Министерство энергетики и электрификации СССР
ГЛАВНИПРОЕКТ
Ордена Октябрьской революции
Всесоюзный Государственный проектно-изыскательский
и научно-исследовательский институт энергетических
систем и электрических сетей
"ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ"

РУКОВОДСТВО ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ I КВ

РАЗДЕЛ 4

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Одобрено научно-техническим
Советом института "Энерго-
сетьпроект"

" " _____ 1980 г.

№ 3041тм-т1

Москва - 1980 г.

gost.e-ecolog.ru

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОСОБИЯ

ЭСП

Взамен:
I066тм, I070тм,
I07Iтм, I340тм,
I562 тм

Ордена Октябрьской революции ВГПИ и НИИ "Энергосетьпроект"

Руководство по проектированию опор и фундаментов линий электропередачи и распределительных устройств подстанций напряжением выше I кВ

Раздел 4

Железобетонные конструкции

Зам.главного инженера института

Ю.А.ГАБЛИЯ

Директор Северо- Западного отделения

А.М.АСТАФЕЕВ

Начальник производственно-технического строительного отдела

Начальник технического отдела

Л.Я.ЛЕРНЕР

Главный специалист

Л.Э.ЛЕВИН

Зав.лабораторией НИЛКЭС, к.т.н.

А.И.КУРНОСОВ

Разработано Северо- Западным отделением института "Энергосетьпроект"

Срок введения в действие

"___"_____I98___ г.

В разработке участвовали:

Зав.НИЛКЭС, к.т.н. А.И.КУРНОСОВ

Зав.группы НИЛКЭС И.И.ШТИНА

СОСТАВ "РУКОВОДСТВА"

Инв.№ №

РАЗДЕЛ I.	Общие положения	3534тм-тI
РАЗДЕЛ П.	Сочетания нагрузок, нормативные и расчетные нагрузки	3534тм-тI
РАЗДЕЛ 3.	Стальные конструкции	3534тм-т2
РАЗДЕЛ 4.	Железобетонные конструкции ...	3041тм-тI
РАЗДЕЛ 5.	Деревянные конструкции	3340тм-тI
РАЗДЕЛ 6.	Основания	3041тм-т2
РАЗДЕЛ 7.	Свайные фундаменты.....	3041тм-т5

А Н Н О Т А Ц И Я

Раздел " Железобетонные конструкции" Руководства по проектированию опор линий электропередачи и ОРУ подстанций выше I кВ разработан в соответствии с планом типовых работ Госстроя СССР.

Раздел разработан с учетом положений метода предельных состояний, приведенных в главах СНиП П-А.10-71 "Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования" и СНиП П-21-75 "Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования".

Рекомендуемые расчетные методы скорректированы с учетом экспериментально-теоретических работ, проводившихся лабораторией центрифугированных изделий Днепропетровского инженерно-строительного института, Вильнюсского инженерно-строительного института, Куйбышевского инженерно-строительного института, НИИЖБа, ОРГРЭС и др.

Материалы этих работ использованы также при назначении коэффициентов условий работ и коэффициентов надежности.

При подготовке окончательной редакции учтены замечания, полученные от специализированных организаций, которым работа рассылалась для дачи отзыва.

Работа выполнена лабораторией конструкций электросетевого строительства Северо-Западного отделения.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

стр.

I. Область применения. Определения. Общие указания 7

2. Материалы и их нормативные и расчетные характеристики I0

3. Расчет железобетонных элементов 20

4. Общие конструктивные требования I02

5. Статический расчет свободностоящих опор I06

Литература I40

I. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

I.I. Настоящий раздел составлен в развитие глав СНиП П-А.IO-7I, П-2I-75, "Правил устройства электроустановок" (ПУЭ) и распространяется на проектирование конструкций железобетонных опор и фундаментов линий электропередачи (ВЛ) и открытых распределительных устройств подстанций (ОРУ) напряжением выше IOOO В с обычной и предварительно напряженной продольной арматурой.

I.2. К железобетонным опорам ВЛ относятся все опоры, состоящие полностью из железобетонных элементов, а также опоры, основные элементы которых (стойки одностоечных опор, стойки и траверсы или только стойки портальных опор) выполнены из железобетона.

I.3. Проектирование железобетонных конструкций, предназначенных для работы в условиях агрессивных сред и повышенной влажности, должно вестись с учетом дополнительных требований СНиП П-28-73 по защите строительных конструкций от коррозии.

I.4. Настоящий раздел содержит, в основном, сведения, отражающие специфические особенности проектирования конструкций железобетонных опор и фундаментов ВЛ и ОРУ подстанций.

I.5. Проектирование элементов конструкций железобетонных опор из других материалов должно производиться по указаниям соответствующих глав СНиП и настоящего Руководств

I.6. Железобетонные конструкции опор и фундаментов ВЛ должны проектироваться с учетом:

а) условий эксплоатации;

б) экономии материалов, индустриализации и наименьшей трудоемкости изготовления, максимального использования грузоподъемности транспортных средств, а также наименьшей трудоемкости монтажа конструкций в условиях строительства.

в) унификации сборных конструкций заводского изготовления путем применения стандартных и типовых схем опор и конструкций фундаментов, элементов и деталей; механизированного изготовления на специализированных предприятиях.

г) стойкости конструкций против коррозии бетона и металла;

Для выполнения этих условий рекомендуется:

а) Применять элементы таких форм сечений (кольцевые, круглые, прямоугольные, двутавровые, коробчатые), которые при заданном характере и величинах действующих внешних нагрузок, обеспечивают минимальный расход материалов и в наибольшей мере удовлетворяют перечисленным выше требованиям. С целью более рационального использования материалов размеры поперечных сечений, при необходимости, должны приниматься переменными по длине элемента в соответствии с характером изменения действующих усилий.

б) Применять для арматуры железобетонных элементов арматурные стали (табл.x) I9, 20, 22, 23 и приложение 3),

---

Таблицы, отмеченные звездочкой, см.гл.СНиП П-2I-75.

которые обеспечивают требуемую надежность их работы при наименьшей стоимости. Для продольной арматуры железобетонных стоек рекомендуется применять стержневые арматурные стали, арматурную проволоку периодического профиля и спиральные семипроволочные арматурные канаты. Целесообразность применения продольной арматуры с гладкой поверхностью должна быть подтверждена расчетом с постановкой контрольных испытаний.

Конструкции арматурных каркасов, количество напрягаемой продольной арматуры при смешанном армировании, а также величины предварительного напряжения арматуры должны приниматься с учетом схемы опоры и характера действующих нагрузок. Для опор консольного типа, устанавливаемых в сильно гололедных районах, рекомендуется применение более жестких железобетонных стоек, т.е. с большими величинами общего предварительного напряжения продольной арматуры.

в) Для основных элементов железобетонных конструкций опор (стоек, траверс опор портального типа) должны, как правило, применяться цельные элементы (без стыков). В тех случаях, когда применение стыков вызывается необходимостью, количество их следует сокращать до минимума. Конструкции стыков должны обеспечивать простоту сборки и монтажа опор в условиях строительства.

г) Элементы сборных конструкций должны отвечать условиям механизированного изготовления на специализированных предприятиях.

I.7. На чертежах конструкций должны приводиться все те данные, которые позволяют осуществить их изготовление, перевозку и монтаж (марка бетона и арматурной стали, величина общего предварительного натяжения арматуры, указания по изготовлению арматурного каркаса и т.д.)

2. МАТЕРИАЛЫ И ИХ НОРМАТИВНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.I. Материалы для железобетонных элементов опор и фундаментов должны применяться в соответствии с рекомендациями и требованиями гл.СНиП П-2I-75 и настоящего Руководства.

2.2. Для стоек и траверс железобетонных опор должен применяться тяжелый бетон марки по прочности на осевое сжатие - центрифугированных М 400 и выше, вибрированных М300 и выше. Для конструкций сборных фундаментов (подножники, призматические сваи, анкерные и опорные плиты, ригели и др.сборные элементы) - бетон по прочности на осевое сжатие М200 и выше.

2.3. Марка бетона по морозостойкости для всех железобетонных элементов опор ВЛ и ОРУ напряжением 35 кВ и выше, а также фундаментов для этих опор, предназначенных для районов с расчетной зимней температурой наружного воздуха выше минус 40°С, должна приниматься не ниже Мрз I50, а для опор и фундаментов ВЛ и ОРУ напряжением ниже 35 кВ- не ниже Мрз I00. Для районов с наружной зимней температурой ниже минус 40°С марки по морозостойкости для этих

элементов должны быть Мрз 200 и Мрз I50 соответственно.

2.4. Стандартными контрольными образцами, по которым определяется марка бетона по прочности на сжатие, для центрифугированных труб принимаются бетонные кубы размером IOxIOxIO см, изготовленные тем же способом. Контроль прочности бетона вибрированных элементов опор и конструкций фундаментов должен производиться по указаниям главы СНиП I-В.3-72.

Разрешается прочность центрифугированных труб контролировать по вибрированным кубам с ребром IO, I5 и 20 см при наличии установленного прямыми измерениями переходного коэффициента от прочности кубов к прочности бетона в изделии.

2.5. Для напрягаемой и ненапрягаемой арматуры рекомендуется применять следующие арматурные стали.

2.5.I. В качестве напрягаемой арматуры стоек, предназначенных для эксплуатации в I и П районах по гололеду, нормируемых Правилами устройства электроустановок (ПУЭ);

а) преимущественно арматуру классов А-IУ, А-У, Атс-УI;

б) при соответствующем технико-экономическом обосновании - арматурные канаты классов К-7 и К-I9.

2.5.2. В качестве напрягаемой арматуры стоек, предназначенных для эксплуатации в Ш, IУ и особом районах по гололеду, преимущественно арматуру классов К-7, К-I9 и Атс-УI.

ПРИМЕЧАНИЕ : Допускается применять арматуру классов А-У и А-IУ, при этом число напрягаемых стержней должно быть увеличено по расчету до значения, при котором достигается требуемая жесткость.

2.5.3. В качестве ненапрягаемой арматуры центрифугированных стоек следует применять стержневую сталь классов А-IУ, А-У, Атс-УI:

а) если напрягаемая арматура стержневая - допускается принимать одинакового с ней класса;

б) если напрягаемая арматура канатная - в зависимости от характера работы стойки: А-У - при работе стоек на изгиб по схеме защемленной консоли, А-IУ - при работе стоек на сжатие с изгибом, когда не обеспечивается эффективное использование арматуры растянутой зоны.

2.5.4. В качестве напрягаемой арматуры железобетонных элементов опор и фундаментов, изготавливаемых вибрированием, следует преимущественно применять:

а) стержневую горячекатанную периодического профиля классов А-IУ, А-У и Атс-УI и термически упрочненную классов Ат-IУ, Ат-У, Ат-УI - только для продольной рабочей арматуры в вязаных каркасах;

б) допускается применять арматурные канаты классов К-7 и К-I9 при соответствующем технико-экономическом обосновании.

2.5.5. В качестве ненапрягаемой арматуры опор и фундаментов из вибробетона следует применять стержневую горячекатанную арматуру периодического профиля классов А-Ш, А-IУ, А-У.

ПРИМЕЧАНИЕ: Если напрягаемая арматура стержневая - допускается ненапрягаемую принимать одинакового с ней класса. Если напрягаемая арматура канатная - в зависимости от характера работы элемента: А-У - при изгибе и растяжении с изгибом, А-IУ - при сжатии с изгибом, когда не обеспечивается эффективное использование арматуры растянутой зоны.

2.6. В качестве поперечной арматуры (спирали) следует применять обыкновенную арматурную проволоку класса В-I. При обосновании расчетом допускается применять проволоку класса Вр-I, стержневую арматурную сталь гладкую и периодического профиля классов А-I, А-П.

Нормативные и расчетные характеристики

2.7. В качестве нормативных сопротивлений бетона приняты:

$R^н$ - временное сопротивление сжатию кубов (кубиковая прочность)

$R^н_{пр}$ - временное сопротивление осевому сжатию призм (призменная прочность)

$R^н_р$ - временное сопротивление осевому растяжению

Значения кубиковой и призменной прочностей в зависимости от проектной марки бетона $\bar{R}$ определяются по формулам

$$R^{н} = \bar{R}\,(1 - 1{,}64\,\upsilon)$$

$$R^{н}_{пр} = R^{н}(0{,}77 - 0{,}0001\,\bar{R}) \geqslant 0{,}72\,R^{н}$$

при коэффициенте изменчивости прочности для тяжелых бетонов

$$\upsilon = 0{,}135$$

2.8. Расчетные сопротивления бетона определяются путем деления нормативных сопротивлений на коэффициенты безопасности $K_{бс}$ (для сжатого бетона) и $K_{бр}$ (для растянутого бетона). Для тяжелого бетона при назначении проектной марки по прочности на сжатие их значения принимаются равными $K_{бс} = 1{,}3$; $K_{бр} = 1{,}5$.

2.9. В конкретных случаях, когда условия изготовления, эксплуатации и т.д. железобетонных элементов отличаются от нормальных, расчетные сопротивления необходимо домножать на коэффициенты условий работы $m_{бi}$, учитываемые независимо.

2.10. Для высокопрочного тяжелого бетона марок М600, М700 и М800 на расчетное сопротивление бетона сжатию $R_{пр}$ вводится коэффициент $m_{б}$, учитывающий особенности их деформаций и равный соответственно 0,95; 0,925 и 0,9.

2.11. При проектировании предварительно напряженных железобетонных стоек, изготавливаемых центробежным способом, должен учитываться коэффициент $m_{бн}$ увеличения прочности бетона, дозревающего в условиях одноосного обжатия усилием предварительного напряжения продольной арматуры

при 4 $\leq \sigma_{\delta н} \leq$ 6 МПа $m_{\delta н} = I,I$

при $\sigma_{\delta н} >$ 6 МПа $m_{\delta н} = I,I5$

При этом, отношение $\sigma_{\delta н}/R_{\circ}$ не должно превышать величин, указанных в табл. 6 СНиП П-2I-75.

2.I2. При проектировании железобетонных стоек и фундаментов промежуточных опор, основными нагрузками на которые являются кратковременные ветровые, расчетные сопротивления бетона сжатию и растяжению должны домножаться на коэффициент условий работы $m_{\delta 1} = I,I$, учитывающий влияние вероятной длительности действия расчетных условий и условий нарастания прочности во времени.

Для стоек и фундаментов анкерно-угловых опор ВЛ при угле поворота 5° и более и всех опор ОРУ (для гибкой ошиновки и под оборудование) его величину рекомендуется принимать равной $m_{\delta 1} = I$.

При проектировании стоек из тяжелого бетона для северных районов с расчетной зимней температурой наружного воздуха ниже минус 40°С расчетные сопротивления $R_{пр}$ и $R_{р}$ должны домножаться на коэффициент $m_{\delta 3} = 0,9$, учитывающий попеременное замораживание и оттаивание в условиях эпизодического водонасыщения. Для стоек из полимерцементного бетона допускается принимать $m_{\delta 3} = I$.

2.I3. При расчете железобетонных конструкций опор для гибкой ошиновки (порталов) и их фундаментов на нагрузки, возникающие при двухполюсном коротком замыкании,

расчетные сопротивления бетонов марок М 200 и выше допускается увеличивать путем умножения на коэффициент условий работы $m_{\delta v}$= I,2,учитывающий повышение прочности бетона на сжатие при больших скоростях нагружения. В остальных случаях этот коэффициент должен приниматься $m_{\delta v}$ = I.

2.I4. Коэффициенты условий работы, учитывающие знакопеременный (пульсирующий) характер нагрузки $m_{\delta 2}$, снижение расчетного сопротивления бетона элементов, находящихся постоянно или эпизодически в водонасыщенном состоянии и подвергающихся периодическому замораживанию и оттаиванию при расчете железобетонных конструкций опор и фундаментов $m_{\delta 3}$ допускается принимать равными единице.

2.I5. При проектировании предварительно напряженных центрифугированных стоек следует учитывать повышение начального модуля упругости бетона вследствие обжатия его напрягаемой арматурой в раннем возрасте путем умножения значений, приведенных в табл. I8 СНиП П-2I-75 на коэффициент, принимаемый по графику, приведенному на рис.I.

2.I6. Нормативные сопротивления арматуры должны приниматься в соответствии с указаниями главы СНиП П-2I-75.

2.I7. Расчетные сопротивления арматуры определяются путем деления соответствующих нормативных сопротивлений на коэффициент безопасности арматуры. Значения расчетных сопротивлений должны приниматься по табл. 22-23 главы СНиП П-2I-75.

Расчетные сопротивления гладкой обыкновенной арматурной проволоки, применяемой для спирали железобетонных стоек

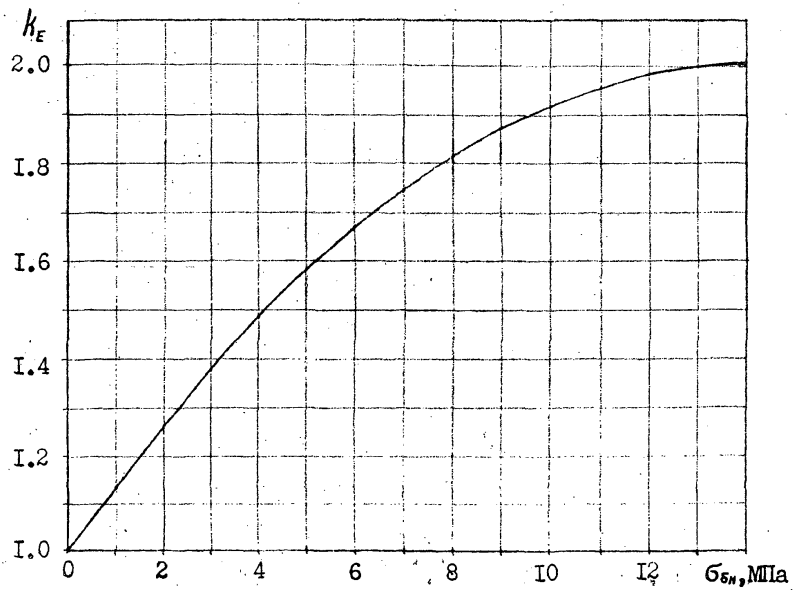


Рис. I. Зависимость коэффициента увеличения начального модуля упругости бетона от обжатия его напрягаемой арматурой.

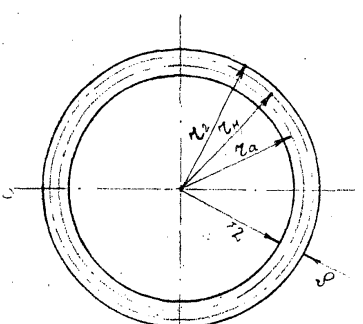


Рис. 2. Геометрические параметры кольцевого сечения:
r_2, r_1 - внешний и внутренний радиусы;
δ - толщина стенки.

опор, изготавливаемых центробежным способом из бетона марки по прочности на сжатие М 400 и выше допускается принимать по 2-ой строке табл. 23 СНиП П-2I-75, как и для арматурной проволоки периодического профиля класса Вр-I.

2.I8. Факторы, которые могут понизить или повысить прочность или надежность работы железобетонных конструкций учитываются при проектировании путем введения на расчетные сопротивления коэффициентов условий работы, которые могут быть меньше и больше единицы. Степень ответственности конструкций и сооружений учитывается путем деления расчетных сопротивлений на коэффициент надежности, больший единицы.

2.I9. Коэффициент условий работы m_{ax}, учитывающий неравномерность распределения напряжений в арматуре по длине наклонного сечения с трещиной, должен приниматься согласно указаниям п.2.29 главы СНиП П-2I-75 во всех случаях, кроме спирали цилиндрических и конических стоек опор ВЛ и ОРУ подстанций, работающих на изгиб с кручением, для которой его значение допускается принимать m_{ax}= I.

ПРИМЕЧАНИЕ. Это допущение не распространяется на спираль подземной части таких стоек при их расчете на действие поперечной силы.

2.20. В соответствии с п.3.I3 главы СНиП П-2I-75 расчетные сопротивления напрягаемой арматуры допускается умножать на коэффициенты условий работы m_{a4}, учитывающий работу арматуры при напряжениях выше условного предела текучести.

2.2I. Концевые участки железобетонных элементов с напрягаемой продольной арматурой (концы траверс портальных опор, выполняемых из цилиндрических железобетонных труб, к которым подвешиваются провода, верхние концы стоек свободностоящих опор, удлиняемых посредством наращивания металлическими конструкциями, передающими значительный изгибающий момент на концевой участок и др.) должны проверяться с учетом неблагоприятных условий работы напрягаемой арматуры на длине зоны ее анкеровки (когда анкера отсутствуют) путем умножения расчетных сопротивлений на коэффициент условий работы m_{a3} в соответствии с требованиями табл.24 главы СНиП П-2I-75.

2.22. Коэффициенты условий работы, учитывающие снижение сопротивления арматуры при действии знакопеременной (пульсирующей) нагрузки m_{a1} и неблагоприятные условия работы сварных соединений при действии таких нагрузок m_{a2}, при проектировании железобетонных конструкций опор и фундаментов опор ВЛ и ОРУ подстанций допускается не учитывать.

2.23. При расчете железобетонных конструкций опор для гибкой ошиновки и фундаментов ОРУ подстанций на динамические воздействия, возникающие при коротких замыканиях, допускается увеличивать сопротивления арматуры путем их умножения на коэффициент условий работы $m_{av} = I,I$, учитывающий повышение физического предела текучести арматурных сталей при больших скоростях загружения.

2.24. Значения начальных модулей упругости бетона при сжатии и растяжении $E_б$ и модулей упругости арматурных сталей $E_а$ должны приниматься по табл. I8 и 29 главы СНиП П-2I-75.

3. РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Основные расчетные положения

3.I. Расчет железобетонных конструкций опор и фундаментов должен производиться в соответствии с главой СНиП П-А.I0-7I "Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования" по несущей способности (первая группа предельных состояний) и по пригодности к нормальной эксплуатации (вторая группа предельных состояний).

Первой группой предельных состояний предусматривается:
- расчет по прочности
- расчет на устойчивость.

Вторая группа предельных состояний предусматривает:
- расчет по деформациям и перемещениям (прогибы, углы поворота, крены),
- расчет по образованию и раскрытию трещин.

3.2. Расчет железобетонных элементов конструкций опор и фундаментов должен быть произведен для стадии изготовления, транспортирования, монтажа и эксплуатации.

3.3. Расчет железобетонных элементов конструкций опор и фундаментов по прочности должен производиться на воздействие расчетных нагрузок.

3.4. При расчете по прочности свободностоящих опор усилия в их элементах должны определяться с учетом деформированного состояния опор, соответствующего стадии предельного состояния.

3.5. Угол поворота стоек свободностоящих опор за счет деформаций грунта основания должен определяться для каждого рассматриваемого конкретного случая с учетом принятого типа закрепления, действующих нагрузок, физико-механических характеристик грунта и др.

При проектировании массовых (типовых, унифицированных) конструкций свободностоящих опор ВЛ, закрепляемых в грунте путем заглубления нижней части стойки, угол наклона стойки опоры за счет деформаций грунта основания при действии горизонтальных нормативных нагрузок допускается принимать равным 0,01 рад., а его зависимость от момента на отметке поверхности грунта $M > M_н$, обусловленного действием всех нагрузок, линейной ($M_н$ - момент на той же отметке, создаваемый горизонтальными нормативными нагрузками). При проектировании опор для конкретных условий величину этого угла допускается принимать равной 0,02 рад., при этом, стойка должна удовлетворять требованию прочности при угле поворота 0,02 рад.

Закрепления опор в грунте должны проектироваться таким образом, чтобы угол поворота стойки при оговоренных условиях не превышал ~~указанных~~ предельных величин.

Положение центра поворота стойки при определении ее отклонения, допускается принимать на глубине, равной 2/3

длины подземной части стойки.

3.6. При расчете свободностоящих опор высотою менее I0 м дополнительные изгибающие моменты от весовых нагрузок на стрелах прогиба допускается учитывать постоянным коэффициентом I,I, вводимым на изгибающие моменты от горизонтальных и неуравновешенных вертикальных нагрузок.

3.7. При определении усилий в элементах опор на оттяжках с заделанными в грунт стойками дополнительно должны учитываться перемещения анкерных плит, к которым крепятся оттяжки, и осадка стоек за счет деформации грунта при действии расчетных нагрузок.

3.8. При расчете по прочности железобетонных элементов опор, находящихся под действием продольной сжимающей силы должен учитываться технологический (случайный) прогиб. Его величина должна приниматься по ГОСТ 22687-77, но не менее $\frac{1}{600} l$, где l - расстояние между точками закрепления элемента. Это требование распространяется на элементы опор, рабочее положение которых фиксируется в двух точках (стойки портальных и одностоечных опор на оттяжках, подветренные стойки опор ПВС ниже узла крепления наклонной связи и др.) Оно не распространяется на опоры, стойки которых работают по схеме защемленной консоли.

