3,29	-2,88	-2,56	-2,31	-2,10
	1,20	-22,4	-16,1	-13,3	-11,6	-10,4	-7,14	-5,53	-4,54	-3,85	-3,35	-2,97	-2,66	-2,42	-2,21
	1,30	-21,3	-15,4	-12,7	-11,1	-9,94	-6,91	-5,44	-4,51	-3,87	-3,39	-3,02	-2,73	-2,49	-2,28
$\frac{M}{pr_1^2 b} 10^3$	1,05	-1,79	-0,90	-0,62	-0,48	-0,39	-0,20	-0,14	-0,10	-0,084	-0,07	-0,06	-0,053	-0,047	-0,042
	1,10	-12,0	-6,33	-4,37	-3,36	-2,74	-1,45	-0,99	-0,75	-0,61	-0,51	-0,44	-0,39	-0,34	-0,31
	1,20	-73,8	-40,4	-28,2	-21,8	-17,8	-9,52	-6,55	-5,01	-4,07	-3,42	-2,95	-2,60	-2,32	-2,10
	1,30	-180,8	-106,7	-76,5	-60,0	-49,5	-2,6,9	-18,7	-14,4	-11,7	-9,88	-8,55	-7,54	-6,74	-6,10
$\frac{N}{pr_1 b}$	1,05	-1,36	-1,05	-0,87	-0,74	-0,64	-0,39	-0,28	-0,22	-0,18	-0,15	-0,13	-0,12	-0,11	-0,096
	1,10	-1,73	-1,46	-1,27	-1,13	-1,02	-0,68	-0,52	-0,41	-0,35	-0,30	-0,26	-0,23	-0,21	-0,19
	1,20	-2,27	-2,01	-1,82	-1,67	-1,55	-1,14	-0,91	-0,76	-0,65	-0,57	-0,5	-0,45	-0,41	-0,38
	1,30	-2,79	-2,49	-2,28	-2,12	-1,99	-1,53	-1,26	-1,07	-0,92	-0,82	-0,74	-0,67	-0,61	-0,56

Таблица Е.2 – Максимальные растягивающие напряжения и усилия

Расчетное напряжение и усилие	Отношение внешнего радиуса обделки к внутреннему $n = r_2 / r_1$	Отношение модуля деформации грунта к модулю деформации материала обделки E_0/E_1													
		0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$\frac{\sigma_p}{p}$	1,05	-0,005	0,064	0,087	0,094	0,094	0,077	0,062	0,051	0,043	0,037	0,033	0,029	0,027	0,024
	1,10	-0,14	-0,048	0,001	0,030	0,046	0,070	0,067	0,061	0,054	0,049	0,045	0,041	0,037	0,035
	1,20	-0,45	-0,29	-0,21	-0,16	-0,12	-0,028	0,002	0,015	0,021	0,023	0,024	0,024	0,024	0,023
	1,30	-0,78	-0,55	-0,43	-0,36	-0,31	-0,16	-0,10	-0,071	-0,051	-0,038	-0,029	-0,023	-0,018	-0,015
$\frac{\sigma_{\theta_{внеш}}}{p}$	1,05	-2,01	0,86	1,71	2,01	2,08	1,77	1,43	1,18	1,00	0,87	0,76	0,69	0,62	0,57
	1,10	-5,77	-1,96	-0,58	0,10	0,48	0,99	0,97	0,88	0,79	0,71	0,65	0,59	0,54	0,50
	1,20	-9,19	-4,32	-2,49	-1,54	-0,96	0,14	0,41	0,49	0,50	0,49	0,47	0,44	0,42	0,40
	1,30	-9,75	-5,15	-3,26	-2,23	-1,59	-0,28	0,10	0,25	0,32	0,34	0,35	0,34	0,34	0,33
$\frac{\sigma_{\theta_{внутр}}}{p}$	1,05	4,92	4,30	4,01	3,73	3,46	2,47	1,90	1,53	1,29	1,11	0,97	0,87	0,78	0,71
	1,10	7,09	4,43	3,65	3,27	3,01	2,25	1,81	1,51	1,30	1,14	1,01	0,91	0,83	0,76
	1,20	11,2	6,32	4,64	3,81	3,31	2,25	1,81	1,53	1,33	1,18	1,06	0,97	0,89	0,82
	1,30	12,6	7,46	5,45	4,40	3,75	2,39	1,87	1,57	1,37	1,21	1,09	1,00	0,91	0,85
$\frac{M}{pr_1^2 b} 10^3$	1,05	1,44	0,72	0,48	0,36	0,29	0,15	0,098	0,073	0,059	0,049	0,042	0,037	0,033	0,03
	1,10	10,7	5,32	3,53	2,64	2,10	1,05	0,70	0,53	0,42	0,35	0,30	0,27	0,24	0,21
	1,20	68,1	35,4	23,8	17,8	14,2	7,03	4,66	3,48	2,78	2,32	1,99	1,74	1,54	1,39
	1,30	167,4	94,6	65,4	49,7	40,0	20,0	13,2	9,88	7,87	6,54	5,60	4,89	4,34	3,90
$\frac{N}{pr_1 b}$	1,05	0,073	0,13	0,14	0,14	0,14	0,11	0,083	0,068	0,057	0,049	0,043	0,039	0,035	0,032
	1,10	0,066	0,12	0,15	0,17	0,17	0,16	0,14	0,12	0,10	0,093	0,083	0,075	0,069	0,063
	1,20	0,20	0,20	0,21	0,23	0,23	0,24	0,22	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12
	1,30	0,42	0,35	0,33	0,32	0,32	0,32	0,30	0,27	0,25	0,23	0,22	0,20	0,19	0,18

Приложение Ж
(информационное)

Общий алгоритм и примеры расчета обделок некругового поперечного сечения на сейсмические воздействия

Ж.1 В настоящем Приложении Ж приведены методика расчета обделок некругового поперечного сечения на сейсмические воздействия и пример расчета железнодорожного тоннеля, приведенные в [7].

Ж.2 Исходными данными для расчета являются заданные форма и размеры поперечного сечения обделки и величины:

- E_0 - модуль деформации грунта, МПа;
- ν_0 - коэффициент Пуассона грунта;
- E_1 - модуль деформации материала обделки, МПа ;
- ν_1 - коэффициент Пуассона материала обделки;
- γ - объемная масса грунта, МН/м³;
- k_c - коэффициент сейсмичности;
- T_0 - преобладающий период колебаний частиц грунта, с.

Ж.3 Расчет состоит из трех этапов:

- построение конформного отображения;
- определение корней основных систем уравнений;
- определение расчетных напряжений и усилий в обделке.

Ж.4 Первый этап - построение конформного отображения - состоит в определении коэффициентов $q_1, \dots, q_4$ функции вида

$$z = \omega(\zeta) = R \left(\zeta + \left(\sum_{v=1}^4 q_v \zeta^{-v} \right) \right),$$

реализующей конформное преобразование внешности окружности радиуса $R_1 < 1$ в плоскости ζ в область, занимаемую кольцом заданной формы и средой в плоскости z , таким образом, чтобы единичная окружность перешла в линию контакта.

Ж.5 Построение конформного отображения осуществляется в два приема: сначала отыскивается функция вида

$$z = \omega(\zeta_1) = \sum_{v=0}^5 a_v \zeta_1^{1-v},$$

реализующая отображение внешности единичной окружности (в плоскости ζ_1) на внешность внутреннего контура поперечного сечения (в плоскости ζ), при этом окружность радиуса $R_1^* \neq 1$ переходит во внешний контур; далее производят преобразование, состоящее в том, чтобы окружность радиуса $R_1^* \neq 1$ в плоскости ζ_1 перешла в единичную окружность в плоскости ζ . При этом внешний контур поперечного сечения перейдет в единичную окружность, а внутренний - в окружность радиуса

$$R_1 = \frac{1}{R_1^*} < 1,$$

Ж.6 Отображение внешности единичной окружности на внешность внутреннего контура поперечного сечения обделки может быть выполнено любым из известных способов. В Приложении И приведено описание графоаналитического способа, разработанного П.В.Мелентьевым. В результате получают значения коэффициентов $a_0, a_1, \dots, a_5$.

Ж.7 Для определения радиуса окружности R_1^* которая при отображении переходит во внешний контур поперечного сечения обделки, решают уравнение пятой степени вида

$$a_0 R_1^{*5} + (a_1 - h_1) R_1^{*4} + a_2 R_1^{*3} + a_3 R_1^{*2} + a_4 R_1^* + a_5 = 0,$$

где h_1 - расстояние от начала координат, являющегося центром описанной около внутреннего контура окружности, до точки пересечения внешнего контура с вертикальной осью OX .

В качестве R_1^* берется действительный корень уравнения пятой степени, больший единицы.

Ж.8 Коэффициенты функции, реализующей последующее отображение, определяют по формулам

$$R = a_0 / R_1; \quad g_i = a_{i+1} R_1^{i+1} / a_0 \quad (i = 1, \dots, 4),$$

где $R = \frac{1}{R_1^*}$.

Ж.9 Второй этап - определение корней основных систем уравнений - состоит из следующих операций:

а) определяют величины

$$\beta = \frac{E_1(1 + \nu_0)}{E_0(1 + \nu_1)}, \quad \chi_0 = 3 - 4\nu_0, \quad \chi_1 = 3 - 4\nu_1.$$

и находят входящие в расчетные соотношения комбинации упругих постоянных материала обделки и окружающей выработку грунта по формулам

$$t = \frac{1 + \chi_0 \beta}{1 + \chi_1}, \quad d = \frac{1 - \beta}{1 + \chi_1}, \quad l = 1 - d; \quad s = 1 - t.$$

б) определяют вспомогательные величины по формулам

$$\omega_i = \begin{cases} 1 - R_1^2 & \text{при } i = 1 \\ 0 & \text{при } i = 2 \\ g_{i-2} (1 - R_1^{4-2i}) & \text{при } i = 3, \dots, 6 \end{cases}$$

$$\omega_i^1 = i g_i \quad (i = 1, \dots, 4), \quad \omega^" = 0 \quad (i = 1, \dots, 5), \quad \omega_i^" = 0 \quad (i = 6),$$

$$\omega_{i+5}^" = \sum_{j=1}^4 \omega_j^1 \omega_{i-j+4} \quad (i = 2, \dots, 12),$$

$$\omega_i = \begin{cases} 0 & \text{при } i = 1, 2, \\ \sum_{j=1}^6 \varpi_j \omega_{i+j-3} & \text{при } i = 3, \dots, 14, \end{cases}$$

$$h_i = \sum_{j=1}^4 g_i \omega_{i-j+6} \quad (i=0,1,\dots,4).$$

в) составляют матрицу системы десяти линейных уравнений (система 1) вида

$$\sum_{v=1}^4 c_{m,v} c_v + \sum_{v=1}^6 a_{m,v} a_v = d_m \quad (m=1,\dots,4),$$

$$\sum_{v=1}^4 c'_{m,v} c_v + \sum_{v=1}^6 a'_{m,v} a_v = d_m \quad (m=1,\dots,6).$$

Коэффициенты при неизвестных c_v в первых четырех уравнениях определяют по формулам

$$c_{m,v} = \begin{cases} -v\omega_{m+v+6} + R_1^{2m} + \frac{1}{a} & \text{при } m=v, \\ -v\omega_{m+v+6} & \text{при } m \neq v. \end{cases}$$

Коэффициенты при неизвестных a_v ($v=1, 2, \dots, 6$) первых четырех уравнений определяют из соотношений

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= t\omega_6 - d(h_3\omega_6 + 2h_4\omega_5), & a_{2,1} &= t\omega_7 - d(h_3\omega_7 + 2h_4\omega_6), \\ a_{3,1} &= t\omega_8 - d(h_3\omega_8 + 2h_4\omega_7), & a_{4,1} &= t\omega_9 - d(h_3\omega_9 + 2h_4\omega_8), \\ a_{1,2} &= 2(t\omega_5 - dh_4\omega_6), & a_{2,2} &= 2(t\omega_6 - dh_4\omega_7), \\ a_{3,2} &= 2(t\omega_7 - dh_4\omega_8), & a_{4,2} &= 2(t\omega_8 - dh_4\omega_9), \\ a_{i,j} &= jt\omega_{i-j+6}, & (i=1,\dots,4; j=3,\dots,6). \end{aligned}$$

Коэффициенты при неизвестных c_v ($v=1, \dots, 4$) в остальных шести уравнениях вычисляют по формуле

$$c'_{m,v} = -v\omega_{v-m+6},$$

Коэффициенты при неизвестных a_v ($v=1, \dots, 6$) последних шести уравнений определяют по формулам

$$\begin{aligned} a'_{1,1} &= tR_1^{-2} + s - d(h_3\omega_4 + 2h_4\omega_3) + t\omega_4 - h_3(l + dR_1^{-2}), \\ a'_{1,2} &= 2[t\omega_3 - dh_4\omega_4 - h_4(l + dR_1^{-2})], \\ a'_{2,1} &= t\omega_3 - dh_3\omega - h_4(l + dR_1^{-4}), \\ a'_{2,2} &= tR_1^{-4} + s - 2dh_4\omega_3, \\ a'_{1,3} &= a'_{1,4} = a'_{1,5} = a'_{1,6} = 0, \\ a'_{2,3} &= a'_{2,4} = a'_{2,5} = a'_{2,6} = 0, \\ a'_{m,k} &= \begin{cases} tR_1^{-2m} + s & \text{при } m=k \\ 0 & \text{при } m \neq k \end{cases} \quad (m=3,\dots,6). \end{aligned}$$

г) систему уравнений 1 решают дважды со свободными членами групп 1а и 1б, вычисляемыми по формулам:

Группа свободных членов 1а

$$d_1 = d \left(\frac{d-t}{d^2} + \sum_{j=1}^4 j h_4 \omega_{7-j} \right), \quad d_m = d \sum_{j=1}^4 j h_j \omega_{m-j+6} \quad (m=2,3,4),$$

$$d'_1 = h_1 (l + dR_1^{-2}) + d (h_1 \omega_4 + 2h_2 \omega_3),$$

$$d'_2 = h_2 (l + dR_1^{-4}) + d h_1 \omega_3, \quad d'_3 = h_3 (l + dR_1^{-6}),$$

$$d'_4 = h_4 (l + dR_1^{-8}), \quad d'_5 = d'_6 = 0.$$

Группа свободных членов 1б

$$d_m = -d\omega_{m+5}, \quad d'_1 = -(l + dR_1^{-2}) - d\omega_4,$$

$$d'_2 = -d\omega_3, \quad d'_3 = d'_4 = d'_5 = d'_6 = 0.$$

В результате получают соответственно две группы корней 1а и 1б.

д) составляют систему уравнений 2, коэффициенты матрицы которой получаются из соответствующих коэффициентов матрицы системы 1 по формулам:

$$c_{m,v}^{II} = c_{m,v} - 2(l + dR_1^{2m})/d \quad \text{при } m = v(m=1, \dots, 4),$$

$$a_{1,1}^{II} = -a_{1,1} + 2t\omega_6, \quad a_{1,2}^{II} = -a_{1,2} + 4t\omega_5,$$

$$a_{2,1}^{II} = -a_{2,1} + 2t\omega_7, \quad a_{2,2}^{II} = -a_{2,2} + 4t\omega_6,$$

$$a_{3,1}^{II} = -a_{3,1} + 2t\omega_8, \quad a_{3,2}^{II} = -a_{3,2} + 4t\omega_7,$$

$$a_{4,1}^{II} = -a_{4,1} + 2t\omega_9, \quad a_{4,2}^{II} = -a_{4,2} + 4t\omega_8.$$

$$a_{1,1}^{III} = -a_{1,1} + 2[t\omega_4 - h_3(l + dR_1^{-2})], \quad a_{1,2}^{III} = -a'_{1,2} + 4[t\omega_3 - h_4(l + dR_1^{-2})],$$

$$a_{2,1}^{III} = -a'_{2,1} + 2[t\omega_3 + h_4(l + dR_1^{-4})],$$

$$a_{2,2}^{III} = -a'_{2,2}, \quad a_{3,3}^{III} = -a'_{3,3}, \quad a_{4,4}^{III} = -a'_{4,4},$$

$$a_{5,5}^{III} = -a'_{5,5}, \quad a_{6,6}^{III} = -a'_{6,6}.$$

Остальные коэффициенты матрицы 2 остаются теми же, что в системе 1.

е) систему уравнений 2 решают со свободными членами группы 1б, за исключением члена d'_1 который должен быть вычислен по формуле

$$d'_1 = l + dR_1^{-2} - d\omega_4,$$

В результате решения системы 2 получают третью группу корней – $c_1(2), \dots, c_4(2), a_1(2), \dots, a_6(2)$.

Полученные три группы корней 1а, 1б и 2 являются основой для определения напряжений и усилий в обделке.

Ж.10 Третий этап расчета - определение напряжений и усилий в обделке - включает следующие операции, выполняющиеся сначала при $\Theta = 0^\circ$, а затем с изменением угла Θ с заданным шагом до 180° :

а) вычисляют значения

$$A_1(1a) = a_1(1a)h_3 + 2a_2(1a)h_4, \quad A_2(1a) = a_1(1a)h,$$

$$A_1(1б) = a_1(1б)h_4 + 2a_2(1б)h_4, \quad A_2(1б) = a_1(1б)h,$$

$$A_1(2) = a_1(2)h_3 + 2a_2(2)h_4, \quad A_2(2) = a_1(2)h.$$

б) определяют величины

$$\begin{aligned}
 A'_1(1a) &= \frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(1a) \cos(v-1)\Theta + \sum_{v=1}^2 v A_v(1a) \cos(v+1)\Theta - \\
 &- \sum_{v=1}^6 v a_v(1a) \cos(v+1)\Theta + \sum_{v=1}^4 v h_v \cos(v+1)\Theta + \frac{t-d}{d}, \\
 B'_1(1a) &= \frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(1a) \sin(v-1)\Theta - \sum_{v=1}^2 v A_v(1a) \sin(v+1)\Theta + \\
 &+ \sum_{v=1}^6 v a_v(1a) \sin(v+1)\Theta - \sum_{v=1}^4 v h_v \sin(v+1)\Theta, \\
 A_1(1\delta) &= \frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(1\delta) \cos(v-1)\Theta + \sum_{v=1}^2 v A_v(1\delta) \cos(v+1)\Theta - \\
 &- \sum_{v=1}^6 v a_v(1\delta) \cos(v+1) - \cos 2\Theta, \\
 B'_1(1\delta) &= \frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(1\delta) \sin(v-1)\Theta - \sum_{v=1}^2 v A_v(1\delta) \sin(v+1)\Theta + \\
 &+ \sum_{v=1}^6 v a_v(1\delta) \sin(v+1)\Theta + \sin 2\Theta, \\
 A'_1(2) &= -\frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(2) \sin(v-1)\Theta - \sum_{v=1}^2 v A_v(2) \sin(v+1)\Theta + \\
 &+ \sum_{v=1}^6 v a_v(2) \sin(v+1)\Theta - \sin 2\Theta, \\
 B'_1(2) &= \frac{1}{d} \sum_{v=1}^4 v c_v(2) \cos(v-1)\Theta - \sum_{v=1}^2 v A_v(2) \cos(v+1)\Theta + \\
 &+ \sum_{v=1}^6 v a_v(2) \cos(v+1)\Theta - \cos 2\Theta.
 \end{aligned}$$

в) при значениях $\rho=1$ и $\rho=R_1$ вычисляют величины

$$\begin{aligned}
 c'_1 &= 1 - \sum_{v=1}^4 v g_v \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta, \quad d'_1 + \sum_{v=1}^4 v g_v \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta, \\
 a'_2(1a) &= \sum_{v=1}^4 v c_v(1a) \rho^{v-1} \cos(v-1)\Theta - t \sum_{v=1}^6 v a_v(1a) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta + \\
 &+ d \sum_{v=1}^2 v A_v(1a) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta + d \sum_{v=1}^4 v h_v \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta, \\
 b'_2(1a) &= \sum_{v=1}^4 v c_v(1a) \rho^{v-1} \sin(v-1)\Theta + t \sum_{v=1}^6 v a_v(1a) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta - \\
 &- d \sum_{v=1}^2 v A_v(1a) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta - d \sum_{v=1}^4 v h_v \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a'_2(1\delta) &= \sum_{v=1}^4 v c_v(1\delta) \rho^{v-1} \cos(v-1)\Theta - t \sum_{v=1}^6 v a_v(1\delta) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta + \\
&+ d \sum_{v=1}^2 v A_v(1\delta) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta - d \rho^{-2} \cos 2\Theta, \\
b'_2(1\delta) &= \sum_{v=1}^4 v c_v(1\delta) \rho^{v-1} \sin(v+1)\Theta + t \sum_{v=1}^6 v a_v(1\delta) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta - \\
&- d \sum_{v=1}^2 v A_v(1\delta) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta + d \rho^{-2} \sin 2\Theta, \\
a'_2(2) &= - \sum_{v=1}^4 v c_v(2) \rho^{v-1} \sin(v-1)\Theta - t \sum_{v=1}^6 v a_v(2) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta - \\
&- d \sum_{v=1}^2 v A_v(2) \rho^{-v-1} \sin(v+1)\Theta - d \rho^{-2} \sin 2\Theta, \\
b'_2(2) &= \sum_{v=1}^4 v c_v(2) \rho^{v-1} \cos(v-1)\Theta - t \sum_{v=1}^6 v a_v(2) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta - \\
&- d \sum_{v=1}^2 v A_v(2) \rho^{-v-1} \cos(v+1)\Theta - d \rho^{-2} \cos 2\Theta.
\end{aligned}$$

г) определяют составляющие напряженного состояния $\sigma(1a)$, $\sigma(1b)$, $\sigma(2)$ по формулам

$$\begin{aligned}
\sigma_\rho &= \frac{c'_1 A'_1 + d'_1 B'_1}{c_1'^2 + d_1'^2} \Big|_{\rho=1}, \quad \tau_{p\theta} = \frac{c'_1 B'_1 + d'_1 A'_1}{c_1'^2 + d_1'^2} \Big|_{\rho=1}, \\
\sigma_{\theta \text{ внеш}} &= \frac{4c'_1 a'_2 + d'_1 b'_2}{c_1'^2 + d_1'^2} \Big|_{\rho=1}^{-\sigma_p}, \\
\sigma_{\theta \text{ внутр}} &= 4 \frac{c'_1 a'_2 + d'_1 b'_2}{c_1'^2 + d_1'^2} \Big|_{\rho=R_1}.
\end{aligned}$$

с подстановкой входящих величин A'_1 , B'_1 , a'_2 , b'_2 соответствующих групп 1a, 1б и 2.