3.9. Расчет элементов конструкций железобетонных опор и фундаментов по второй группе предельных состояний производится на воздействие нормативных нагрузок.

3.10. Железобетонные элементы конструкций опор и фундаментов должны рассчитываться по трещинообразованию и раскрытию трещин на нормативные нагрузки нормальных режимов.

Расчет по трещинообразованию производится в следующих случаях:

а) при применении в качестве продольной арматуры высокопрочной арматурной проволоки и спиральных семипроволочных арматурных канатов при действии часто встречающихся нагрузок.

За частовстречающиеся принимаются нагрузки нормальных режимов, создаваемые давлением ветра на провода, грозозащитные тросы, оборудование и конструкции опор, соответствующие повторяемости один раз в один год;

б) при применении арматуры из любых сталей на действие нормативных постоянных и длительных нагрузок.

В остальных случаях железобетонные элементы должны проверяться по раскрытию трещин.

3.11. Определяемая расчетом ширина раскрытия трещин для конструкций опор и фундаментов, эксплуатируемых в нормальных условиях (неагрессивных средах), не должна превышать:

а) в элементах опор со стержневой арматурой классов от А-I до А-У ($А_т$-У) включительно и с обыкновенной арматурной проволокой классов В-I и Вр-I, в элементах фундаментов со стержневой арматурой классов А-I, А-П, А-Ш:

- при кратковременном раскрытии (промежуточные опоры ВЛ и их фундаменты) - 0,3 мм;
- при длительном раскрытии (анкерные и анкерно-угловые опоры ВЛ и ОРУ подстанций и их фундаменты) - 0,2 мм;

б) в элементах опор со стержневой арматурой классов A_T-УI и выше, с высокопрочной проволокой классов В-П и Вр-П и арматурными канатами при диаметре проволоки 4 мм и более:

- при кратковременном раскрытии - 0,I5 мм;
- при действии длительных (постоянных) нормативных нагрузок раскрытие трещин не допускается.

Для конструкций опор и фундаментов, эксплуатируемых в агрессивных средах, определяемая расчетом ширина раскрытия трещин должна быть не более:

в элементах опор со стержневой арматурой классов от А-I до А-У (A_T-У) включительно и с обыкновенной арматурной проволокой классов В-I и Вр-I, фундаментов - классов А-I, А-П, А-Ш:

- при кратковременном раскрытии - 0,2 мм
- при длительном раскрытии - 0,I мм

В элементах со стержневой арматурой классов A_T-УI и выше, с высокопрочной проволокой классов В-П и Вр-П и с арматурными канатами раскрытие трещин не допускается.

Допускаются максимальные значения ширины раскрытия трещин для железобетонных конструкций, эксплуатируемых в

агрессивных средах, принимать такими же как и для конструкций, эксплуатируемых в нормальных условиях, если обеспечивается специальное изоляционное покрытие в соответствии с главой СНиП П-28-73 "Антикоррозийная защита строительных конструкций зданий и сооружений, нормы проектирования".

3.12. Деформации предварительно напряженных элементов от нагрузок, не вызывающих появления трещин, определяются как для сплошного тела с учетом работы сжатой и растянутой зон. Деформации железобетонных элементов от нагрузок, при которых образуются нормальные к продольной оси трещины, определяются по удлинению растянутой арматуры с учетом работы растянутого бетона между трещинами и по укорочению крайнего волокна бетона с учетом неравномерного распределения деформаций вдоль оси элемента.

Расчет железобетонных элементов по несущей способности

3.13. Расчет по прочности железобетонных элементов кольцевого сечения (конических и цилиндрических труб) должен производиться в соответствии с настоящим Руководством.

3.14. Расчет по прочности изгибаемых железобетонных элементов кольцевого сечения со смешанной (напрягаемой и ненапрягаемой) продольной арматурой, равномерно распределенной по окружностям радиусов $r_н$ и $r_а$ (рис.2), должен удовлетворять условию:

$$M_p \le \left(R_{пр} F r_{ср} + R_{ас} F_а r_а + R_{нс} F_н r_н\right) \frac{\sin \pi \alpha_к}{\pi} + \\ + R_а F_а K_а z_а + R_н F_н K_н z_н \qquad (I),$$

где $$\alpha_к = \frac{A_а R_а F_а + (\sigma_о + A_н R_н) F_н}{R_{пр} F + (R_{ас} + B_а R_а) F_а + (R_{нс} + B_н R_н) F_н} \qquad (2)$$

Здесь F – площадь бетона всего сечения;

$F_а, F_н$ – площадь сечения продольной ненапрягаемой и напрягаемой арматуры;

$$r_{ср} = \frac{1}{2}(\mathcal{D} - \delta) \qquad (3)$$

$\mathcal{D}$ и δ – диаметр и толщина наружной стенки кольцевого сечения;

$r_а$ и $r_н$ – радиусы окружностей, проходящих через центры сечений стержней обычной и напрягаемой продольной арматуры;

$R_{пр}$ – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию;

$R_а, R_н$ – расчетное сопротивление обычной и напрягаемой продольной арматуры;

$R_{ас}, R_{нс}$ – расчетное сопротивление обычной и напрягаемой продольной сжатой арматуры;

$K_а, K_н$ – коэффициенты, определяемые по формулам

$$K_а = A_а - B_а \alpha_к \qquad (4)$$

$$K_н = A_н - B_н \alpha_к \qquad (5)$$

$z_а$ – расстояние от равнодействующей усилий в арматуре растянутой зоны до центра тяжести сечения

$$z_{a(н)} = (0,2 + I,3\,\alpha_к)\,\gamma_{a(н)} \qquad (6)$$

σ_o - предварительное напряжение арматуры, определяемое согласно п.п. I.24-I,28 СНиП II-2I-75 при коэффициенте точности $m_т = I,I$

$$A_a = m_{ak} \qquad (7)$$

$$A_н = m_{ak} - \frac{\sigma_o}{R_н} \qquad (8)$$

где: m_{ak} -коэффициент, принимаемый равным для арматуры классов А-I, А-II, А-III -I ; классов А-IУ, $А_т$-IУ, А-У, $А_т$-У, Ат-УI, В-II, Вр-II, К-7 и К-I9 -I,I ;

$$B_a = A_a \cdot \Delta_a \qquad (9)$$

$$B_н = A_н \cdot \Delta_н \qquad (I0)$$

где: Δ_a и $\Delta_н$ -принимаются равными

$$\Delta_a = I,5 + 6.I0^{-4} R_a \qquad (II)$$

$$\Delta_н = I,5 + 6.I0^{-4} R_н \qquad (I2)$$

Если определенное по формуле (2) $\alpha_к < 0,I5$, то в формуле(I) должно быть учтено его значение по формуле (I3)

$$\alpha_к = \frac{K_a R_a F_a + (\sigma_o + K_н R_н) F_н}{R_{пр} F + R_{ac} F_a + R_{нс} F_н} \qquad (I3)$$

Учитываемые в уравнении (I3) параметры K_a, $K_н$ и z_a определяются по формулам (4),(5) и (6) при $\alpha_к = 0,I5$

Если коэффициенты K_a и $K_н$ по (4) и (5) получаются отрицательными,то в уравнении(I) их нужно принять равными нулю, при этом в формуле (2) коэффициенты A_a, B_a, $A_н$, $B_н$ также должны быть приняты равными нулю .

ПРИМЕЧАНИЯ: I. Расчетные сопротивления принимаются по табл.I3,22 и 23 главы СНиП П-2I-75 с учетом коэффициентов условий работы и надежности в соответствии с разделом 2 настоящего Руководства.

2. При расчете элементов с обычной арматурой,величина $F_н$ в формулах (I),(2) и (I3) принимается равной нулю.

3. Рекомендации п.3.I4 распространяются на сечения с отношением $\frac{z_2 - z_1}{z_2} \leqslant 0,5$ при числе продольных стержней в поперечном сечении элемента не менее 6.

Пример проверки стойки промежуточной свободностоящей опоры.

Изгибающий момент, создаваемый расчетными нагрузками в расчетном (опорном) сечении

$M_р$ = 246 кН·м

Характеристики сечения

D = 53 см r = 6,37 см $z_a = z_н$ = 23,5 см

Напрягаемая арматура I0 ϕ I2 А-IУ $F_н$ =II,3I см^2

Ненапрягаемая арматура 17 Ø 12 А-IУ F_a = 19,23 см^2

$R_a = R_н$ =500 МПа $R^н_н$ = 600 МПа

Величина предварительного напряжения арматуры

$\sigma_{ок} = 0,9 \cdot R^н_н = 0,9 \cdot 600 = 540$ МПа

$Ea = E_н = 2.10^5$ МПа, R_{ac} =400 МПа

Бетон тяжелый марки М 400, $R_{пр}$= 17,5 МПа,

$E_б$= 30000 МПа, $\bar{R}$ =40 МПа,

$R_р$= 30 МПа

С учетом коэффициентов $m_{δн}$= 1,1 и $m_{δ1}$= 1,1

$m_{δн} \cdot m_{δ1} \cdot R_{пр}$= 17,5 . 1,1 . 1,1 = 21,175 МПа

Площадь сечения кольца:

$F_к = \pi\delta(D-\delta) = \pi \cdot 6,37(53,00-6,37) = 932,68$ см^2

Площадь бетона: $F_б = F_к - (F_a + F_н) =$

$= 932,68 - (19,23 + 11,31) = 902,14$ см^2

$$n_a = n_н = n = \frac{E_a}{E_б} = \frac{2.10^5}{0,3.10^5} = 6,67$$

Приведенная площадь бетона:

$F_п = F_к + (n-1)\cdot(F_a + F_н) =$

$= 932,68 + (6,67-1) \cdot 30,54 = 1105,84$ см^2

Потери предварительного напряжения:

1) от релаксации

$\sigma_1 = 0,1\sigma_{ок} - 20 = 0,1 \cdot 540 - 20 = 34$ МПа

2) от быстронатекающей ползучести:

$$\sigma_{\delta н} = \frac{(\sigma_{ок} - \sigma_1)F_н}{F_п} = \frac{(540-34).II,3I}{II05,84} = 5,I75 \text{ МПа}$$

$$\frac{\sigma_{\delta н}}{R_o} = \frac{5,I75}{30} = 0,I73 < \alpha = 0,6$$

$$\sigma_2 = 50 \cdot \frac{\sigma_{\delta н}}{R_o} .0,85 = 50.0,I73.0,85 = 7,35 \text{ Мпа}$$

3) от усадки бетона

$\sigma_3 = 35$ МПа ;

4) от ползучести бетона:

$$\sigma_4 = 200 .K . \frac{\sigma_{\delta н}}{R_o} = 200. 0,85 .0,I73 = 29,4I \text{ МПа}$$

Предварительное напряжение после проявления всех потерь:

$$\sigma_o = \sigma_{ок} - (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4) =$$

$$= 540-(34+7,35+35+29,4I) = 434,24 \text{ МПа}$$

$$A_a = m_{ak} = 1,1$$

$$A_н = m_{ak} - \frac{\sigma_o}{R_н} = I,I - \frac{434,24}{500} = 0,232$$

$$\Delta_a = I,5+ 6 \cdot R_a .I0^{-4} = I,5 + 6.500.I0^{-4} = I,8$$

т.к. $R_н = R_a$, то $\Delta_н = \Delta_a = I,8$

$B_a = A_a \Delta_a = I,I.I,8 = I,98$

$B_н = A_н \Delta_н = 0,232. I,8 = 0,42$

$$\alpha_к = \frac{(434,24 +0,232.500).II,3I +I,I.500.I9,23}{2I,I75.902,I4 +(400+I,98.500).I9,23+(400+0,42.500).II,3I} = 0,3I9$$

$$r_{cp} = \frac{1}{2}(2r - \delta) = \frac{1}{2}(53-6{,}37) = 23{,}3 \text{ см}$$

$K_в = A_в - B_в \alpha_к = 1{,}1 - 1{,}98 \cdot 0{,}319 = 0{,}47$

$K_н = A_н - B_н \alpha_к = 0{,}232 - 0{,}420 \cdot 0{,}319 = 0{,}10$

$z_{a(н)} = (0{,}2 + 1{,}3\alpha_к) r_{a(н)} = (0{,}2 + 1{,}3 \cdot 0{,}319) \cdot 23{,}5 = 14{,}45$ см

$\sin(180 \cdot 0{,}319) = \sin 57{,}42^0 = 0{,}8427$

$$M_п = \frac{1}{\pi}(21{,}175 \cdot 902 \cdot 14 \cdot 23{,}3 + 400 \cdot 19 \cdot 23 \cdot 23{,}5 + 400 \cdot 11{,}31 \cdot 23{,}5) \cdot 0{,}8427 + 500 \cdot 19 \cdot 23 \cdot 0{,}47 \cdot 14{,}45 + 500 \cdot 11 \cdot 31 \cdot 0{,}1 \cdot 14{,}45 = 270 \text{ кН.м}$$

$M_р < M_п$ следовательно, условие прочности удовлетворяется.

3.15. Расчет по прочности железобетонных элементов, находящихся под воздействием сжимающих сил, во всех случаях должен производиться по формулам внецентренного сжатия, поскольку в реальных условиях имеют место монтажные эксцентриситеты, производственные прогибы, а также действующие одновременно со сжатием поперечные нагрузки (собственный вес, давление ветра и др.).

3.16. Расчет по прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения со смешанной напрягаемой и ненапрягаемой продольной арматурой, равномерно распределенной по окружностям радиусов $r_н$ и $r_а$ (рис.2), производится по формулам:

$$Ne_0 \le (R_{пр} F r_{ср} + R_{ас} F_а r_а + R_{нс} F_н r_н) \frac{\sin \pi \alpha_к}{\pi} + \quad (14)$$

$$+ R_а F_а K_а z_а + R_н F_н K_н z_н$$

где

$$\alpha_к = \frac{A_a R_a F_a + (\sigma_o + A_н R_н) F_н + N}{R_{пр} F + (R_{ас} + B_a R_a) F_a + (R_{нс} + B_н R_н) F_н} \qquad (I5)$$

При этом, если подсчитанное по формуле (I5) $\alpha_к < 0,I5$, то оно должно быть скорректировано по формуле:

$$\alpha_к = \frac{K_a R_a F_a + (\sigma_o + K_н R_н) F_н + N}{R_{пр} F + R_{ас} F_a + R_{нс} F_н} \qquad (I6)$$

N -внешняя сжимающая сила ;

e_o -эксцентриситет приложения продольной силы относительно геометрического центра сечения, определяется с учетом прогиба элемента от кратковременного и длительного действия всех поперечных и продольных нагрузок, а в необходимых случаях также технологического, принимаемого в соответствии с п. 3.8.

Принятые в формулах (I4),(I5) и (I6) остальные обозначения те же, что и в формулах (I),(2) и (I3)

ПРИМЕЧАНИЯ: Те же, что и I,2,3 по 3,I4.

Пример проверки по прочности стойки промежуточной портальной опоры на оттяжках.

Усилия, полученные из статического расчета опоры на расчетные нагрузки:

I режим M_p= 342 кН.м N_p = 771 кН

II режим M_p= 338 кН.м N_p =227 кН

Характеристики сечения:

$\mathcal{D}$ = 56 см δ = 6 см $r_a = r_н$ = 25,6 см.

Напрягаемая арматура. I2 Ø I2 А-IУ $F_н$ = I3,572 см^2

Ненапрягаемая арматура I8 Ø I2 А-IУ F_a = 20,358 см^2

Величина предварительного напряжения арматуры

$\sigma_{ок} = 0{,}9 \cdot R^н_н = 0{,}9 \cdot 600 = 540$ МПа

$R_a = R_н = 500$ МПа $R^н_н = 600$ МПа

$R_{нс} = R_{ас} = 400$ МПа

$E_a = E_н = 2 \cdot I0^5$ МПа

Бетон тяжелый марки М 500:

$\bar{R} = 50$ МПа , $R_o = 37{,}5$ МПа , $R_{пр} = 2I{,}5$ МПа

$E_б = 32500$ МПа

Коэффициент условий работы $m_{бн} = I{,}I$ и $m_{б1} = I{,}I$

$R_{пр} \cdot m_{бн} \cdot m_{б1} = 2I{,}5 \cdot I{,}I \cdot I{,}I = 26{,}0I5$ МПа

Площадь сечения кольца:

$F_к = \pi\delta(\mathcal{D} - \delta) = \pi \cdot 6(56-6) = 942$ см^2

Площадь сечения бетона:

$F = F_к - (F_н + F_a) = 942 - (I3{,}572 + 20{,}358) = 908$ см^2

$n_a = n_н = \dfrac{E_a}{E_б} = \dfrac{2 \cdot I0^5}{0{,}325 \cdot I0^5} = 6{,}I5$

Приведенная площадь бетона:

$F_п = F_к + (n_a - 1)(F_н + F_a) = 942 + (6{,}I5 - I)$

$\cdot (I3{,}572 + 20{,}358) = III7$ см^2

Потери предварительного напряжения:

а) потери от релаксации:

$\sigma_1 = 0{,}I \cdot \sigma_{ок} - 20 = 0{,}I \cdot 540 - 20 = 34$ МПа;

б)потери от быстронатекающей ползучести:

$$\sigma_{\varepsilon н} = \frac{(\sigma_{ок} - \sigma_1)\cdot F_н}{F_п} = \frac{(540-34).13,572}{1117} = 6,15 \text{ МПа}$$

$$\frac{\sigma_{бн}}{R_o} = \frac{6,15}{37,5} = 0,164 < \alpha = 0,6$$

$$\sigma_2 = 50.\frac{\sigma_{бн}}{R_o} .0,85 = 50.0,164.0,85 = 6,97 \text{ МПа};$$

в)потери от усадки бетона:

$\sigma_3 = 40$ Мпа ;

г)потери от ползучести:

$$\sigma_4 = 200.К.\frac{\sigma_{бн}}{R_o} = 200.0,85.0,164 = 27,9 \text{ МПа}$$

$$\sigma_o = \sigma_{ок} - (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4) = 540-(34+6,97+40+27,9) = 431,1 \text{ МПа}$$

$$A_a = m_{ак} = 1,1 ; \quad A_н = m_{ак} - \frac{\sigma_o}{R_н} = 1,1 - \frac{431,1}{500} = 0,24 ;$$

$$\Delta_a = 1,5+6.10^{-4} R_a = 1,5+6.10^{-4}.500 = 1,8 ;$$

здесь $\Delta_н = 1,8$ т.к. $R_a = R_н$

$$B_a = A_a \Delta_a = 1,1 .1,8 = 1,98 ;$$

$$B_н = A_н \Delta_н = 0,24 . 1,8 = 0,432$$

$$\alpha_к = \frac{A_a R_a F_a + (\sigma_o + A_н R_н) F_н + N'}{R_{пр} F + (R_{ас} + B_a R_a) F_a + (R_{нс} + B_н R_н) F_н}$$

I режим

$$\alpha_к = \frac{1,1.500.20,358+(431,1+0,24.500).13,572+7711.10^{1}}{26,015.908+(400+1,98.500).20,358+(400+0,432.500)13,572} =$$

$$= 0,438$$

$\sin \pi \alpha_к = \sin (180.0,438) = \sin 78^0 50' = 0,981$

$z_н = z_а = (0,2+1,3\ \alpha_к)\ \tau_а$ =(0,2+1,3.0,438).25,6=
= 19,71 см

$K_а = A_а - B_а \cdot \alpha_к = 1,1-1,98.0,438 = 0,234$

$K_н = A_н - B_н \cdot \alpha_к = 0,240-0,432.\ 0,438 = 0,051$

По формуле (14):

$(Ne_0)_п$ = (26,015 .908.25 + 400.20,358.25,6+400.13,572.
.25,6). $\frac{0,981}{\pi}$ +500.20,358.0,234.19,71+500.13,572.
.0,051.19,71 = 346,7 кН.м

II режим

$\alpha_к = \frac{1,1.500.20,358 + (431,1 + 0,24.500)13,572 + 227.10^1}{26,015.908+(400+1,98.500)20,358+(400+0,432.500).13,572} =$

= 0,347

$z_н = z_а = (0,2+1,3\ \alpha_к)\tau_а$ =(0,2+1,3.0,347).25,6=
= 16,66 см

$\sin \pi \alpha_к = \sin (\pi .0,347) = 0,887$

$K_а = 1,1-1,98.0,347 = 0,41$

$K_н = 0,24-0,432.\ 0,347 = 0,09$

По формуле (14):

$(Ne_0)_п$ = (26,015.908.25+400.20,358.25,6+400.13,572.25,6).
$\cdot \frac{0,887}{\pi}$ +500.20,358.0,41.16,66+500.13,572.0,09.16,66=

= 344,7 кН.м

3.17. Расчет по прочности внецентренно растянутых железобетонных элементов кольцевого сечения со смешанной (напрягаемой и ненапрягаемой) продольной арматурой, равномерно распределенной по окружностям радиусов $r_н$ и $r_а$ (рис.2), удовлетворяющих условию $\alpha_к \geqslant \frac{1}{6}$, рекомендуется производить по формулам (14) и (15) с заменой знака перед N на минус.

Принятые обозначения те же, что и в п.п. 3.14 и 3.16.

Примечания. Те же, что и к п. 3.14

Если определенное по формуле (15) значение $\alpha_к < 1/6$, расчет рекомендуется производить по соотношению

$$Ne_0 \leq \frac{N_{пц} - N}{N_{пц} - N_{пг}} M_{пг} \qquad (17)$$

где:

$N_{пг}$ – предельное значение растягивающей силы (граничное), соответствующее $\alpha_к = \frac{1}{6}$, определяется из уравнения (15) при $\alpha_к = \frac{1}{6}$;

$M_{пг}$ – предельное (граничное) значение момента, определяемое по формуле (1) при $\alpha_к = \frac{1}{6}$;

$N_{пц}$ – предельная величина центральной растягивающей силы

$$N_{пц} = m_{а4} R_а F_а + m_{а4} R_н F_н \qquad (18)$$

$m_{а4}$ – коэффициент, принимаемый для стали классов А-I, А-II, А-III -I ; для стали других классов – по указаниям п.3.14 главы СНиП II-21-75.

3.I8.Если по условиям проектирования для проверяемого сечения требуется построить кривую зависимости предельной величины растягивающей силы $N_п$, от эксцентриситета e_o рекомендуется сначала определить по формуле(I8) предельную величину центральной растягивающей силы $N_{пц}$ и величины граничного эксцентриситета $e_г$ и соответствующей ему предельной силы $N_{пг}$ по формулам (I9) и (20).

$$e_г = \frac{1}{N_{пг}}\left[\frac{1}{2\pi}\left(R_{пр}F z_{ср} + R_{ас}F_а z_а + R_{нс}F_н z_н\right) + R_а F_а K_а z_а + R_н F_н K_н z_н\right] \quad (I9)$$

$$N_{пг} = A_а R_а F_а + \left(\sigma_o + A_н R_н\right)F_н - \frac{1}{6}\left[R_{пр}F + \left(R_{ас} + B_а R_а\right)F_а + \left(R_{нс} + B_н R_н\right)F_н\right] \quad (20)$$

Для значений $\alpha_к < \frac{1}{6}\left(e_o < e_г\right)$ расчет производится по формуле (I7), для $\alpha_к > \frac{1}{6}\left(e_o > e_г\right)$ -по формулам (I4) и (I5).

В последнем случае целесообразно задаться значениями $N < N_{пг}$ в нужном диапазоне и определить соответствующие им эксцентриситеты приложения силы.

Пример расчета внецентренно растянутого элемента по прочности (стойка анкерной Л-образной опоры).

Усилия ,полученные из статического расчета опоры на расчетные нагрузки:

$M_р$= 24I кН.м $N_р$ =864 кН (I нормальный режим)

Характеристики сечения:

h = 56 см, δ = 6 см , $z_а = z_н$ = 25,6 см

Напрягаемая арматура 12 Ø 12 А-У $F_н$ = 13,572 см^2

Ненапрягаемая арматура 18 Ø12А-У $F_а$ = 20,358 см^2

$R_а = R_н$ = 640 МПа $R^н_н$ = 800 МПа

Величина предварительного напряжения арматуры

$\sigma_{ок}$ = 0,9 $R^н_н$ = 0,9.800=720 МПа

$E_а = E_н$ = 1,9.10^5 МПа ; $R_{ас} = R_{нс}$ = 400 МПа

Бетон тяжелый марки М 500

$\bar{R}$ = 50 МПа $E_б$ = 32500 МПа $R_о$ =37,5 МПа

$R_{пр}$ = 21,5 МПа

Коэффициенты условий работы $m_{бн}$ = 1,15 и $m_{б1}$ =1,0

$R_{пр} \cdot m_{бн} \cdot m_{б1}$ = 21,5.1,15.1,0 = 24,725 МПа

Площадь сечения кольца:

$F_к = \pi \delta (d - \delta) = \pi \cdot 6(56-6) = 942$ см^2

Площадь сечения бетона:

$F = F_к - (F_н + F_а)$ = 942-(13,572+20,358) = 908 см^2

$$n_а = n_н = \frac{E_а}{E_б} = \frac{1,9 \cdot 10^5}{0,325 \cdot 10^5} = 5,85$$

Приведенная площадь бетона:

$F_п = F_к + (n_а - 1)(F_н + F_а)$ =942+(5,85-1)(13,572+20,358) =

= 1107 см^2

Потери предварительного напряжения:

1) от релаксации:

σ_1 =0,1 · $\sigma_{ок}$ -20=0,1.720-20 = 52 МПа

2) от быстронатекающей ползучести:

$$\sigma_{6н} = \frac{(\sigma_{ок} - \sigma_1)F_н}{F_п} = \frac{(720-52).13,572}{1107} = 8,19 \text{ МПа}$$

$$\frac{\sigma_{6н}}{R_o} = \frac{8,19}{37,5} = 0,218 \quad < \quad \alpha \quad = 0,6$$

$$\sigma_2 = 50. \frac{\sigma_{6н}}{R_o} .0,85 = 50.0,218.0,85 = 9,265 \text{ МПа}$$

3) от усадки бетона:

$$\sigma_3 = 40 \text{ МПа}$$

4) от ползучести:

$$\sigma_4 = 200.К \frac{\sigma_{6н}}{R_o} = 200.0,85.0,218 = 37,06 \text{ МПа}$$

$$\sigma_o = \sigma_{ок} - (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4) = 720-(52+9,3+40+37,1) = 581,6 \text{ МПа}$$

$$A_a = m_{ак} = 1,1 \; ; \; A_н = m_{ак} - \frac{\sigma_o}{R_н} = 1,1 - \frac{581,6}{640} = 0,191 \; ;$$

$$\Delta_a = 1,5+6. R_a 10^{-4} = 1,5+6.10^{-4}.640 = 1,884$$

$$\Delta_н = 1,5+6 \; R_н 10^{-4} = 1,5+6.10^{-4}.640 = 1,884$$

$$B_a = A_a \Delta_a = 1,1.1,884 = 2,07 \; ; \; B_н = A_н \Delta_н = 0,191.1,884 = 0,360$$

I режим

$$\alpha_к = \frac{A_a R_a F_a + (\sigma_o + A_н R_н)F_н - N}{R_{пр}F + (R_{ас} + B_a R_a)F_a + (R_{нс} + B_н R_н)F_н} =$$

$$= \frac{1,1.640.20,358+(581,6+0,191.640).13,572-864.10^1}{24,725.908+(400+2,07.640).20,358+(400+0,360.640).13,572}$$

$$= 0,230$$

$$\sin(\pi\alpha_к) = \sin(180.0,23) = \sin(41^o24') = 0,663$$

$z_н = z_а = (0,2+I,3\ \alpha_к)\ r_а = (0,2+I,3.0,23).25,6=I2,77$ см

$K_а = A_а - B_а\ \alpha_к = I,I-2,07.0,23 = 0,624$

$K_н = A_н - B_н \alpha_к = 0,I9I-0,360.0,230 = 0,I08$

$$r_{ср} = \frac{I}{2}.\ (R - \delta) = \frac{I}{2}\ (56-6,0) = 25,0 \text{ см}$$

$$M_п = \left(R_{пр} F r_{ср} + R_{ас} F_а r_а + R_{нс} F_н r_н\right) \frac{\sin \pi \alpha_к}{\pi} +$$

$$+ R_а F_а K_а z_а + R_н F_н K_н z_н =$$

$$=(24,725.908.25+400.20,358.25,6+400.I3,572.25,6).$$

$$\cdot \frac{0,66I3}{\pi} +640.\ 20,358.0,624\ .I2,77+640.I3,572.0,I08.I2,77=$$

$= 307,2$ кН.м

$M_р < M_п$, следовательно условие прочности удовлетворяется

3.I9. Расчет по прочности центрально растянутых железобетонных ,элементов кольцевого сечения со смешанной (ненапрягаемой и напрягаемой) продольной арматурой, равномерно распределенной по окружностям радиусов $r_а$ и $r_н$,рекомендуется производить по формуле (I8).

При расчете элементов с одной напрягаемой продольной арматурой в формуле (I8) необходимо положить $F_а = 0$, а при расчете элементов с обычной арматурой $F_н = 0$.

3.20.Расчет по прочности железобетонных элементов кольцевого сечения(I-ая группа предельных состояний)при совместном действии крутящего и изгибающего моментов может не производиться,если при всех сочетаниях внешних расчетных нагрузок трещины не образуются,а также при наличии трещин(как наклонных, так и нормальных), если удовлетворяется неравенство

$$M_р < M_п \qquad (26)$$

где $M_{кн}$ - крутящий момент, воспринимаемый элементом за счет нагельного действия продольной арматуры

$$M_{кн} = 4\pi r_a^2 R_p^н p_a \qquad (27)$$

p_a - полупериметр одного продольного стержня;

r_a - радиус окружности, проходящей через центры сечений продольной арматуры.

3.2I. Момент образования трещин железобетонных элементов кольцевого сечения с равномерно распределенной продольной арматурой и поперечной в виде односторонней одновитковой спирали, находящихся под одновременным воздействием изгиба и кручения рекомендуется определять по формуле:

$$M_т = M_б \frac{\sqrt{1+4c^2(1+\beta)}-1}{2c^2} \qquad (28)$$

где: $M_б = R_p^н \gamma W_o$; $c = \varkappa\gamma\alpha$, $\beta = \frac{M_o}{M_б}$; $\alpha = \frac{W_o}{W_{тк}}$

при $\sigma_{бн} \le R_p^н$ $\quad M_o = \sigma_{бн} W_o \gamma$

при $\sigma_{бн} > R_p^н$ $\quad M_o = R_p^н W_o \gamma + (\sigma_{бн} - R_p^н) W_o$

$$\varkappa = \frac{M_к}{M_{uк}} \; ; \quad \gamma = 2 - 0{,}4\frac{r_1}{r_2}$$

$R_p^н$ - нормативное сопротивление бетона осевому растяжению;

$\sigma_{бн}$ - напряжение в бетоне, создаваемое предварительным напряжением арматуры;

W_o - момент сопротивления приведенного кольцевого сечения при изгибе;

$$W_o = \frac{\pi}{\quad} r_2^3 (1-\alpha^4) + \frac{n r_a}{\quad}(F_a + F_н') \; ; \quad n = \frac{E_a}{E_{\quad}}$$

$W_{тк}$ - пластический момент сопротивления при кручении

$$W_{тк} = \frac{2}{3}\pi(1-\alpha^3)r_2^3 \quad , \quad \alpha = \frac{r_1}{r_2}$$

r_2 и r_1 - наружный и внутренний радиусы сечения;

r_a - см.п.3.20

3.22. Если условие (26) не удовлетворяется, достаточность принятых значений площадей продольной и поперечной арматуры, а также поперечных размеров элемента должна быть подтверждена расчетом. Прочность проверяемого сечения при одновременном действии изгиба и кручения достаточна, если удовлетворяются условия

$$M_{ик} < M_{икп}$$
$$M_к < M_{кп}$$

где

$M_{ик}$, $M_к$ - действующие совместно изгибающий и крутящий моменты создаваемые расчетными нагрузками;

$M_{икп}$, $M_{кп}$ - действующие совместно изгибающий и крутящий моменты, характеризующие несущую способность элемента.

Дополнительно должно удовлетворяться условие

$$M_к \le 0{,}1\pi R_{пр}(r_2^3 - r_1^3) \qquad (29)$$

Предельный крутящий момент элемента кольцевого сечения с равномерно распределенной по окружности радиуса $r_a(r_н)$ продольной арматурой и поперечной арматурой в виде охватывающей однозаходной односторонней спирали рекомендуется определять по формуле:

$$M_{uкп} = \left[(R_{uк} - \sigma_б)F r_{ср} + (R_н + \sigma'_н)F_н r_н + (R_а + \sigma'_а)F_а r_а\right] \frac{\sin \pi \alpha_к}{\pi} \qquad (30)$$

где

$R_{uк}$ -предельная прочность бетона на сжатие вдоль оси при изгибе с кручением;

$$R_{uк} = \frac{R^2_{пр} - R_{пр}\sigma_{бк}}{R_{пр} - \sigma_{бк}\sin^2 \alpha_c} + \sigma_б \qquad (31)$$

$$\sigma_б = \sigma_{бк}\cos^2 \alpha_c \;; \quad \sigma_{бк} = \frac{2 \varkappa M_{uкп}}{F r_{ср} \sin 2\alpha_c} \leq R_{пр} \qquad (32)$$

$$\alpha_к = \frac{R_н F_н + R_а F_а - \sigma_б F}{(R_{uк} - \sigma_б)F + (R_н + \sigma'_н)F_н + (R_а + \sigma'_а)F_а} \qquad (33)$$

Величина $\alpha_к$ определяемая по (33) ограничивается неравенствами: $\alpha_к \leq 0{,}3$ для элементов с обычной арматурой ($F_н = 0$), а также со смешанной при $\sigma_о < 200$ МПа; $\alpha_к \leq 0{,}5$ для элементов с одной напрягаемой арматурой ($F_а = 0$);

$\alpha_к \leq \frac{F_н + 0{,}9F_а}{2F_н + 3F_а}$ для элементов со смешанной арматурой при $\sigma_о > 200$ МПа

$r_{ср} = \frac{r_1 + r_2}{2}$

α_c определяется из уравнения

$$tg\alpha_c = tg\alpha_о \frac{r_{ср}}{r_2}, \quad \text{где} \quad tg\alpha_о = \frac{R_р W_о}{\varkappa a M_т}$$

Если $tg\alpha_о > tg\alpha^{пр}_о = \frac{r_2 - r_1}{2c}$, то $\alpha_о = \alpha^{пр}_о$

Если $\sigma'_c > 0$, то при $\eta \leq \eta_н$ $\sigma'_н = \frac{\eta - \eta_н}{\eta_н} R_а$

при $\eta > \eta_н$ $\sigma'_н = \frac{\eta - \eta_н}{\eta_н}\sigma'_c$

где: $\eta_н = \frac{R_а}{R_а + \sigma'_c}$ $\eta = \frac{M_{uкп}}{M_п} - \eta_н$

$M_п$ -изгибающий момент при изгибе, определяемый по формуле (I)

Если $\sigma_c' < 0$, то $\sigma_н' = \eta(R_a + \sigma_c') - R_a$

Величина σ_c' определяется по указаниям настоящего Руководства.

$$\sigma_a' = \frac{\eta - \eta_o}{\eta} R_{ac} \qquad \text{при} \quad \eta \leq \eta_o \ ;$$

$$\sigma_a' = \frac{\eta - \eta_o}{1 - \eta_o} R_{ac} \qquad \text{при} \quad \eta > \eta_o \ ,$$

где $$\eta_o = \frac{R_a}{R_a + R_{ac}}$$

Расчет рекомендуется производить методом последовательного приближения, в соответствии с которым необходимо:

а) задаться начальным значением $M_{икп}$ ($M_{икп} < M_п$) и по формуле (31) и (32) определить σ_δ и $R_{ик}$;

б) по полученным значениям σ_δ и $R_{ик}$ определить по формуле (30) момент $M_{икп}$;

в) по новому значению $M_{икп}$ скорректировать σ_δ и $R_{ик}$;

г) вновь определить по формуле (30) $M_{икп}$ и т.д.

Процесс приближения продолжается до тех пор, пока полученное в последнем подсчете значение $M_{икп}$ будет отличаться от его значения в предыдущем подсчете не более, чем на 5%.

При этом за расчетное следует принимать среднее значение моментов, полученных на последнем и предпоследнем приближениях. Задаваемую величину $M_{икп}$ можно принимать по кривым рис.3 в зависимости от $\varkappa$ и $\sigma_{\delta н}$.

При выполнении приближенных расчетов момент $M_{икп}$ допускается определять по формуле

$$M_{икп} = \eta M_п \qquad (34)$$

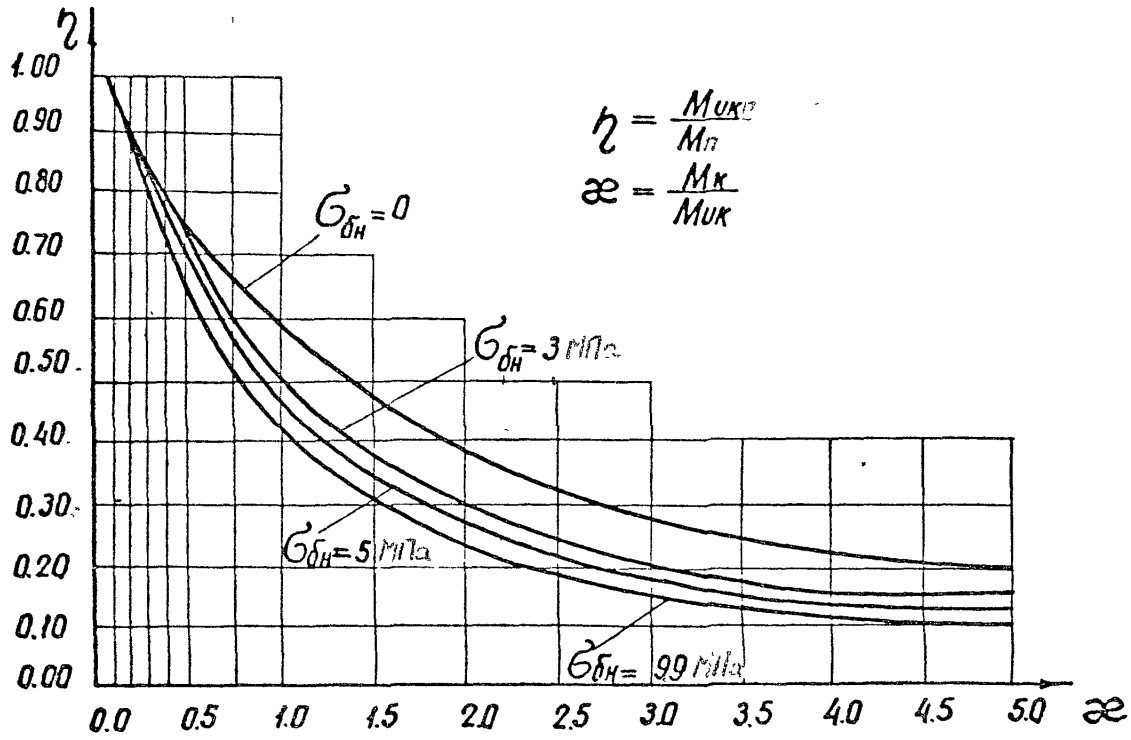


Рис. 3. График зависимости η от $æ$.

в которой коэффициент η принимается по кривым рис.3

Предельный крутящий момент для элементов, работающих на кручение с изгибом, рекомендуется определять по формуле

$$M_{кп} = M_{кн} + 2\pi r_{ср} r_x q_x \operatorname{ctg} \alpha_c \qquad (35)$$

где $$q_x = \frac{f_x R_x}{u}$$

f_x -площадь одного витка;

R_x -расчетное сопротивление поперечной арматуры растяжению ;

r_x -радиус витка ;

u -шаг витков ;

$M_{кн}$ -момент определяемый по формуле (27).

Пример расчета стойки свободностоящей промежуточной опоры на совместное действие изгиба и кручения по опорному сечению.

Изгибающий и крутящий моменты создаваемые расчетными нагрузками в опорном сечении равны соответственно:

$M_{ик}$ = 298 кН.м, $M_к$ = 45 кН.м

Характеристики сечения:

b =53 см; δ =7,24 см; r_a = $r_н$ = 23,5 см; r_x=24,3 см

Напряженная арматура 10 Ø 12 AIV $F_н$ = 11,31 см^2

Ненапряженная арматура 23 Ø 12 AV F_a = 26,013 см^2

R_a = $R_н$ = 500 МПа $R^н_н$ = 600 МПа

R_{ac} = $R_{нс}$=400 МПа E_a = $E_н$ = 2.10^5 МПа

Величина предварительного напряжения арматуры

$\sigma_{ок}$ = 0,9. $R^н_н$ = 0,9.600 = 540 МПа

Бетон тяжелый марки М400

$\bar{R}$ = 40 МПа ; R_o = 30 МПа ; R_{np} = 17,5 МПа

$E_б$ = 30000 МПа ; $R_p^н$ = 1,8 МПа

Коэффициенты условий работы $m_{бн}$ = 1,1 , $m_{б1}$ = 1,1

$m_{бн} m_{б1} R_{np}$ = 1,1 .1,1.17,5 = 21,175 МПа

Спираль Ø 4В-1 R_x = 350 МПа , f_x = 0,126 см^2,

u = 3,0 см

Площадь сечения кольца:

$$F_к = \pi \delta (д - \delta) = \pi \cdot 7{,}24(53-7{,}24) = 1040 \text{ см}^2$$

$$r_{ср} = \frac{1}{2}(д - \delta) = \frac{1}{2}(53-7{,}24) = 22{,}88 \text{ см}$$

$$n = n_a = n_н = \frac{E_a}{E_б} = \frac{2.10^5}{0{,}3.10^5} = 6{,}67$$

Площадь сечения бетона:

$$F = F_к - (F_a + F_н) = (1040-(26{,}013+11{,}31) = 1003 \text{ см}^2$$

Приведенная площадь бетона:

$$F_п = F_к + (n_a - 1)(F_н + F_a) = 1040+5{,}67(26{,}013+11{,}31) =$$

$$= 1252 \text{ см}^2$$

Потери предварительного напряжения

1) от релаксации:

$\sigma_1 = 0{,}1 \cdot \sigma_{ок}$ -20= 0,1.540-20= 34 МПа ;

2) От быстронатекающей ползучести:

$$\sigma_{бн} = \frac{(\sigma_{ок} - \sigma_1) F_н}{F_п} = \frac{(540-34).11{,}31}{1252} = 4{,}571 \text{ МПа}$$

так как $\frac{\sigma_{бн}}{R_o} = \frac{4{,}571}{30} = 0{,}152 < \alpha = 0{,}6$

$\sigma_2 = 50 \cdot \frac{\sigma_{бн}}{R_o} \cdot 0,85 = 50.0,I52.0,85 = 6,46$ МПа ;

3) от усадки бетона ;

$\sigma_3 = 35$ МПа

4) от ползучести бетона:

$\sigma_4 = 200.K\frac{\sigma_{бн}}{R_o} = 200.0,85.0,I52 = 25,8$ МПа

$\sigma_c = \sigma_{ок} - (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4) = 540 - (34+6,5+35+25,8) = 438,7$ МПа ;

$\gamma = 2 - 0,4\ \frac{r_1}{r_2} = 2 - 0,4\ \frac{I9,26}{26,5} = I,7I$;

$\varkappa = \frac{M_к}{M_{uк}} = \frac{45}{298} = 0,I5I$

$\alpha = \frac{r_1}{r_2} = \frac{I9,26}{26,5} = 0,727$

$W_o = \frac{\pi}{4} r_2^3 (1-\alpha^4) + \frac{n r_a}{2} (F_a + F_н) =$

$= \frac{\pi}{4} .26,5^3 (\ I-0,727^4) + \frac{6,67\ .23,5}{2} (26,0I3 + II,3I)$

$= I3453$ см^3

$W_{тк} = \frac{2}{3}\pi\ (I-\alpha^3)\ r_2^3 = \frac{2}{3}\pi\ (I-0,727^3).26,5^3 = 24000$см^3

$\alpha = \frac{W_o}{W_{тк}} = \frac{I3453}{24000} = 0,56I$

$c = \varkappa \cdot \gamma \cdot \alpha = 0,I5I.I,7I.0,56I = 0,I45$

$\rho_a = \frac{\pi \cdot d_a}{2} = \frac{\pi \cdot I,I3I}{2} = I,776$

$$M_{кн} = 4\pi r_a^2 R_p^н p_a = 4.\pi .23,5^2.I,8.I,776 = 22,2 \text{ кН.м}$$

$$\sigma_{бн} = \frac{\sigma_o F_н}{F_п} = \frac{438,7 .II,3I}{I252} = 3,963 \text{ МПа} > R_p^н$$

$$M_0 = R_p^н W_0 \gamma + (\sigma_{бн} - R_p^н) W_0 = I,8.I3453.I,7I+(3,963-I,8).$$

$$.I3453 = 70,5 \text{ кН.м}$$

$$M_б = R_p^н \gamma W_0 = I,8.I,7I.I3453 = 4I,4 \text{ кН.м}$$

$$\beta = \frac{M_0}{M_б} = \frac{70,5}{4I,4} = I,70$$

$$M_т = M_б \cdot \frac{\sqrt{1+4c^2(1+\beta)}-1}{2c^2} = 4I,4 \cdot \frac{\sqrt{I+4.0,I45^2(I+I,7)}-1}{2.0,I45^2} =$$

$$= I06,I \text{ кН.м}$$

$$M_к < 0,1 \pi R_{пр}(r_2^3 - r_1^3) = 0.I.\pi .2I,I75(26,5^3-I9,26^3) =$$

$$= 76,2 \text{ КН.м}$$

$$A_a = m_{ак} = I,I; \quad A_н = m_{ак} - \frac{\sigma_o}{R_н} = I,I - \frac{438,7}{500} = 0,223 ;$$

$$\Delta_a = I,5+6.I0^{-4}. R_a = I,5+6.I0^{-4}.500 = I,8 ;$$

$$\Delta_н = I,5+6.I0^{-4}. R_н = I,5+6.I0^{-4}.500 = I,8 ;$$

$$B_a = A_a \Delta_a = I,I.I,8 = I,98 ;$$

$$B_н = A_н \Delta_н = 0,223.I,8=0,40I ;$$

$$\alpha_к = \frac{A_a R_a F_a + (\sigma_o + A_н R_н) F_н}{R_{пр} F + (R_{ас} + B_a R_a) F_a + (R_{нс} + B_н R_н) F_н} =$$

$$= \frac{I,I\ .500.26,0I3 + (438,7+0,223.500).II,3I}{2I,I75.I003+(400+I,98.500).26,0I3+(400+0,40I.500)II,3I} =$$

$= 0,32$

$\sin(\ I80.0,32) = \sin(57^0 36') = 0,844$

$z_н = z_a = (\ 0,2+I,3\,\alpha_к\ )\,r_a = (0,2+I,3.0,32)23,5 = I4,48$

$K_a = A_a - B_a\alpha_к = I,I - I,98.0,32 = 0,466$

$K_н = A_н - B_н\,\alpha_к = 0,223 - 0,40I.0,32 = 0,095$

$$M_п = (R_{пр}F r_{ср} + R_{ас}F_a r_a + R_{нс}F_н r_н)\frac{\sin\pi\alpha_к}{\pi} + R_a F_a K_a z_a + R_н F_н K_н z_н =$$

$= (2I,I75.I003.22,88+400.26,0I3.23,5+400.II,3I.23,5)\cdot$

$\cdot\ \frac{0,844}{\pi} + 500.26,0I3.0,466\ .I4,48+500.II,3I.0,095.I4,48 =$

320,5 кН.м

В первом приближении $M_{икп}$ можно определить по формуле (34) :