д) вычисляют величины

$$\xi = \frac{v_0}{1-v_0}, \quad \vartheta_0 = \sqrt{\frac{1-2v_0}{2(1-v_0)}}.$$

и определяют значения экстремальных нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем и внешнем контурах поперечного сечения обделки по формулам:

$$A = \sigma_{\theta_{\text{внутр}}}^{(1)} = \frac{1 + \xi}{4} \sigma_{\theta_{\text{внутр}}} (1a) + \sqrt[3]{\frac{\xi}{1 + \xi}} \left[\sigma_{\theta_{\text{внутр}}}^2 (1b) + \sigma_{\theta_{\text{внутр}}}^2 (2) \right],$$

$$B = \sigma_{\theta_{\text{внутр}}}^{(2)} = \frac{1 + \xi}{4} \sigma_{\theta_{\text{внутр}}} (1a) - \sqrt[3]{\left(1 + \frac{\xi}{2}\right) \left[\sigma_{\theta_{\text{внутр}}}^2 (1b) + \sigma_{\theta_{\text{внутр}}}^2 (2)\right]},$$

$$C = \sigma_{\text{внеш}}^{(1)} = \frac{1+\xi}{4} \sigma_{\text{внеш}} (1a) + \varrho \sqrt{(1+\varrho^6) [\sigma_{\text{внеш}}^2 (1b) + \sigma_{\text{внеш}}^2 (2)]},$$

$$D = \sigma_{\text{внеш}}^{(2)} = \frac{1+\xi}{4} \sigma_{\text{внеш}} (1a) - \sqrt[0]{\left(1 + \sqrt[0]{\frac{\sigma_{\text{внеш}}^2 (1\sigma) + \sigma_{\text{внеш}}^2 (2)}{\sigma_{\text{внеш}}^2 (1\sigma) + \sigma_{\text{внеш}}^2 (2)}}\right)} \left[\sigma_{\text{внеш}}^2 (1\sigma) + \sigma_{\text{внеш}}^2 (2) \right].$$

е) из значений A, B, C, D выбирают наибольшее отрицательное и наибольшее положительное.

Если наибольшим того или иного знака окажется число A , то определяют соответствующий ему угол падения волн α_1 по формуле

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \arctg \frac{\varrho_{\theta_{\text{внутр}}}^0(2) - \sigma_{\theta_{\text{внутр}}}(\varrho_{\theta_{\text{внутр}}}^0(16))}{\varrho_{\theta_{\text{внутр}}}^0(16) + \sigma_{\theta_{\text{внутр}}}(\varrho_{\theta_{\text{внутр}}}^0(2))},$$

и находят напряжения $\sigma_\rho, \tau_{\rho\theta}, \sigma_{\theta\theta}$ в долях величины p из соотношений

$$\sigma = \frac{1+\xi}{4}\sigma(1a) + \frac{\eta}{2}\sigma(1\bar{b})\left(\frac{\eta}{2}\cos 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1\right) + \frac{\eta}{2}\sigma(2)\left(\frac{\eta}{2}\sin 2\alpha_1 + \cos 2\alpha_1\right),$$

Если наибольшим окажется число C , то для определения напряжений $\sigma^{\rho}, \tau_{\rho\theta}, \sigma_{\theta\text{внутр}}$ в последнюю формулу следует подставить значение угла α_1 , вычисленное по формуле пункт «е», в которой вместо величин $\sigma_{\theta\text{внутр}}$ использованы величины $\sigma_{\theta\text{внеш}}$

Если наибольшим того или иного знака окажется число B , то определяют соответствующий угол

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \frac{\pi}{2},$$

а напряжения $\sigma^{\rho}, \tau_{\rho\theta}, \sigma_{\theta\text{внеш}}$ определяют из соотношений

$$\sigma = \frac{1+\xi}{4}\sigma(1a) + \frac{\sigma}{2}(1\bar{b})\left(\frac{\sigma}{2}\cos 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_2\right) + \frac{\sigma}{2}(2)\left(\frac{\sigma}{2}\sin 2\alpha_2 + \cos 2\alpha_2\right),$$

Если же наибольшим окажется число D , то при определении α_2 используют значение α_1 , вычисленное с подстановкой вместо $\sigma_{\text{внутр}}$ величин $\sigma_{\text{внешн}}$. Напряжения $\sigma_\rho, \tau_{\rho\theta}, \sigma_{\text{внешн}}, \sigma_{\text{внутр}}$, определяют по последней формуле.

В результате получают по две эпюры напряжений $\sigma_\rho, \tau_{\rho\theta}, \sigma_{\theta_{внеш}}, \sigma_{\theta_{внутр}}$, соответствующих наибольшему сжимающим (отрицательным) и наибольшему

растягивающим (положительным) нормальным тангенциальным напряжением в обделке, которые могут возникнуть при совокупном действии волн сжатия и сдвига.

ж) определяют безразмерные координаты точек внутреннего и внешнего контуров поперечного сечения обделки по формулам

$$x_{1,2} = \left[\frac{a_1 R_1}{a_0} \rho \cos \Theta + \sum_{v=1}^4 g_v \rho^{-v} \cos v \Theta \right] / \rho = R_1, 1,$$

$$y_{1,2} = \left[\rho \sin \Theta - \sum_{v=1}^4 g_v \rho^{-v} \sin v \Theta \right] / \rho = R_1, 1.$$

и относительную толщину обделки

$$\delta = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2},$$

и) для обоих полученных вариантов напряженного состояния обделки определяют безразмерные величины M и N по формулам

$$M = \frac{\delta^2}{12} [\sigma_{\theta_{внутр}} - \sigma_{\theta_{внеш}}],$$

$$N = \frac{\delta}{12} [\sigma_{\theta_{внутр}} + \sigma_{\theta_{внеш}}].$$

к) угол θ измеряют от 0° до 180° с заданным шагом, например через 15° , и повторяют третий этап расчета.

Ж.11 Полученные усилия соответствуют наибольшим сжимающим и растягивающим напряжениям σ_θ в обделке в предположении, что растягивающая нормальная нагрузка на конструкцию не передается. Использование этих двух вариантов усилий рекомендуется для проверки прочности сечений при сжатии и растяжении, если обделка проектируется с допущением образования трещин.

Если предполагается, что обделка работает совместно с окружающим массивом грунта и при наличии нормального растяжения на контакте (например, обделка прианкерена к породе, выполнена из набрызг-бетона или проектируется без допущения образования трещин с максимальным запасом прочности), то из полученных двух для каждого вида напряжений и усилий эпюр выбирают те, которые соответствуют напряжениям σ_θ в обделке, наибольшим по абсолютной величине. За расчетные принимают как для проверки прочности сечений при сжатии, так и при растяжении, указанные эпюры усилий, взятые со знаками «плюс» и «минус»

Ж.12 Расчетные значения напряжений умножают на величину

$$p = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma c_1 T_0,$$

СП РК 2.03-107-2013

где C_1 - скорость распространения упругих волн сжатия (растяжения), характеризующая соотношением

$$C_1 = \sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma} \times \frac{1 - \nu_0}{(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}},$$

либо определяемая непосредственными измерениями в массиве;

g - ускорение силы тяжести.

Расчетные значения изгибающих моментов M умножают на величину pR^2b , а продольных сил N - на pRb , где b - единица длины в продольном направлении сооружения.

Ж.13 Если требуется провести расчет отдельно на действие волны сжатия или волны сдвига, падающей под заданным углом α к вертикальной оси симметрии выработки, то следует воспользоваться формулами

$$\sigma_{сжс} = \frac{1+\xi}{4} \sigma(1a) + \frac{1-\xi}{2} [\sigma(1b) \cos 2\alpha + \sigma(2) \sin 2\alpha],$$

$$\sigma_{сдв} = \frac{1-\xi}{2} [\sigma(2) \cos 2\alpha - \sigma(1b) \sin 2\alpha].$$

где символом σ обозначены все напряжения от единичной нагрузки. Усилия определяют через напряжения по формулам пункта Ж.10 данного Приложения Ж.

Ж.14 Отладочный вариант расчета.

Исходные данные:

$$E_0 = 17600 \text{ МПа}, E_1 = 22000 \text{ МПа}, \nu_0 = 0,25, \nu_1 = 0,16, k_c = 0,1$$

$$T_0 = 0,5 \text{ с}, \gamma = 0,025 \text{ МН / м}^3, h_1 = 9,25 \text{ м}.$$

Форма и размеры поперечного сечения обделки даны на Рисунке Ж.1

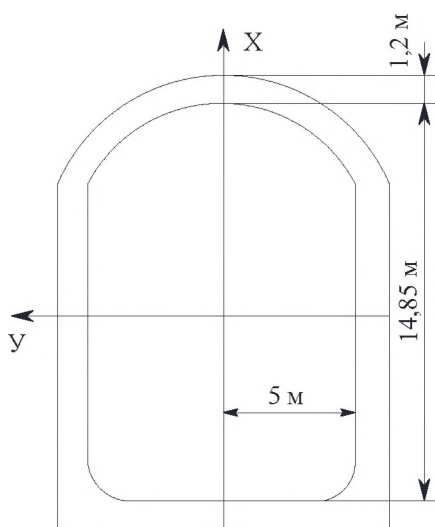


Рисунок Ж.1 - Схема обделки для отладочного варианта расчета

Коэффициенты отображающей функции имеют величины:

$$\begin{aligned} a_0 &= 6,900833, & a_1 &= 0,149705, & a_2 &= 1,171667, \\ a_3 &= 0,221667, & a_4 &= -0,688333, & a_5 &= 0,253628. \end{aligned}$$

Расчетные эпюры усилий приведены на Рисунке Ж.2 (а – изгибающие моменты в кН·м, б – продольные силы в кН). Сплошными линиями показаны усилия, которые, будучи взятыми со знаками «плюс» и «минус», соответствуют максимальным сжимающим и растягивающим напряжениям σ_θ в обделке в предположении полного контакта ее с массивом грунта и при наличии растягивающих нормальных контактных напряжений. Пунктиром показаны усилия, соответствующие максимальным растягивающим напряжениям σ_θ в обделке, в предположении, что нормальная растягивающая нагрузка на конструкцию не передается (усилия, соответствующие максимальным сжимающим напряжениям, в этом случае те, которые показаны сплошными линиями).

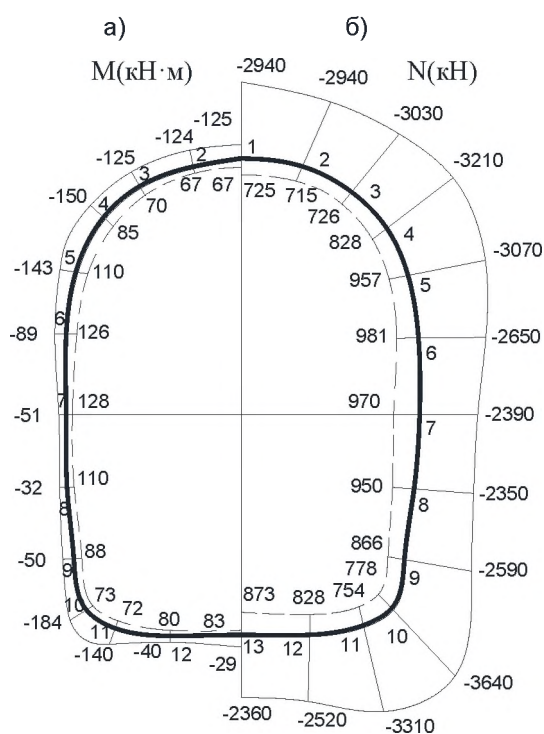


Рисунок Ж.2 - Расчетные эпюры усилий (изгибающих моментов и продольных сил) для отладочного варианта расчета (значения ординат пунктирной и сплошной линиями см.в тексте)

Величины нормальных давлений на обделку σ_p/p и касательных напряжений $\tau_{p\theta}/p$ на контакте обделки с грунтом в точках, находящихся на пересечении, показанных на

Рисунке Ж.2, сечений с внешним контуром, а также величины поперечных сил Q/p в сечениях, расположенных посередине между показанными на Рисунке Ж.2 (на оси симметрии $Q=0$), даны в Таблице Ж.1.

Таблице Ж.1 – Значения нормальных давлений, касательных напряжений и поперечных сил

Номер сечения	Единичное контактное напряжение и поперечная сила					
	при полном контакте			при невозможности реализации растягивающей нагрузки		
	σ_p/p	$\tau_{p\theta}/p$	Q/p	σ_p/p	$\tau_{p\theta}/p$	Q/p
1	-0,56	0		-0,15	0	
2	-0,54	-0,05	0,01	-0,02	-0,07	0
3	-0,52	-0,05	0	-0,05	-0,15	0
4	-0,50	0,04	-0,02	0,06	0,23	0,01
5	-0,42	0,12	0,01	0,11	-0,23	0,02
6	-0,31	0,08	0,04	0,09	-0,11	0,01
7	-0,25	-0,02	0,03	0,03	0,04	0
8	-0,22	-0,13	0,01	-0,05	0,17	-0,01
9	-0,29	-0,27	-0,01	-0,11	0,27	-0,02
10	-0,61	-0,21	-0,14	0,03	0,25	-0,02
11	-0,55	0,26	0,06	-0,01	-0,11	0
12	-0,31	0,19	0,10	-0,15	-0,08	0,01
13	-0,27	0	0,01	-0,16	0	0

Знак «минус» у контактных напряжений, продольных и поперечных сил означает сжатие, у изгибающих моментов – относительное растяжение внешнего волокна.

Таким образом, в данном случае, учитывая, что нагрузка $p=573 \text{ кН/м}^2$, контактные напряжения σ_p составляют величины до 0,35 МПа и, если считать, что эти величины не превышают сцепления обделки с грунтом, (при отсутствии других видов нагрузок) и обделка проектируется без допущения образования трещин или прианкеренной к грунту, то в качестве расчетных нужно принимать усилия M и N , данные на Рисунке Ж.2 сплошными линиями, со знаками «плюс» и «минус». Эти усилия отражают как максимальные сжимающие, так и максимальные растягивающие напряжения σ_θ в обделке от сейсмических воздействий. При этом расчетные давления на обделку, касательные напряжения на контакте и поперечные силы в сечениях обделки будут те, что даны в первой части Таблицы Ж.1, также со знаками «плюс» и «минус».

Если же обделка не прианкерена к грунту и проектируется с допущением образования трещин, то расчетными для проверки прочности обделки на сжатие являются эпюры M и N из Рисунка Ж.2 (сплошные линии) и Q из первой части Таблицы, а на растяжение – эпюры M и N из Рисунка Ж.2 (пунктир) и Q – из второй части Таблицы Ж.1.

В этом случае также возможно появление растягивающих нормальных контактных напряжений, но не по всему периметру поперечного сечения, а лишь на его части, причем

не превышающих 0,07 МПа (контактные напряжения σ_p/p и касательные напряжения $\tau_{p\theta}/p$, соответствующие максимальным растягивающим напряжениям σ_θ , даны во второй части Таблицы Ж.1).

На Рисунке Ж.3 приведены в качестве иллюстрации эпюры усилий N (сплошная линия) и M (пунктир) в обделке при действии волны сжатия, падающей под углом $\alpha=120^\circ$ к направленной вверх оси симметрии (угол α отсчитывается против часовой стрелки).

На Рисунке Ж.4 даны эпюры продольных сил N (сплошная линия) и изгибающих моментов M (пунктир) от падающей под углом $\alpha=120^\circ$ волны сдвига.

Как видно из Рисунков Ж.3 и Ж.4, эпюры усилий не имеют осей симметрии, так как направление распространения волн не совпадает ни с вертикалью, ни с горизонталью.

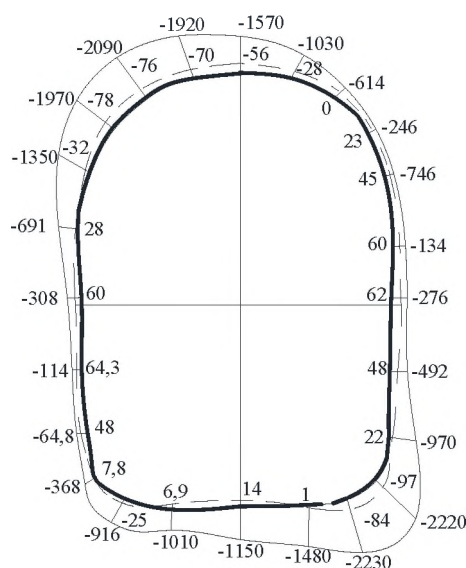


Рисунок Ж.3 - Эпюры усилий (сплошная линия и пунктир) в обделке при действии волны сжатия, падающей под углом 120° к направленной вверх оси симметрии

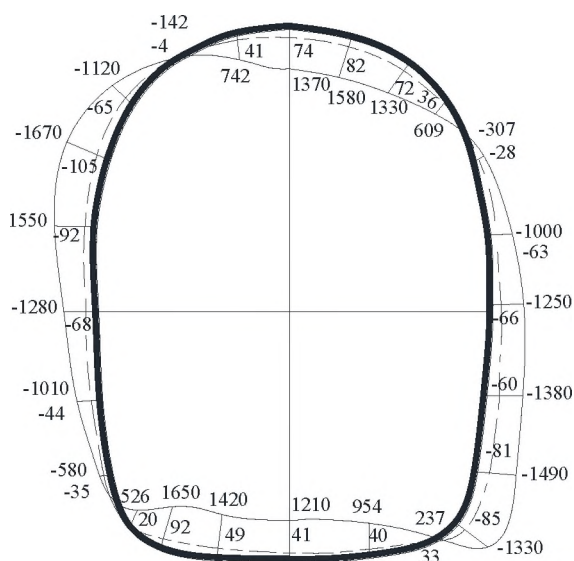


Рисунок Ж.4 - Эпюры усилий (сплошная линия и пунктир) в обделке

Ж.15 Обделка железнодорожного тоннеля.

Исходные данные:

$$E_1 = 31500 \text{ МПа}, \quad \nu_1 = 0,15, \quad E_0 = 700 \text{ МПа}, \quad \nu_0 = 0,3, \quad \gamma = 0,0263 \text{ МН / м}^3,$$

$$k_c = 0,1, \quad T_0 = 0,5 \text{ с}, \quad \delta = 0,5 \text{ м}.$$

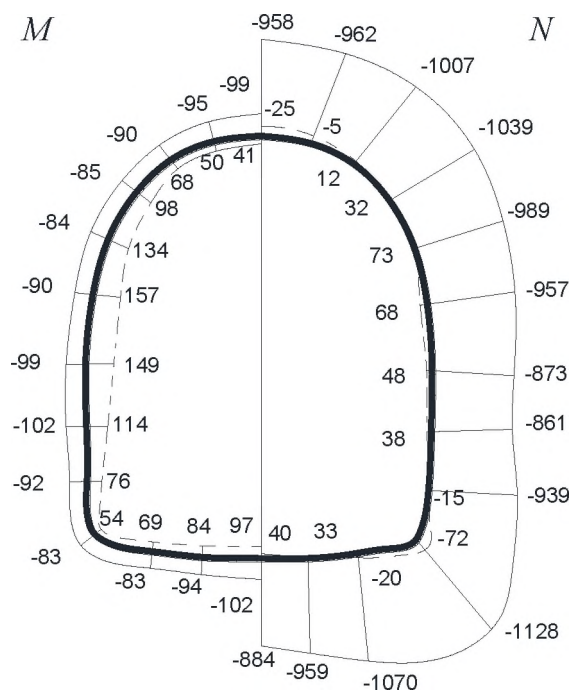


Рисунок Ж.5 Расчетные эпюры усилий в обделке железнодорожного тоннеля.

Расчетные эпюры усилий приведены на Рисунке Ж.5 (сплошные линии – усилия, соответствующие максимальным сжимающим, пунктир – максимальным растягивающим напряжениям σ_θ в обделке).

Приложение И (информационное)

Построение конформного отображения графо – аналитическим способом П. В. Мелентьева

И.1 Строят конформное отображение для определения коэффициентов отображающей функции $a_0, a_1, \dots, a_5$, характеризующих форму поперечного сечения обделки и используемых в качестве исходных данных для компьютерного расчета.

И.2 Для нахождения указанных коэффициентов выполняют следующие операции:

И.2.1 Вычерчивают в масштабе (1:100, в случае небольших размеров выработки – 1:50) половину симметричного внутреннего контура поперечного сечения обделки. Начало координат располагают внутри контура на вертикальной оси симметрии, вдоль которой направляется ось $O - X$ (Рисунок И.1) и совпадает с центром окружности, описанной вокруг контура.