$M_{икп} = \eta\, M_п$,где η берется из графика рис.3

В данном случае $\eta = 0,95$

тогда $M_{икп\,(зад.)} = \eta\, M_п = 0,95.320,5 = 304,5$ кН.м

$$tg\,\alpha_0 = \frac{R_p W_0}{\varkappa\, a\, M_т} = \frac{I,2.I3453}{0,I5I.0,56I.I06,I.I0^3} = I,8$$

$$\alpha_0 = 6I^0 \quad tg\,\alpha_0^{пр} = \frac{r_2 - r_1}{2c} = \frac{26,5-I9,26}{2.0,I45} = 24,97 > tg\,\alpha_0$$

$$tg\alpha_c = tg\alpha_0 \frac{\tau_{cp}}{\tau_2} = 1,8 \cdot \frac{22,88}{26,5} = 1,55 \qquad \alpha_c = 57^0 10'$$

$$\sin 2\alpha_c = \sin 114^0 20' = \cos 24^0 20' = 0,9112$$

$$\sigma_{bk} = \frac{2 \partial e M_{ukp}}{F \tau_{cp} \sin 2\alpha_c} = \frac{2.0,151.304,5.10^2}{1003.22,88.0,9112} = 4,398 \text{ МПа}$$

$$\sin^2\alpha_c = (\sin 57^0 10')^2 = 0,8403^2 = 0,7061$$

$$\sigma_b = \sigma_{bk} \cos^2\alpha_c = 4,398.0,5422^2 = 1,293 \text{ МПа};$$

$$R_{uk} = \frac{R_{np}^2 - R_{np}\sigma_{bk}}{R_{np} - \sigma_{bk}\sin^2\alpha_c} + \sigma_b = \frac{21,175^2 - 21,175.4,398}{21,175 - 4,398.0,7061} +$$

$$+ 1,293 = 20,953 \text{ МПа}$$

$$\sigma_c' = 400 - m_T \sigma_c = 400 - 1,1.438,7 = -82,6 \text{ МПа}$$

$$\eta_H = \frac{R_a}{R_a + \sigma_c'} = \frac{500}{500 - 82,6} = 1,2$$

$$\eta_0 = \frac{R_a}{R_a + R_{ac}} = \frac{500}{500 + 400} = 0,56 \qquad \sigma_c' < 0$$

$$\sigma_H' = \eta (R_a + \sigma_c') - R_a = 0,95(500 - 82,6) - 500 = 103,5 \text{ МПа};$$

$$\eta > \eta_0 \quad \sigma_a' = \frac{\eta - \eta_0}{1 - \eta_0} R_{ac} = \frac{0,95 - 0,56}{1 - 0,56} .400 = 354,5 \text{ МПа}$$

$$\alpha_k = \frac{R_H F_H + R_a F_a - \sigma_b F}{(R_{uk} - \sigma_b)F + (R_H + \sigma_H')F_H + (R_a + \sigma_a')F_a} =$$

$$= \frac{500.11,31 + 500.26,03 - 1,293.1003}{(20,953 - 1,293).1003 + (500 - 103,5).11,31 + (500 + 354,5)26,03} =$$

$$= 0,374$$

$$\alpha_к^п = \frac{F_н + 0,9 F_а}{2 F_н + 3 F_а} = \frac{II,3I+26,0I3.0,9}{2.II,3I+26,0I3} = 0,345$$

Принимаем $\alpha_к = 0,345$

$\sin(\pi.0,345) = \sin 62^0 30' = 0,8870$

$$M_{икп} = \left[(R_{ик} - \sigma_б) F r_{ср} + (R_н + \sigma_н') F_н r_н + (R_а + \sigma_а') F_а r_а\right] \frac{\sin \pi \alpha_к}{\pi} =$$

$$=/(20,953-I,293).I003.22,88+(500-I03,5)II,3I.23,5+$$

$$+(500+354,5).26,0I3.23,5/. \frac{0,8870}{\pi} = 304,8 \text{ Кн.м}$$

Так как $M_{икп\,(зад.)} = \eta M_п \cong M_{икп}$,подбор прекращаем и принимаем $M_{икп} = 304,8$ кН.м

$$q_x = \frac{f_x R_x}{u} = \frac{0,I26.350}{3} = I4,7$$

$$ctg\, \alpha_c = ctg\, 57^0 I0' = 0,6453$$

$$M_{кп} = M_{кн} + 2\pi r_{ср} r_x q_x ctg\, \alpha_c =$$

$$=22,2+2.\pi .22,88.24,3.I4,7.0,6453.I0^{-3} = 55,3 \text{ кН.м}$$

3.23. Главные растягивающие напряжения в бетоне железобетонных элементов кольцевого сечения, создаваемые крутящими моментами и перерезывающими силами рекомендуется определять по формуле:

$$\sigma_{гр} = -\frac{\sigma_{бн}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{бн}}{2}\right)^2 + \tau^2} \qquad (36)$$

где $$\tau = \tau_к + \tau_а \qquad (37)$$

$$\tau_к = \frac{M_к r_2}{J_{рп}} \qquad (38)$$

$J_{рп}$ - приведенный полярный момент инерции

$$J_{рп} = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4) + (n_а - 1)F_а r_а^2 + (n_н - 1)F_н r_н^2 \qquad (39)$$

$$n_а = \frac{E_а}{E_б}, \quad n_н = \frac{E_н}{E_б}$$

$$\tau_а = \frac{4}{3}\frac{Q}{F_п}\frac{1+\alpha+\alpha^2}{1+\alpha^2} \qquad (40)$$

где $$\alpha = \frac{r_1}{r_2}$$

3.24. Расчет по прочности элементов железобетонных конструкций прямоугольных, тавровых и др.сечений должен производиться в соответствии со СНиП П-21-75.

3.25. В настоящем Руководстве дополнительно приводится метод расчета прочности предварительно напряженных и ненапряженных элементов прямоугольных и трапецоидальных сечений, с учетом нелинейной работы бетона и арматуры (см.п.п. 3.26-3.31), более строго отражающий напряженное состояние при работе на изгиб с центральным сжатием или растяжением. Расчетные уравнения метода записаны для 2-х случаев, соответствующих двум качественно разным его состояниям - когда элемент в предельной стадии имеет трещины и когда работает без трещин. Несмотря на внешнюю сложность эти уравнения более просты по построению при расчете, чем общие уравнения СНиП П-21-75 (п.3.28) и потому рекомендуются к преимущественному применению при расчете

конструкций массового производства.

3.26. Расчет изгибаемых элементов прямоугольного сечения, когда внешний момент действует в плоскости оси симметрии сечения при наличии нормальных к продольной оси элемента трещин производится из следующих условий:

а) Если $\varepsilon_0 < \varepsilon_m$

$$M \le M_n = 0{,}5 R_{np} b x^2 \left(1 - 0{,}1 \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_m^2}\right) + \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} \left(h_{oi} - x\right) \qquad (41)$$

При этом, высота сжатой зоны x определяется из уравнения

$$R_{np} b x \left(1 - 0{,}25 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_m}\right) - \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} = 0 \qquad (42)$$

где f_{ai} - площадь сечения i-го стержня арматуры;

$$\varepsilon_0 = \frac{2 R_{np}}{0{,}717 E_b};$$

ε_m - относительная деформация наиболее сжатого волокна бетона.

Напряжения в арматурных стержнях определяются:

для арматурных сталей классов А-I, А-II, А-III, имеющих площадку текучести

$\sigma_{ai} = \varepsilon_{ai} E_{ai}$ при $\varepsilon_{ai} E_{ai} < R_a$

$\sigma_{ai} = R_a$ при $\varepsilon_{ai} E_{ai} \ge R_a$

где ε_{ai} - относительная деформация i-го стержня продольной арматуры:

$$\varepsilon_{ai} = \frac{(h_{oi} - x)}{x} \varepsilon_m$$

для арматурных сталей, которые не имеют площадки текучести - по диаграмме $\sigma_a - \varepsilon_a$ согласно приложению 5; b, h_{oi}, x - в соответствии с обозначениями на рис. 4;

б) если $\varepsilon_0 \ge \varepsilon_m$

$$M \le \frac{1}{60}(25 R_{np} + 2C) b x^2 + \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} \left(h_{oi} - x\right) \qquad (43)$$

Высота сжатой зоны x из уравнения

$$\left(\frac{2}{3}R_{пр}+\frac{c}{12}\right)bx-\sum_{i=1}^{n}\sigma_{ai}f_{ai}=0 \qquad (44)$$

где $C=\dfrac{0{,}2\dfrac{\varepsilon_m}{\varepsilon_E}+\dfrac{\varepsilon_E}{\varepsilon_m}-2}{\left(1-\dfrac{\varepsilon_E}{\varepsilon_m}\right)^2}R_{пр}$; $\varepsilon_E=\dfrac{0{,}2R_{пр}}{E_б}$

3.27. Расчет внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения имеющих нормальные трещины в растянутой зоне ($x<h$), когда внешняя сила действует в плоскости оси симметрии сечения, может производиться:

а) если $\varepsilon_o<\varepsilon_m$ по (45) и (46)

$$N_p e_o \le M_п = 0{,}5R_{пр}bx^2\left(1-0{,}1\frac{\varepsilon_o^2}{\varepsilon_m^2}\right)+\sum_{i=1}^{n}\sigma_{ai}f_{ai}(h_{oi}-x)+N_p\left(\frac{h}{2}-x\right) \qquad (45)$$

$$R_{пр}bx\left(1-0{,}25\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_m}\right)-\sum_{i=1}^{n}\sigma_{ai}f_{ai}-N_p=0 \qquad (46)$$

б) если $\varepsilon_o \gg \varepsilon_m$ по (47) и (48)

$$N_p e_o \le M_п=\frac{1}{60}(25R_{пр}+2c)bx^2+\sum_{i=1}^{n}\sigma_{ai}f_{ai}(h_{oi}-x)+N_p\left(\frac{h}{2}-x\right) \qquad (47)$$

$$\frac{1}{12}(8R_{пр}+c)bx-\sum_{i=1}^{n}\sigma_{ai}f_{ai}-N_p=0 \qquad (48)$$

3.28. Расчет внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения, когда внешняя сила действует в плоскости оси симметрии сечения и имеет место условие $x \gg h$ (растянутая зона отсутствует), рекомендуется производить:

а) если $\varepsilon_o < \varepsilon_m$, по (49)

$$N_p e_o \le M_n = \frac{1}{20} R_{np} b x_o^2 (9 + 3\nu_o - 3\nu_o^2 + \nu_o^3) + \frac{1}{2} R_{np} b (h^2 - x_o^2) + \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} (h_{oi} - h) - N_p \frac{h}{2} \quad (49)$$

Параметр ν_o , характеризующий распределение деформаций по высоте сечения , определяется из урвнения (50)

$$\frac{1}{4} R_{np} b x_o (3 + 3\nu_o - 3\nu_o^2 + \nu_o^3) + R_{np} b (h - x_o) - \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} - N_p = 0 \quad (50)$$

Здесь $\nu_o = \frac{\varepsilon_\delta}{\varepsilon_o}$; $\varepsilon_o = \frac{2 R_{np}}{0{,}717 E_\delta}$

Высота участка сечения, в пределах которого $\sigma_\delta < R_{np}$:

$$x_o = \frac{1 - \nu_o}{\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_o} - \nu_o} h \quad (51)$$

Остальные обозначения те же, что и в уравнениях (47) и (48). σ_{ai} определяется по ε_{ai} , которая находится по формуле (52)

$$\varepsilon_{ai} = \varepsilon_m - \frac{h_{oi}}{h} (\varepsilon_m - \nu_o \varepsilon_o) \quad (52)$$

б) если $\varepsilon_o \geqslant \varepsilon_m$, по (53)

$$N_p e_o \le M_n = \frac{1}{12} R_{np} b h^2 (5 + 2\nu - \nu^2) + \frac{1}{60} c b h^2 (2 - \nu - 4\nu^2 + 3\nu^3) + \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} (h_{oi} - h) - \frac{1}{2} N_p \cdot h \quad (53)$$

Неизвестный параметр $\nu = \frac{\varepsilon_\delta}{\varepsilon_m}$ определяется из уравнения (54):

$$\frac{1}{3} R_{np} b h (2 + 2\nu - \nu^2) + \frac{1}{12} c b h (1 + \nu - 5\nu^2 + 3\nu^3) - \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} - N_p = 0 \quad (54)$$

σ_{ai} определяется по ε_{ai} , которая находится по формуле (55):

$$\varepsilon_{ai} = \varepsilon_m \left[1 - \frac{h_{oi}}{h} (1 - \nu) \right] \quad (55)$$

Принятые в уравнениях (53) и (54) обозначения те же, что и в (47), (48).

3.29. Расчет прочности внецентренно растянутого железобетонного элемента прямоугольного сечения со сквозными трещинами (сжатая зона бетона отсутствует) от нагрузки, действующей в одной из плоскостей симметрии сечения, нормального к продольной оси элемента, производится путем решения уравнений (56) и (57)

Предельный момент определяется по формуле (56)

$$M_p \leqslant M_n = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} h_{oi} - \frac{1}{2} N_p h \qquad (56)$$

При этом, параметр $\gamma_a = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{an}}$, необходимый для определения напряжений σ_{ai} находится из уравнения (57); методом последовательного приближения

$$\sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} - N_p = 0 \qquad (57),$$

где: σ_{ai} определяется по ε_{ai}

$$\varepsilon_{ai} = \varepsilon_{an}\left[\gamma_a + \frac{h_{oi}}{h_o}(1-\gamma_a)\right] \qquad (58)$$

здесь ε_{an} - предельная относительная деформация арматуры;

ε_a - относительная деформация наиболее растянутого края сечения.

3.30. Расчет предварительно-напряженных элементов по методу изложенному в п.п. 3.25-3.3I настоящего Руководства производится в следующем порядке:

I. Определяются относительные деформации, возникающие в результате предварительного напряжения в ненапрягаемой и напрягаемой арматуре $\varepsilon_a^н$ и $\varepsilon_н^н$

$$\varepsilon_a^н = \frac{\sigma_o F_н}{E_б F_б + E_a F_a} \qquad (59)$$

$$\varepsilon_н^н = \frac{\sigma_o}{E_н} \qquad (60)$$

где σ_o – предварительное напряжение в напрягаемой арматуре с учетом всех потерь.

2) По начальному приближению высоты сжатой зоны бетона определяются относительные деформации в бетоне и арматуре, возникшие от внешней нагрузки (без предварительного напряжения).

3) Определяются суммарные деформации, полученные в п.I и п.2 (то есть: $\varepsilon_{ai} + \varepsilon_{ai}^н$).

4) По полученным суммарным деформациям определяются соответствующие им напряжения и их значения подставляются в уравнение равновесия (в уравнение суммы проекций всех сил на ось элемента). Если уравнение удовлетворяется, то переходим к п.5, если нет – расчет повторяется с п.2.

5) Определяется предельный момент.

6) Расчет элемента без предварительного напряжения производится в том же порядке, но п.I и п.3 опускаются.

Пример расчета на прочность внецентренно сжатого элемента прямоугольного сечения удовлетворяющего условию $x > h$ (все сечение сжато).

Выполнена проверка сечения стойки СВ-6 (черт. № 7209тм-9) анкерно-угловой опоры с расщепленными оттяжками, расположенного на отметке поясов нижней траверсы. Величины расчетных усилий приняты такими, чтобы обеспечивалось сжатие всего сечения

N_p = 2190 кН M_p = 32 кН.м

Бетон вибрированный М 300:

$R_{пр}$ = I3,5 МПа ; $\bar{R}$ = 30 МПа ; R_o = 22,5 МПа

$E_б$ = 26000 МПа ; ε_m = 0,0025

Арматура:

напрягаемая 8 Ø I4 А-IУ $F_н$ = I2,3I см^2

ненапрягаемая 8 Ø I2 А-IУ $F_а$ = 9,05 см^2

$R_а = R_н$ = 500 МПа; $R^н_н$ = 600 МПа;

$E_а = E_н = 2 \cdot I0^5$ МПа

Размеры сечения и расположение арматуры даны на рис.5

Граница нелинейного участка зависимости $\sigma_б - \varepsilon_б$:

$$\varepsilon_o = \frac{2 R_{пр}}{0,7I7\ E_б} = \frac{2 \cdot I3,5}{0,7I7 \cdot 0,26 \cdot I0^5} = 0,00I45 <$$

$$< \varepsilon_m = 0,0025$$

Площадь сечения $F = b \cdot h$ = 37x37 = I369 см^2

Площадь бетона $F_б = F - (F_а + F_н)$ = I369-(9,05+I2,3I) = I347,64 см^2

$$n_а = n_н = n = \frac{E_а}{E_б} = \frac{2 \cdot I0^5}{0,26 \cdot I0^5} = 7,7$$

Приведенная площадь бетона

$$F_п = F + (n-1)(F_а + F_н) = I369+6,7(9,05+I2,3I) = I5I2 \text{ см}^2$$

Потери предварительного напряжения.

Контролируемая величина предварительного напряжения продольной арматуры

$$\sigma_{ок} = \frac{N_{ок}}{F_н} = \frac{400}{I2,3I} = 324,9 \text{ МПа}$$

где $N_{ок}$ - принятое (черт. № 7209тм-9) общее усилие натяжения арматуры

а) первые потери

От релаксации -

$$\sigma_1 = 0{,}1\ \sigma_{ок} - 20 = 0{,}1 \cdot 324{,}9 - 20 = 12{,}5 \text{ МПа}$$

От быстронатекающей ползучести бетона -

$$\sigma_{бн} = \frac{(\sigma_{ок} - \sigma_1) F_н}{F_п} = \frac{(324{,}9 - 12{,}5) \cdot 12{,}31}{1512} = 2{,}54 \text{ МПа}$$

$$\frac{\sigma_{бн}}{R_о} = \frac{2{,}54}{22{,}5} = 0{,}113 < \alpha = 0{,}6, \text{ поэтому}$$

$$\sigma_2 = 50 \frac{\sigma_{бн}}{R_о} \cdot 0{,}85 = 4{,}8 \text{ МПа}$$

б) Вторые потери

От усадки бетона

$$\sigma_3 = 35 \text{ МПа}$$

От ползучести бетона

$$\sigma_4 = 200\ K \frac{\sigma_{бн}}{R_о} = 200 \cdot 0{,}85 \cdot \frac{2{,}54}{22{,}5} = 19{,}22 \text{ МПа}$$

Так как суммарная величина всех потерь меньше 100 МПа, то согласно п.1.26 СНиП II-21-75 они принимаются равными 100 МПа.

Предварительное напряжение после проявления всех потерь

$$\sigma_о = 324{,}9 - 100 = 224{,}9 \text{ МПа}$$

Относительные деформации, возникающие в напрягаемой и ненапрягаемой арматуре от предварительного напряжения, соответственно равны:

$$\varepsilon_н^н = \frac{\sigma_о}{E_н} = \frac{224{,}9}{2 \cdot 10^5} = 0{,}001125$$

$$\varepsilon_а^н = \frac{\sigma_о F_н}{E_б F_б + E_а F_а} = \frac{224{,}9 \cdot 12{,}31}{(0{,}26 \cdot 1347{,}64 + 2 \cdot 9{,}05) \cdot 10^5} = 0{,}000075$$

Относительные деформации, возникшие от внешней нагрузки определяются по формуле (52);

$$\varepsilon_{ai} = \varepsilon_m - \frac{h_{oi}}{h}\left(\varepsilon_m - \nu_o \varepsilon_o\right) \qquad (52)$$

На рис.6 изображена эпюра деформаций и напряжений по высоте сечения элемента.

По значениям суммарных деформаций, согласно п.3.30 настоящего Руководства по диаграмме $\sigma - \varepsilon$ рис.7 определяются напряжения σ_{ai}.

Для решения уравнения равновесия (50) следует задаваться параметром ν_o. Предельный момент находится по формуле (49) В нашем примере уравнение (50) удовлетворяется при $\nu_o = 0{,}5$, при этом из формулы (5I):

$$x_o = \frac{1-\nu_o}{\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_o} - \nu_o} \cdot h = \frac{1-0{,}5}{\frac{0{,}0025}{0{,}00145} - 0{,}5} \cdot 37 = 15{,}10 \text{ см}$$

Все вычисления, связанные с определением высоты сжатой зоны и предельного момента M_n сведены в таблицу:

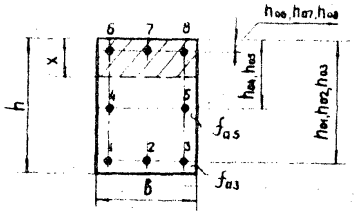


Рис. 4. Геометрические параметры прямоугольного сечения.

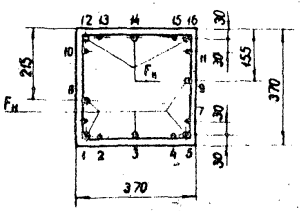


Рис.5. Размеры сечения и расположение арматуры в сечении стойки опоры, СВ-6 на отметке поясов нижней траверзы.

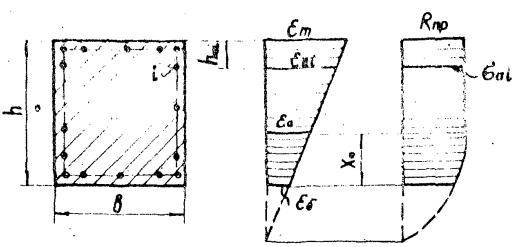


Рис.6. Эпюра деформаций и напряжений по высоте сечения элемента.

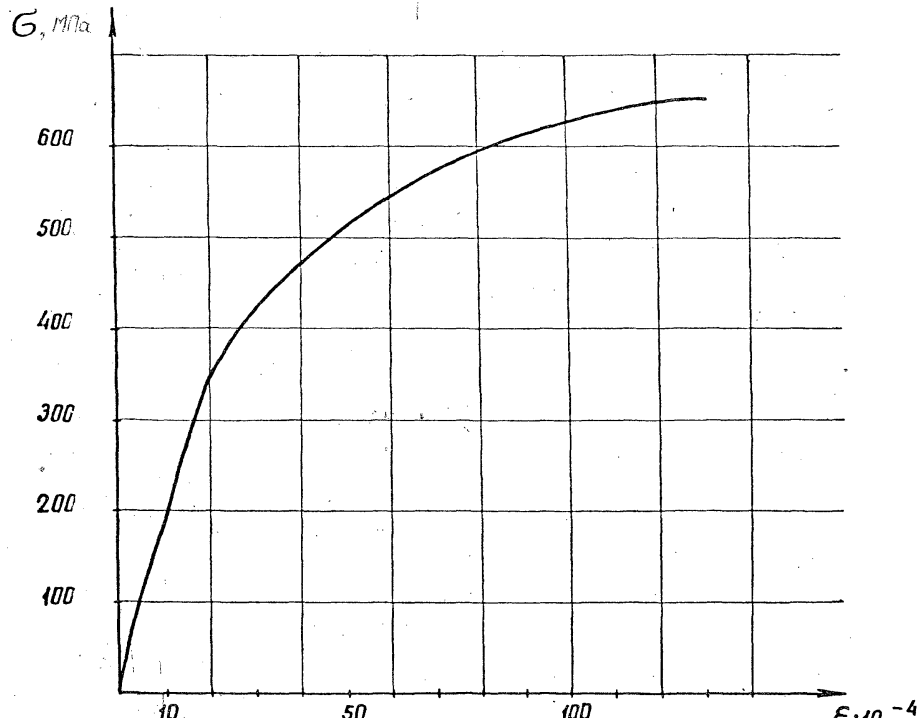


Рис.7. Диаграмма σ–ε построенная для расчетных сопротивлений арматуры класса А-IУ.

Все вычисления, связанные с определением высоты сжатой зоны и предельного момента M_n сведены в таблицу

Номер стержня i	f_{ai} $см^2$	h_{oi} см	Относит. деформ. $\varepsilon_{ai}=\varepsilon_m\left(1-\frac{h_{oi}}{h}\right)+\varepsilon_o)_c\frac{h_{oi}}{h}$	$\varepsilon_{ai}^{н}$	$\sum\varepsilon_{ai}$	σ_{ai} МПа	$\sigma_{ai}f_{ai}$ кН	$h_{oi}-h$	$\sigma_{ai}f_{ai}(h_{oi}-h)$ кН.м
I,3,5	4,62	34	-0,000869	0,00II25	0,000256	5I,2	23,65	-3	-0,7
2,4	2,26	34	-0,000869	-0,000075	-0,000944	-I88,8	-42,67	-3	I,3
6,7	2,26	3I	-0,00I0I0	-0,000075	-0,00I085	-2I0,0	-47,46	-6	2,8
8	I,54	2I,5	-0,00I468	0,00II25	-0,000343	-68,0	-I0,58	-I5,5	I,6
9	I,54	I5,5	-0,00I756	0,00II25	-0,00063I	-I26,3	-I9,45	-2I,5	4,2
I0,II	2,26	6	-0,002210	-0,000075	-0,002285	-365,0	-82,49	-3I	25,6
I3,I5	2,26	3	-0,002350	-0,000075	-0,002425	-375,0	-84,75	-34	28,8
I2,I4, I6	4,62	3	-0,002360	0,00II25	-0,00I235	-235,0	-I08,57	-34	36,9

$\sum_{i=1}^{n} = -372,32$ $\sum_{i=1}^{n} = I00,5$

Подставим в уравнение (50):

$$\frac{1}{4}R_{пр}\,b\,x_0(3+3\nu_0-3\nu_0^2+\nu_0^3)+R_{пр}\,b(h-x_0)-\sum_{i=1}^{n}\sigma_{ai}f_{ai}-N_p=0$$

$$\frac{1}{4}\cdot 13{,}5\cdot 37\cdot 15{,}1(3+3\cdot 0{,}5-3\cdot 0{,}5^2+0{,}5^3)\cdot 10^{-1}+13{,}5\cdot 37\cdot$$

$$(37-15{,}1)\cdot 10^{-1}+372{,}32-2190\cong 0$$

Момент из уравнения (49):

$$M_п=\frac{1}{20}R_{пр}\,b\,x_0^2(9+3\nu_0-3\nu_0^2+\nu_0^3)+\frac{1}{2}R_{пр}\,b(h^2-x_0^2)+$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sigma_{ai}f_{ai}(h_{oi}-h)-N_p\frac{h}{2}=\frac{1}{20}13{,}5\cdot 37\cdot 15{,}1^2\cdot$$

$$\cdot(9+3\cdot 0{,}5-3\cdot 0{,}5^2+0{,}5^3)\cdot 10^{-3}+\frac{1}{2}\cdot 13{,}5\cdot 37\cdot(37^2-15{,}1^2)\cdot$$

$$10^{-3}+100{,}5-2190\cdot\frac{37}{2}\cdot 10^{-2}=36{,}5\ \text{кН.м}$$

Пример расчета на прочность внецентренно сжатого элемента прямоугольного сечения, удовлетворяющего условию $x<h$.

Выполнена проверка вибрированной стойки СВ-4 (чертеж № 7269тм-7) промежуточной опоры.

Усилия создаваемые расчетными нагрузками в опорном сечении

$M_p = 158$ кН.м $\qquad N_p = 50$ кН

Характеристики сечения

$b = 37$ см; $\qquad h = 38$ см; $\qquad a = a' = 3{,}0$ см

Продольная арматура:

напрягаемая 8 Ø 14 А IУ $\qquad F_н = 12{,}31$ см^2

ненапрягаемая 8 Ø 12 А IУ $\qquad F_a = 9{,}05$ см^2

$R_a = R_н = 500$ МПа $\qquad R_н^н = 600$ МПа

$E_a = E_н = 2\cdot 10^5$ МПа

Бетон тяжелый марки М 300

$\bar{R}$ = 30 МПа ; R_o = 22,5 МПа ; $R_{пр}$ = 13,5 МПа

$E_б$ = 26000 МПа; ε_m = 0,0025

Размеры сечения и распределение арматуры даны на рис.8

Коэффициенты условий работы

$m_{б1}$ = 1,1; $m_{бн}$ = 1,0

$m_{б1} \cdot m_{бн} \cdot R_{пр}$ = 1,1·1,0·13,5 = 14,85 МПа

Величина контролируемого напряжения арматуры

$\sigma_{ок} = 0,9\ R_н^н = 0,9 \cdot 600 = 540$ МПа

$$n_a = n_н = n = \frac{E_a}{E_н} = \frac{2 \cdot 10^5}{0,26 \cdot 10^5} = 7,7$$

Площадь сечения бетона

$$F_б = b h - (F_a + F_н) = 37 \cdot 38 - (9,05 + 12,31) = 1384,64 \text{ см}^2$$

Приведенная площадь бетона

$$F_п = F_c + (n-1)(F_a + F_н) = 1406 + 6,7 \cdot (9,05 + 12,31) = 1550 \text{ см}^2$$

Потери предварительного напряжения арматуры

а) первые потери

От релаксации

$$\sigma_1 = 0,1 \cdot \sigma_{ок} - 20 = 0,1 \cdot 540 - 20 = 34 \text{ МПа}$$

От быстронатекающей ползучести

$$\sigma_{бн} = \frac{(\sigma_{ок} - \sigma_1) F_н}{F_п} = \frac{(540 - 34) \cdot 12,31}{1550} = 4,019 \text{ МПа}$$

Так как $\frac{\sigma_{бн}}{R_o} = \frac{4,019}{22,5} = 0,179 < \alpha = 0,6$, то

$$\sigma_2 = 50 \cdot \frac{\sigma_{бн}}{R_o} \cdot 0,85 = 42,5 \cdot 0,179 = 7,6 \text{ МПа}$$

б) Вторые потери

От усадки бетона

$$\sigma_3 = 35 \text{ МПа}$$

От ползучести бетона

$$\sigma_4 = 200 \frac{\sigma_{6н}}{R_o} \cdot K = 200 \cdot 0,179 \cdot 0,85 = 30,4 \text{ МПа}$$

Суммарная величина потерь напряжений

$$\sigma_п = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 = 34 + 7,6 + 35 + 30,4 = 107 \text{ МПа}$$

Предварительное напряжение после проявления всех потерь

$$\sigma_o = \sigma_{ok} - \sigma_п = 540 - 107 = 433 \text{ МПа}$$

Относительная деформация напрягаемой арматуры

$$\varepsilon_н^н = \frac{433}{2 \cdot 10^5} = 0,00217,$$

Ненапрягаемой -

$$\varepsilon_a^н = \frac{\sigma_o F_н}{E_б F_б + E_a F_a} = \frac{433 \cdot 12,31}{(0,26 \cdot 1384,64 + 2 \cdot 9,05) \cdot 10^5} = 0,00141$$

Граница нелинейного участка зависимости $\sigma_б - \varepsilon_б$

$$\varepsilon_o = \frac{2 R_{пр}}{0,717 E_б} = \frac{2 \cdot 14,85}{0,717 \cdot 0,26 \cdot 10^5} = 0,00159 < \varepsilon_m = 0,0025$$

Относительные деформации, возникающие от внешней нагрузки определяются по формуле:

$$\varepsilon_{ai} = \frac{\varepsilon_m (h_{oi} - x)}{x}$$

На рис.9 изображена эпюра деформаций и напряжений по высоте сечения элемента.

По значениям суммарных деформаций, согласно п.3.30 настоящего Руководства по диаграмме $\sigma - \varepsilon$ рис.7 определяются напряжения σ_{ai}.

Для решения уравнения равновесия (46) следует задаваться параметром x. Предельный момент находится по формуле (45). В нашем примере уравнение (46) удовлетворяется при X=12,1 см.

Все вычисления, связанные с определением высоты сжатой зоны и предельного момента $M_п$ сведены в таблицу:

Номер стержня i	f_{ai} см^2	h_{oi} см	Относит. деформ. $\left(\frac{h_{oi}}{x}-1\right)\varepsilon_m$	$\varepsilon^{н}_{ai}$	$\sum \varepsilon_{ai}$	σ_{ai} МПа	$\sigma_{ai} f_{ai}$ кН	$h_{oi}-x$ см	$\sigma_{ai} f_{ai}(h_{oi}-x)$ кН.м
I,3,5	4,62	35	0,00473	0,002I7	0,0069	570	263,34	22,9	60,3
2,4	2,26	35	0,00473	-0,000I4I	0,00459	500	II3,00	22,9	25,9
6,7	2,26	32	0,004II	-0,000I4I	0,00397	470	I06,22	I9,9	2I,I
8	I,54	22	0,002045	0,002I7	0,0042I5	480	73,92	9,9	7,3
9	I,54	I6	0,000806	0,002I7	0,00298	4I7,5	64,30	3,9	2,5
I0.II	2,26	6	-0,00I26	-0,000I4I	-0,00I40I	-270	-6I,02	-6,I	3,7
I3,I5	2,26	3	-0,00I88	-0,000I4I	-0,00202I	-340	-76,84	-9,I	7,0
I2,I4,I6	4,62	3	-0,00I88	0,002I7	0,00029	58	26,78	-9,I	-2,4
						$\sum_{i=1}^{n}$ =	509,70	$\sum_{i=1}^{n}$ =	I25,4

Проверим подстановкой в уравнение (46):

$$R_{пр} b x \left(1 - 0.25 \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_m}\right) - \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} - N_p = 0$$

$$14,85 \cdot 37 \cdot 12,1 \cdot \left(1 - 0,25 \cdot \frac{0,00159}{0,0025}\right) \cdot 10^{-1} - 509,7 - 50 \cong 0$$

Предельный момент по формуле (45)

$$M_n = 0,5 R_{пр} b x^2 \left(1 - 0,1 \frac{\varepsilon_o^2}{\varepsilon_m^2}\right) + \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} \left(h_{oi} - x\right) + N_p \left(\frac{h}{2} - x\right) =$$

$$= 0,5 \cdot 14,85 \cdot 37 \cdot 12,1^2 \left(1 - 0,1 \frac{0,00159^2}{0,0025^2}\right) 10^{-3} + 125,4 +$$

$$+ 50 \cdot \left(\frac{38}{2} - 12,1\right) \cdot 10^{-2} = 167,4 \text{ кН.м}$$

Пример расчета на прочность внецентренно растянутого железобетонного элемента прямоугольного сечения когда X = 0 (все сечение растянуто).

Выполнена проверка стойки фундаменты Ф2-А по типовому проекту серии 3.407-115, чертежи КЖ3 и КЖ4.

Характеристики сечения даны на рис.10. Арматура ненапрягаемая 8Ø 25 А-Ш. Предельная относительная деформация (принятая в расчете) $\varepsilon_{an} = 0,015$

Расчетная величина растягивающей силы

$$N_p = 1424 \text{ кН}$$

Из уравнения (57) методом последовательных приближений находим γ_a.

Для арматуры класса А-Ш принимается диаграмма Прандтля с площадкой текучести $\sigma_т = R_a^н = 400$ МПа

Относительная деформация, соответствующая пределу пропорциональности

$$\varepsilon_т = \frac{400}{2 \cdot 10^5} = 0,002$$

Уравнение (57) удовлетворяется при $\xi_a = 0{,}1$

Все вычисления сведены в таблицу:

Номера стержней	f_{ai} см^2	$\varepsilon_{ai} = \varepsilon_{a1}[\xi_a + \frac{h_{ai}}{h_a}(1-\xi_a)]$	ε_a''	σ_{ai} МПа	$\sigma_{ai} f_{ai}$ кН	h_{ai}	$\sigma_{ai} f_{ai} h_{ai}$ кН.м
1,2,3	14,73	0,0015	0	300	441,90	4	17,7
4	4,909	0,00614	0	400	196,36	15	29,5
5	4,909	0,01036	0	400	196,36	25	49,1
6,7,8	14,73	0,015	0	400	589,20	36	212,1
					$\sum_{i=1}^{n} = 1423{,}82$		$\sum_{i=1}^{n} = 308{,}4$

Делаем проверку подстановкой в уравнение (57):

$$\sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} - N_p = 1423{,}82 - 1424 \approx 0$$

Предельный момент определяем по (56):

$$M_n = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} h_{ai} - \frac{1}{2} N_p h = 308{,}4 - 1424 \cdot \frac{40}{2} \cdot 10^{-2} =$$

$$= 23{,}6 \text{ кН.м}$$

3.31. Расчет плит грибовидных подножников, когда изгибающий момент действует в плоскости оси симметрии сечения параллельной сторонам плиты, в общем случае, т.е. при любых значениях высоты сжатой зоны, в зависимости от направления изгибающего момента рекомендуется производить:

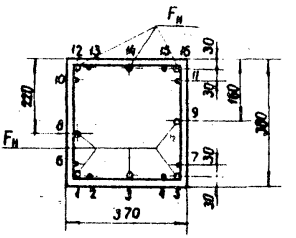


Рис.8. Размеры сечения и расположение арматуры в сечении стойки опоры СВ-4 на отметке опорного сечения.

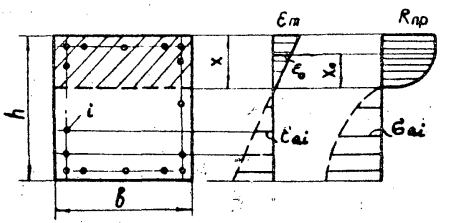


Рис.9. Эпюра деформаций и напряжений по высоте сечения элемента.

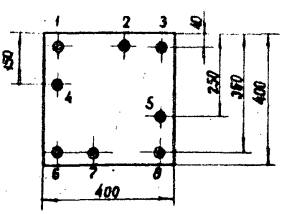


Рис.10. Размеры сечения и расположение арматуры в сечении стойки фундамента Ф2-А.

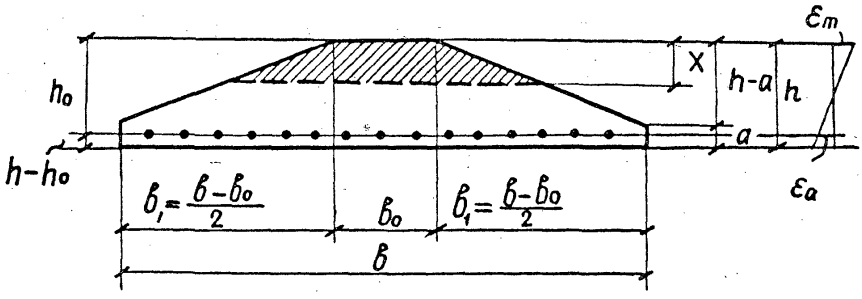


Рис.II. Расчетное сечение плиты сжатого грибовидного подножника.

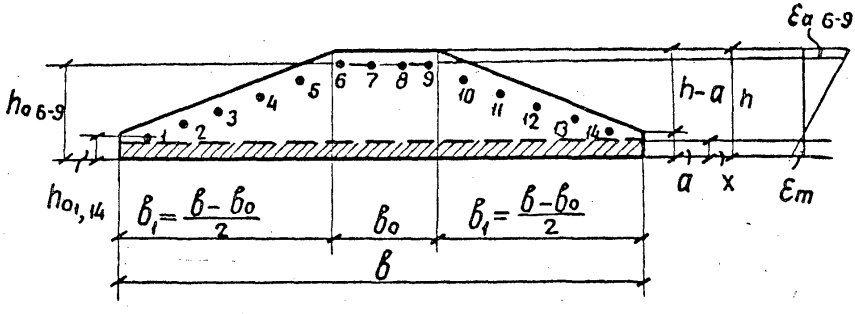


Рис. I2. Расчетное сечение плиты выдергиваемого гибовидного подножника

а) сжатая зона расположена в верхней части сечения (рис.II).

Предельный изгибающий момент определяется по формуле

$$M_n = R_{np}\left[\frac{(b-b_o)x^3}{6(h-a)} + \frac{b_o x^2}{2}\right] + \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} x_{ai} \qquad (61)$$

При этом, высота сжатой зоны x определяется из уравнения

$$x^2 + Ax - B\sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} = 0 \qquad (62)$$

где $A = \frac{2(h-a)b_o}{b-b_o}$; $B = \frac{2(h-a)}{R_{np}(b-b_o)}$

Принятые обозначения даны на рис.II

б) Сжатая зона расположена в нижней части сечения (рис.I2).

Прямоугольный участок отсутствует ($a = 0$).

Предельный изгибающий момент определяется по формуле

$$M_n = R_{np}\left[\frac{bx^2}{2} - \frac{(b-b_o)x^3}{6h}\right] + \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai}(h_{oi} - x) \qquad (63)$$

высота сжатой зоны из уравнения

$$x^2 - Ax + B\sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} = 0 \qquad (64)$$

где $A = \frac{2bh}{b-b_o}$; $B = \frac{2h}{R_{np}(b-b_o)}$

Сечение имеет прямоугольный участок ($a \neq 0$).

Если высота сжатой зоны находится в пределах прямоугольного участка сечения ($x \leq a$), то предельный момент определяется по формуле

$$M_n = \frac{1}{2} R_{np} b x^2 + \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai}(h_{oi} - x) \qquad (65)$$

а высота сжатой зоны – из уравнения

$$R_{пр} b x - \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} = 0 \qquad (66)$$

Если высота сжатой зоны находится в пределах трапецевидного участка сечения ($x > a$), то предельный момент определяется по формуле

$$M_n = R_{пр}\left[\frac{d x^2}{2} - \frac{(d-b)a^2}{2} + \frac{(d-b_o)a^2 x}{2h} - \frac{(d-b_o)x^3}{6h} - \frac{(d-b_o)a^3}{3h}\right] + \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai}\left(h_{oi} - x\right) \qquad (67)$$

а высота сжатой зоны – из уравнения

$$x^2 - \bar{A}x + \bar{B} + \bar{C}\sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} = 0 \qquad (68)$$

где $$\bar{A} = \frac{\left[d + (d-b_o)\frac{a}{h}\right]2h}{d-b_o};$$

$$\bar{B} = \frac{\left[2a + (d-b_o)\frac{a^2}{2h}\right]2h}{d-b_o};$$

$$\bar{C} = \frac{2h}{R_{пр}(b-b_o)}; \qquad d = b + 2a$$

Пример расчета по прочности изгибаемого элемента трапецевидного сечения (плита сжатоопрокидываемого грибовидного фундамента промежуточной опоры).

Расчётное сечение дано на рис.II.

Характеристики сечения:

$b = 200$ см, $b_o = 40$ см; $a_n = 10$ см; $h = 40$ см;

$h_o = 36$ см

Бетон М 300, $R_{пр} = 135$ МПа, $E_б = 0{,}26 \cdot 10^5$ МПа,

$\varepsilon_m = 0{,}003$

Арматура ненапрягаемая I5 Ø 22 А-Ш R_a = 340 МПа;

$E_a = 2 \cdot 10^5$ МПа F_a = 57,02 см^2 (I5Ø 22)

С учетом коэффициента m_{b1} = I,I (табл.I5 СНиП II-2I-75)

$R_{пр}$ = I3,5xI,I = I4,85 МПа

Определяем высоту сжатой зоны из (62)

$$A = \frac{2(40-10) \cdot 40}{200 - 40} = 15$$

$$B = \frac{2(40-10)}{14,85(200-40)} = 0,0253$$

$$x^2 + 15x - 0,0253 \cdot 57,02 \quad \sigma_{ai} = 0$$

Исходим из допущения, что $\varepsilon_a > \varepsilon_y$, тогда

$$\sigma_{ai} = R_a = 340 \text{ МПа}$$

$$x^2 + 15x - 0,0253 \cdot 57,02 \cdot 340 = 0$$

$$x = 15,74 \text{ см}$$

$$\varepsilon_{ai} = \frac{0,003(36-15,74)}{15,74} = 0,00386 > \varepsilon_y = 0,0017$$

$$x_{ai} = 36-15,74 = 20,26 \text{ см}$$

$$M_n = 14,85 \cdot / \frac{(200-40) \cdot 15,74^3}{6(40-10)} + \frac{40 \cdot 15,74^2}{2} / +$$

$$+ 340 \cdot 57,02 \cdot 20,26 = 517,9 \text{ кН,м}$$

Пример расчета по прочности изгибаемого элемента трапециевидного сечения (плита грибовидного фундамента промежуточной опоры, работающего на выдергивание с опрокидыванием). Расчетное сечение дано на рис.I2.

Исходные данные: бетон М300; $R_{пр}$ = I3,5 МПа;

$E_б = 0,26 \cdot 10^5$ МПа; $\varepsilon_m = 0,003$

Характеристики сечения:

b = 200 см; b_0 = 40 см; a = 10 см; h = 40 см; h_0=36 см

Арматура ненапрягаемая 15 Ø 22 А-Ш; f_a = 3,801 см^2

R_a = 340 МПа; $E_a = 2 \cdot 10^5$ МПа ; ε_y = 0,0017

С учетом коэффициента m_{b1} = 1,1

$R_{пр}$ =13,5 ·1,1 = 14,85 МПа

Задаемся X=10 см

Номера стержней i	f_{ai} см^2	$\varepsilon_{ai}=\frac{\varepsilon_m(h_{oi}-x)}{x}$	h_{oi} см	σ_{ai} МПа	$\sigma_{ai} f_{ai}$ кН
1,14	7,602	-0,0012	6	-240	-182,448
2,13	7,602	0,0006	12	120	91,224
3,12	7,602	0,0024	18	340	258,468
4,11	7,602	0,0042	24	340	258,468
5,10	7,602	0,0060	30	340	258,468
6,7,8,9	15,204	0,0078	36	340	516,936

$\sum_{i=1}^{n} = 1201,116$

Делаем проверку подстановкой в уравнение (66):

$$R_{пр} b x - \sum_{i=1}^{n} \sigma_{ai} f_{ai} = 14,85 \cdot 200 \cdot 10 \cdot 10^{-1} - 1201,116 =$$

= 2970-1201,116 - уравнение (66) не удовлетворяется, принятое X велико.

Уравнение (66) удовлетворяется при x = 5,4 см

$$\varepsilon_{1,14} = \frac{0,003\,(6-5,4)}{5,4} = 0,000333 \quad \sigma_{1,14} = 66,6 \text{ МПа}$$

$$\varepsilon_{2,13} = \frac{0,003\,(12-5,4)}{5,4} = 0,00367 \quad \sigma_{2,13} = 340 \text{ МПа}$$

$$\varepsilon_{3-12} > \varepsilon_y \qquad \sigma_{3-12} = 340 \text{ МПа}$$

$$14{,}85 \cdot 200 \cdot 5{,}4 - 3{,}801 \cdot (2 \cdot 66{,}6 + 12 \cdot 340) \cong 0$$

Предельный момент находим по формуле (65):

$$M_n = \frac{148{,}5 \cdot 5{,}4^2 \cdot 200}{2} + 3{,}801/(2 \cdot 66{,}6 \cdot 0{,}6 + 340(2 \cdot 6{,}6 +$$

$$+ 2 \cdot 12{,}6 + 2 \cdot 18{,}6 + 2 \cdot 24{,}6 + 4 \cdot 30{,}6)/ = 363{,}1 \text{ кН.м}$$

3.32. Площадь поперечного сечения одноэаходной охватывающей продольную арматуру спирали, соответствующая I метру длины элемента кольцевого сечения, требуемой по условию действия поперечной силы, рекомендуется определять по формуле

$$F_{cq} = \frac{100 Q^2}{4 Q_\delta' R_{ax}} \qquad (69)$$

$$Q_\delta' = 0{,}3\delta (\gamma_a + r)^2 R_{np} \qquad (70)$$

где $$\gamma_a = \frac{\frac{1}{2}(\pi - \theta) - \frac{1}{4}\sin 2\theta}{\sin\theta + (\pi - \theta)\cos\theta} \qquad (71)$$

Параметр θ определяется из уравнения, которое решается подбором или графически $tg\,\theta - \theta = \pi \mu n'$

$$\mu n' = \frac{E_a F_a + E_n F_n}{0{,}85 E_\delta F} \qquad (72)$$

3.33. Расчет по деформации железобетонных элементов кольцевого сечения (конических и цилиндрических труб) производится в соответствии с указаниями настоящего раздела.

3.34. Деформации железобетонных элементов кольцевого сечения с напряжением всей или части продольной арматуры от нагрузок не вызывающих образования трещин, вычисляются как упругие деформации по жесткости В.

$$B = 0{,}85 E_\delta J_n \qquad (73)$$

$E_б$ - начальный модуль упругости бетона при сжатии.

Для элементов с напрягаемой арматурой принимается с коэффициентом $m_{бн}$ в соответствии с п.2.15 настоящего Руководства.

$J_п$ - момент инерции приведенного сечения трубы.

$$J_п = \frac{\pi}{8} \delta_э D_{ср}^3 \qquad (74)$$

где $D_{ср}$ - средний диаметр кольцевого сечения;

$\delta_э$ - эквивалентная (с учетом продольной арматуры) толщина стенки трубы.

$$\delta_э = \delta [1 + \mu(n-1)] \qquad (75)$$

При выполнении проверочных расчетов допускается момент инерции сечения определять по фактической толщине стенки, т.е. без учета продольной арматуры.

При определении прогибов свободностоящих опор момент инерции $J_п$ определяется для сечения, расположенного на отметке защемления; за которое условно принимается сечение, расположенное на отметке поверхности грунта. При определении прогибов стоек одностоечных и портальных опор на оттяжках, выполняемых из цилиндрических железобетонных труб с постоянной по длине толщиной стенки, момент инерции рекомендуется определять по сечению с наименьшим армированием.

3.35. Деформации железобетонных элементов кольцевого сечения с обычной, предварительно напряженной и смешанной продольной арматурой, если при действии внешних нагрузок трещины образуются, вычисляются как упруго-пластические дефор-

мации по кривизнам, определяемым по п.3.39.

3.36. Определение стрел прогиба, защемленных свободностоящих стоек, f_p (рис.I3) из конических или цилиндрических железобетонных труб, а также из вибрированных призматических и пирамидальных сплошных и коробчатых элементов квадратного и прямоугольного сечений с обычной, предварительно напряженной и смешанной продольной арматурой от действия горизонтальных сосредоточенных сил и распределенных нагрузок, если при их действии образуются трещины, допускается производить по следующим формулам:

при $h_i > H_o$

$$f_i = \frac{H_o^2}{3} \frac{1}{\rho} \left(\frac{3}{2} \nu_i - \frac{1}{2}\right) \omega_3 C_o$$

при $h_i < H_o$

$$f_i = \frac{h_i^2}{3} \frac{1}{\rho} \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \nu_i\right) \omega_3 C_o \qquad (76)$$

где $\nu_i = \frac{h_i}{H_o}$

$H_o = \frac{M_{on}}{Q_{on}}$ - высота равнодействующей всех горизонтальных нагрузок с учетом влияния моментов, создаваемых вертикальными неуравновешенными нагрузками;

M_{on} и Q_{on} - изгибающий момент и перерезывающая сила, создаваемые горизонтальными и неуравновешенными вертикальными нагрузками в опорном сечении

h_i - высота до отметки оси стойки, для которой определяется прогиб

$\frac{1}{\rho}$ - кривизна в опорном сечении, подсчитанная в соответствии с п.3.39, а для прямоугольных и коробчатых сечений по указаниям Руководства [I]

$\omega_э$ - коэффициент полноты эпюр кривизн - принимается по табл. I

C_o - коэффициент, учитывающий увеличение прогиба стойки за счет действия вертикальных осесимметричных сил при ее отклонении и изгибе определяемый в соответствии с указаниями п.3.38.