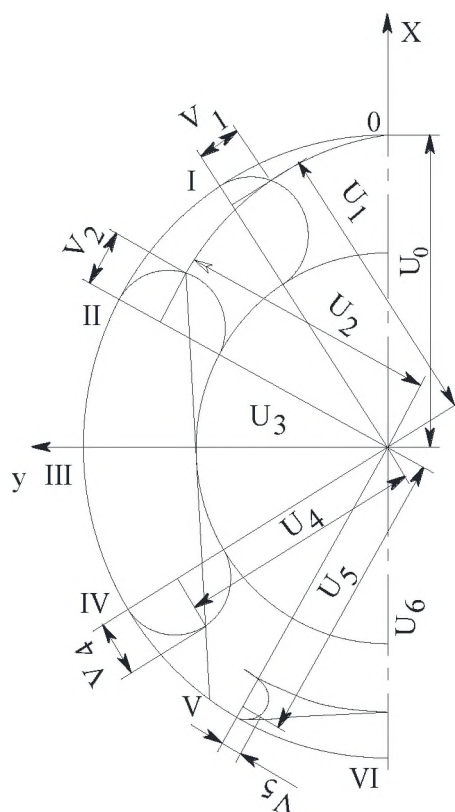


**Рисунок И.1 - Схема к отысканию коэффициентов отображающей функции
графо–аналитическим способом П. В. Мелентьева**

И.2.2 Половину симметричного контура разбивают лучами $0, I, \dots, VI$, исходящими из начала координат на 6 частей (лучи проводят под углом 30° друг к другу).

И.2.3 Из того же центра проводят окружности, касающиеся контура изнутри (их может быть несколько), и если один луч пересекает две окружности, то для следующего построения выбирают окружность большего радиуса.

И.2.4 На отрезках лучей $I, \dots, V$, заключенных между описанной около контура и касающимися контура изнутри окружностями, как на диаметрах, строят вспомогательные окружности, пересекающие контур в двух точках.

И.2.5 Из двух точек пересечения выбирают наиболее удаленную от начала координат, и из нее на соответствующий луч опускают перпендикуляр. Расстояние этой точки до луча обозначают V_n , а длину луча от начала координат до пересечения с перпендикуляром обозначают U_n .

И.2.6 Значения $u_n^{(0)}$ читают на шкале прозрачной палетки (Рисунок И.2), вычерченной на кальке в масштабе одно деление – 1 см, если контур вычерчен в масштабе 1:100, и одно деление – 2 см, если контур дан в масштабе 1:50. Палетку накладывают на чертеж таким образом, чтобы шкала u совпадала с n – ным лучом, а шкала v – с перпендикуляром, опущенным на луч из точки пересечения вспомогательной окружности с контуром.

Примечания

1 Величины $v_0^{(0)}$ и $v_6^{(0)}$ равны нулю, поэтому в качестве $u_0^{(0)}$ и $u_6^{(0)}$ принимают длины соответствующих лучей от начала координат до пересечения с контуром.

2 Все необходимые графические построения показаны на Рисунке И.1.

И.2.7 Решают систему семи уравнений относительно неизвестных $a_n^{(0)}$, у которой в качестве свободных членов берут измеренные величины $u_n^{(0)}$.

Матрица системы уравнений для определения $a_n^{(0)}$ дана в Таблице И.1.

И.2.8 Корни системы уравнений И.2.7 дают первое приближение коэффициентов отображающей функции.

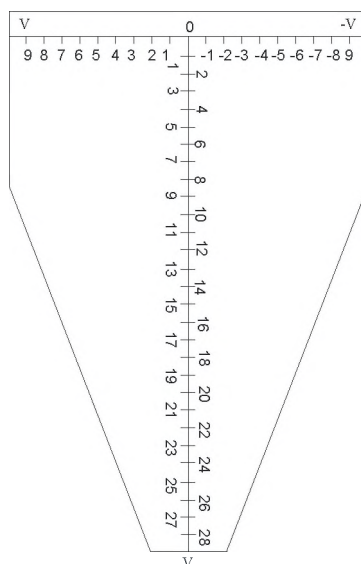


Рисунок И.2 - Палетка для определения значений $u_n^{(0)}$

И.2.9 Найденные из решения системы И.2.7 величины $a_n^{(0)}/n=0, \dots, 6$ подставляют в формулу для определения $v_n^{(0)}$, имеющую вид

$$v_n^{(0)} = -\sum_{v=0}^6 a_v^{(0)} \sin \frac{vn\pi}{6}$$

Таблица И.1 – Матрица системы уравнений для определения $a_n^{(0)}$

Коэффициент отображающей функции							Свободный член
$a_0^{(0)}$	$a_1^{(0)}$	$a_2^{(0)}$	$a_3^{(0)}$	$a_4^{(0)}$	$a_5^{(0)}$	$a_6^{(0)}$	
1	1	1	1	1	1	1	$u_0^{(0)}$
1	0,866	0,5	0	-0,5	-0,866	-1	$u_1^{(0)}$
1	0,5	-0,5	-1	-0,5	0,5	1	$u_2^{(0)}$
1	0	-1	0	1	0	-1	$u_3^{(0)}$
1	-0,5	-0,5	1	-0,5	-0,5	1	$u_4^{(0)}$
1	-0,866	0,5	0	-0,5	0,866	-1	$u_5^{(0)}$
1	-1	1	-1	1	-1	-1	$u_6^{(0)}$

И.2.10 Для нахождения следующего приближения $u_n^{(1)}$ прозрачную палетку со шкалами u_1v (Рисунок И.2) накладывают на соответствующий луч, после чего передвижением шкалы u вдоль луча добиваются того, чтобы полученное значение $v_n^{(0)}$ оказалось на пересечении контура со шкалой v . При таком положении палетки на шкале u читают значения $u_n^{(1)}$.

Примечание - Величины $u_0^{(1)}$ и $u_6^{(1)}$ остаются прежними.

И.2.11 Вновь производят операции п.п. Е.2.7, Е.2.9, но качестве свободных членов системы пункта И.2.7 берут значения $u_0^{(1)}$ и $u_1^{(1)} \dots u_6^{(1)}$.

И.2.12 Указанным образом определяют второе приближение коэффициентов отображающей функции и т.д.

И.2.13 Операции продолжают до тех пор, пока построение следующего приближения не будет вносить существенной поправки в величины v_n .

Примечание - Как правило, для реальных очертаний обделок достаточно трех приближений.

И.2.14 Проверку соответствия полученного контура исходному осуществляют по формулам для координат точек

$$x = \sum_{n=0}^6 a_n \cos(1-n)\Theta, \quad y = \sum_{n=0}^6 a_n \sin(1-n)\Theta.$$

И.2.15 Решают систему уравнений пункта И.2.7 относительно коэффициентов a_n , определяют величины v_n и координаты точек, отображенного контура по методике приведенной в [8].

Приложение К (информационное)

Алгоритм и пример расчета многослойной круговой обделки тоннеля

К.1 В настоящем Приложении К приведен алгоритм и методика расчета многослойных круговых обделок тоннелей, приведенные в [9].

К.2 Обделку рассматривают как $(n-1)$ слойное кольцо; n -й слой - бесконечно толстый массив (Рисунок 14 в подразделе 5.5 настоящего свода правил).

К.3 Задаваемые расчетные нагрузки неравномерны по углу Θ , отсчитываемому от оси, проходящей через максимум радиальной нагрузки

$$\begin{aligned}\sigma_r &= p_0 + p_2 \cos 2\Theta, \\ \tau_{r\theta} &= Q_2 \sin 2\Theta.\end{aligned}$$

где σ_r и $\tau_{r\theta}$ - радиальная и касательная составляющие нагрузок;

p_0, p_2 и Q_2 - параметры нагрузок (задаются или вычисляются по приведенным формулам).

К.4 При расчете обделок, слои которых неоднородны по механическим свойствам, например, бетонные с арматурой гибкой или жесткой или слои с ребристыми тубингами, учитывают неравномерность распределения напряжений по сечению. Неоднородность материалов в каждом слое характеризуется коэффициентом (степенью) армирования, которая определяется отношением площади сечения арматуры к площади сечения слоя. Если внутренним слоем обделки являются ребристые тубинги без заполнения пространства между ребрами, то степень армирования выделенного слоя ребер определяют отношением площади сечения ребер к площади междуреберного пространства и ребер.

К.5 Исходные данные для расчета

К.5.1 Свойства грунта в массиве:

E_0 - модуль деформации, МПа;

ν_0 - коэффициент Пуассона;

γ - объемная масса грунта, МН/м³;

k_c - коэффициент сейсмичности;

T_0 - преобладающий период колебаний частиц грунта, с;

C_1 - скорость распространения упругих волн сжатия-растяжения, см/с, определяют по формуле

$$C_1 = \sqrt{\frac{980 E_n (1 - \nu_n)}{\gamma (1 + \nu_n) (1 - 2\nu_n)}},$$

К.5.2 Данные по обделке:

$n-1$ - количество слоев;

R_i - радиусы контуров слоев ($i = 0, 1, \dots, n-1$);

A_i - степень армирования слоев ($i = 1, 2, \dots, n-1$);

E_i^I, E_i^{II} - модули деформации материалов слоев (МПа);

E_i^I - основного материала;

E_i^{II} - арматуры;

ν_i - коэффициенты Пуассона материалов слоев.

К.5.3 Сейсмические воздействия:

$$p_{0c}^n = \frac{1}{4\pi(1-\nu_0)} \cdot k_c \gamma C_1 T_0,$$

$$p_{2c}^n = p_{0c}^n \sqrt{(1-2\nu_0)(3-4\nu_0)}.$$

К.5.4 Порядок расчета:

$$\left. \begin{aligned} E_i &= E_i^I (1 - A_i) + E_i^{II} A_i \\ x_i &= 3 - 4\nu_i; G_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)} \end{aligned} \right\} i = 1, 2, \dots, n-1;$$

$$c_i = \frac{R_i}{R_i - 1}, \quad D_i = \frac{c_i^2 - 1}{x_i + 1}, \quad H_i = \frac{(c_i^2 - 1)^3}{x_i + 1} \quad i = 1, 2, \dots, n-1.$$

$\{\alpha_{kl}\}, \{\beta_{kl}\}, \{\gamma_{kl}\}, \{\delta_{kl}\}$ - квадратные матрицы (3 x 3).

$$i = 1, 2, \dots, n-1.$$

$$\bar{\delta}_{21}^i = 0; \quad \bar{\delta}_{22}^i = \frac{1}{H_i} (c_i^6 + 9c_i^4 + 3c_i^2 + 3) + 2,$$

$$\bar{\delta}_{23}^i = \frac{1}{H_i} (c_i^6 - 3c_i^4 - 3c_i^2 - 3) + 2,$$

$$\bar{\delta}_{31}^i = 0; \quad \bar{\delta}_{32}^i = \frac{1}{H_i} (c_i^6 - 3c_i^4 - 3c_i^2 - 3) - 4,$$

$$\bar{\delta}_{33}^i = \frac{1}{H_i} (c_i^6 - 3c_i^4 + 3c_i^2 + 3) - 4,$$

$$\alpha_{kj}^i = \frac{1}{G_i} \bar{\alpha}_{kj}^i, \quad \bar{\beta}_{kj}^i = \frac{1}{G} \bar{\beta}_{kj}^i, \quad \bar{\gamma}_{kj}^i = \frac{1}{G_i} \bar{\gamma}_{kj}^i, \quad \delta_{kj}^i = \frac{1}{G_i} \bar{\delta}_{kj}^i.$$

для n -го бесконечного слоя коэффициенты $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$

$$\begin{aligned}
 \bar{\alpha}_{11}^n &= -2, \quad \bar{\alpha}_{12}^n = 0, \quad \bar{\alpha}_{13}^n = 0, \\
 \bar{\alpha}_{21}^n &= 0, \quad \bar{\alpha}_{22}^n = -3(x_n + 1) + 2, \quad \bar{\alpha}_{23}^n = 3(x_n + 1) - 4, \\
 \bar{\alpha}_{31}^n &= 0, \quad \bar{\alpha}_{32}^n = 3(x_n + 1) - 4, \quad \bar{\alpha}_{33}^n = -3(x_n + 1)2; \\
 \bar{\beta}_{11}^n &= x_n + 1, \quad \bar{\beta}_{12}^n = 0, \quad \bar{\beta}_{13}^n = 0, \\
 \bar{\beta}_{21}^n &= 0, \quad \bar{\beta}_{22}^n = 6(x_n + 1), \quad \bar{\beta}_{23}^n = 0, \\
 \bar{\beta}_{31}^n &= 0, \quad \bar{\beta}_{32}^n = -6(x_n + 1), \quad \bar{\beta}_{33}^n = 0; \\
 A^i &= \{\alpha_{kj}^i\}, \quad B^i = \{\beta_{kj}^i\} \quad i = 1, 2, \dots, n, \\
 \bar{\alpha}_{11}^i &= \frac{1}{D_i} - 2, \quad \bar{\alpha}_{12}^i = 0, \quad \bar{\alpha}_{13}^i = 0, \\
 \bar{\alpha}_{21}^i &= 0, \quad \bar{\alpha}_{22}^i = -\frac{1}{H_i}(3c_i^6 + 3c_i^4 + 9c_i^2 + 1) + 2, \\
 \bar{\alpha}_{23}^i &= \frac{1}{H_i}(3c_i^6 + 3c_i^4 + 3c_i^2 - 1) - 4, \\
 \bar{\alpha}_{31}^i &= 0, \quad \bar{\alpha}_{32}^i = \frac{1}{H_i}(3c_i^6 + 3c_i^4 - 3c_i^2 - 1) - 4 = \bar{\alpha}_{23}^i, \\
 \bar{\alpha}_{33}^i &= -\frac{1}{H_i}(3c_i^6 + 3c_i^4 - 3c_i^2 + 1) + 2, \\
 \bar{\beta}_{11}^i &= \frac{c_i^2}{D_i}, \quad \bar{\beta}_{12}^i = 0, \quad \bar{\beta}_{13}^i = 0, \\
 \bar{\beta}_{21}^i &= 0, \quad \bar{\beta}_{22}^i = \frac{2}{H_i}c_i^2(3c_i^4 + 2c_i^2 + 3), \quad \bar{\beta}_{23}^i = -\frac{2}{H_i}c_i^2(c_i^2 + 3), \\
 \bar{\beta}_{31}^i &= 0, \quad \bar{\beta}_{32}^i = -\frac{2}{H_i}c_i^4(3c_i^2 + 1), \quad \bar{\beta}_{33}^i = \frac{4}{H_i}c_i^4, \\
 \bar{\gamma}_{11}^i &= -\frac{1}{D_i}, \quad \bar{\gamma}_{12}^i = 0, \quad \bar{\gamma}_{13}^i = 0, \\
 \bar{\gamma}_{21}^i &= 0, \quad \bar{\gamma}_{22}^i = -\frac{2}{H_i}(3c_i^4 + 2c_i^2 + 3), \quad \bar{\gamma}_{23}^i = \frac{2}{H_i}c_i^2(3c_i^2 + 1), \\
 \bar{\gamma}_{31}^i &= 0, \quad \bar{\gamma}_{32}^i = \frac{2}{H_i}(c_i^2 + 3), \quad \bar{\gamma}_{33}^i = -\frac{4}{H_i}c_i^2, \\
 \bar{\delta}_{11}^i &= \frac{c_i^2}{D_i} - 2, \quad \bar{\delta}_{12}^i = 0, \quad \bar{\delta}_{13}^i = 0, \\
 F^i &= \{\gamma_{kj}^i\}, \quad D^i = \{\delta_{kj}^i\} \quad i = 1, 2, \dots, n-1,
 \end{aligned}$$

$$k^0 = \begin{Bmatrix} 000 \\ 000 \\ 000 \end{Bmatrix},$$

$$k^i = \left[-A^{i+1} + D^i + F^i K^{i-1} \right]^{-1} B^{i+1}.$$

где $1 \leq i \leq n-1$ - при расчете обделки совместно с массивом;

$$p^i = k^i p^{i+1}$$

$$p^n = \begin{Bmatrix} p_0^n \\ p_2^n \\ Q_2^n \end{Bmatrix},$$

$$s_1^i = \frac{2c_i^2}{c_i^2 - 1}, \quad s_{12}^i = -\frac{(4c_i^2 + 1)c_i^2}{(c_i^2 - 1)^2}, \quad s_{13}^i = \frac{4c_i^2}{(c_i^2 - 1)^2},$$

$$s_{21}^i = s_{11}^i, \quad s_{22}^i = -s_{12}^i, \quad s_{23}^i = -s_{13}^i,$$

$$s_{31}^i = \frac{c_i^2 + 1}{c_i^2 - 1}, \quad s_{32}^i = \frac{c_i^4 + 6c_i^2 + 1}{(c_i^2 - 1)^2}, \quad s_{33}^i = \frac{2(c_i^4 - 2c_i^2 - 1)}{(c_i^2 - 1)^2},$$

$$s_{41}^i = s_{31}^i, \quad s_{42}^i = -s_{32}^i, \quad s_{43}^i = -s_{33}^i,$$

$$t_{11}^i = -s_{31}^i, \quad t_{12}^i = s_{32}^i, \quad t_{13}^i = -\frac{2(c_i^4 + 2c_i^2 - 1)}{(c_i^2 - 1)^2},$$

$$t_{21}^i = t_{11}^i, \quad t_{22}^i = -t_{12}^i, \quad t_{23}^i = -t_{13}^i,$$

$$t_{31}^i = -\frac{s_{11}^i}{c_i^2}, \quad t_{32}^i = \frac{s_{12}^i}{c_i^2}, \quad t_{33}^i = s_{13}^i,$$

$$t_{41}^i = t_{31}^i, \quad t_{42}^i = -t_{32}^i, \quad t_{43}^i = -t_{33}^i.$$

К.5.5 Напряжения в элементах обделки

$$\sum_i^j = \begin{Bmatrix} \sigma_{i\text{вс}}^j \\ \sigma_{i\text{вб}}^j \\ \sigma_{i\text{нс}}^j \\ \sigma_{i\text{нб}}^j \end{Bmatrix} \quad (j=1,2) \quad (i=1,2,\dots,n-1),$$

Значки "вс", "вб", "нс", "нб" указывают сечения, в которых определяют напряжения:

- "в" - на внутреннем контуре слоя;
- "н" - на наружном контуре слоя;
- "с" - в своде (по оси действия максимальной нагрузки);
- "б" - в боках (по оси, перпендикулярной направлению действия максимальной нагрузки).

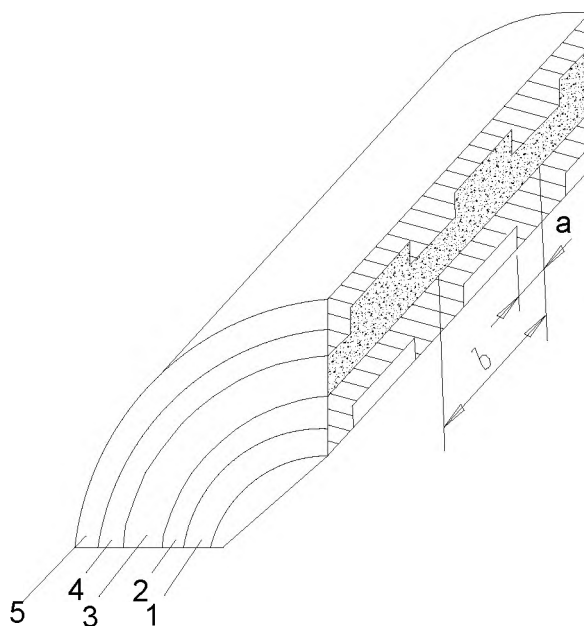
Верхний индекс "j" указывает на материал, в котором определяют напряжения: например j=1 - бетон, j=2 - арматура; i - номер слоя.

$$\sum_i^j = \frac{E_i^j}{E_i} [\{s_{kl}\} P_{\Sigma}^i + \{t_{kl}\} P_{\Sigma}^{i-1}],$$

$$(1 \leq k \leq 4)$$

$$(1 \leq l \leq 3)$$

К.5.6 Пример расчета обделки, состоящей из двух слоев чугунных тюбингов с заполненным бетоном между ними (см. Рисунок К.1)



1 - слой без заполнения; 2, 5 - слои спинки чугунных тюбингов; 3 - слой бетона; 4 - слой комбинированный (ребра тюбингов и бетонное заполнение)

Рисунок К.1 - Конструкция многослойной кольцевой обделки

К.5.7 Свойства грунта в массиве:

Модуль деформации – 700 МПа;

Коэффициент Пуассона – 0,30;

Объемная масса 0,0262 МН/м³;

Коэффициент сейсмичности – 0,1;

Преобладающий период колебаний 0,5 с.

Параметры обделки приведены в Таблице К.1.

Параметры нагрузок на слой обделки приведены в Таблице К.2.

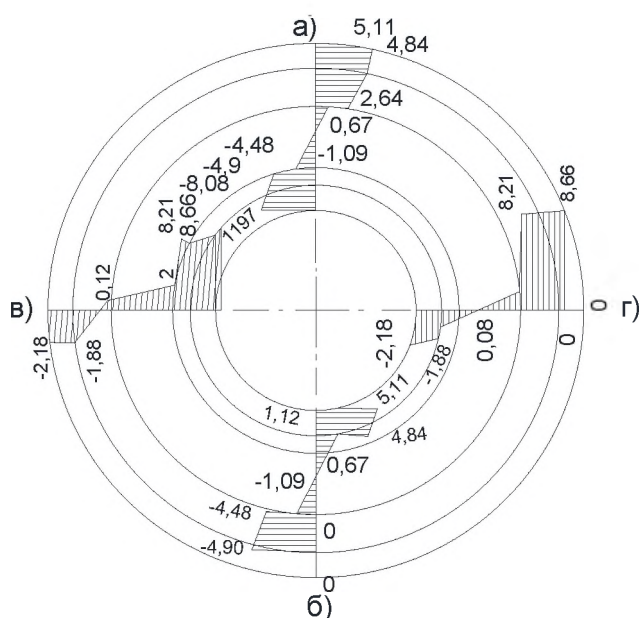
Эпюры напряжений в шельге свода и на горизонтальном диаметре в сечениях по ребрам и межреберному заполнению в МПа показаны на Рисунке К.2.