ПРИМЕЧАНИЕ: Здесь и в дальнейшем к осесимметричным отнесены нагрузки, обусловленные весом проводов, гололедных отложений, оборудования и конструкций, симметричных относительно оси стойки недеформированной опоры.

Табл. I

Значения коэффициента $\omega_э$

Тип опор	Вид арматуры	Значения $\omega_э$, при толщине стенки гололеда мм нормируемой плотности			
		$C \leq 5$	C=I0	C=I5	C=20
Одноцепные с треугольным расположением проводов	стержневая смешанная	0,90	I,0	I,05	I,I0
	проволочная (прядевая) напряженная	0,85	0,95	I,0	I,05
Двухцепные с расположением проводов по шестиугольнику	стержневая смешанная	0,95	I,05	I,I0	I,I5
	проволочная (прядевая) напряженная	0,90	I,0	I,05	I,I0

3.37. Определение стрел прогиба f_p защемленных свободностоящих стоек из конических или цилиндрических железо-

бетонных труб с предварительно напряженной или смешанной продольной арматурой от действия горизонтальных сосредоточенных сил и распределенных нагрузок, если при их действии трещины не образуются, допускается производить по формуле

$$f = \frac{Q h_{min}^3}{3 B_1} (\nu \mu_1 - \mu_2) C_0 \qquad (77)$$

μ_1 и μ_2 – коэффициенты, учитывающие изменение по длине геометрических размеров сечений стойки. Для стоек из конических и цилиндрических труб определяются по табл. 2 и 3.

3.38. Коэффициент C_0, учитывающий увеличение прогибов жесткозащемленных свободностоящих стоек из конических или цилиндрических железобетонных труб за счет действия вертикальных (весовых) нагрузок при их отклонении от вертикали за счет изгиба и деформаций грунта основания, рекомендуется определять по формуле

$$C_0 = \frac{1}{1 + \frac{N_{пр}}{N_{кр}}} \qquad (78)$$

где:

$N_{пр}$ – приведенная к отметке верхнего сечения стойки сосредоточенная вертикальная сила

$$N_{пр} = \sum_{i=1}^{n} G_i \frac{f_{ii}}{f_{in}} \frac{h_n}{h_i} \qquad (79)$$

G_i – учитываемая в расчете вертикальная сосредоточенная сила, действующая на отметке h_i ;

f_{ii} – прогиб стойки на отметке h_i от единичной горизонтальной силы, приложенной на отметке h_n ;

f_{in} – прогиб стойки на отметке, определяемой высотой h_n от единичной горизонтальной силы, приложенной на той же отметке;

h_i – высота до отметки приложения силы G_i ;

h_n – высота до отметки, к которой приводятся вертикальные силы;

$N_{кр}$ – „критическая" сила, характеризующая общую устойчивость опоры (с учетом закрепления) на рассматриваемой стадии нагружения

$$N_{кр} = \frac{\pi^2}{12} \frac{h_n}{f_1} \qquad (80)$$

где:

f_1 – прогиб стойки на отметке h_n , обусловленный изгибом стойки и ее отклонением вследствие деформаций грунта основания от единичной горизонтальной силы, приложенной на той же отметке

$$f_1 = f_{1Q} + f_{1r} \qquad (81)$$

f_{1Q} – прогиб стойки на отметке h_n от единичной горизонтальной силы, приложенной на той же отметке в предположении, что стойка жестко защемлена Если трещины не образуются f_{1Q} определяется по ф-ле (77) при $Q = I$, $\nu = I$, $C_o = I$ и $h_{min} = h_n$. Если трещины образуются f_{1Q} принимается равной

$$f_{1Q} = f_Q \frac{h_n}{M} \qquad (82)$$

f_Q – стрела прогиба на отметке h_n, определяемая по формуле (76) от всех учитываемых горизонтальных и неуравновешенных вертикальных нагрузок (при $C_0 = I$);

M - изгибающий момент в опорном сечении, создаваемый теми же нагрузками;

$f_{1г}$ - отклонение стойки на отметке $h_п$ от единичной горизонтальной силы, приложенной на той же отметке, за счет деформаций грунта

$$f_{1г} = \frac{0{,}01\, h_п (h_п + 2)}{M_г^н} \qquad (83)$$

$M_г^н$ - наибольший из опрокидывающих моментов (изгибающие моменты на отметке поверхности земли), действующих в одной плоскости, от нормативных значений горизонтальных и неуравновешенных вертикальных нагрузок.

3.39. Кривизны железобетонных элементов кольцевого сечения (конических и цилиндрических труб) с обычной, предварительно напряженной и смешанной продольной арматурой, в которых при действии учитываемых внешних нагрузок образуются трещины, рекомендуется определять по формуле

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_{бс} + \varepsilon_{ас}}{D - a} \qquad (84)$$

Здесь:

D - наружный диаметр кольцевого сечения ;

a - расстояние по радиусу от осей стержней продольной арматуры до наружной поверхности ($a = r_2 - r_a$);

$\varepsilon_{бс}$ - средняя относительная деформация наиболее удаленного от нейтральной оси волокна бетона сжатой зоны

$$\varepsilon_{бс} = \frac{\sigma_б \psi_б}{E_б \nu_б} \qquad (85)$$

Ψ_δ - отношение средних деформаций бетона на сжатой грани между трещинами к деформациям бетона над трещиной.

При расчете прогибов элементов кольцевого сечения его значение рекомендуется принимать равным

$$\Psi_\delta = 0{,}9$$

ν_δ - коэффициент, учитывающий неупругие деформации бетона и равный отношению упругой части деформации наиболее удаленного от нейтральной оси волокна сжатой зоны сечения к полной его деформации, включающей все виды неупругой деформации бетона (ползучесть, усадку, пластические деформации). Значения коэффициента ν_δ для случая действия кратковременных нагрузок должны приниматься по кривым рис.I4 в зависимости от отношения $\frac{\sigma_\delta}{R^н_{пр}}$

σ_δ - напряжение в бетоне сжатой зоны.

$$\sigma_\delta = \frac{M_n + (N_o \pm N)\alpha z}{F\alpha z\left(1 + \mu n \frac{\omega_{ac}}{\nu_\delta}\right)} \qquad (86)$$

M_n - приведенный момент внешних сил.

Приведенный момент определяется как сумма моментов всех внешних сил, расположенных по одну сторону сечения, относительно оси нормальной к плоскости изгиба и проходящей через геометрический центр кольцевого сечения.

ПРИМЕЧАНИЕ: При центральном обжатии элементов равнодействующей усилий предварительного напряжения арматуры момент этого усилия относительно оси, проходящей через геометрический центр сечения, равен нулю.

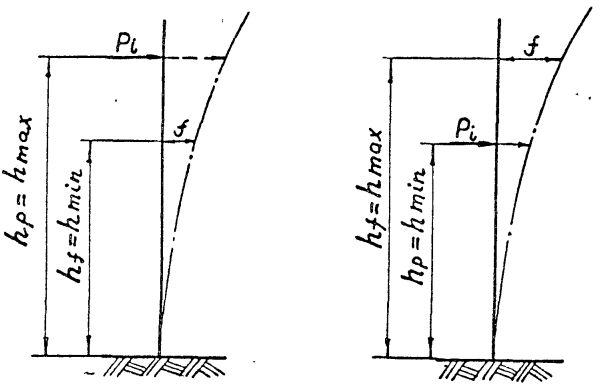


Рис.I3. Расчетная схема для определения прогибов стоек.

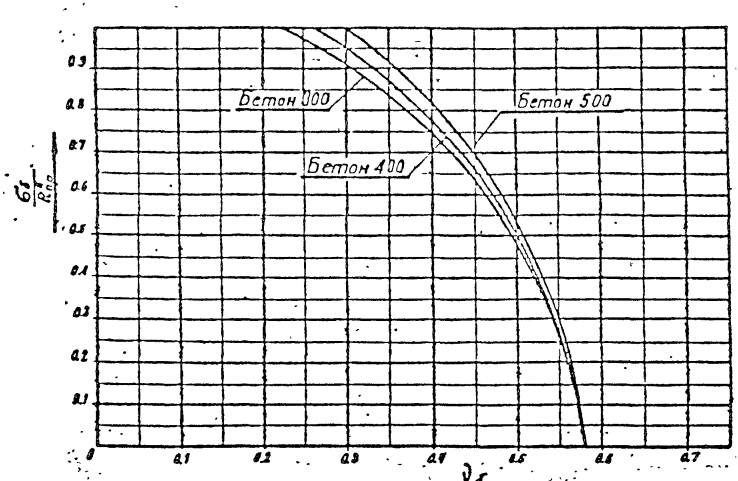


Рис.14 Кривые зависимости $\nu_\sigma = f\left(\frac{\sigma_s}{R^H_{np}}\right)$

N_o – равнодействующая усилий в продольной арматуре, определяемая с учетом потерь напряжения в напрягаемой арматуре и возникновения напряжений сжатия в результате усадки и ползучести бетона в ненапрягаемой арматуре. Характер учитываемых потерь (до или после окончания обжатия бетона) должен соответствовать той стадии изготовления железобетонного элемента, для которой выполняется расчет.

N – осевое усилие, создаваемое внешними нагрузками. Сжимающее учитывается со знаком (+), растягивающее – со знаком (–)

α – относительная площадь сжатой зоны кольцевого сечения после образования трещин в бетоне растянутой зоны

$$\alpha = \alpha_T - (\alpha_T - \alpha_n)\Delta - 0{,}2(\alpha_T + \alpha_n)\Delta(1-\Delta) \qquad (87)$$

где

$$\Delta = \frac{M_n - M_{nT}}{M_{nn} - M_{nT}} \qquad (88)$$

M_{nT} – приведенный момент внешних сил, соответствующий стадии образования трещин

$$M_{nT} = W_T R_p^H + (N_o \pm N)\,r_я \qquad (89)$$

W_T – момент сопротивления для растянутой грани сечения, определяемый с учетом неупругих свойств бетона

$$W_T = \gamma W_o \qquad (90)$$

$$\gamma = 2 - 0{,}4\frac{d}{D}$$

D ; d – наружный и внутренний диаметры сечения;

W_0 – момент сопротивления для растянутой грани сечения, определяемый по правилам сопротивления упругих материалов

$$W_0 = \frac{2J_п}{D} \qquad (91)$$

$r_я$ — радиус ядра сечения

$$r_я = \frac{W_0}{F_п} \qquad (92)$$

$J_п$ – приведенный момент инерции сечения, определяемый по формуле

$$J_п = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) + \frac{1}{2}\left[(n_a - 1)F_a r_a^2 + (n_н - 1)F_н r_н^2\right] \qquad (93)$$

$r_н$, r_a – радиусы окружностей, проходящих через центры сечений стержней напрягаемой и ненапрягаемой продольной арматуры;

$n_н$, n_a – отношение модулей упругости, соответственно $\frac{E_н}{E_б}$; $\frac{E_a}{E_б}$;

$M_{пп}$ – предельная величина приведенного момента внешних сил, характеризующего прочность элемента и определяемого правой частью формулы (I) при чистом изгибе, с учетом п.3.16 при внецентренном сжатии и п.3.17 при внецентренном растяжении;

$M_п$ – приведенный [x] момент внешних сил рассматриваемой стадии;

$\alpha_т$ – относительная площадь сжатой зоны бетона перед образованием трещин:

---

x) определение приведенного момента см.выше

$$\alpha_т = \frac{1 + \frac{\sigma_{\delta,N}}{R_p^н}}{2{,}1 + \frac{1}{10\mu n} + 1{,}3\frac{\sigma_{\delta,N}}{R_p^н}} \qquad (94)$$

$$\sigma_{\delta,N} = \frac{N_0 \pm N}{F_п} \qquad (95)$$

$$\mu n = \mu_a n_a + \mu_н n_н$$

$$\mu_a = \frac{F_a}{F}\ ; \qquad \mu_н = \frac{F_н}{F} \qquad (96)$$

$\alpha_п$ – относительная площадь сжатой зоны бетона, соответствующая предельной стадии работы элемента и определяемая по формулам (2) и (I3) при чистом изгибе, с учетом п.3.I6 при внецентренном сжатии и п.3.I7 при внецентренном растяжении;

z – расстояние между точками приложения равнодействующих усилий в сжатой и растянутой зонах сечения

$$z = \frac{r_c \sin\pi\alpha}{\pi\alpha(1-\alpha)} \qquad (97)$$

r_c – средний радиус железобетонного кольцевого сечения

$$r_c = \frac{r_в + r'_a}{2}, \text{ где } r_в = \frac{r_1 + r_2}{2};\ r'_a = \frac{r_a + r_н}{2}$$

r_1, r_2 – внутренний и наружный радиусы сечения

$r_a, r_н$ – см. п.3,I4

F – площадь бетона в сечении, определяемая как разность площади кольца $\pi\delta(2r-\delta)$ и площади напрягаемой и ненапрягаемой продольной арматуры ($F_н + F_a$);

δ – толщина стенки элемента в сечении;

ω_{ac} – коэффициент полноты эпюры напряжений в арматуре сжатой зоны сечения, принимаемый равным $\omega_{ac}=0,55$ для всех стадий нагружения элемента;

ε_{ac} – средняя относительная деформация удлинения наиболее удаленного от нейтральной оси стержня продольной арматуры

$$\varepsilon_{ac} = \varepsilon_a \psi_a \qquad (98)$$

ε_a – приращение деформации удлинения наиболее удаленного от нейтральной оси арматурного стержня

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_{кп}}{E_a \nu_a} - \frac{N_o}{(F_н + F_a) E_a} \qquad (99)$$

E_a – модуль упругости арматурной стали.

При наличии в сечении арматурных сталей с разными модулями упругости в расчет должен быть введен эквивалентный модуль, определяемый по формуле

$$E_{aэ} = \frac{E_1 F_1 + E_2 F_2 + \cdots}{F_1 + F_2 + \cdots} \qquad (100)$$

$\sigma_{кп}$ – полное напряжение в наиболее удаленном от нейтральной оси арматурном стержне

$$\sigma_{кп} = \frac{N_o}{F_н + F_a} + \frac{\sigma_a}{\omega_{ap}} \qquad (101)$$

σ_a – напряжение в арматуре растянутой зоны, вызываемое внешней нагрузкой

$$\sigma_a = \frac{M_п - (N_o \pm N)(1-\alpha) z}{(F_н + F_a)(1-\alpha) z} \qquad (102)$$

1. Проволочная арматура
2. Стержневая горячекатаная арматура.
3. Стержневая арматура подвергнутая упрочнению вытяжкой.

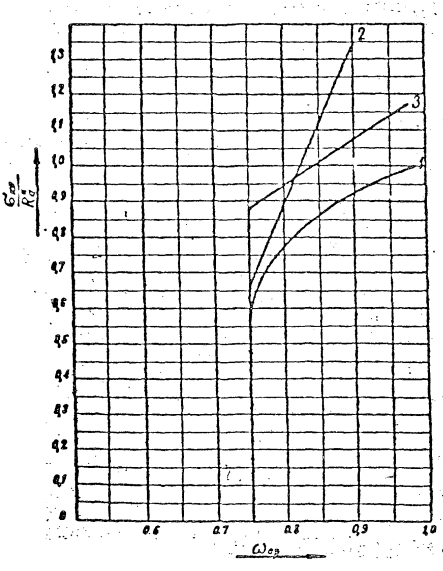
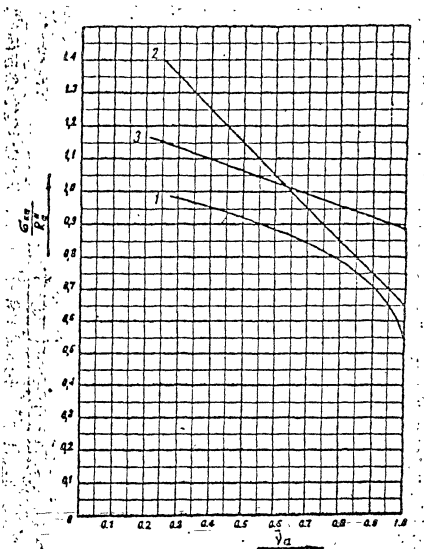


Рис 15. Зависимость $\omega_{ар} = f\left(\frac{\sigma_{ка}}{R_a^н}\right)$



1. Проволочная арматура.
2. Стержневая горячекатаная арматура.
3. Стержневая арматура подвергнутая упрочнению вытяжкой.

Рис.16. Кривые зависимости $\gamma_a = f\left(\frac{\sigma_{sp}}{R_a^H}\right)$

ω_{ap} - коэффициент полноты, эпюры напряжений в арматуре растянутой зоны, принимаемый по графикам рис. I5

$\bar{\nu}_a$ - коэффициент, учитывающий пластические деформации арматуры при напряжениях, превышающих предел пропорциональности, равный отношению упругого удлинения арматуры к полному. Он должен приниматься по графикам рис.I

При расчете деформаций элементов от нагрузок, не превышающих нормативных для рекомендуемых "Руководством" марок арматурных сталей допускается принимать коэффициент $\bar{\nu}_a = I$

Коэффициенты ω_{ap} и $\bar{\nu}_a$ допускается определять по отношению $\frac{\sigma_{кп}}{R_a^н}$ ($R_a^н$ - нормативное сопротивление ненапрягаемой арматуры) и в том случае, когда арматура выполнена из разных арматурных сталей с неодинаковыми сопротивлениями.

ψ_a - отношение средних деформаций удлинения арматуры к деформациям удлинения ее в сечении с трещиной определяемое по формулам (I03), (I04) но принимаемое не более I,0

Для изгибаемых элементов кольцевого сечения, выполняемых без предварительного напряжения

$$\psi_a = 1,05 - 0,8\, S' \frac{M_т}{M} \qquad (I03)$$

в остальных случаях

$$\psi_a = 1,3 - S' \frac{m}{0,3 + 0,8\, m} \leq 1 \qquad (I04)$$

З д е с ь:

S' - коэффициент, зависящий от профиля арматурных стержней и длительности действия нагрузки. При кратковременном действии нагрузки $S' = I,I$ для стержней периодического профиля; $S' = I,0$ для гладких стержней

$$m = \frac{M_{пт} - (N_o \pm N)(1-\alpha_т)z_т}{M_п - (N_o \pm N)(1-\alpha)z} \qquad (105)$$

при этом должно удовлетворяться условие

$$m \leq 1$$

Значения букв, входящих в числитель формулы (105) принимаются по стадии непосредственно после образования трещин, в знаменателе - по стадии, для которой определяется коэффициент " m ".

В приведенном методе полное напряжение в наиболее удаленном от нейтральной оси стержне арматуры $\sigma_{кп}$ и напряжение в бетоне сжатой зоны $\sigma_б$ определяются через коэффициенты ν_a и $\nu_б$, которые в свою очередь находятся по кривым в зависимости от определяемых напряжений $\sigma_{кп}$ и $\sigma_б$. Поэтому при выполнении расчетов напряжения $\sigma_{кп}$ и $\sigma_б$ определяются подбором или методом последовательных приближений. При использовании метода последовательных приближений нужно задаться любым начальным значением коэффициента, находящимся в интервале возможных его изменений и по этому значению определить напряжение. По подсчитанному таким образом напряжению, пользуясь соответствующей кривой графиков, нужно найти новое значени коэффициента, по нему снова определить напряжение, а по напряжению следующее значение коэффициента, продолжая процесс до тех пор пока погрешность в вычислении по предыдущему и последующему приближениям будет меньше заданной (она должна быть не более 5%). Для сокращения числа приближений начальное значение целесообразно выбирать с учетом конкретных условий.

Иногда лучшие результаты получаются если напряжение определять не по значению коэффициента, полученному в данном приближении, а по среднему значению данного и предыдущего приближений.

Допускается определять кривизну по формуле:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_п + (N_0 \pm N)\alpha z}{(\mathfrak{D}-a)z}\left[\frac{\psi_a}{(F_a+F_н)(1-\alpha)E_a\bar{\nu}_a\omega_{ap}} - \frac{\psi_б}{F_a(1+\mu n\frac{\omega_{ac}}{\nu_б})E_a\nu_б}\right] -$$

$$- \frac{N_0 \pm N}{\mathfrak{D}-a}\frac{\psi_a}{(F_a+F_н')(1-\alpha)E_a\bar{\nu}_a\omega_{ap}} - \frac{N_0\psi_a}{(\mathfrak{D}-a)(F_a+F_н)E_a}\left(\frac{1}{\nu_a}-1\right) \quad (106)$$

Входящие в формулу буквы имеют те же значения, что и в приведенных выше выражениях, используемых при определении кривизны по формуле (84).

Пример расчета кривизны оси стойки СК-2 промежуточной свободностоящей опоры на отметке опорного сечения.

В сечении действует изгибающий момент

$$M = 287 \text{ кН.м}$$

Характеристики сечения

$\mathfrak{D} = 53$ см, $\delta = 7{,}23$ см, $r_a = r_н = 23{,}5$ см

Продольная арматура:

напрягаемая 10 Ø 12 А-IУ $F_н = 11{,}31$ см^2

ненапрягаемая 23 Ø 12 А-IУ $F_a = 26{,}013$ см^2

$R_a = R_н = 500$ МПа; $R_{нс} = R_{ac} = 400$ МПа;

$R_н'' = 600$ МПа; $E_a = E_н = 2\cdot10^5$ МПа

Бетон тяжелый марки М 400

$\bar{R} = 40$ МПа; $R_0 = 30$ МПа; $R_{пр} = 17{,}5$ МПа

коэффициенты условий работы

$m_{бн} = 1{,}1$; $m_{б1} = 1{,}1$

$m_{бн} \cdot m_{б1} \cdot R_{пр} = 1{,}1\cdot1{,}1\cdot17{,}5 = 21{,}175$ МПа

Контролируемая величина предварительного напряжения продольной арматуры $\sigma_{ок} = 0,9\ R_н^н = 0,9 \cdot 600 = 540$ МПа

$\sigma_о = 438,7$ МПа; $n = 6,67$; $F_п = 1252$ см^2; $\alpha_п = 0,32$;

$M_п = 320,5$ кН.м

Значения $\sigma_о$, n, $F_п$, $\alpha_п$ и $M_п$ приняты по примеру расчета этой же стойки на совместное действие изгиба и кручения см. пример расчета к п.3.22.

Определяется момент трещинообразования:

$$J_п = \frac{\pi}{64}(53^4 - 38,54^4) + \frac{1}{2}(6,67-1)(26,013+11,31) \cdot 23,5^2 = 337319 \text{ см}^4$$

$$W_о = \frac{2J_п}{D} = 12729 \text{ см}^3 \quad r_я = \frac{W_о}{F_п} = \frac{12729}{1252} = 10,17 \text{ см}$$

$$\gamma = 2-0,4\frac{d}{D} = 2-0,4 \cdot \frac{53-7,23}{53} = 1,709$$

$$W_т = \gamma W_о = 1,709 \cdot 12729 = 21754 \text{ см}^4$$

$$N_о = F_н \sigma_о - F_а \sigma_{an} = 11,31 \cdot 438,7 - 26,013(35+25,8) = 338,01 \text{ кН}$$

$$M_т = W_т R_р^н + (N_о \pm N) r_я = 21754 \cdot 1,8 \cdot 10^{-1} + 338,01 \cdot 10,17 = 73,5 \text{ кН}$$

По формуле (94) определяется площадь сечения сжатой зоны бетона в момент образования трещин

$$\sigma_{б,N} = \frac{N_о \pm N}{F_п} = \frac{338,01}{1252} = 2,7 \text{ МПа}$$

$$\mu n = \frac{26,013+11,31}{1003} \cdot 6,67 = 0,248$$

$$\alpha_т = \frac{1+\frac{2,7}{1,8}}{2,1+\frac{1}{10 \cdot 0,248}+1,3\frac{2,7}{1,8}} = 0,561$$

По формуле (87) определяется относительная площадь сжа зоны сечения соответствующая действующему моменту М=287 кН

$$\Delta = \frac{M - M_т}{M_п - M_т} = \frac{287 - 73,5}{320,5 - 73,5} = 0,864$$

$$\alpha = 0,561 - (0,561-0,32)\cdot 0,864 - 0,2(0,561+0,32)\cdot 0,864 \cdot 0,136 = 0,332$$

По формуле (97) определяется плечо внутренней пары z

$$r_c = \frac{22,88 + 23,5}{2} = 23,19 \text{ см}$$

$$z = \frac{23,19 \sin \pi \cdot 0,332}{\pi \cdot 0,332(1-0,332)} = 28,8 \text{ см}$$

$$\sin \pi \cdot 0,332 = \sin 59^{\circ}46' = 0,864$$

По формуле (86) и кривым рис.14 определяется напряжение в бетоне сжатой зоны:

$$\sigma_б = \frac{2870000 + 33801 \cdot 0,332 \cdot 28,8}{1003 \cdot 0,332 \cdot 28,8 (1+0,248 \frac{0,55}{\nu_б})} = \frac{332,96}{1+\frac{0,136}{\nu_б}}$$

$$= 21,175 \text{ МПа}$$

При этом $\nu_б = 0,238$

По формуле (85) определяется относительная деформация $\varepsilon_{бс}$

$$\varepsilon_{бс} = \frac{21,175 \cdot 0,9}{30000 \cdot 0,238} = 0,00267$$

Определение относительной деформации $\varepsilon_{ас}$.