Таблица К.1 – Параметры обделки

Номер слоя	Радиус, см	Отношение площади поперечного сечения ребра (арматуры) ко всему слою F_2/F_1	Модуль деформации, МПа		Коэффициент Пуассона
			E_1	E_2	
5	474	0	100000	100000	0,25
4	471	0,1	24000	100000	0,15
3	447	0	24000	24000	0,25
2	377	0	100000	100000	0,25
1	374	0,1	0	100000	0,15
0	350				

Таблица К.2 – Параметры нагрузок

Номер слоя	Параметр нагрузки, кПа			Примечание
	P_0	P_2	Q_2	
5	116,56	16,63	-158,41	Внешняя нагрузка
4	107,22	-7,89	-205,19	
3	88,73	-73,43	-304,66	
2	26,91	-94,99	-204,46	
1	12,08	-45,59	-102,06	



а – сечение в шельге свода по ребрам; б – то же по межреберному заполнению;
 в – сечение на горизонтальном диаметре по ребрам; г – то же межреберному заполнению
 («плюс» - сжатие, «минус» - растяжение)

Рисунок К.2 - Эпюры напряжений по сечениям многослойной обделки

Приложение Л
(информационное)

**Оценка эксплуатационной надежности обделки перегонного
тоннеля из сборных железобетонных блоков**

Л.1 Общие указания

Л.1.1 В настоящем приложении Л приведена методика определения очертания возведенной обделки кругового очертания из сборных железобетонных блоков перегонного тоннеля глубокого заложения. По результатам инструментальной съемки определена вертикальная и горизонтальная эллиптичность обделки с измененной геометрией.

Произведены расчеты кольца обделки с измененной геометрией на основное и особое сочетания действия нагрузок. По результатам расчетов на основное и особое сочетания действия нагрузок определены внутренние усилия в нормальных и лотковом блоках обделки. Произведены расчеты, связанные с определением несущей способности нормальных и лоткового блоков и оценена эксплуатационная надежность кольца обделки с измененной геометрией.

Л.1.2 На Рисунке Л.1 приведено проектное очертание кольца обделки перегонного тоннеля из сборных железобетонных блоков, объединенных специальными скобками.

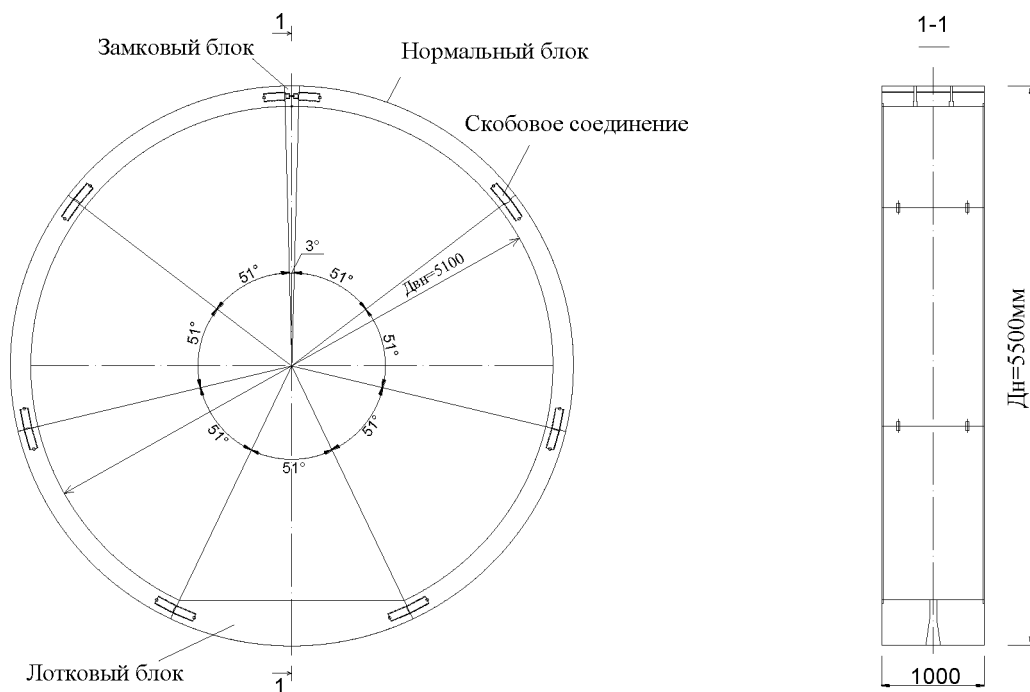


**Рисунок Л.1 – Проектное очертание кольца обделки перегонного тоннеля из
сборных железобетонных блоков**

Л.2 Радиальная съемка кольца обделки

Л.2.1 Для определения фактического внутреннего очертания возведенной обделки из сборных железобетонных блоков производится его радиальная съемка. Радиальную съемку рекомендуется выполнять при помощи электронного тахеометра. Ниже в подразделе Л.2 излагается методика определения фактического внутреннего очертания кольца обделки с измененной геометрией.

Л.2.2 На Рисунке Л.2 показано поперечное сечение железобетонного кольца, местоположение тахеометра и определяемые координаты внутренних точек сопряжения блоков (стыков) кольца обделки (1÷7) относительно местоположения (начала координат) тахеометра (ц).

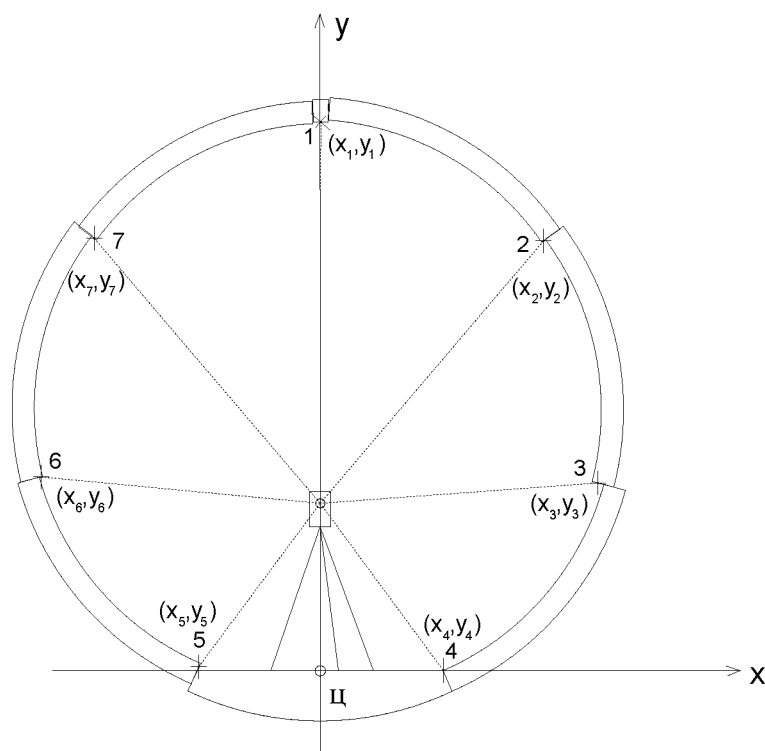


**Рисунок Л.2 – К определению координат стыков блоков обделки относительно нижней точки тахеометра:
1÷7 – стыки блоков; ц – нижняя точка тахеометра**

В Таблице Л.1 приведены координаты стыков блоков обделки относительно нижней точки тахеометра.

Таблица Л.1 - Данные по стыкам блоков обделки относительно нижней точки тахеометра

Координат a	Координата стыка относительно нижней точки тахеометра, м						
	1	2	3	4	5	6	7
X	0,195	2,149	2,449	0,967	-1,248	-2,500	-1,914
Y	4,601	3,478	1,317	-0,299	-0,140	1,660	3,789

Л.2.3 По результатам тахеометрической съемки координаты центра образовавшегося многоугольника относительно нижней точки тахеометра могут быть определены по формулам

$$x_y = \frac{\sum_{i=1}^7 x_i}{7}, \quad y_y = \frac{\sum_{i=1}^7 y_i}{7} \quad (\text{Л.1})$$

где x_i, y_i - координаты внутренних точек сопряжения (стыков) блоков обделки относительно нижней точки тахеометра.

На Рисунке Л.3 показано поперечное сечение обделки, координаты внутренних точек сопряжения (стыков) блоков относительно нижней точки тахеометра и координаты центра многоугольника.

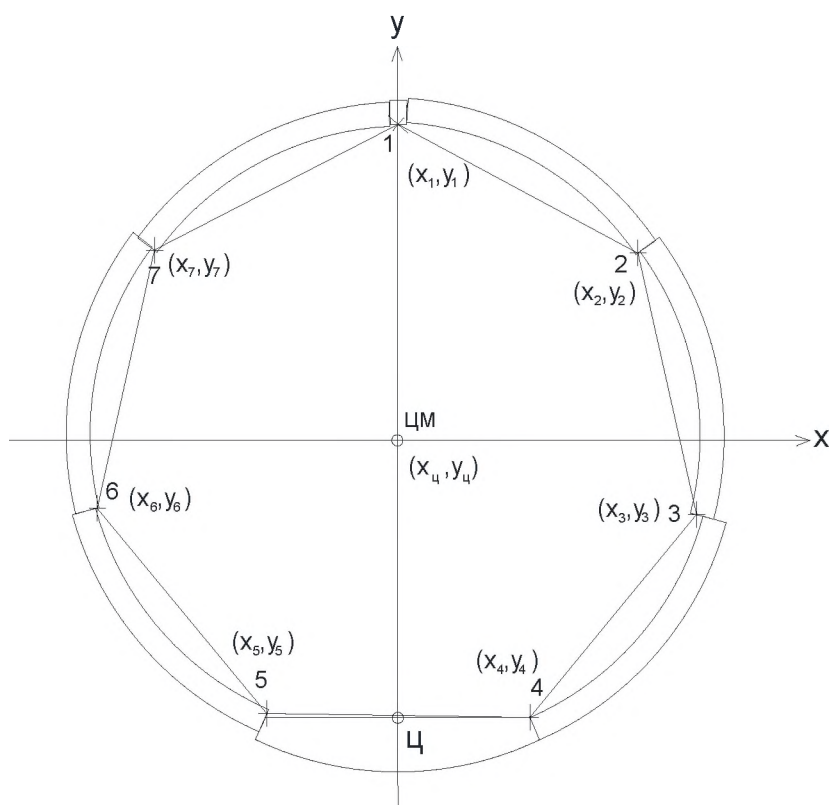


Рисунок Л.3 – К определению координат центра многоугольника стыков блоков обделки относительно нижней точки тахеометра:
 цм– центр многоугольника; ц – нижняя точка тахеометра

В Таблица Л.2 приведены координаты центра многоугольника, определенные из выражений (Л.1).

Таблица Л.2 – Данные по центру многоугольника стыков блоков обделки

Координата	Координата центра многоугольника стыков блоков относительно нижней точки тахеометра, м
$X_{ц}$	0,010
$Y_{ц}$	2,060

Л.2.4 На следующем этапе определяются координаты внутренних точек сопряжения (стыков) блоков обделки относительно центра многоугольника по формулам

$$x_{i,цм} = x_i - x_{ц}, \quad y_{i,цм} = y_i - y_{ц}. \quad (Л.2)$$

Л.2.5 На Рисунке Л.4 показано поперечное сечение обделки и координаты определяемых точек сопряжения (стыков) блоков обделки относительно центра многоугольника.

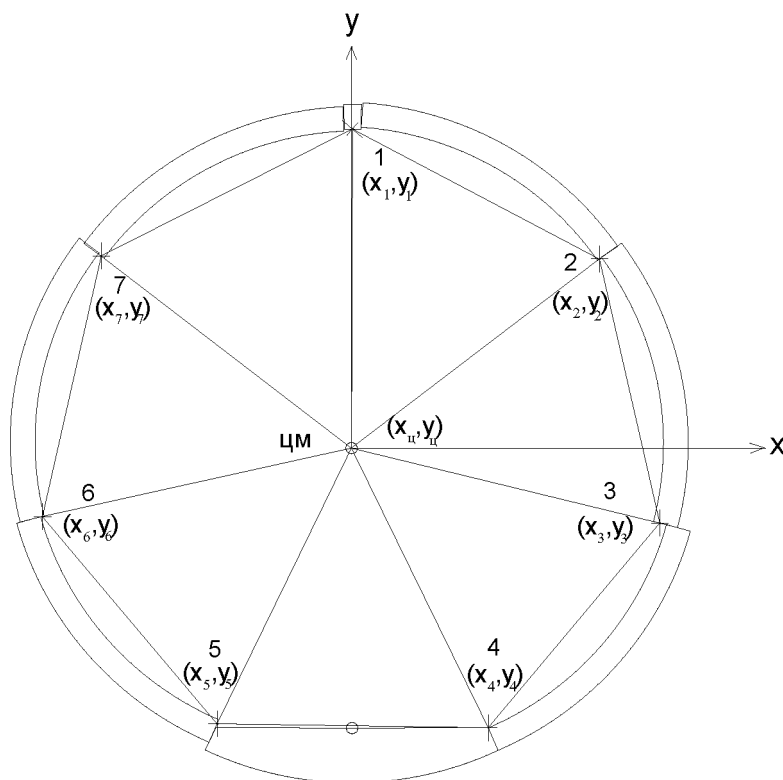


Рисунок Л.4 – К определению координат стыков блоков обделок относительно центра многоугольника: цм – центр многоугольника

В Таблице Л.3 приведены координаты точек сопряжения (стыков) блоков относительно центра многоугольника.

Таблица Л.3 – Данные по стыкам блоков обделки относительно центра многоугольника

Координата	Координата стыка относительно центра многоугольника, м						
	1	2	3	4	5	6	7
X	0,181	2,135	2,435	0,953	-1,262	-2,514	-1,928
Y	2,543	1,420	-0,741	-2,357	-2,198	-0,398	1,731

Л.2.6 На Рисунке Л.5 показано поперечное сечение обделки, определяемые радиусы и промежуточные углы стыков.

Радиусы от центра многоугольника до внутренних точек сопряжения (стыков) блоков кольца обделки могут быть определены по формуле

$$R_i = \sqrt{(x_{i,oy} - x_y)^2 + (y_{i,oy} - y_y)^2}, \quad (\text{Л.3})$$

где: $x_{i,oy}, y_{i,oy}$ – координаты стыков относительно центра многоугольника.

Углы между радиусами, направленными до внутренних точек мест сопряжения (стыков) блоков обделки могут быть определены по формуле

$$\cos \varphi = \frac{\vec{R}_i \times \vec{R}_{i+1}}{|\vec{R}_i| \times |\vec{R}_{i+1}|} = \frac{(x_{i,oy} - x_y) \cdot (x_{i+1,oy} - x_y) + (y_{i,oy} - y_y) \cdot (y_{i+1,oy} - y_y)}{\sqrt{(x_{i,oy} - x_y)^2 + (y_{i,oy} - y_y)^2} \cdot \sqrt{(x_{i+1,oy} - x_y)^2 + (y_{i+1,oy} - y_y)^2}}, \quad (\text{Л.4})$$

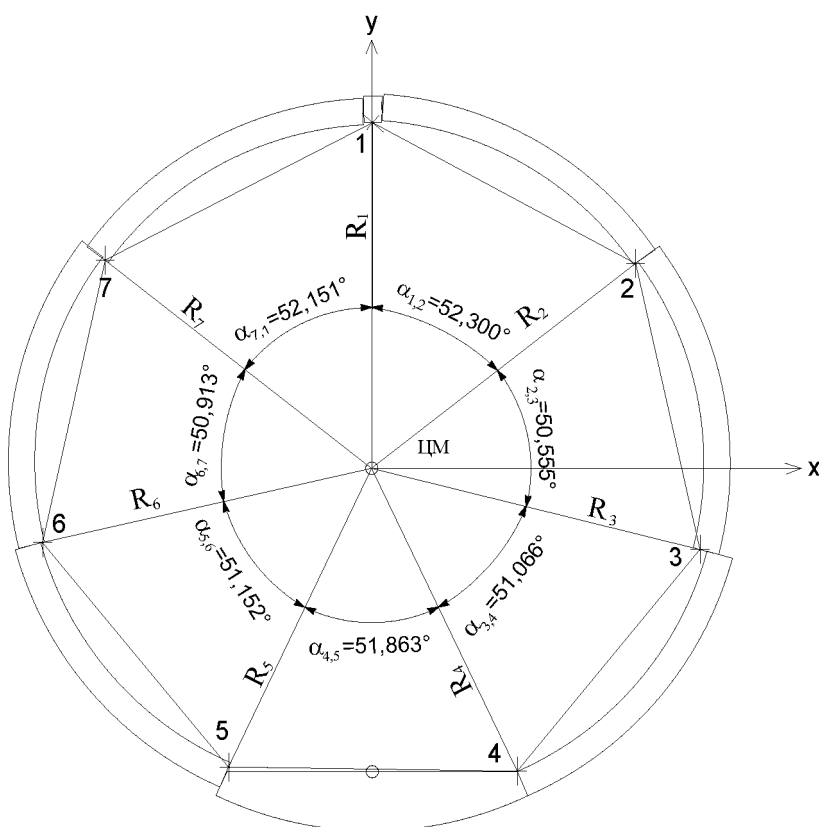


**Рисунок Л.5 – К определению радиусов и углов стыков блоков обделки:
 $R_1 \div R_7$ – радиусы стыков, $\alpha_{1,2} \div \alpha_{7,1}$ – углы стыков**

В Таблице Л.4 приведены данные по радиусам стыков блоков обделки относительно центра многоугольника.

Таблица Л.4 – Данные по радиусам стыков блоков обделки

Длина радиуса стыка блока обделки, м						
R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
2,550	2,564	2,545	2,543	2,534	2,545	2,591

Далее определяются расстояния от центра многоугольника до внутренних точек сопряжения (стыков) блоков, находящихся на расчетной оси обделки (Рисунок Л.6).

Расстояния R'_i от центра многоугольника до расчетной оси блоков кольца обделки определяются из зависимости

$$R'_i = R_i + \frac{h}{2}, \quad (\text{Л.5})$$

где h - толщина обделки.

Расчетной осью кольца обделки считается геометрическое место центров тяжести ненарушенного материала расчетных сечений.

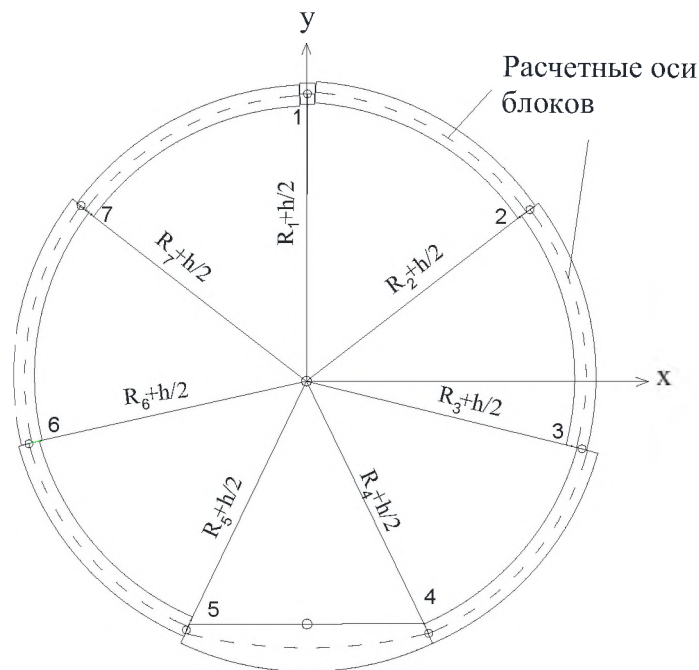


Рисунок Л.6 – К определению радиусов стыков блоков, определяющих положение расчетной оси обделки

Л.2.7 Криволинейное очертание расчетной оси обделки заменяется ломаной линией. На Рисунке Л.7 показано положение расчетной оси кольца обделки, которая определяется двадцатью восемью вершинами многоугольника.

Координаты этих вершин определяются из зависимостей

$$x_i = R'_i \sin \varphi, \quad y_i = R'_i \cos \varphi. \quad (\text{Л.6})$$

где R'_i - радиус от центра до i – ой вершины многоугольника;

φ – промежуточный угол между радиусами R'_i и R'_{i+1} .

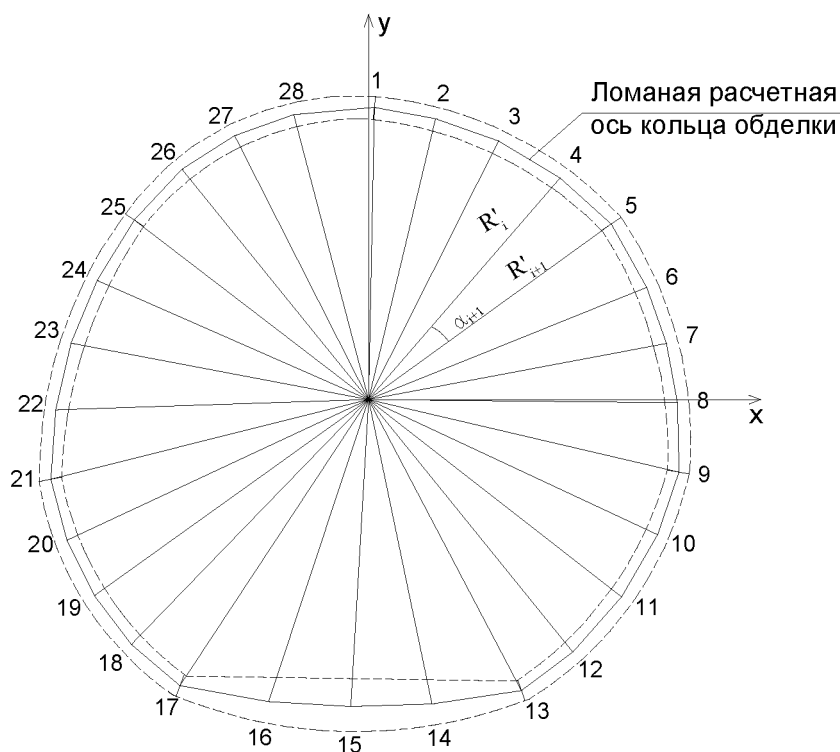


Рисунок Л.7 – К определению промежуточных углов, радиусов и координат вершин многоугольника, определяющих расчетную ось обделки: 1÷28 – вершины многоугольника

В Таблице Л.5 приведены данные по промежуточным углам, радиусам и координатам узловых точек на расчетной оси кольца обделки

Л.2.8 Для оценки очертания обделки с измененной геометрией определяются ее вертикальная и горизонтальная эллиптичность. Для определения вертикальной и горизонтальной эллиптичности обделки используются результаты радиальной съёмки.