По формуле (102) определяется напряжение $\sigma_а$

$$\sigma_а = \frac{2870000 - 33801(1-0,332)\cdot 28,8}{(26,013+11,31)(1-0,332)\,28,8} = 309,1 \text{ МПа}$$

По формуле (101) определяется краевое напряжение $\sigma_{кп}$

$$\sigma_{кп} = \frac{338,01 \cdot 10^{1}}{26,013+11,31} + \frac{309,1}{\omega_{ар}} = 481,8 \text{ МПа}$$

Здесь $\omega_{ар} = 0,79$

По формуле (99) определяется относительная деформация $\varepsilon_{а}$

$$\varepsilon_{а} = \frac{481,8}{2 \cdot 10^{5} \cdot \bar{\nu}_{а}} - \frac{338,01 \cdot 10^{1}}{(26,013+11,31) \cdot 2 \cdot 10^{5}} = 0,00238$$

$$\bar{\nu}_{а} = 0,85$$

По формуле (97) определяется $z_{т}$

$$z_{т} = \frac{23,19 \cdot \sin\pi \cdot 0,561}{\pi \cdot 0,561(1-0,561)} = 29,45 \text{ см}$$

$$\sin\pi \cdot 0,561 = \sin 100^{0}59' = 0,9816$$

По формуле (105) определяется параметр m

$$m = \frac{73,5-338,01(1-0,561) \cdot 29,45 \cdot 10^{-2}}{287-338,01(1-0,332) \cdot 28,8 \cdot 10^{-2}} = 0,134$$

По формуле (104) определяется коэффициент $\psi_{а}$

$$\psi_{а} = 1,3-1,1 \frac{0,134}{0,3+0,8 \cdot 0,134} = 0,938$$

По формуле (98) - $\varepsilon_{ас}$

$$\varepsilon_{ас} = 0,00238 \cdot 0,938 = 0,00223$$

По формуле (84) определяется кривизна :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{0,00267 + 0,00223}{53-3} = 0,98 \cdot 10^{-4}$$

3.40. Расчет по образованию и раскрытию трещин элементов железобетонных опор и конструкций фундаментов прямоугольной двутавровой и других форм сечений, кроме кольцевого, произво-

дится в соответствии с указаниями Руководства по проектированию предварительно-напряженных железобетонных конструкций из тяжелого бетона.

3.41. Расчет по образованию и раскрытию трещин железобетонных элементов кольцевого сечения с равномерно распределенной по окружностям радиусов r_a и $r_н$ продольной арматурой должен производиться в соответствии с указаниями настоящего Руководства.

3.42. Расчет по образованию трещин изгибаемых элементов кольцевого сечения конструкций железобетонных опор рекомендуется производить по формуле

$$M_{тр} \leq \left[\frac{A_1}{2} f_1(\psi) + 2A_2 f_2(\psi)\right] \frac{Fr}{2\pi} R_p^н \qquad (107)$$

при этом параметр ψ находится из уравнения

$$A_1 f_3(\psi) - A_2 f_4(\psi) - \frac{\pi N_o}{F_п R_p^н} = 0 \qquad (108)$$

3.43. Расчет по образованию трещин внецентренно сжатых и внецентренно растянутых с большим эксцентриситетом железобетонных элементов кольцевого сечения рекомендуется производить по формуле

$$N_{тр} e_o \leq \left[\frac{A_1}{2} f_1(\psi) + 2A_2 f_2(\psi)\right] \frac{Fr}{2\pi} R_p^н \qquad (109)$$

параметр ψ находится из уравнения

$$A_1 f_3(\psi) - A_2 f_4(\psi) \pm \frac{r}{e_o}\left[\frac{A_1}{4} f_1(\psi) + A_2 f_2(\psi)\right] - \frac{\pi N_o}{F_п R_p^н} \qquad (110)$$

\+ внецентренное сжатие

\- внецентренное растяжение

Здесь: $A_1 = C(1+\mu n)$

$A_2 = 1+\mu n'_p$

C – коэффициент пластичности, принимаемый при расчете по трещиностойкости изгибаемых и внецентренно сжатых элементов равным C=2,0, а при расчете внецентренно растянутых C=1,5

μ – коэффициент армирования

$$\mu = \frac{F_a + F_н}{F}$$

F – площадь бетонной части кольцевого сечения

$$F = F_c - (F_a + F_н)$$

F_c – площадь сечения, определяемая по геометрическим размерам

$$n = \frac{n_a F_a + n_н F_н}{F_a + F_н}$$

$$n'_p = 2n$$

$$n_a = \frac{E_a}{E_б}; \qquad n_н = \frac{E_н}{E_б}$$

Значения переменных параметров $f_1(\psi)$, $f_2(\psi)$, $f_3(\psi)$ и $f_4(\psi)$ даны в табл.4

3.44. Ширину раскрытия трещин изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых с большим эксцентриситетом элементов кольцевого сечения с равномерно распределенной по периметру продольной арматурой допускается определять по формуле

$$a = 0{,}8\,\frac{F_н + F_a}{S}\,\frac{\sigma_a}{E_a}\left(\frac{\sigma_{a.тр}}{R_p} - n'_p\right) \qquad \text{(III)}$$

где:

S – периметр поперечного сечения всей продольной арматуры;

σ_a – напряжение в крайнем (наиболее удаленном от нейтральной оси) стержне продольной арматуры растянутой зоны на участке трещины от рассматриваемых нагрузок;

$\sigma_{a,тр}$ – то же, что и σ_a, но в момент образования трещин

R_p – расчетное сопротивление бетона на растяжение

Напряжение $\sigma_{a,тр}$ независимо от характера действующего усилия (внецентренное сжатие и растяжение, изгиб) должно определяться по формуле

$$\sigma_{a,тр} = \frac{4\pi M_{тр}}{F\tau} \cdot \frac{1}{A_1' f(\theta) + \mu f_5(\theta)} \qquad (II2)$$

Напряжение σ_a должно определяться по ф-ле

$$\sigma_a = \frac{4\pi N^н e_o}{F\tau} \cdot \frac{1}{A_1'' f_1(\alpha) + \mu f_5(\alpha)} \qquad (II3)$$

При расчете изгибаемых элементов в формуле (II3) произведение $N^н e_o$ нужно заменить изгибающим моментом $M^н$.

Значения параметров θ и α определяются из уравнений

$$A_1' f_3(\theta) - \mu f_6(\theta) - \frac{N_o' \tau}{4 M_{тр}} \left[A_1' f_1(\theta) + \mu f_5(\theta) \right] = 0 \qquad (II4)$$

$$A_1'' f_3(\alpha) - \mu f_6(\alpha) - \frac{(N_o' \pm N^н)\tau}{4 N^н e_o} \left[A_1'' f_1(\alpha) + \mu f_5(\alpha) \right] = 0 \qquad (II5)$$

В формуле (II5) (+) принимается при расчете внецентренно сжатых, (–) – внецентренно растянутых элементов.

При расчете изгибаемых элементов в формуле (II5) нужно положить $N^н = 0$ и вместо $N^н e_o$ поставить изгибающий момент $M^н$

$$N_0' = \frac{N_0}{1 + \mu(n-1)}$$

$n' = n$ $n'' = 2n$

коэффициенты $f_1(\psi)$, $f_1(\theta)$ и $f_1(\alpha)$ даны в табл.4

Параметр ψ определяется из уравнений (108), (110) подбором по таблице 4.

Параметры θ и α определяются из уравнений (114) и (115) подбором по табл. 4.

При расчете ширины раскрытия трещин ненапряженных элементов величины N_0 в формулах (108), (110), (114) и (115) принимается равной нулю.

3.45. Ширина раскрытия трещин изгибаемых внецентренно сжатых и внецентренно растянутых с большим эксцентриситетом железобетонных элементов кольцевого сечения с равномерно распределенной по периметру продольной арматурой может определяться по формуле

$$a_т = \varepsilon_{ac} l_т \qquad (116)$$

ε_{ac} – средняя деформация удлинения наиболее удаленного от нейтральной оси арматурного стержня растянутой зоны, определяемая в соответствии с рекомендациями п.3.39 настоящего Руководства.

$l_т$ – расстояние между трещинами.

Для изгибаемых внецентренно растянутых и внецентренно сжатых элементов $l_т$ рекомендуется определять по формуле

$$l_т = K_1 n u \eta \qquad (117)$$

где: $$u = \frac{F_a + F_н}{S}$$

S - периметр сечения всей продольной арматуры;

η - коэффициент, зависящий от вида продольной растянутой арматуры, принимаемый равным:

Для стержней периодического профиля

$$\eta = 0,7$$

Для гладких горячекатанных стержней

$$\eta = 1,0$$

K_1 - коэффициент, определяемый по формуле

$$K_1 = \frac{W_т}{(F_a + F_н)(1-\alpha)z n} - 2 \qquad (118)$$

Значения остальных параметров даны в п.3.39

4. ОБЩИЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

4.1. При конструировании железобетонных элементов опор ВЛ необходимо руководствоваться указаниями СНиП II-21-75 Руководств (1,2) и настоящего Руководства.

4.2. Толщина наружного защитного слоя для продольной арматуры железобетонных труб, изготавливаемых центробежным способом должна быть не менее:

а) Для элементов, к которым предъявляется требование трещиностойкости - 10 мм.

б) Для элементов с продольной арматурой из горячекатанной стали, к которым требование трещиностойкости не предъявляется - 15 мм.

Толщина внутреннего защитного слоя для продольной арматуры железобетонных труб должна быть не менее 15 мм, а толщина защитного слоя для монтажных колец должна быть не менее 5 мм.

Толщина защитного слоя для спиральной арматуры железобетонных труб, изготавливаемых центробежным способом: должна быть не менее:

в) Для элементов, к которым предъявляется требование трещиностойкости - 10 мм.

г) Для элементов, к которым требование трещиностойкости не предъявляется - 15 мм.

4.3. Толщину защитного слоя стоек опор с предварительно напряженной продольной арматурой периодического профиля, изготавливаемых методом вибрирования рекомендуется принимать в соответствии с указаниями (1,2).

4.4. Участки стоек железобетонных опор для ВЛ 110 кВ и выше находящиеся в процессе эксплуатации ниже отметки + 0,5 м относительно поверхности грунта, в целях защиты от влаги, должны покрываться гидроизоляцией. В этом случае толщину защитного слоя допускается принимать такой же как и для участка стойки, расположенного над поверхностью земли.

4.5. Концы продольных стержней ненапрягаемой арматуры в стойках и траверсах опор ВЛ 35 кВ и выше должны отстоять от торца не более чем на 10 мм, концы напрягаемой арматуры должны быть защищены слоем раствора не менее 5 мм или путем установки торцевых крышек на цементном растворе.

В стойках опор ВЛ ниже 35 кВ концы напрягаемой продольной арматуры разрешается не защищать слоем раствора.

4.6. В целях исключения раскалывания торцов напряженно армированных элементов, используемых для стоек и траверса опор (центрифугированные конические и цилиндрические трубы,

вибрированные стойки прямоугольного сечения пирамидальные и призматические с полостью и без полости) на длине анкеровки напрягаемой арматуры должны устанавливаться внутренние по отношению к продольной арматуре заанкуренные хомуты (для труб-кольца) из арматурной стали кл.А-I с площадью не менее 6 см2 на I м длины и шагом не более 50 мм и охватывающая продольную арматуру спираль с площадью не менее 2,5 $см^2$ на I м длины и шагом не более 50 мм.

Длина анкеровки в предварительно напряженных элементах, армируемых стержнями периодического профиля без анкеров принимается равной 15 d , а в элементах армируемых проволокой, пучками и прядями без анкеров по указаниям (I,2).

При мгновенной передаче предварительного напряжения на бетон начало зоны анкеровки арматуры принимается на расстоянии 0,25 $\ell_{ан}$ от торца элемента (для тяжелого бетона).

При выполнении этого требования разрешается толщину защитного слоя бетона на концах принимать такой же, как и на всей остальной длине.

4.7. При назначении расстояний между стержнями в элементах с сечениями, отличными от кольцевого необходимо руководствоваться указаниями СНиП II-21-75.

4.8. Расстояния в свету между стержнями и прядями в цилиндрических и конических трубах, изготавливаемых методом центрифугирования, должны назначаться с учетом удобства укладки и уплотнения бетонной смеси.

4.9. При выборе пространственного размещения и схем обрывов стержней необходимо стремиться к равномерному их

распределению по периметру на всей длине стойки. При этом среднее расстояние между стержнями в свету по периметру должно быть не менее 30 мм.

Ненапряженные стержни продольной арматуры должны обрываться в соответствии с эпюрой усилий по три стержня в одном сечении, расположенных через 120 дуговых градусов по периметру.

Взаимные смещения обрываемых стержней в двух ближайших сечениях должны приниматься по возможности близкими к 60^{0}.

4.10. Поперечная арматура (спираль) для центрифугированных труб с шагом менее 30 мм не рекомендуется. В этом случае необходимо принимать следующий больший диаметр проволоки или предусмотреть на этом участке спираль из двух рядом расположенных проволок того же диаметра.

4.11. В трубах, используемых в качестве стоек прямых промежуточных свободностоящих опор, в которых наружная спираль, охватывающая продольную арматуру не ставится (по расчету не требуется), расстояния между поперечными хомутами в зоне наибольших усилий, т.е. на участке опоры между отметками (1,0÷4,0) м, должны быть не более 500 мм, на остальных участках не более 1000 мм. Диаметр хомутов должен быть не менее 8 мм.

4.12. В трубах используемых в качестве стоек опор, для которых значительную часть нагрузок составляют постоянные (опоры на оттяжках, промежуточные угловые и т.д.), во всех случаях должна ставиться наружная спираль с расстояниями между витками не более 120 мм.

При наличии наружной спирали расстояния между монтажными кольцами могут быть увеличены до 1500 мм.

5. Статический расчет свободностоящих опор

5.1. Статический расчет опор необходимо производить с учетом указаний гл.3 "Расчет железобетонных элементов" и рекомендаций настоящей главы.

5.2. Опоры должны быть рассчитаны на нагрузки сочетаний нормальных, аварийных и монтажных режимов в соответствии с разделом "Опоры" "Правил устройства электроустановок" (ПУЭ).

Допускается не производить расчет на отдельные сочетания, если путем сравнения нагрузок может быть установлено, что эти сочетания не являются расчетными.

5.3. Усилия в элементах промежуточных опор (нормальных и угловых) при расчете этих опор по прочности (I-я группа предельных состояний) должны определяться от расчетных нагрузок сочетаний всех режимов (нормальных и аварийных), а по трещиностойкости (2-я группа предельных состояний) от нормативных нагрузок только нормальных режимов.

5.4. Усилия в элементах анкерных и анкерно-угловых опор при расчете этих опор по прочности (устойчивости формы) должны определяться от расчетных нагрузок всех режимов (нормальных, аварийных и монтажных), по деформациям (2-я группа предельных состояний) - от нормативных нагрузок сочетаний только аварийных режимов, по трещиностойкости - от нормативных нагрузок сочетаний нормальных и монтажных режимов. В тех случаях, когда расчет по трещиностойкости от нагрузок монтажных режимов оказывается определяющим для отдельных элементов опор реко-

мендуется предусматривать мероприятия по их усилению на период монтажа, о чем должны быть даны соответствующие указания в рабочих чертежах таких опор.

5.5. При расчете опор по прочности усилия в железобетонных элементах должны быть определены раздельно от постоянных и временных или особых нагрузок нормируемых сочетаний. Для определения усилий в железобетонных элементах от постоянных нагрузок, опоры должны быть рассчитаны дополнительно на эти нагрузки в соответствии с указаниями [3]. Усилия от временных нагрузок или от особых воздействий определяются как разность усилий, полученных из расчета на полные и на постоянные нагрузки данного сочетания.

5.6. Расчет железобетонных элементов промежуточных свободностоящих нормальных (прямых) опор допускается производить на усилия, полученные из статического расчета на полные нагрузки соответствующих сочетаний без их дифференциации на постоянные и временные, т.е. считая все нагрузки временными.

5.7. Расчетная схема опоры должна в наибольшей мере отвечать действительным условиям работы конструкции. Выбор ее должен осуществляться с учетом всех факторов, могущих оказать влияние на величины усилий в отдельных элементах опоры. Такими факторами, например, в статически неопределимых конструкциях являются: жесткость узловых сопряжений, податливость якорных плит, степень жесткости заделки стоек в грунте и др. Если конструктивными мерами нельзя добиться их постоянства, то расчет должен выполняться с учетом граничных значений характеристик, которые могут иметь место при работе проектируемой конструкции в эксплуатационных условиях.

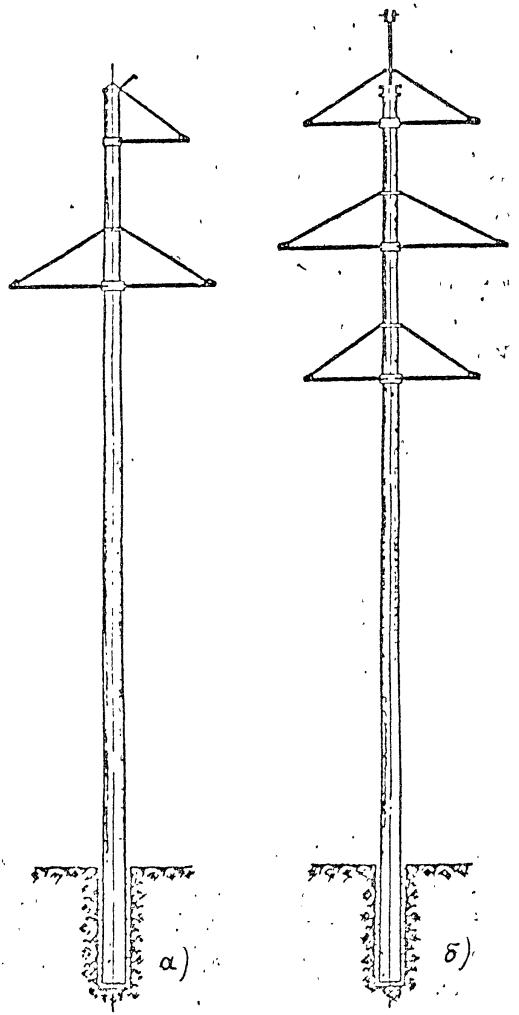


Рис.17. Схемы одноцепной и двухцепной промежуточных одностоечных свободностоящих железобетонных опор.

5.8. Конструкции опор представляющие собою статически неопределимые системы допускается рассчитывать приближенными способами, как статически определимые, только при условии, что вполне надежно определены границы, внутри которых ошибка в определении усилий при расчете этими приближенными способами не превосходит заданной величины.

Одностоечные свободностоящие опоры (рис.I7)

5.9. Расчет массовых (типовых, унифицированных) одностоечных свободностоящих опор при их проектировании должен производиться по деформированной схеме, которая определяется расчетом путем учета прогиба стойки опоры под действием всех сил, как горизонтальных, так и вертикальных, а также ее отклонения за счет деформаций грунта основания.

5.I0. Расчет разрешается производить при следующих упрощающих допущениях:

а) Распределенный по длине собственный вес стойки заменяется сосредоточенными вертикальными силами, численно равными весам секций стойки, на которые она разбивается. Число таких секций должно быть не менее шести.

б) Сосредоточенные вертикальные силы, заменяющие веса секций стойки опоры, прикладываются на отметках середин секций.

в) Вертикальные силы, создаваемые весами проводов, гирлянд изоляторов, гололедных отложений на проводах и конструкции траверз прикладываются на отметках крепления к стойке поясов соответствующих траверз, а веса тросов, гололедных отложений на них и тросовых подвесок - к отметкам крепления тросовых подвесок.

г) Действующая на стойку распределенная нагрузка, создаваемая давлением ветра, заменяется горизонтальными сосредоточенными силами, отнесенными к точкам крепления проводов и тросов.

д) Расчет прогибов стоек опор, имеющих металлические надставки (например, тросовые стойки) производится в предположении, что их жесткость на участках этих надставок изменяется по тому же закону, что и жесткость железобетонной, продолженной до отметки крепления троса с сохранением сбега диаметра и толщины стенки при постоянстве продольной арматуры на всем этом участке, принятой по отметке верхнего сечения, железобетонной стойки.

5.II. Разбивку стойки на секции рекомендуется производить в соответствии с намеченными отметками расчетных сечений, для которых подсчитываются усилия (за отметки расчетных сечений желательно принять также отметки креплений к стойке поясов травера). Середина (по высоте) каждой секции должна совпадать с отметкой расчетного сечения. Рекомендуемые схемы разбивки даны на рис.I8.

5.I2. Замену распределенной ветровой нагрузки на стойку горизонтальными сосредоточенными силами, приложенными на отметках крепления гирлянд изоляторов и тросов, допускается производить путем разнесения ее между расчетными отметками, рассматривая отдельные участки, как однопролетные шарнирно-опертые балки. Пример замены равномерно распределенной нагрузки для одноцепных и двухцепных опор дан на рис.I9.

При этом,

для одноцепных опор

$$P_з = P_т + \frac{W}{2} n$$

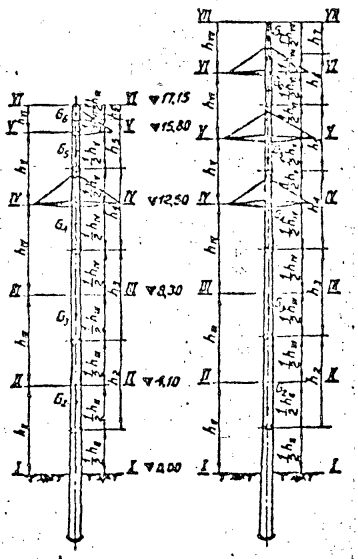


Рис.18. Схема учета вертикальных (весовых) нагрузок

Одноцепная опора: $G_2 = g_{к2}$; $G_3 = g_{к3}$;

$G_4 = g_{к4} + 2(g_п + g_г) + g_{тр.н}$;

$G_5 = g_{к5} + g_п + g_г + g_{тр.в}$;

$G_6 = g_{к6} + g_т + g_{т.с}$

Двухцепная опора: $G_2 = g_{к2}$; $G_3 = g_{к3}$;

$G_4 = g_{к4} + 2(g_п + g_г) + g_{тр.н}$;

$G_5 = g_{к5} + 2(g_п + g_г) + g_{тр.с}$;

$G_6 = g_{к6} + 2(g_п + g_г) + g_{тр.в}$;

$G_7 = g_т + g_{т.с}$

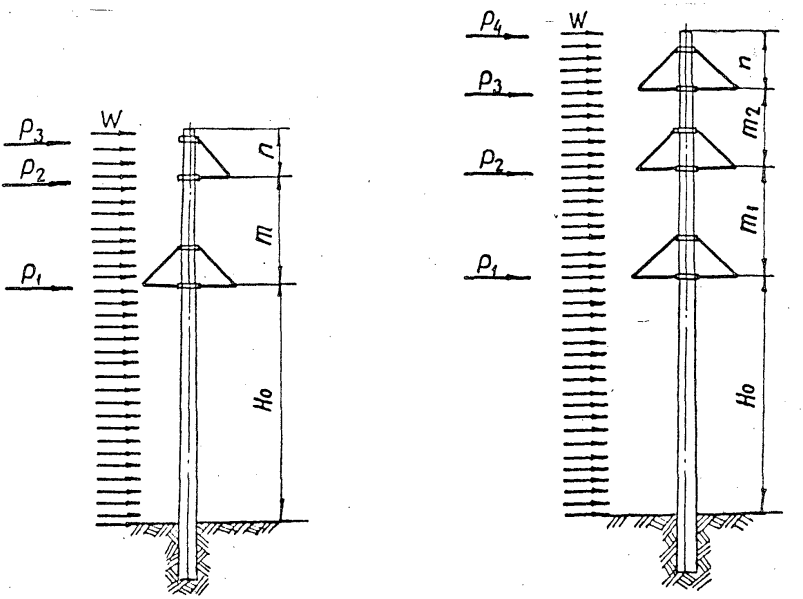


Рис.I9. Схемы, поясняющие замену распределенной ветровой нагрузки сосредоточенными горизонтальными силами.

$$P_2 = P_п + \frac{W}{2}(n+m)$$

$$P_1 = 2P_п + \frac{W}{2}(m+H_0)$$

для двухцепных опор

$$P_4 = P_т + \frac{W}{2}n$$

$$P_3 = 2P_п + \frac{W}{2}(n+m_2)$$

$$P_2 = 2P_п + \frac{W}{2}(m_2+m_1)$$

$$P_1 = 2P_п + \frac{W}{2}(m_1+H_0)$$

5.I4. Расчет рекомендуется выполнять в следующем порядке:

I. Намечаются расчетные сечения с учетом рекомендаций п.5.II.

2. Определяются изгибающие моменты и перерезывающие силы, действующие в расчетных сечениях от горизонтальных ($M_1 Q_1$) и неуравновешенных вертикальных ($M_2 Q_2$) нагрузок.