Определяется фактический верхний вертикальный радиус кольца обделки $R_{ф.в.в}$ и фактический внутренний нижний вертикальный радиус кольца обделки $R_{ф.в.н}$ (Рисунок Л.8).

Сумма этих радиусов дает фактический внутренний вертикальный диаметр $D_{ф.в}$ кольца обделки

$$D_{ф.в} = R_{ф.в.в} + R_{ф.в.н}, \quad (\text{Л.7})$$

Л.2.9 Вычитая из фактического внутреннего вертикального диаметра кольца обделки с измененной геометрией $D_{ф.в}$ проектный внутренний вертикальный диаметр кольца $D_{н.в}$ определяется вертикальная эллиптичность обделки

$$\mathcal{E}_в = D_{ф.в} - D_{н.в}, \quad (\text{Л.8})$$

Для определения горизонтальной эллиптичности кольца обделки по результатам радиальной съёмки находится фактический внутренний правый горизонтальный радиус кольца обделки $R_{ф.г.п}$ и фактический внутренний левый горизонтальный радиус кольца обделки $R_{ф.г.л}$ (Рисунок Л.8). Сумма этих радиусов дает фактический внутренний горизонтальный диаметр $D_{ф.г}$ кольца обделки.

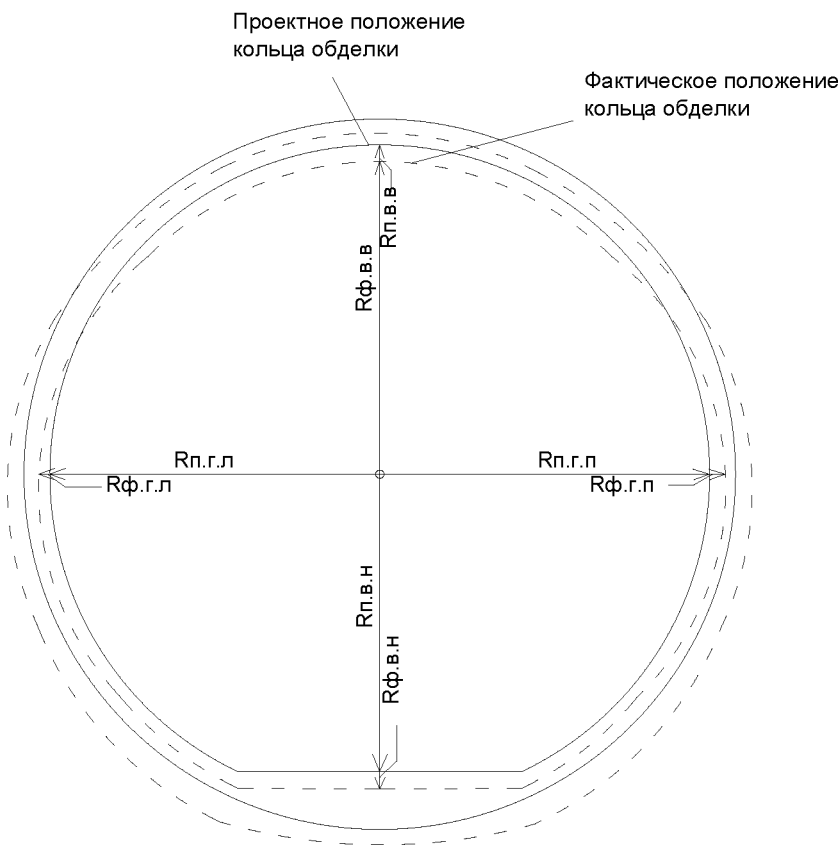
**Таблица Л.5 – Данные по промежуточным углам, радиусам и координатам
узловых точек на расчетной оси кольца обделки**

Промежуточный угол между узловыми точками на расчетной оси кольца обделки			Радиус узловой точки на расчетной оси кольца обделки		Координата узловой точки на расчетной оси кольца обделки, м			
номер узловых точек		$\alpha_{i,i+1}$, градус	$\alpha_{i,i+1}$, радиан	номер радиуса R_i	длина радиуса R_i' , м	узловая точка	x	y
осью у	1	4,077	0,071	R ₁	2,650	1	0,19	2,64
1	2	13,075	0,228	R ₂	2,653	2	0,78	2,54
2	3	13,075	0,228	R ₃	2,657	3	1,34	2,30
3	4	13,075	0,228	R ₄	2,660	4	1,82	1,94
4	5	13,075	0,228	R ₅	2,664	5	2,22	1,48
5	6	12,639	0,221	R ₆	2,659	6	2,48	0,95
6	7	12,639	0,221	R ₇	2,655	7	2,63	0,39
7	8	12,639	0,221	R ₈	2,650	8	2,64	-0,20
8	9	12,639	0,221	R ₉	2,645	9	2,53	-0,77
9	10	12,767	0,223	R ₁₀	2,645	10	2,30	-1,31
10	11	12,767	0,223	R ₁₁	2,644	11	1,95	-1,78
11	12	12,767	0,223	R ₁₂	2,643	12	1,51	-2,17
12	13	12,767	0,223	R ₁₃	2,643	13	0,99	-2,45
13	14	12,966	0,226	R ₁₄	2,543	14	0,40	-2,51
14	15	12,966	0,226	R ₁₅	2,510	15	-0,17	-2,50
15	16	12,966	0,226	R ₁₆	2,543	16	-0,74	-2,43
16	17	12,966	0,226	R ₁₇	2,634	17	-1,31	-2,28
17	18	12,788	0,223	R ₁₈	2,637	18	-1,79	-1,94
18	19	12,788	0,223	R ₁₉	2,640	19	-2,17	-1,50
19	20	12,788	0,223	R ₂₀	2,643	20	-2,45	-0,98
20	21	12,788	0,223	R ₂₁	2,645	21	-2,61	-0,41
21	22	12,728	0,222	R ₂₂	2,657	22	-2,65	0,17
22	23	12,728	0,222	R ₂₃	2,668	23	-2,56	0,76
23	24	12,728	0,222	R ₂₄	2,680	24	-2,34	1,31
24	25	12,728	0,222	R ₂₅	2,691	25	-2,00	1,80
25	26	13,038	0,228	R ₂₆	2,681	26	-1,54	2,19
26	27	13,038	0,228	R ₂₇	2,670	27	-1,00	2,48
27	28	13,038	0,228	R ₂₈	2,660	28	-0,41	2,63
28	1	13,038	0,228	R ₁	2,650	1	0,19	2,64

$$D_{\phi, z} = R_{\phi, z, n} + R_{\phi, z, л}, \quad (Л.9)$$

Вычитая из фактического внутреннего горизонтального диаметра кольца обделки проектный внутренний горизонтальный диаметр кольца $D_{\phi, z}$ определяется горизонтальная эллиптичность кольца обделки

$$\mathcal{E}_z = D_{\phi, z} - D_{n, z}, \quad (Л.10)$$



$R_{п.в.в}$, $R_{п.в.н}$ – проектные внутренние радиусы: вертикальный верхний и вертикальный нижний;

$R_{п.г.л}$, $R_{п.г.п}$ – проектные внутренние радиусы: горизонтальный левый и горизонтальный правый;

$R_{ф.в.в}$, $R_{ф.в.н}$ – фактические внутренние радиусы: вертикальный верхний и вертикальный нижний;

$R_{ф.г.л}$, $R_{ф.г.п}$ – фактические внутренние радиусы: горизонтальный левый и горизонтальный правый.

Рисунок Л.8 – Схема к определению вертикальной и горизонтальной эллиптичности кольца обделки

Л.2.10 В Таблице Л.6 приведены данные по эллиптичности кольца эталонного и кольца с измененной геометрией. Анализ данных по эллиптичности кольца с измененной геометрией свидетельствует:

- вертикальная эллиптичность составляет «минус» 16 мм;
- горизонтальная эллиптичность составляет «плюс» 7 мм.

Таблица Л.6 – Данные по вертикальной и горизонтальной эллиптичности

Наименование элемента	Проектный внутренний радиус, м				Фактический внутренний радиус, м				Эллиптичность, мм	
	вертикальный верхний, Rp.в.в	вертикальный нижний, Rp.в.н	горизонтальный правый, Rp.г.п	горизонтальный левый, Rp.г.л	вертикальный верхний, Rф.в.в	вертикальный нижний, Rф.в.н	горизонтальный правый, Rф.г.п	горизонтальный левый, Rф.г.л	вертикальная, Эв	горизонтальная, Эг
Кольцо обделки с измененной геометрией	2,550	2,302	2,550	2,550	2,550	2,286	2,550	2,557	-16	7

Л.3 Расчет кольца обделки с измененной геометрией на основное сочетание действия нагрузки

Л.3.1 Определение нагрузок на кольцо обделки

Л.3.1.1 Излагается методика расчета нагрузок, воздействующих на кольцо обделки перегонного тоннеля глубокого заложения шириной 1,0 м при основном сочетании действия нагрузки.

Л.3.1.2 В грунтах, обладающих способностью к сводообразованию, при расчете обделки тоннелей глубокого заложения (заложение шельги свода не менее трех максимальных поперечных размеров выработки) следует учитывать нагрузку от свода обрушения.

Л.3.1.3 Высота свода обрушения над верхней точкой обделки перегонного тоннеля в условиях сводообразования (Рисунок Л.9) определяется по формуле

$$h_1 = \frac{L}{2f}, \quad (\text{Л.11})$$

где L – величина пролета свода обрушения, определяемая по Формуле (Л.12)

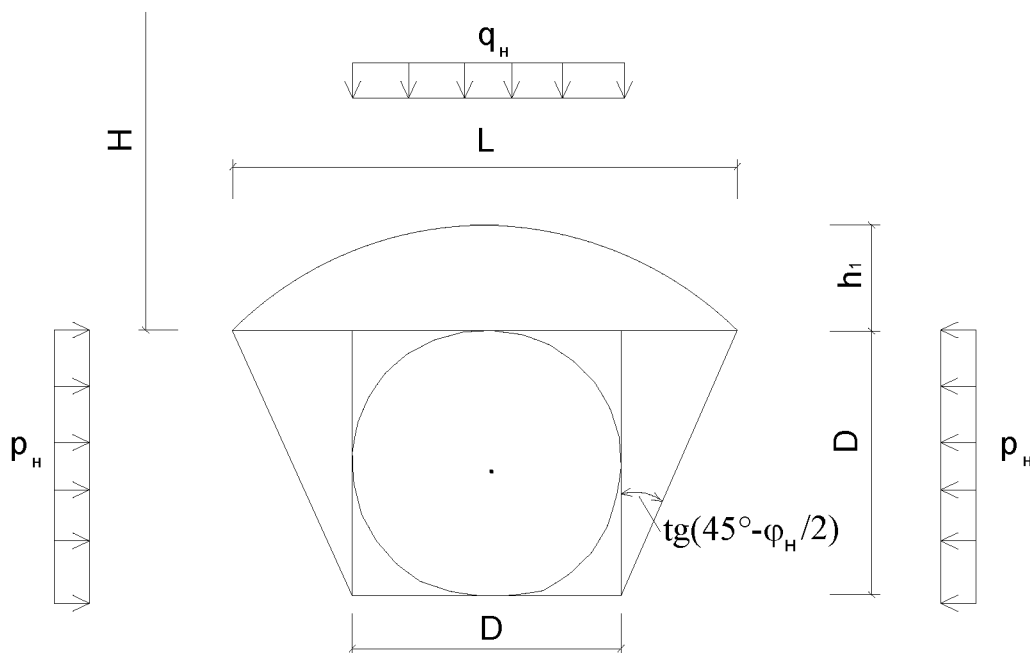


Рисунок Л.9 – Схема для определения горного давления на кольцо обделки

$$L = D + 2D \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi_H}{2} \right), \quad (\text{Л.12})$$

где f – коэффициент крепости породы по Протоdjяконову;

D – наружный диаметр кольца обделки;

φ_H – нормативный угол внутреннего трения грунта в уровне сечения обделки.

Л.3.1.4 Нормативная вертикальная равномерно распределенная нагрузка в условиях сводообразования при однородной толще грунта определяется по формуле

$$q_H = \gamma_{cp} h_1, \quad (\text{Л.13})$$

где γ_{cp} – нормативная плотность грунта;

h_1 – высота свода обрушения над верхней точкой обделки.

Л.3.1.5 Нормативная горизонтальная равномерно распределенная нагрузка в условиях сводообразования при однородной толще грунта определяется по формуле

$$p_H = \gamma_{cp} \cdot (h_1 + 0,5D) \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_H}{2} \right), \quad (\text{Л.14})$$

Л.3.1.6 При расчете обделки на основное сочетание нагрузок собственный вес обделки принимается в виде равномерно распределенной нагрузки на проекцию горизонтального диаметра обделки.

Л.3.1.7 Коэффициенты надежности на постоянные нагрузки при расчете по прочности принимаются следующие:

$\gamma_f = 1,4$ – для вертикальной нагрузки от действия грунта свода обрушения;

$\gamma_f = 0,8$ – для горизонтальной нагрузки от действия грунта;

$\gamma_f = 1,1$ – для собственного веса блоков обделки.

Расчетные нагрузки на кольцо обделки перегонного тоннеля определяются умножением нормативных нагрузок на коэффициенты надежности по нагрузке.

Л.3.1.8 В Таблице Л.7 приведены физико-механические характеристики грунтов, нормативные и расчетные нагрузки на кольцо обделки при основном сочетании действия нагрузки.

Л.3.1.9 В Таблицах Л.5 и Л.8 приведены координаты узлов и исходные данные по нагрузкам к расчету кольца обделки, а на Рисунке Л.10 показана расчетная схема приложения этих нагрузок на кольцо обделки.

Таблица Л.7 – Исходные данные и нагрузки на кольцо обделки при основном сочетании действия нагрузки

Исходные данные		Значение
Глубина заложения щельги свода, м		30
Плотность грунта, $\gamma_{гр}$, МН/м ³		0,0228
Угол внутреннего трения φ , градус		41
Коэффициент крепости, f		1,20
Высота свода обрушения h_1 , м		4,38
Нормативная нагрузка, кН/м ²	вертикальная нагрузка от свода обрушения, q_H	99,8
	горизонтальная нагрузка грунта, P_H	33,7
	собственный вес обделки $q_{H,св}$	8,5
Расчетная нагрузка, кН/м ²	вертикальная нагрузка от свода обрушения, q_p	139,8
	горизонтальная нагрузка грунта, P_p	27,0
	собственный вес обделки $q_{p,св}$	9,4

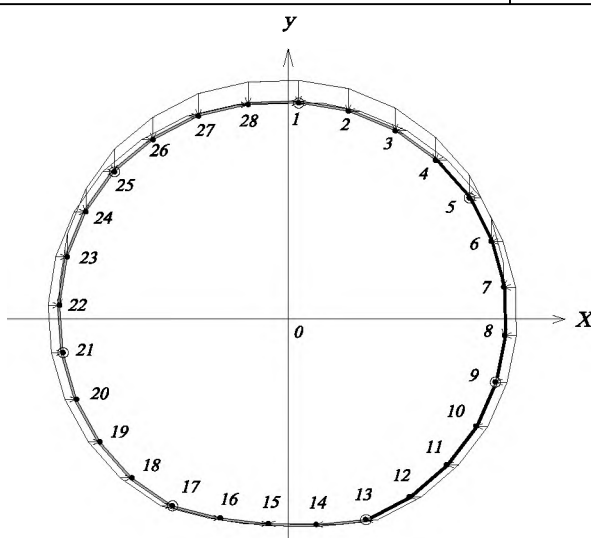


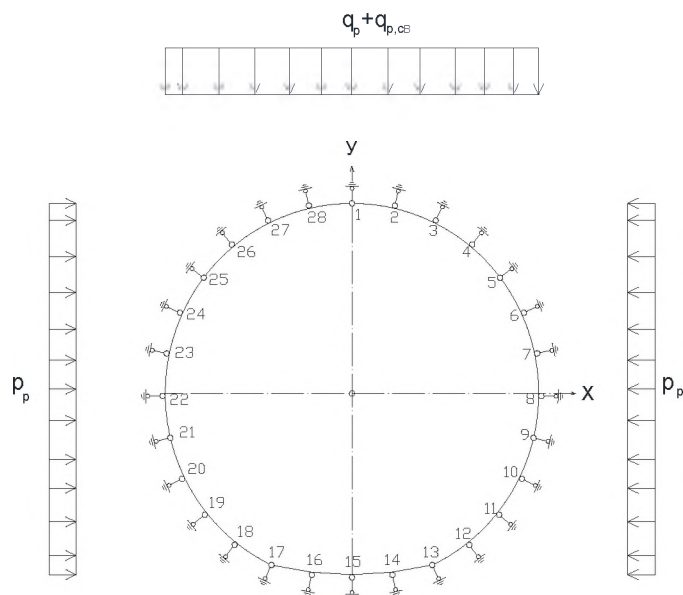
Рисунок Л.10 - Расчетная схема кольца обделки и ее нагружение

Таблица Л.8 – Исходные данные к расчету кольца обделки с измененной геометрией при основном сочетании действия нагрузок

Номер узла		Вертикальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м	Горизонтальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м
начало элемента	конец элемента		
1	2	149,2	27,0
2	3	149,2	27,0
3	4	149,2	27,0
4	5	149,2	27,0
5	6	149,2	27,0
6	7	149,2	27,0
7	8	149,2	27,0
8	9	0	27,0
9	10	0	27,0
10	11	0	27,0
11	12	0	27,0
12	13	0	27,0
13	14	0	27,0
14	15	0	27,0
15	16	0	-27,0
16	17	0	-27,0
17	18	0	-27,0
18	19	0	-27,0
19	20	0	-27,0
20	21	0	-27,0
21	22	0	-27,0
22	23	149,2	-27,0
23	24	149,2	-27,0
24	25	149,2	-27,0
25	26	149,2	-27,0
26	27	149,2	-27,0
27	28	149,2	-27,0
28	1	149,2	-27,0

Л.3.2 Определение усилий в кольце обделки

Л.3.2.1 На Рисунке Л.11 представлена расчетная схема обделки, которая представляет собой многоугольник, состоящий из двадцати восьми прямолинейных отрезков с двадцатью одной опорами, моделирующими упругий отпор грунта. Стыки между нормальными и лотковым блоками в расчетной схеме моделируются путем введения шарниров в узлах 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25 обделки.



1, 5, 9, 13, 17, 21, 25 – Узлы с шарнирными стыками

Рисунок Л.11 – Расчетная схема обделки при основном сочетании действия нагрузок

Л.3.2.2 Упругий отпор грунта принимается по всему периметру кольца обделки. Коэффициент упругого отпора грунта в случае галечниковых грунтов принимается равным $K=100 \text{ МН/м}^3$.

Л.3.2.3 Вертикальная расчетная нагрузка, действующая на кольцо обделки, представляет собой сумму нагрузок от горного давления и собственного веса обделки, а горизонтальная расчетная нагрузка представляет собой также нагрузку от горного давления, но в долях от вертикальной нагрузки.

Л.3.2.4 По результатам выполненных расчетов определяются перемещения и усилия (изгибающие моменты, нормальные и поперечные силы в двадцати восьми узлах кольца обделки при основном сочетании действия нагрузки (Таблица Л.9).

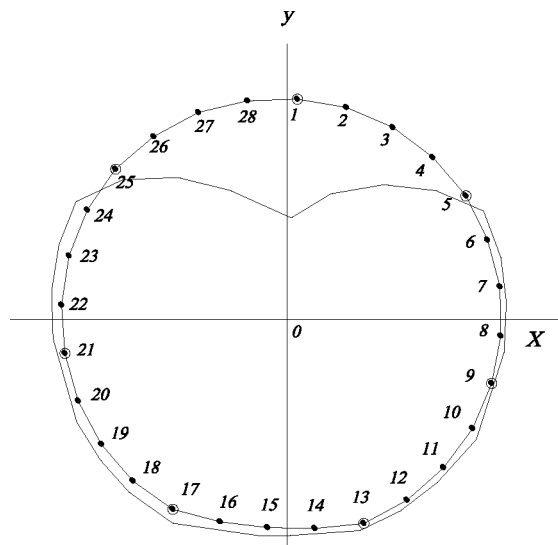
На Рисунке Л.12 показаны эпюры перемещений, изгибающих моментов и нормальных сил в узлах кольца обделки.

Л.3.2.5 В Таблице Л.10 приведены максимальные расчетные усилия в железобетонных блоках и максимальные перемещения контура обделки.

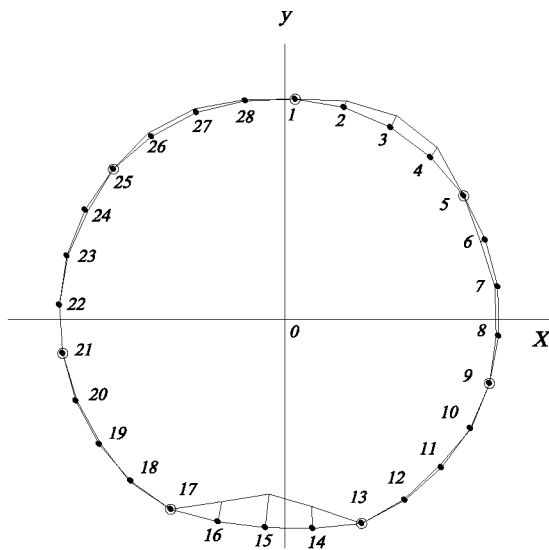
Таблица Л.9 - Внутренние усилия в элементах и перемещения узлов кольца обделки

Номер узла	Начало и конец элемента	Изгибающий момент, кНм		Нормальная сила в элементе, кН	Поперечная сила в элементе, кН	Перемещение узла		
		начало элемента	конец элемента			угол поворота, рад	горизонтальное, м	вертикальное, м
1	1-2	0	13,0	-350,8	-21,6	0	0,00048	0,01141
2	2-3	-13,0	24,7	-375,6	-19,3	-0,00480	0,00002	0,00850
3	3-4	-24,7	22,9	-409,6	3,1	-0,00421	-0,00103	0,00595
4	4-5	-22,9	0	-442,1	37,6	-0,00349	-0,00239	0,00408
5	5-6	0	-10,0	-464,7	17,0	-0,00314	-0,00385	0,00274
6	6-7	10,0	-3,9	-485,5	-10,6	0,00160	-0,00293	0,00314
7	7-8	3,9	-3,3	-493,4	-1,1	0,00139	-0,00209	0,00332
8	8-9	3,3	0	-494,3	-5,6	0,00129	-0,00130	0,00328
9	9-10	0	0,1	-497,5	-0,1	0,00124	-0,00060	0,00309
10	10-11	-0,1	-4,6	-501,4	8,0	0,00060	-0,00029	0,00291
11	11-12	4,6	-2,2	-507,7	-4,1	0,00053	-0,00005	0,00267
12	12-13	2,2	0	-514,9	-3,7	0,00043	0,00010	0,00243
13	13-14	0	-46,6	-502,6	78,6	0,00040	0,00017	0,00219
14	14-15	46,6	-60,7	-497,4	24,7	0,00023	0,00016	0,00196
15	15-16	60,7	-43,0	-496,9	-30,8	0,00006	0,00013	0,00188
16	16-17	43,0	0	-501,0	-73,0	0,00011	0,00011	0,00189
17	17-18	0	1,3	-510,0	-2,30	-0,00031	0,00011	0,00204
18	18-19	-1,3	-1,4	-503,1	4,80	-0,00050	0,00025	0,00231
19	19-20	1,4	-1,0	-496,5	-0,7	-0,00050	0,00043	0,00254
20	20-21	1,0	0	-492,8	-1,7	-0,00053	0,00067	0,00273
21	21-22	0	0,2	-492,1	-0,4	-0,00055	0,00097	0,00286
22	22-23	-0,2	-1,7	-487,7	3,1	-0,00116	0,00164	0,00295
23	23-24	1,7	-4,1	-471,2	4,1	-0,00118	0,00234	0,00290
24	24-25	4,1	0	-444,1	-6,8	-0,00127	0,00303	0,00267
25	25-26	0	9,2	-414,6	-15,3	-0,00133	0,00369	0,00227
26	26-27	-9,2	8,2	-381,5	1,6	0,00392	0,00223	0,00405
27	27-28	-8,2	1,9	-354,8	10,5	0,00419	0,00109	0,00626
28	28-1	-1,9	0	-343,5	3,1	0,00434	0,00049	0,00880

Перемещения по нормали к контуру



Изгибающие моменты



Нормальные силы

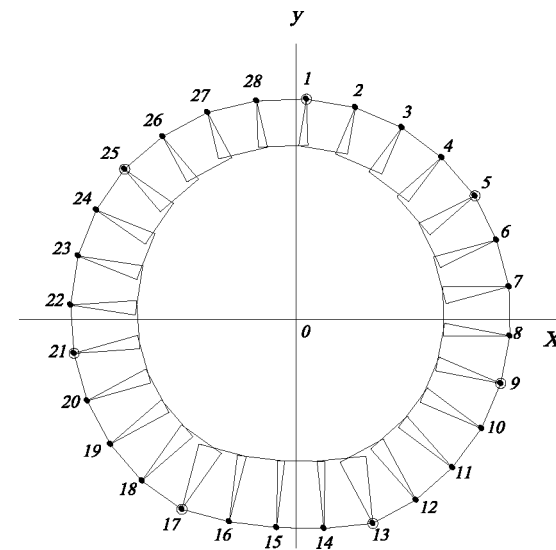


Рисунок Л.12 – Результаты расчета кольца обделки при основном сочетании действия нагрузки

Таблица Л.10 - Максимальные расчетные усилия и перемещения в кольце обделки при основном сочетании действия нагрузки

Тип кольца	Нормальный блок			Нормальный блок			Лотковый блок			Максимальное перемещение контура обделки, мм		
	макс. отрицат. изгиб. момент, -М, кН·м	нормальная сила, N, кН	номер сечения	макс. положит. изгиб. момент, +М, кН·м	нормальная сила, N, кН	номер сечения	макс. отрицат. изгиб. момент, -М, кН·м	нормальная сила, N, кН	номер сечения	верт.	гориз. в сторону грунта на уровне гориз. диаметра	
											осадка свода	слева
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Кольцо с измененной геометрией	-10,0	-464,7	6	24,70	-375,60	3	-60,70	-497,40	15	11,4	1,64	1,3

Л.4 Расчет кольца обделки с измененной геометрией на особое сочетание действия нагрузки

Л.4.1 Определение нагрузок на кольцо обделки

Л.4.1.1 Расчет кольца тоннельной обделки при особом сочетании действия нагрузки в данном примере ведется на воздействие постоянных и сейсмических нагрузок.

Л.4.1.2 При расчете кольца обделки перегонного тоннеля глубокого заложения на особое сочетание действия нагрузки в качестве примера принимаются следующие исходные данные:

1. Сейсмичность площадки строительства - 9 баллов;
2. Расчетная сейсмичность железобетонного кольца обделки тоннеля принята - 9 баллов;
3. В качестве грунтового основания принимается галечниковый маловлажный грунт, имеющий II категорию по сейсмическим свойствам;
4. Скорость распространения продольных волн сжатия $C_1=1150$ м/сек;
5. Скорость распространения поперечных волн сдвига $C_2=700$ м/сек;
6. Преобладающий период колебаний частиц породы $T_0=0,5$ сек;
7. Коэффициент Пуассона грунта $\nu_0=0,27$;
8. Коэффициент сейсмичности для площадки строительства сейсмичностью 9 баллов (грунты II категории по сейсмическим свойствам) принимается $k_c=0,1$;
9. Коэффициент сочетания n_c при расчете кольца обделки с учетом сейсмических воздействий принимается равным $n_c=1$.

Л.4.1.3 Для кольца обделки, имеющей очертание достаточно близкое к круговому, в целях упрощения, в данном примере выполняется расчет при вертикальном и горизонтальном падении сейсмических волн.

На Рисунке Л.13 показано четыре варианта силового воздействия на кольцо обделки продольных (сжатия) и поперечных (сдвига) сейсмических волн.

Л.4.1.4 Напряженное состояние, возникающее при сейсмических воздействиях в среде, содержащей подкрепленное отверстие, согласно п.5.2.17 настоящего свода правил, определяется с учетом двухосного сжатия и сдвига на бесконечности напряжениями

$$P = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma_{гр} C_1 T_0, \quad \xi = \frac{\nu_0}{1 - \nu_0}, \quad (\text{Л.15})$$

$$Q = \frac{1}{2\pi} k_c \gamma_{гр} C_2 T_0. \quad (\text{Л.16})$$

Л.4.1.5 Для определения наиболее неблагоприятного напряженного состояния в обделке тоннеля при различных комбинациях воздействия продольных волн сжатия и поперечных волн сдвига, одновременно учитывается воздействие горного давления и собственного веса обделки.

Горизонтальное падение сейсмических волн

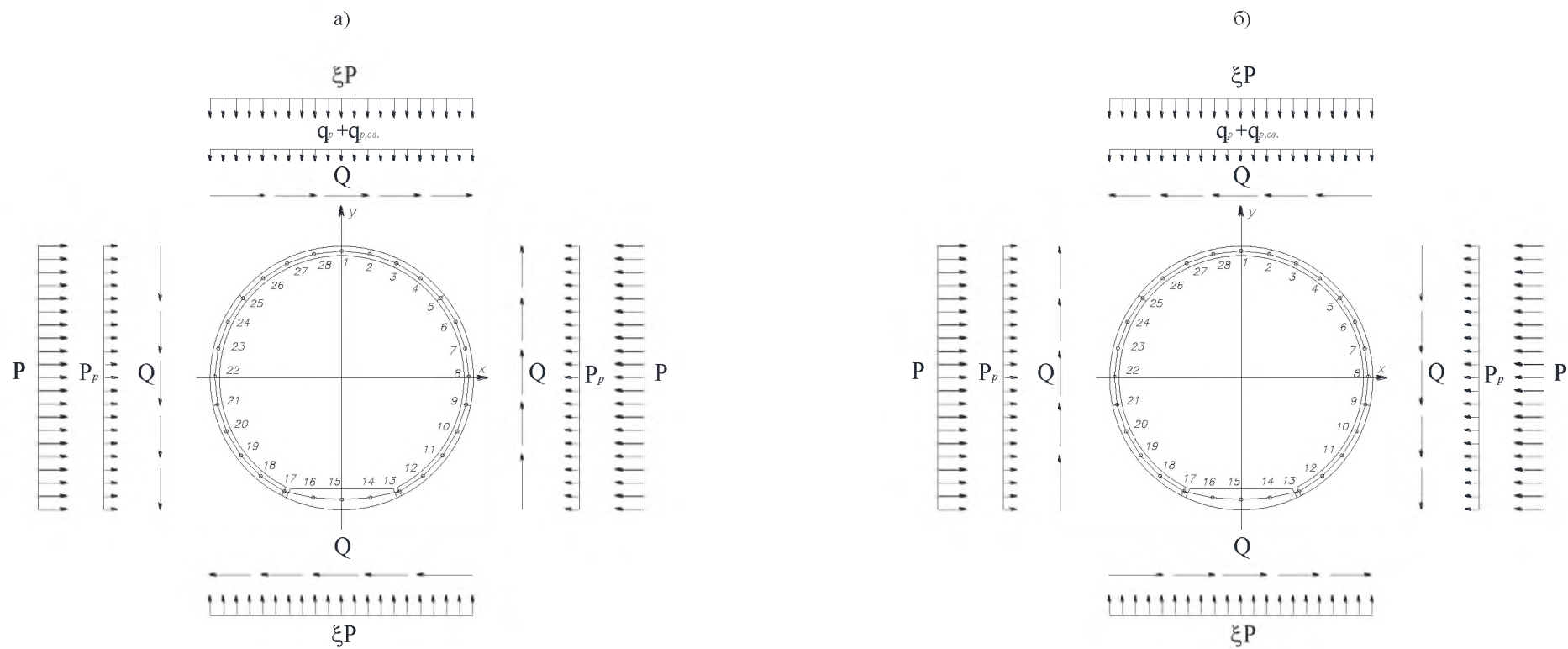


Рисунок 13 – Расчетные схемы кольца обделки при особом сочетании действия нагрузки

Вертикальное падение сейсмических волн

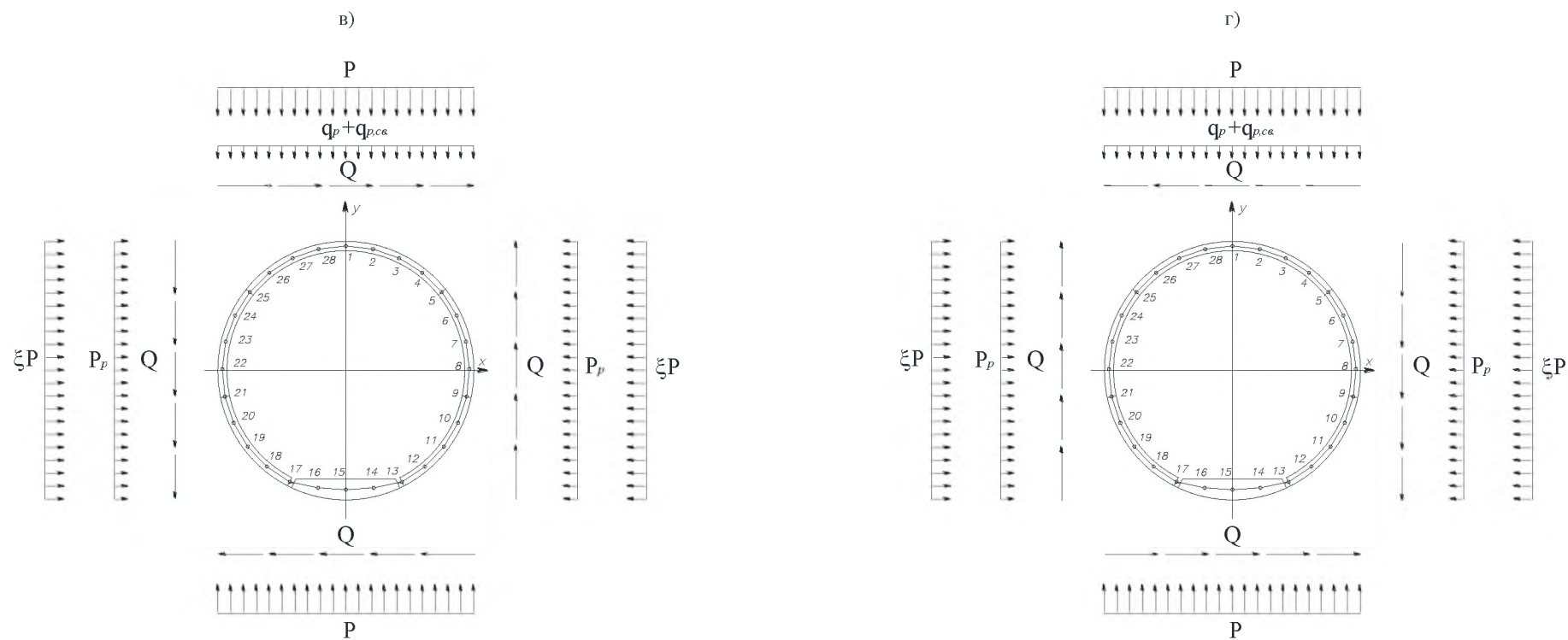


Рисунок 13 (продолжение)

Л.4.1.6 На Рисунке Л.14 показана расчетная схема в соответствии с которой определяются расчетные постоянные вертикальные и горизонтальные нагрузки, воздействующие на кольцо обделки.

Л.4.1.7 Расчетная постоянная вертикальная нагрузка q_p принимается равной сумме нормативных нагрузок от давления грунта (горное давление) q_n и собственного веса обделки $q_{н,с,в}$ с коэффициентами надежности по нагрузке равным $\gamma_f=1,0$

$$q = q_n + q_{н,с,в}, \quad (\text{Л.17})$$

Расчетная горизонтальная нагрузка P_p принимается равной нормативной горизонтальной нагрузке от воздействия грунта P_n с коэффициентом надежности по нагрузке равным $\gamma_f=1,0$

$$P_p = P_n, \quad (\text{Л.18})$$

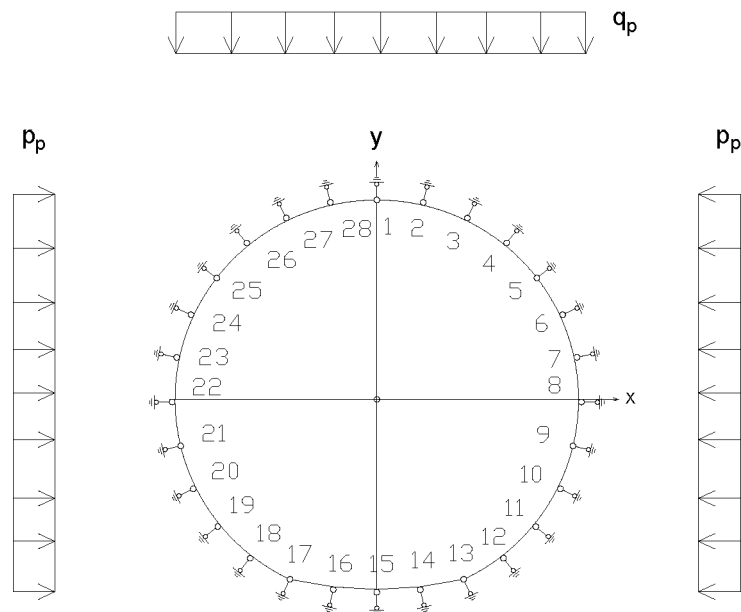


Рисунок Л.14 – Расчетная схема к определению напряженного состояния в обделке при воздействии горного давления и собственного веса обделки

Л.4.1.8 В Таблице Л.11 приведены расчетные нагрузки на кольцо обделки при особом сочетании действия нагрузки. Физико-механические характеристики грунта в среде которого находится кольцо обделки приведены в Таблице Л.7.

Л.4.1.9 В Таблицах Л.5, Л.12 и Л.13 приведены координаты узлов и исходные данные по нагрузкам к расчету кольца обделки, а на Рисунке Л.13 показана расчетная схема приложения этих нагрузок на кольцо обделки.

Таблица Л.11 – Исходные данные и нагрузки на кольцо обделки при особом сочетании действия нагрузки

Тип кольца	Внутренний/наружный диаметр кольца, м	Глубина заложения щельги свода, м	Расчетная вертикальная нагрузка, кН/м ²		Расчетная горизонт. нагрузка от грунта, Р _р кН/м ² ,	Воздействие сейсмической волны сжатия, кН/м ²		Воздействие сейсмической волны сдвига, кН/м ²
			от свода обрушения, q _p	от веса обделки, q _{p,св.}		Р	ξР	Q
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кольцо обделки	5,1/5,5	30	99,8	8,50	33,70	208,0	77,2	127,1

Таблица Л.12 – Исходные данные к расчету кольца обделки при особом сочетании действия нагрузки при расчетных схемах а) и б)

Номер узла		При расчетной схеме а) (см. Рисунок 13)		При расчетной схеме б) (см. Рисунок 13)	
		вертикальная равномерно-распределенная нагрузка, кН/м	горизонтальная равномерно-распределенная нагрузка, кН/м	вертикальная равномерно-распределенная нагрузка, кН/м	горизонтальная равномерно-распределенная нагрузка, кН/м
начало элемента	конец элемента				
1	2	58,4	115,4	312,6	369,6
2	3	58,4	115,4	312,6	369,6
3	4	58,4	115,4	312,6	369,6
4	5	58,4	115,4	312,6	369,6
5	6	58,4	115,4	312,6	369,6
6	7	58,4	115,4	312,6	369,6
7	8	58,4	115,4	312,6	369,6
8	9	58,4	115,4	49,9	115,4
9	10	-204,3	369,6	49,9	115,4
10	11	-204,3	369,6	49,9	115,4
11	12	-204,3	369,6	49,9	115,4
12	13	-204,3	369,6	49,9	115,4
13	14	-204,3	369,6	49,9	115,4
14	15	-204,3	369,6	49,9	115,4
15	16	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
16	17	49,9	-115,4	-204,3	-369,6

Таблица Л.12 – Исходные данные к расчету кольца обделки при особом сочетании действия нагрузки при расчетных схемах а) и б)
(продолжение)

Номер узла		При расчетной схеме а) (см. Рисунок 13)		При расчетной схеме б) (см. Рисунок 13)	
начало элемента	конец элемента	вертикальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м	горизонтальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м	вертикальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м	горизонтальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м
17	18	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
18	19	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
19	20	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
20	21	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
21	22	49,9	-115,4	-204,3	-369,6
22	23	312,6	-369,6	58,4	-115,4
23	24	312,6	-369,6	58,4	-115,4
24	25	312,6	-369,6	58,4	-115,4
25	26	312,6	-369,6	58,4	-115,4
26	27	312,6	-369,6	58,4	-115,4
27	28	312,6	-369,6	58,4	-115,4
28	1	312,6	-369,6	58,4	-115,4

Таблица Л.13 – Исходные данные к расчету кольца обделки при особом сочетании действия нагрузки при расчетных схемах в) и г)

Номер узла		При расчетной схеме в) (см. Рисунок 13)		При расчетной схеме г) (см. Рисунок 13)	
начало элемента	конец элемента	вертикальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м	горизонтальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м	вертикальная равномерно- распределенная нагрузка, кН /м	горизонтальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м
1	2	444,2	238,0	190,0	-16,2
2	3	444,2	238,0	190,0	-16,2
3	4	444,2	238,0	190,0	-16,2
4	5	444,2	238,0	190,0	-16,2
5	6	444,2	238,0	190,0	-16,2
6	7	444,2	238,0	190,0	-16,2
7	8	444,2	238,0	190,0	-16,2
8	9	-81,7	-16,2	-335,9	238,0

Таблица Л.13 – Исходные данные к расчету кольца обделки при особом сочетании действия нагрузки при расчетных схемах в) и г)
(продолжение)

Номер узла		При расчетной схеме в) (см. Рисунок 13)		При расчетной схеме г) (см. Рисунок 13)	
начало элемента	конец элемента	вертикальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м	горизонтальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м	вертикальная равномерно- распределенная нагрузка, кН /м	горизонтальная равномерно- распределенная нагрузка, кН/м
9	10	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
10	11	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
11	12	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
12	13	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
13	14	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
14	15	-81,7	-16,2	-335,9	238,0
15	16	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
16	17	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
17	18	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
18	19	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
19	20	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
20	21	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
21	22	-335,9	-238,0	-81,7	16,2
22	23	190,0	16,2	444,2	-238,0
23	24	190,0	16,2	444,2	-238,0
24	25	190,0	16,2	444,2	-238,0
25	26	190,0	16,2	444,2	-238,0
26	27	190,0	16,2	444,2	-238,0
27	28	190,0	16,2	444,2	-238,0
28	1	190,0	16,2	444,2	-238,0

Л.4.2 Определение усилий в кольце обделки

Л.4.2.1 По результатам выполненных расчетов определены перемещения и внутренние усилия в кольце обделки при особом сочетании действия нагрузки.

Таблицах Л.14 ÷ Л.17 приведены данные по перемещениям узлов обделки, изгибающим моментам, нормальным и поперечным силам в узлах 1 ÷ 28 кольца обделки при расчетных схемах а), б), в) и г) воздействия нагрузок.

На Рисунках Л.15 ÷ Л.18 приведены эпюры изгибающих моментов и нормальных сил в элементах кольца обделки, по данным, приведенным в таблицах Л.14 ÷ Л.17.

Л.4.2.2 В Таблице Л.18 приведены максимальные расчетные усилия в блоках обделки и данные по максимальным перемещениям контура обделки.

Таблица Л.14 - Внутренние усилия в элементах и перемещения узлов кольца обделки при расчетной схеме а)

Номер узла	Начало и конец элемента	Изгибающий момент, кНм		Нормальная сила в элементе, кН	Поперечная сила в элементе, кН	Перемещение узла		
		начало элемента	конец элемента			угол поворота, рад	горизонтальное, м	вертикальное, м
1	1-2	0	6,4	-895,5	-10,6	0	-0,00110	-0,00006
2	2-3	-6,4	0,5	-877,9	9,6	0,00024	-0,00099	0,00003
3	3-4	-0,5	-5,1	-853,9	9,4	0,00035	-0,00083	0,00017
4	4-5	5,1	0	-832,0	8,4	0,00028	-0,00065	0,00027
5	5-6	0	-2,9	-811,8	4,9	0,00020	-0,00049	0,00030
6	6-7	2,9	15,9	-801,6	-32,3	0,00017	-0,00034	0,00028
7	7-8	-15,9	15,4	-798,4	0,8	0,00036	-0,00020	0,00023
8	8-9	-15,4	0	-796,8	26,5	0,00083	0,00015	0,00016
9	9-10	0	5,2	-821,8	-8,8	0,00105	0,00070	-0,00002
10	10-11	-5,2	5,4	-864,8	-0,3	-0,00047	0,00038	0,00002
11	11-12	-5,4	-0,7	-912,1	10,3	-0,00031	0,00015	0,00009
12	12-13	0,7	0	-956,2	-1,2	-0,00024	-0,00002	0,00014
13	13-14	0	-56,5	-967,0	95,3	-0,00025	-0,00017	0,00023
14	14-15	56,5	-61,3	-969,4	8,3	-0,00003	-0,00023	0,00013
15	15-16	61,3	-39,0	-972,3	-38,7	-0,00022	-0,00028	0,00020
16	16-17	39,0	0	-962,3	-66,2	-0,00038	-0,00030	0,00038
17	17-18	0	-2,7	-946,7	4,6	-0,00056	-0,00029	0,00068
18	18-19	2,7	-3,9	-904,6	2,0	-0,00014	-0,00032	0,00079
19	19-20	3,9	-2,1	-865,9	-3,0	-0,00024	-0,00030	0,00093
20	20-21	2,1	0	-840,4	-3,5	-0,00033	-0,00019	0,00109
21	21-22	0	5,7	-833,0	-9,9	-0,00036	-0,00002	0,00122
22	22-23	-5,7	-11,7	-821,7	29,2	0,00138	-0,00079	0,00125
23	23-24	11,7	-12,5	-826,3	1,5	0,00129	-0,00159	0,00146
24	24-25	12,5	0	-843,1	-21,0	0,00093	-0,00218	0,00178
25	25-26	0	2,0	-863,2	-3,3	0,00074	-0,00252	0,00212
26	26-27	-2,0	14,4	-881,6	-20,1	-0,00142	-0,00189	0,00152
27	27-28	-14,4	13,1	-895,6	2,1	-0,00117	-0,00143	0,00084
28	28-1	-13,1	0	-897,6	21,8	-0,00075	-0,00120	0,00030

Таблица Л.15 - Внутренние усилия в элементах и перемещения узлов кольца обделки при расчетной схеме б)

Номер узла	Начало и конец элемента	Изгибающий момент, кНм		Нормальная сила в элементе, кН	Поперечная сила в элементе, кН	Перемещение узла		
		начало элемента	конец элемента			угол поворота, рад	горизонтальное, м	вертикальное, м
1	1-2	0	17,8	-931,7	-29,8	0	0,00103	-0,00025
2	2-3	-17,8	17,9	-925,7	-0,2	0,00073	0,00118	0,00006
3	3-4	-17,9	4,7	-908,3	22,1	0,00128	0,00151	0,00059
4	4-5	-4,7	0	-887,8	7,7	0,00163	0,00212	0,00125
5	5-6	0	-15,2	-868,1	25,7	0,00170	0,00295	0,00185
6	6-7	15,2	-4,6	-856,6	-18,3	-0,00117	0,00245	0,00151
7	7-8	4,6	-9,0	-856,9	-23,1	-0,00146	0,00172	0,00123
8	8-9	-9,0	0	-874,4	15,5	-0,00139	0,00087	0,00113
9	9-10	0	-0,9	-891,8	1,5	-0,00126	0,00011	0,00119
10	10-11	0,9	-6,6	-923,9	9,8	0,00034	0,00026	0,00102
11	11-12	6,6	-5,5	-966,1	-1,9	0,00023	0,00035	0,00084
12	12-13	5,5	0	-1007,6	-9,3	0,00005	0,00033	0,00072
13	13-14	0	-47,9	-1010,8	80,8	-0,00003	0,00024	0,00067
14	14-15	47,9	-65,7	-1009,2	31,2	0,00038	0,00021	0,00035
15	15-16	65,7	-54,7	-999,0	-19,1	0,00020	0,00016	0,00018
16	16-17	54,7	0	-988,3	-92,8	0	0,00010	0,00013
17	17-18	0	9,9	-971,8	-16,8	-0,00025	0,00006	0,00024
18	18-19	-9,9	8,8	-927,3	1,8	0,00031	-0,00009	0,00019
19	19-20	-8,8	0,2	-880,2	14,5	0,00059	-0,00035	0,00009
20	20-21	-0,2	0	-844,6	0,4	0,00072	-0,00074	-0,00002
21	21-22	0	24,0	-832,6	-41,3	0,00072	-0,00117	-0,00005
22	22-23	-24,0	22,7	-844,2	2,2	-0,00122	-0,00033	0,00009
23	23-24	-22,7	1,4	-849,6	36,0	-0,00052	0,00019	0,00009
24	24-25	-1,4	0	-861,4	2,3	-0,00016	0,00038	0,00011
25	25-26	0	-5,9	-881,1	9,8	-0,00014	0,00050	0,00013
26	26-27	5,9	0,7	-901,1	-10,8	-0,00024	0,00064	0,00011
27	27-28	-0,7	5,5	-922,0	-7,9	-0,00032	0,00080	-0,00001
28	28-1	-5,5	0	-934,0	9,2	-0,00022	0,00094	-0,00015

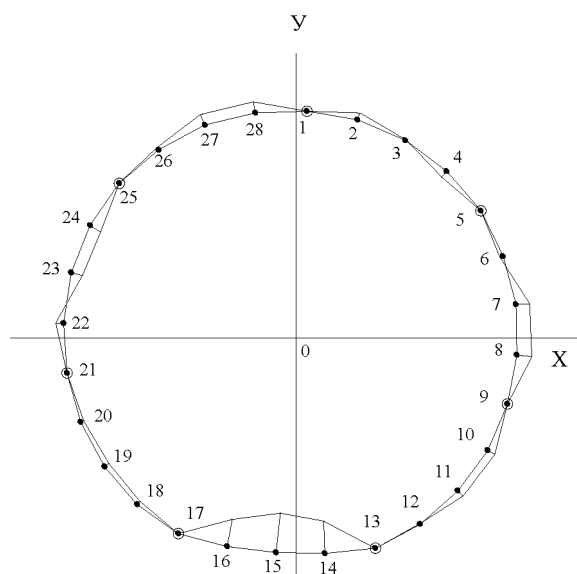
Таблица Л.16 - Внутренние усилия в элементах и перемещения узлов кольца обделки при расчетной схеме в)

Номер узла	Начало и конец элемента	Изгибающий момент, кНм		Нормальная сила в элементе, кН	Поперечная сила в элементе, кН	Перемещение узла		
		начало элемента	конец элемента			угол поворота, рад	горизонтальное, м	вертикальное, м
1	1-2	0	-38,5	-813,2	64,4	0	0,00112	0,00424
2	2-3	38,5	-40,3	-838,8	2,8	-0,00034	0,00121	0,00425
3	3-4	40,3	-24,3	-895,8	-26,6	-0,00156	0,00106	0,00369
4	4-5	24,3	0	-964,9	-39,8	-0,00254	0,00038	0,00263
5	5-6	0	-2,2	-1022,5	3,7	-0,00291	-0,00084	0,00144
6	6-7	2,2	1,1	-1056,9	-5,7	0,00035	-0,00059	0,00144
7	7-8	-1,1	-3,5	-1060,3	7,9	0,00034	-0,00038	0,00139
8	8-9	3,5	0	-1055,7	-6,1	0,00030	-0,00018	0,00129
9	9-10	0	1,3	-1033,2	-2,2	0,00025	-0,00005	0,00116
10	10-11	-1,3	-5,9	-999,7	12,4	0,00040	0,00012	0,00098
11	11-12	5,9	-4,9	-965,4	-1,7	0,00033	0,00024	0,00077
12	12-13	4,9	0	-935,1	-8,4	0,00016	0,00026	0,00060
13	13-14	0	-45,0	-897,3	75,8	0,00009	0,00021	0,00049
14	14-15	45,0	-62,4	-888,2	30,5	0,00036	0,00018	0,00019
15	15-16	62,4	-52,6	-887,2	-17,0	0,00019	0,00014	0,00003
16	16-17	52,6	0	-904,8	-8,93	0	0,00009	-0,00002
17	17-18	0	-1,2	-942,5	2,1	-0,00024	0,00005	0,00008
18	18-19	1,2	-2,5	-971,6	2,3	-0,00005	0	0,00015
19	19-20	2,5	-0,5	-999,9	-3,5	-0,00010	-0,00004	0,00025
20	20-21	0,5	0	-1023,0	-0,8	-0,00015	-0,00002	0,00038
21	21-22	0	1,7	-1036,3	-2,9	-0,00015	0,00004	0,00050
22	22-23	-1,7	3,6	-1042,1	-3,2	-0,00046	0,00031	0,00062
23	23-24	-3,6	3,9	-1016,4	12,8	-0,00038	0,00058	0,00069
24	24-25	3,9	0	-972,1	-6,6	-0,00039	0,00081	0,00070
25	25-26	0	14,1	-926,5	-23,3	-0,00044	0,00108	0,00064
26	26-27	-14,1	72,2	-889,7	-94,8	-0,00026	0,00131	0,00051
27	27-28	-72,2	61,1	-856,7	18,1	0,00108	0,00131	0,00070
28	28-1	-61,1	0	-826,3	101,9	0,00314	0,00108	0,00198

Таблица Л.17 - Внутренние усилия в элементах и перемещения узлов кольца обделки при расчетной схеме г)

Номер узла	Начало и конец элемента	Изгибающий момент, кНм		Нормальная сила в элементе, кН	Поперечная сила в элементе, кН	Перемещение узла		
		начало элемента	конец элемента			угол поворота, рад	горизонтальное, м	вертикальное, м
1	1-2	0	67,3	-875,6	-112,4	0	-0,00071	0,00415
2	2-3	-67,3	69,1	-923,1	-3,0	-0,00299	-0,00099	0,00197
3	3-4	-69,1	11,7	-960,9	95,7	-0,00088	-0,00137	0,00084
4	4-5	-11,7	0	-1000,7	19,2	0,00034	-0,00133	0,00073
5	5-6	0	-6,8	-1041,4	11,4	0,00052	-0,00105	0,00083
6	6-7	6,8	7,2	-1076,6	-24,0	0,00040	-0,00076	0,00086
7	7-8	-7,2	-0,9	-1086,4	13,7	0,00041	-0,00052	0,00082
8	8-9	0,9	0	-1068,9	-1,6	0,00050	-0,00024	0,00071
9	9-10	0	1,7	-1049,7	-2,9	0,00049	0,00002	0,00055
10	10-11	-1,7	-5,2	-1020,5	11,7	0,00021	0,00008	0,00042
11	11-12	5,2	-4,1	-989,2	-1,8	0,00016	0,00012	0,00026
12	12-13	4,1	0	-961,8	-7,0	0,00002	0,00008	0,00016
13	13-14	0	-59,3	-926,5	100,1	-0,00004	-0,00002	0,00013
14	14-15	59,3	-64,5	-920,3	9,1	0	-0,00007	0
15	15-16	64,5	-41,2	-932,2	-40,6	-0,00019	-0,00011	0,00006
16	16-17	41,2	0	-950,6	-69,9	-0,00036	-0,00013	0,00022
17	17-18	0	-2,7	-990,8	4,6	-0,00055	-0,00012	0,00051
18	18-19	2,7	-3,3	-1023,5	1,1	-0,00020	-0,00014	0,00066
19	19-20	3,3	-0,6	-1055,6	-4,7	-0,00029	-0,00010	0,00083
20	20-21	0,6	0	-1083,0	-0,9	-0,00035	0,00002	0,00101
21	21-22	0	-0,8	-1099,7	1,4	-0,00036	0,00020	0,00117
22	22-23	0,8	-1,0	-1092,9	0,4	-0,00030	0,00036	0,00129
23	23-24	1,0	2,5	-1074,1	-6,0	-0,00033	0,00056	0,00137
24	24-25	-2,5	0	-1029,8	4,2	-0,00031	0,00078	0,00140
25	25-26	0	-38,8	-959,4	64,3	-0,00027	0,00097	0,00139
26	26-27	38,8	-56,8	-891,1	29,3	0,00290	-0,00024	0,00297
27	27-28	56,8	-49,1	-846,5	-12,5	0,00142	-0,00080	0,00421
28	28-1	49,1	0	-841,3	-81,9	-0,00021	-0,00080	0,00457

Изгибающие моменты



Нормальные силы

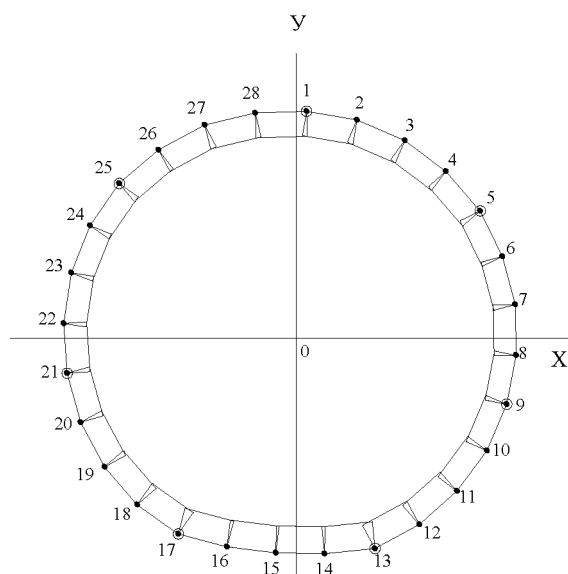
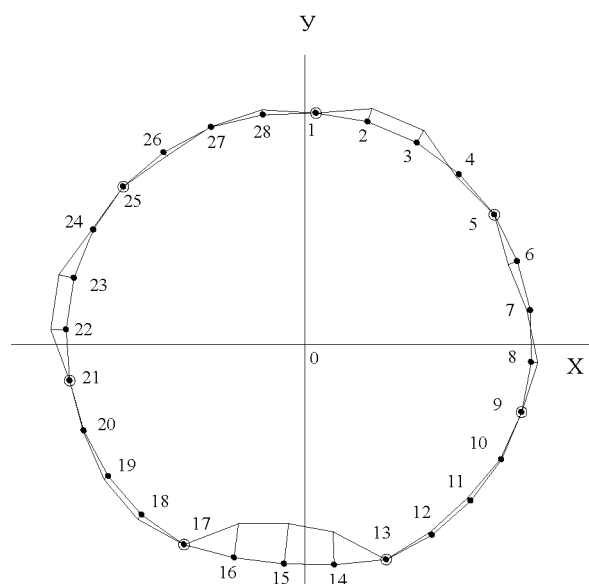


Рисунок Л.15 – Эпюры внутренних усилий в кольце обделки при особом сочетании действия нагрузки согласно расчетной схемы а)

Изгибающие моменты



Нормальные силы

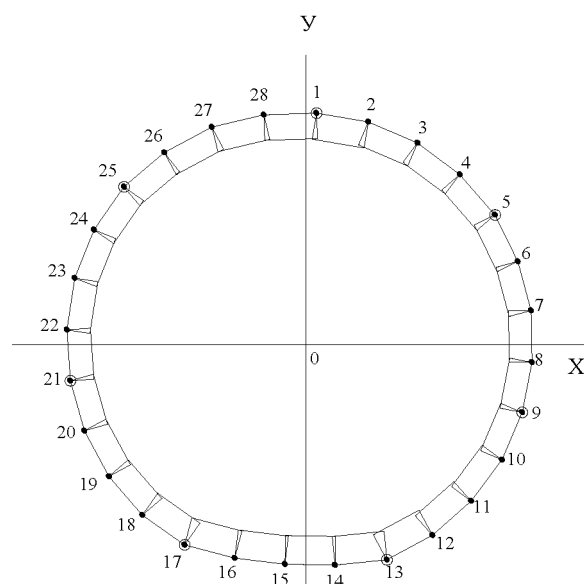
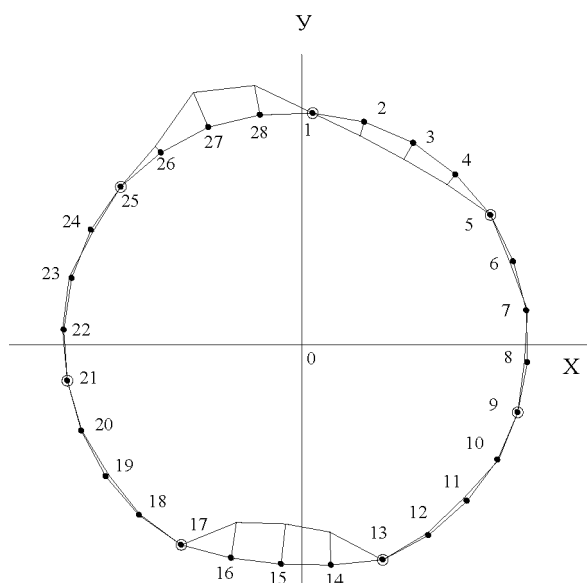


Рисунок Л.16 – Эпюры внутренних усилий в кольце обделки при особом сочетании действия нагрузки согласно расчетной схемы б)

Изгибающие моменты



Нормальные силы

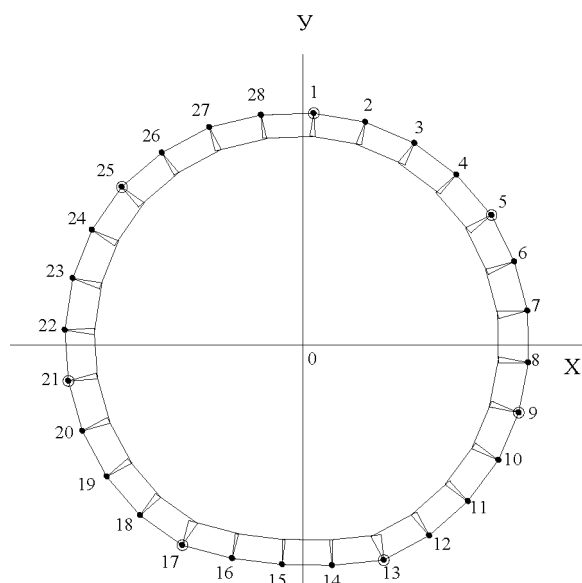
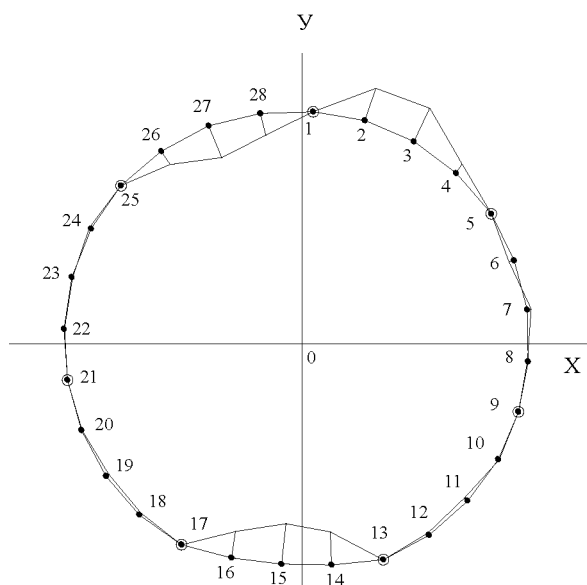


Рисунок Л.17 – Эпюры внутренних усилий в кольце обделки при особом сочетании действия нагрузки согласно расчетной схемы в)

Изгибающие моменты



Нормальные силы

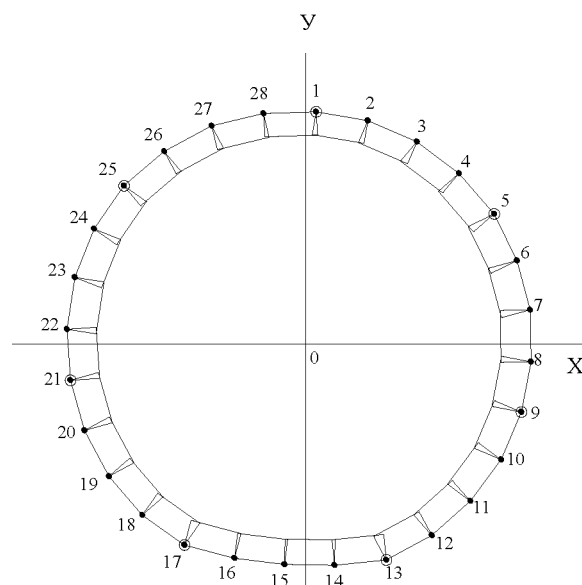


Рисунок Л.18 – Эпюры внутренних усилий в кольце обделки при особом сочетании действия нагрузки согласно расчетной схемы г)

**Таблица Л.18 – Максимальные расчетные усилия и перемещения в кольце обделки
при особом сочетании действия нагрузок при расчетных схемах а), б), в) и г)**

Расчетная схема	Нормальный блок			Нормальный блок			Лотковый блок			Максимальное перемещение контура обделки, мм	
	макс. отрицат. изгибающ. момент, -М, кН·м	нормальная сила, N, кН	номер сечения	макс. положит. изгибающ. момент, +М, кН·м	нормальная сила, N, кН	номер сечения	макс. изгибающ. момент, М, кН·м	нормальная сила, N, кН	номер сечения	макс. величина, мм	номер сечения
а)	-12,5	-826,8	24	15,9	-801,6	7	-61,3	-969,4	15	2,5	25
б)	-15,2	-868,1	6	24,0	-832,6	22	-65,7	-1009,2	15	3,0	5
в)	-40,3	-838,8	3	72,2	-889,7	27	-62,4	-888,2	15	4,3	2
г)	-56,8	-891,1	27	69,1	-923,1	3	-64,5	-920,3	15	4,6	28

Л.5 Расчет прочности и оценка надежности кольца обделки

Л.5.1 Расчет несущей способности железобетонных лоткового и нормальных блоков кольца обделки перегонного тоннеля выполняется по общему случаю в соответствии с положениями норм СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции». Опалубочные и арматурные чертежи нормального и лоткового блоков показаны на Рисунках Л.19 и Л.20.

Л.5.2 Несущая способность нормального сечения блоков колец обделки определяется с использованием метода последовательных приближений.

Л.5.3 На первом этапе расчета задается высота сжатой зоны бетона x . Далее определяются относительные высоты сжатой зоны бетона ξ_1 и ξ_2 по формулам:

$$\xi_1 = \frac{x}{h_{01}}, \quad \xi_2 = \frac{x}{h_{02}}. \quad (\text{Л.19})$$

где h_{01} , h_{02} - расстояния от осей, проходящих через центр тяжести сечений 1-го и 2-го рядов арматуры до наиболее сжатого волокна бетона сечения (Рисунки Л.21 и Л.22).

На Рисунках Л.21 и Л.22 показаны поперечные сечения и армирование нормального и лоткового блоков.

Далее определяется характеристика сжатой зоны бетона по формуле

$$\omega = 0,85 - 0,008 \cdot R_b, \quad (\text{Л.20})$$

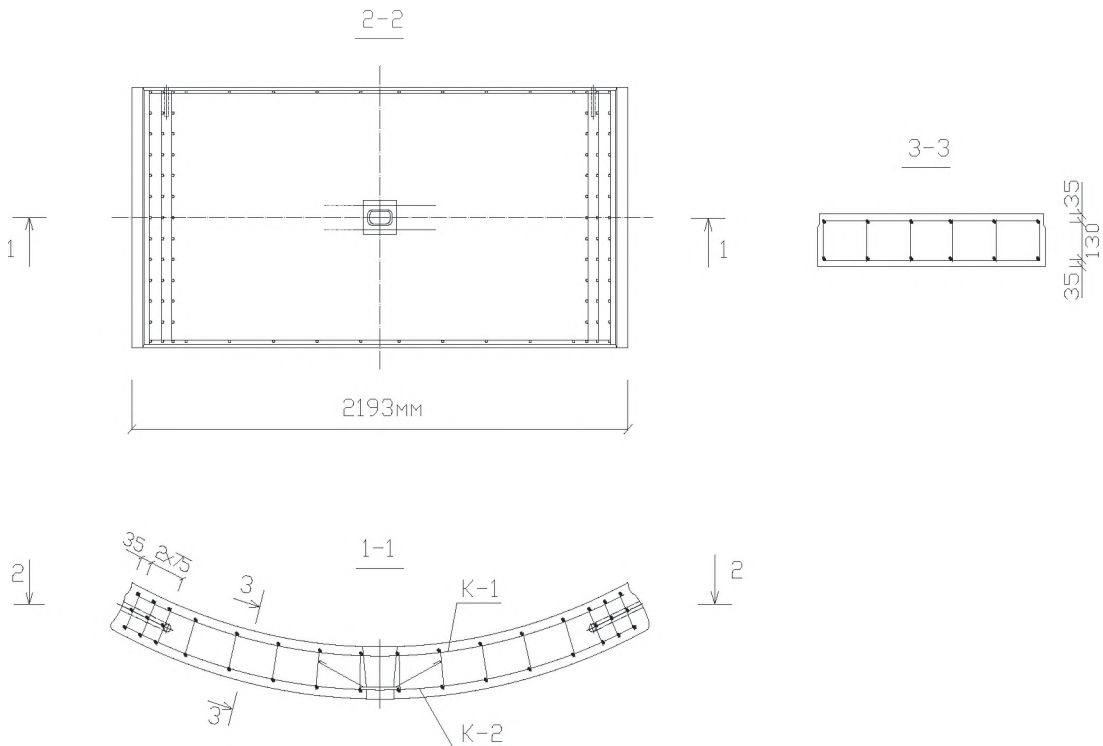
где R_b - призмная прочность бетона.

Л.5.4 На следующем этапе расчета определяются напряжения в 1-ом и во 2-ом рядах арматуры σ_{s1} и σ_{s2} железобетонного блока обделки по формулам

$$\sigma_{s1} = \frac{\sigma_{sc,u}}{1 - \frac{\omega}{1,1}} \cdot \left(\frac{\omega}{\xi_1} - 1 \right) \leq R_{sc}, \quad \sigma_{s2} = \frac{\sigma_{sc,u}}{1 - \frac{\omega}{1,1}} \cdot \left(\frac{\omega}{\xi_2} - 1 \right) \leq R_s. \quad (\text{Л.21})$$

где $\sigma_{sc,u} = 500 \text{ МПа}$ - предельное напряжение в арматуре сжатой зоны бетона;

R_{sc}, R_s – расчетные сопротивления арматуры при сжатии и растяжении.

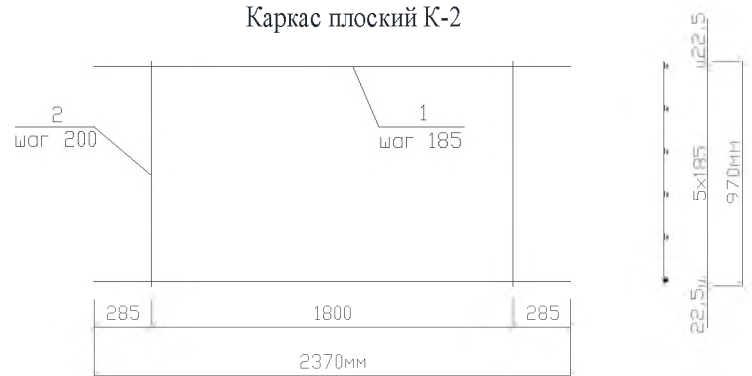


Каркас плоский К-1



Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
	Арматура ГОСТ 5781-82		Количество каркасов
1	Ø12AII L=2260	6	К-1 на Блок - 1шт
2	Ø6AI L=970	10	

Каркас плоский К-2



Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
	Арматура ГОСТ 5781-82		Количество каркасов
1	Ø8AII L=2370	6	К-2 на Блок - 1шт
2	Ø6AI L=970	10	

Рисунок Л.19 – Опалубочный и арматурные чертежи нормального блока

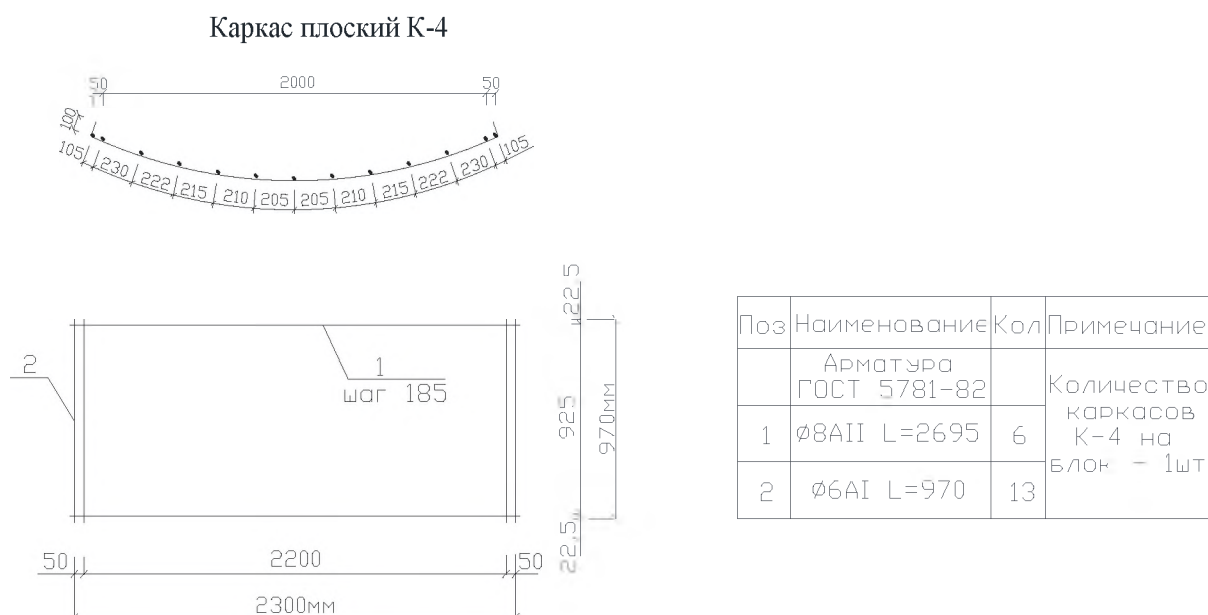
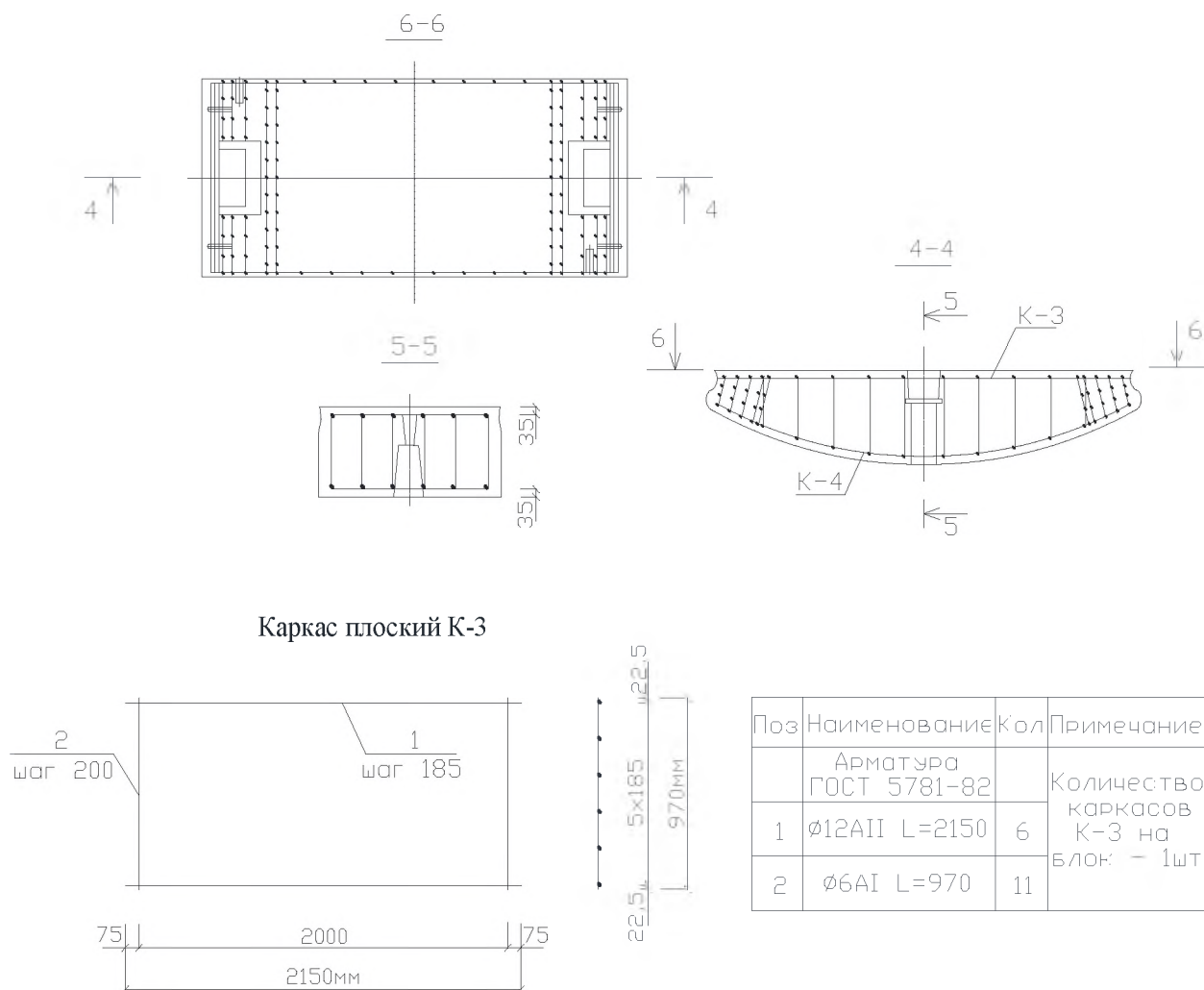


Рисунок Л.20 – Опалубочный и арматурные чертежи лоткового блока

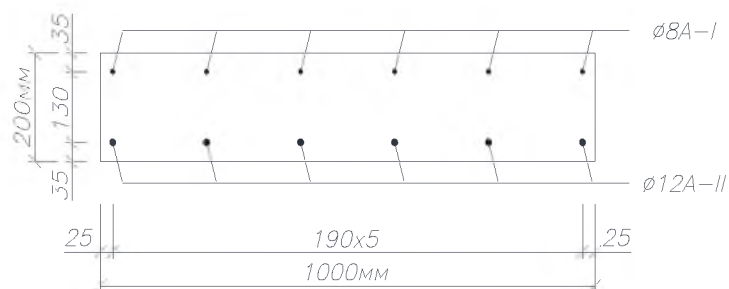


Рисунок Л.21 – Схема армирования нормального блока

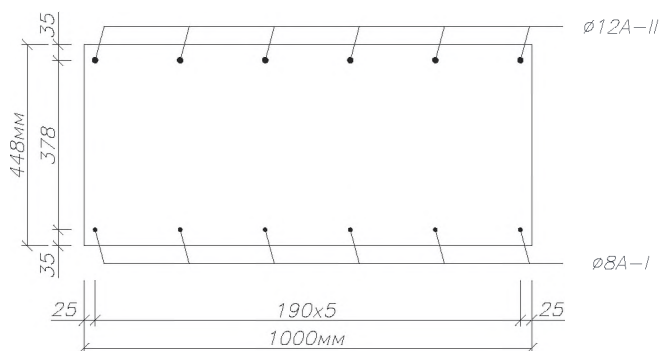


Рисунок Л.22 – Схема армирования лоткового блока

Л.5.5 На основе решения двух уравнений, в каждом из них, определяется величина нормальной силы N , соответствующая предельному состоянию сечения элемента

$$N \cdot \left(e_0 + h_{02} - \frac{h}{2} \right) = R_b \cdot S_b - \sum_{i=1}^2 \sigma_{si} \cdot S_i, \quad (\text{Л.22})$$

$$R_b \cdot A_b - \sum_{i=1}^2 \sigma_{si} \cdot A_{si} - N = 0. \quad (\text{Л.23})$$

где S_b - статический момент площади сечения сжатой зоны бетона относительно

2-го ряда арматуры;

S_i - статический момент площади сечения i -го ряда арматуры относительно

2-го ряда арматуры;

A_b - площадь сечения сжатой зоны бетона;

h - высота сечения элемента.

Л.5.6 Величина эксцентриситета e_0 нормальной силы N_p от действия расчетных нагрузок относительно центра тяжести сечения определяется из зависимости

$$e_0 = \frac{M_p}{N_p}, \quad (\text{Л.24})$$

где M_p - изгибающий момент в сечении элемента от действия расчетных нагрузок.

Значения M_p и N_p принимаются по результатам расчета кольца обделки.

Л.5.7 Из решения двух вышеуказанных уравнений Л.22 и Л.23 определяются нормальные силы N , соответствующие предельному состоянию сечения элемента. Решение считается завершенным при условии совпадения значений нормальных сил N , полученных из решения данных двух уравнений.

Л.5.8 При несовпадении значений N , следует задаться новым значением высоты сжатой зоны бетона x и решение повторить до сходимости N .

Л.5.9 На последнем этапе расчета определяется коэффициент запаса сечения элемента по формуле

$$K = \frac{N}{N_p}, \quad (\text{Л.25})$$

Л.5.10 По результатам выполненных расчетов определяются несущая способность нормального и лоткового блоков и делается сравнительный анализ с усилиями, имеющими место в этих блоках при основном и особом сочетаниях действия нагрузок.

Л.5.11 В Таблице Л.19 приведены результаты сравнительного анализа несущей способности блоков с усилиями, имеющими место в этих блоках при основном и особом сочетаниях действия нагрузок в виде коэффициентов запаса, свидетельствующих о надежности кольца обделки с измененной геометрией.

Таблица Л.19 – Коэффициенты запаса в нормальных и лотковом блоках

Коэффициент запаса						
основное сочетание действия нагрузки			наименование расчетной схемы	особое сочетание действия нагрузки		
при максимальном отрицательном изгибающем моменте в нормальном блоке	при максимальном положительном изгибающем моменте в нормальном блоке	при максимальном изгибающем моменте в лотковом блоке		при максимальном отрицательном изгибающем моменте в нормальном блоке	при максимальном положительном изгибающем моменте в нормальном блоке	при максимальном изгибающем моменте в лотковом блоке
6,8	4,6	9,0	а)	4,2	4,1	6,6
			б)	3,8	3,4	6,3
			в)	2,6	1,5	6,9
			г)	2,0	1,6	6,7

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Дорман И.Я. Сейсмостойкость транспортных тоннелей. – Москва, ТИМР, 2000.
- [2] Руководство по проектированию подземных сооружений в сейсмических районах. – Москва, ТИМР, 1996.
- [3] Рашидов Т.Р. Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. – Ташкент, Фан, 1973.
- [4] ТУ 14-1-5526-2006 Прокат арматурный класса А500СП с эффективным периодическим профилем. Технические условия – Москва, 2006.
- [5] Напетваридзе Ш. Г. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений. – Москва, Госстройиздат, 1959.
- [6] Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Масанов Ж.К. Сейсмонапряженное состояние подземных сооружений в анизотропном слоистом массиве. – Алма-Ата, Наука, 1980.
- [7] Фотиева Н.Н. Расчет крепи подземных сооружений в сейсмически активных районах. – Москва, Недра, 1980.
- [8] Мелентьев П. В. Приближенные вычисления. – Москва, Физматгиз, 1962.
- [9] Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. – Москва, Недра, 1989.
- [10] Методические рекомендации по расчету временной крепи тоннельных выработок – Москва, ЦНИИС, 1984.

УДК 624(574)

МКС 93.060

Ключевые слова: транспортные тоннели, подземные сооружения, линии метрополитена, инженерно-геологические изыскания, нагрузки и воздействия, расчет, изотропные свойства грунта, анизотропные свойства грунта, продольные сейсмические волны, поперечные сейсмические волны сдвига, период колебаний, зона разлома, обделка тоннеля, перегонный тоннель

Ресми басылым

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЭКОНОМИКА МИНИСТРЛІГІНІҢ
ҚҰРЫЛЫС, ТҰРҒЫН ҮЙ-КОММУНАЛДЫҚ ШАРУАШЫЛЫҚ ІСТЕРІ ЖӘНЕ
ЖЕР РЕСУРСТАРЫН БАСҚАРУ КОМИТЕТІ

**Қазақстан Республикасының
ЕРЕЖЕЛЕР ЖИНАҒЫ**

ҚР ЕЖ 2.03-107-2013

СЕЙСМИКАЛЫҚ АУДАНДАРДАҒЫ ЖЕРАСТЫЛЫҚ ИМАРАТТАР

Басылымға жауаптылар: «ҚазҚСҒЗИ» АҚ

050046, Алматы қаласы, Солодовников көшесі, 21
Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – қабылдау бөлмесі

Издание официальное

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО
ХОЗЯЙСТВА И УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ МИНИСТЕРСТВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

**СВОД ПРАВИЛ
Республики Казахстан**

СП РК 2.03-107-2013

ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

Ответственные за выпуск: АО «КазНИИСА»

050046, г. Алматы, ул. Солодовникова, 21
Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – приемная