3. Стойка разбивается на секции - распределенная по высоте нагрузка, обусловленная весом стойки заменяется сосредоточенными силами в соответствии с указаниями п.5.II

4. Распределенная горизонтальная нагрузка на стойки (давление ветра) заменяется сосредоточенными силами, приложенными на отметках крепления гирлянд изоляторов и тросовой подвески в соответствии с п.5.I2.

5. Определяются отрезки прогиба стойки на отметках расчетных сечений от единичных горизонтальных сил при $C_0 = I$, приложенных на отметках крепления гирлянд изоляторов и тросовой подвески по формуле (76) при наличии трещин, по формуле (77) при их отсутствии.

6. Для тех же отметок по формуле (83) определяются отклонения стойки от вертикального положения за счет деформаций грунта основания. При этом, h_n заменяется на h_i (h_i - высота до отметки, для которой определяется отклонение).

7. Определяются стрелы прогиба от действия горизонтальных и неуравновешенных вертикальных сил с учетом деформаций грунта основания.

$$f_i = f_{i\alpha} + f_{ir}\frac{M}{M_{max}}$$

где:

M - изгибающий момент на отметке опорного сечения, создаваемый горизонтальными и неуравновешенными вертикальными нагрузками рассматриваемого сочетания ;

M_{max} - максимальный из изгибающих моментов, создаваемых горизонтальными и вертикальными неуравновешенными нагрузками расчетных сочетаний на той же отметке и той же плоскости.

8. По формуле (80) определяется "критическая" сила.

9. По формуле (79) определяется приведенная вертикальная сила.

I0. По формуле (78) определяется коэффициент C_o и полные стрелы прогиба, т.е. стрелы, обусловленные совместным действием всех нагрузок рассматриваемого режима с учетом деформированного состояния опоры.

II. Для расчетных сечений стоек определяются изгибающие моменты, создаваемые осесимметричными нагрузками на стрелах прогиба.

I2.Определяются суммарные изгибающие моменты,создаваемые всеми нагрузками данного сочетания (горизонтальными, вертикальными неуравновешенными, вертикальными осесимметричными).

I3.Строится эпюра изгибающих моментов, по которой производится расчет продольной арматуры.

I4.При расчете на нагрузки аварийных режимов производится проверка также в соответствии с требованиями п.3.20 на совместное действие изгиба и кручения.

Пример расчета одностоечной свободностоящей опоры ПБ-II0-2 на нагрузки нормального режима I.

Исходные данные

Провод АС-I50, трос ТК-50, Ш р-н по ветру, П р-н по гололеду, ветровой пролет $\ell_в$ = 200м, весовой пролет $\ell_{вес}$ =250 м, стойка СК-2пр.

Расчетные нагрузки на опору:

От веса проводов фазы, троса, кН

$G_ф$ = I.7 $G_т$ = I,I5

От веса гирлянд изоляторов $G_г$ = 0,5 кН

От ветра на провода фазы, трос, кН

$P_ф$ = I,95 Pт= I,2

От ветра на опору(распределенная по высоте),кН/м $P_к$=0,I26

От веса опоры (распределенная по высоте), кН/м $g_к$=2,37

Кривизна оси стойки на отметке опорного сечения,подсчитанная по указаниям п.3.39 Руководства при M=$M_Д$=285,4 кН.м

$$\frac{1}{\rho} = 0{,}5I3 \cdot I0^{-4} \quad I/см$$

Распределенная нагрузка от давления ветра на конструкцию опоры заменяется сосредоточенными силами, действующими на отметках поясов траверз и тросового крепления

$P_1 = 2.1,95+0,126 \frac{16,5-0}{2} = 4,94$ кН

$P_2 = 2.1,95+0,126 \frac{19,5-13,5}{2} = 4,28$ кН

$P_3 = 2.1,95+0,126 \frac{22,2-16,5}{2} = 4,26$ кН

$P_4 = 1,2+0,126 \frac{22,2-19,5}{2} + \frac{1,15.0,2}{22,2} = 1,38$ кН

В настоящем примере определение усилий дано для опорного сечения.

Изгибающие моменты от горизонтальных сил P_1, P_2, P_3 и P_4

$M_{1г} = 4,94.13,5 = 66,6$ кН.м

$M_{2г} = 4,28.16,5 = 70,6$ кН.м

$M_{3г} = 4,26.19,5 = 83,0$ кН.м

$M_{4г} = 1,38.22,2 = 30,6$ кН.м

Суммарный изгибающий момент от горизонтальных сил

$M_{\Sigma г} = 250,8$ Кн.м

Поскольку результирующий (т.е. с учётом действия вертикальных сил на стрелах прогиба) изгибающий момент не будет сильно отличаться от предельного, то кривизны соответствующие силам P_1, P_2, P_3 и P_4 определяются по кривизне, соответствующей предельному моменту Мп =285,4 кН.м

$\left(\frac{1}{\rho}\right)_1 = 0,513.10^{-4} \cdot \frac{66,6}{285,4} = 0,1197.10^{-4}$

$\left(\frac{1}{\rho}\right)_2 = 0,513.10^{-4} \cdot \frac{70,6}{285,4} = 0,127.10^{-4}$

$\left(\frac{1}{\rho}\right)_3 = 0,513.10^{-4} \cdot \frac{83,0}{285,4} = 0,149.10^{-4}$

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_4 = 0{,}513 \cdot 10^{-4} \quad \frac{30{,}6}{285{,}4} = 0{,}055 \cdot 10^{-4}$$

Прогибы стойки опоры от сосредоточенных горизонтальных сил P_1, P_2, P_3 и P_4

а. На отметке нижней траверсы

$$f_{11} = \frac{1350^2}{3} \cdot 0{,}1197 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1350}{1350} \right) = 7{,}28 \text{ см}$$

$$f_{12} = \frac{1350^2}{3} \cdot 0{,}127 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1350}{1650} \right) = 8{,}42 \text{ см}$$

$$f_{13} = \frac{1350^2}{3} \cdot 0{,}149 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1350}{1950} \right) = 10{,}48 \text{ см}$$

$$f_{14} = \frac{1350^2}{3} \cdot 0{,}055 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1350}{2220} \right) = 4{,}00 \text{ см}$$

б) На отметке средней траверсы

$$f_{21} = \frac{1350^2}{3} \cdot 0{,}1197 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{1650}{1350} - \frac{1}{2} \right) = 9{,}70 \text{ см}$$

$$f_{22} = \frac{1650^2}{3} \cdot 0{,}127 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{1650}{1650} - \frac{1}{2} \right) = 11{,}53 \text{ см}$$

$$f_{23} = \frac{1650^2}{3} \cdot 0{,}149 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1650}{1950} \right) = 14{,}55 \text{ см}$$

$$f_{24} = \frac{1650^2}{3} \cdot 0{,}055 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1650}{2220} \right) = 5{,}64 \text{ см}$$

в) На отметке верхней траверсы

$$f_{31} = \frac{1350^2}{3} \cdot 0{,}1197 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{1950}{1350} - \frac{1}{2} \right) = 12{,}11 \text{ см}$$

$$f_{32} = \frac{1650^2}{3} \cdot 0{,}127 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{1950}{1650} - \frac{1}{2} \right) = 14{,}68 \text{ см}$$

$$f_{33} = \frac{1950^2}{3} \cdot 0,149 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{1950}{1950} - \frac{1}{2} \right) = 18,90 \text{ см}$$

$$f_{34} = \frac{1950^2}{3} \cdot 0,055 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1950}{2220} \right) = 7,40 \text{ см}$$

г) Прогибы на отметке крепления грозозащитного троса

$$f_{41} = \frac{1350^2}{3} \cdot 0,1197 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{2220}{1350} - \frac{1}{2} \right) = 14,28 \text{ см}$$

$$f_{42} = \frac{1650^2}{3} \cdot 0,127 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{2220}{1650} - \frac{1}{2} \right) = 17,51 \text{ см}$$

$$f_{43} = \frac{1950^2}{3} \cdot 0,149 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{2220}{1950} - \frac{1}{2} \right) = 22,85 \text{ см}$$

$$f_{44} = \frac{2220^2}{3} \cdot 0,055 \cdot 10^{-4} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{2220}{2220} - \frac{1}{2} \right) = 9,03 \text{ см}$$

д) Полные прогибы

$$f_1 = 7,28+8,42+10,48+4,00+0,01(1350+200) = 45,68 \text{ см}$$

$$f_2 = 9,70+11,53+14,55+5,64+0,01(1650+200) = 59,92 \text{ см}$$

$$f_3 = 12,11+14,68+18,90+7,40+0,01(1950+200) = 74,59 \text{ см}$$

$$f_4 = 14,28+17,51+22,85+9,03+0,01(2220+200) = 87,87 \text{ см}$$

Вертикальные сосредоточенные силы на отметках поясов траверз и тросового крепления.

$$G_1 = 2,2 \cdot 2+2,37 \cdot \frac{16,5-0}{2} = 23,9 \text{ кН}$$

$$G_2 = 2,2,2+2,37 \cdot \frac{19,5-13,5}{2} = 11,5 \text{ кН}$$

$$G_3 = 2,2.2+2,37\ \frac{22,2-I6,5}{2} = II,I5\ кН$$

$$G_4 = I,I5+\ 2,37\ \frac{22,2-I9,5}{2} = 4,35\ кН$$

Изгибающий момент от вертикальных сил на стрелах прогиба

$$M_G = 23,9.0,457+II,5.0,599+II,I5.0,746+4,35.0,879=29,96\ кН.м$$

Суммарный изгибающий момент

$$M_\Sigma = 250,8 + 29,96 = 280,76\ кН.м$$

Так как суммарный изгибающий момент ($M_\Sigma = 280,76$ кН.м) мало отличается от предельного ($M_П = 285,4$ кН.м) расчет может не уточняться.

При значительной разнице нужно по полученному суммарному моменту скорректировать кривизну и весь расчет, начиная с определения кривизн ($\frac{I}{\rho})_i$, соответствующих силам P_I, P_2, P_3 и P_4.

Горизонтальная (перерезывающая) сила

$$Q = 4,94+4,28+4,26+I,38+0,I26\ .\frac{I3,5}{2} = I5,7I\ кН.м$$

Вертикальная сила

$$G = 2,2.6 + I,I5+2,37.22,2 = 67\ кН$$

Аналогично, если это необходимо, определяются усилия для других сечений стойки.

Портальные опоры с внутренними наклонными связями.

5.I5.Рекомендации по статическому расчету портальных свободностоящих опор с внутренними наклонными связями даны применительно к схеме опоры, приведенной на рис. 20 и 2I.

5.I6. Схема опоры представляет собою две заделанные в грунт стойки (ст), шарнирно соединенные металлическим ригелем (р) на отметке крепления проводов (к нему подвешивается средняя фаза). На этой же отметке на каждой стойке закреплена наружная консоль (к) в виде кронштейна с тягой для подвески крайних фаз.

Точки крепления тяг консолей к стойкам соединены растяжкой (Т), обеспечивающей разгрузку стоек от постоянных изгибающих моментов, создаваемых весовыми нагрузками на консолях и повышающей "рамность" конструкции. Ниже отметки траверсы стойки опоры соединены двумя наклонными гибкими связями (Н.с.) образующими крест. Назначение их уменьшить изгибающие моменты, действующие в сечениях стоек и опрокидывающие моменты, действующие на закрепления, за счет создания удерживающей пары " У·в ".

При действии нагрузок в плоскости портала опора работает как система с четырьмя лишними связями, но может рассчитываться как система с тремя лишними связями, поскольку одна из наклонных связей (заранее известная) при действии кососимметричных нагрузок выходит из работы, а при действии симметричных - усилия в этих связях одинаковы.

При действии нагрузок перпендикулярно плоскости портала гибкие наклонные и верхняя горизонтальная связи не работают и потому схема опоры представляет собою дважды, а при учете поддерживающего действия грозозащитных тросов четырежды статически неопределимую систему.

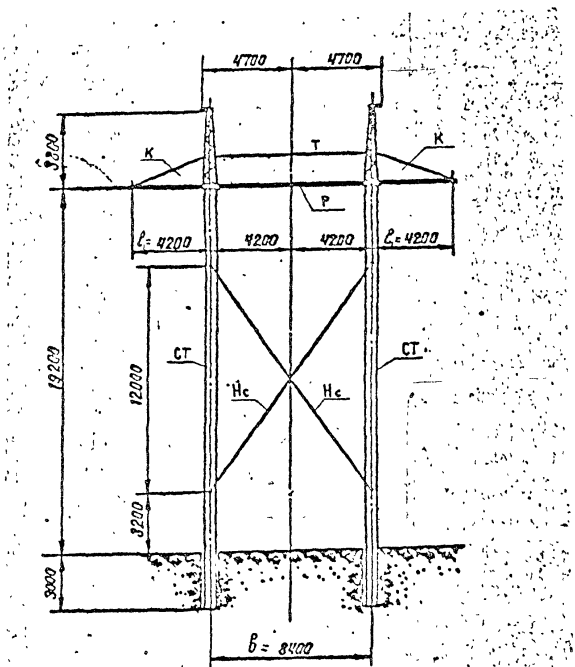


Рис.20. Схема портальной свободностоящей опоры с внутренними связями.

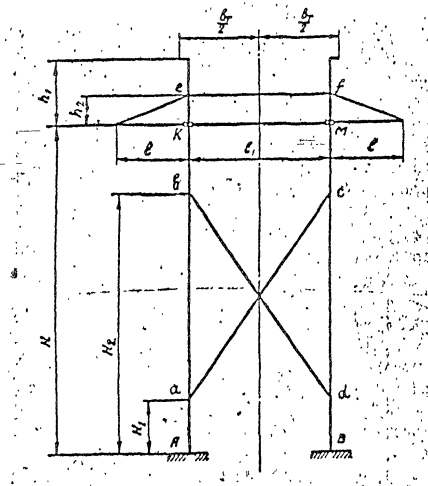


Рис 21 Расчетная схема портальной свободно-стоящей опоры с внутренними связями.

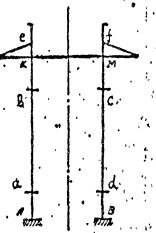


Рис 22. Основная система I.

5.I7. Допускается статический расчет таких опор выполнять при следующих упрощающих допущениях:

а) Наклонные и верхняя горизонтальная гибкие связи работают только на растяжение и при этом имеют прямолинейную форму.

б) Первоначальная форма опоры (т.е. ее форма в ненагруженном состоянии) остается неизменной при всех действующих на опору нагрузках.

в) Защемление стоек в грунте при действии нагрузок в плоскости портала является жестким.

5.I8. При сочетаниях нагрузок, действующих из плоскости портала (аварийные режимы) расчет рекомендуется выполнять для обоих граничных случаев закрепления стоек в грунте: жесткое и шарнирное с шарниром на глубине $\frac{2}{3}h$, где h - заглубление стоек опоры. Последний случай только при учете поддерживающего действия тросов.

5.I9. Рекомендуется следующий способ статического расчета этих опор.

а) На нагрузки, действующие в плоскости портала (нормальные режимы).

Усилия от кососимметричных и симметричных нагрузок определяются раздельно.

За основную систему принимается один раз статически неопределимая система I (рис.22), полученная рассечением рабочей наклонной и верхней горизонтальной связей. При этом, эпюра усилий от кососимметричных нагрузок - давление ветра

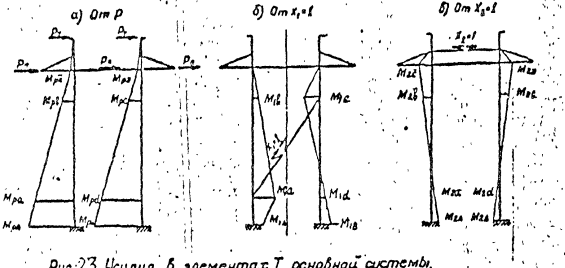


Рис.23 Усилия в элементах I основной системы.

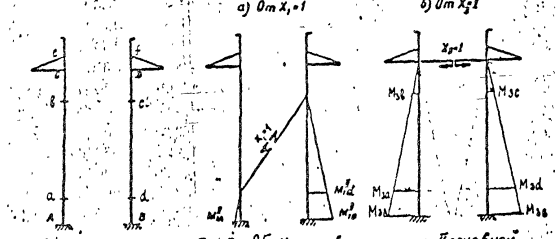


Рис.24 Основная система II

Рис.25 Усилия в элементах II основной системы.

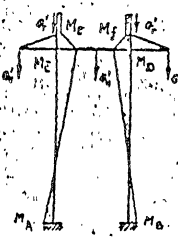


Рис.26 Усилия в элементах I основной системы от симметричных внешних нагрузок G

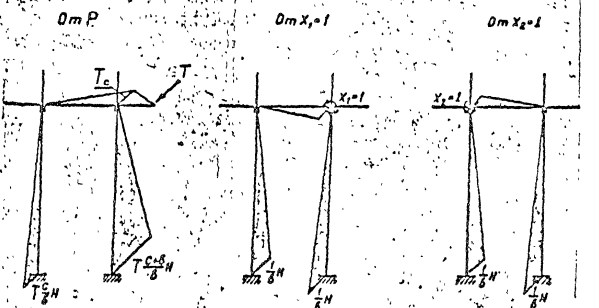


Рис.27 Усилия в элементах основной системы III

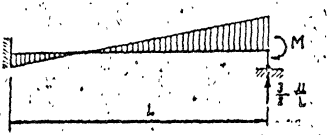


Рис.28 Схема работы стоек при действии силы $X_2=1$

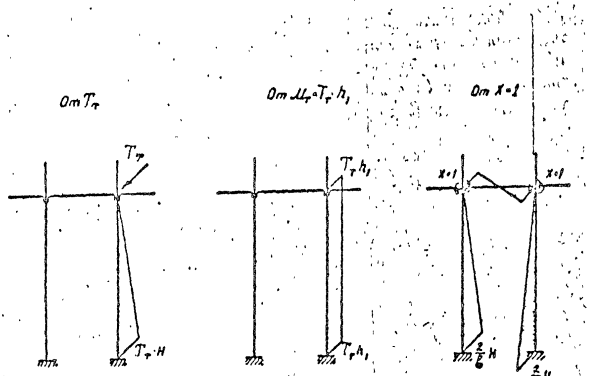


Рис 29. Усилия в элементах основной системы III

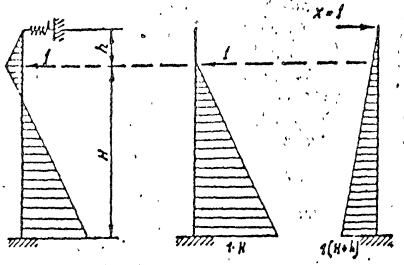


Рис. 30. Схема учета поддерживающего действия грозозащитного троса

на провода, грозозащитные тросы и конструкцию опоры (рис.23а) строится с учетом того, что усилие в ригеле равно нулю (основная система симметричная).

При определении усилий в элементах системы от силы $X_I = I$ рассчитывается система, имеющая одну лишнюю связь (ригель) Основная система П в этом случае представляет собою две раздельностоящие жесткозащемленные стойки (рис.24). Состояние, соответствующее при этом внешнему нагружению дано на рис.25а, а единичному ($X_3 = I$) на рис. 25б.

$$X_3 = -\frac{\Delta_{3P}}{\delta_{33}}$$

где $$\delta_{33} = \frac{2H^3}{3B}$$

$$\Delta_{3P} = \frac{1}{6B}\left[H_1 M_{1A}^{II}\left(M_{3Q} + 2M_{3A}\right) + H_2 M_{1B}^{II}\left(M_{3C} + 2M_{3B}\right)\right]$$

При действии силы $X_2 = I$ схема работы стоек приводится к балке, жесткозащемленной одним концом и опертой на подвижную опору другим, на которую действует изгибающий момент, приложенный в сечении над подвижной опорой (рис.28) и потому можно воспользоваться готовыми решениями.

Усилия в лишних связях X_I и X_2 определяются путем решения системы канонических уравнений метода сил

$$\left.\begin{aligned} \delta_{11}x_1 + \delta_{12}x_2 + \Delta_{1P} = 0 \\ \delta_{21}x_1 + \delta_{22}x_2 + \Delta_{2P} = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (II9)$$

где $$\delta_{11}=\frac{1}{B}\left\{\frac{H_1}{6}\left[2\left(M_{1a}^2+M_{1A}^2\right)+2M_{1A}M_{1a}\right]+\frac{H-H_1}{3}M_{1a}^2+\right.$$

$$\left.+\frac{H-H_2}{3}M_{1c}^2+\frac{H_2^2}{6}\left[2\left(M_{1c}^2+M_{1B}^2\right)-2M_{1c}M_{1B}\right]\right\}+\frac{L_{ac}\cdot 1}{EF_{ac}} \qquad (I20)$$

$$\delta_{22}=\frac{1}{6B}\left\{2H\left[2\left(M_{2A}^2+M_{2\bar{c}}^2\right)-2M_{2A}M_{2\bar{c}}\right]+2\frac{a}{3}M_{2\bar{c}}^2\right\}+$$

$$+\frac{N_2 L_{c\partial}}{EF_{c\partial}}+\frac{1\,L_{ef}}{EF_{ef}} \qquad (I2I)$$

$$\delta_{12}=\frac{1}{B}\left\{-\frac{H-H_1}{6}M_{1a}\left(M_{2\bar{c}}-2M_{2a}\right)-\frac{H_1}{6}\left[2\left(M_{2a}M_{1a}+M_{2A}M_{1A}\right)+\right.\right.$$

$$\left.+M_{2a}M_{1A}+M_{1a}M_{2A}\right]-\frac{H-H_2}{6}M_{1C}\left(2M_{2C}+M_{2\partial}\right)+$$

$$\left.+\frac{H_2}{6}\left[-2\left(M_{2C}M_{1C}+M_{2B}M_{1B}\right)+M_{2C}M_{1B}+M_{2B}M_{1C}\right]\right\} \qquad (I22)$$

$$\Delta_{1P} = -\frac{1}{6B}\Big\{H_1\Big[2\big(M_{P\alpha}M_{1\alpha} + \overline{M_{PA}M_{1A}}\big) + M_{P\alpha}M_{1A} + M_{1\alpha}M_{PA}\Big] +$$

$$+ (H - H_1)M_{1\alpha}\big(2M_{P\alpha} + M_{P\bar{c}}\big) - (H - H_2)M_{1c}\big(2M_{Pc} + M_{P\bar{c}}\big) +$$

$$+ H_2\Big[2\big(-M_{Pc}M_{1c} + M_{PB}M_{1B}\big) + M_{Pc}M_{1B} - M_{PB} - M_{1c}\Big] \qquad (123)$$

$$\Delta_{2P} = 0 \qquad (124)$$

Определение усилий для состояния "р" при действии симметричных нагрузок (рис. 28) производится с учетом тех же соображений, что и для состояния $X_2 = 1$. Единичные состояния, а следовательно и коэффициенты δ_{11}, δ_{22} и δ_{12} при расчете от симметричных нагрузок остаются те же, что и от обратносимметричных. Грузовые члены канонических уравнений метода сил определяются по формулам

$$\Delta_{1P} = \frac{1}{B}\Big\{-\frac{H-H_1}{6}M_{1\alpha}\big(M_{\bar{c}} - 2M_{\alpha}\big) - \frac{H_1}{6}\Big[2\big(M_{\alpha}M_{1\alpha} + M_A M_{1A}\big) + M_{\alpha}M_{1A} + M_{1\alpha}M_A\Big] -$$

$$- \frac{H-H_2}{6}M_{1c}\big(2M_c + M_{\bar{c}}\big) + \frac{H_2}{6}\Big[-2\big(M_c M_{1c} + M_B M_{1B}\big) + M_c M_{1B} + M_B M_{1c}\Big]\Big\} \qquad (125)$$

$$\Delta_{2P} = -\frac{1}{3B}\Big\{\alpha M_{2\bar{c}}\big(2M_{\bar{c}} + M_c\big) + H\Big[2\big(M_{2\bar{c}}M_{\bar{c}} + M_{2A}M_A\big) - M_c - M_{2A} - M_{2c} - M_A\Big]\Big\} \qquad (126)$$

По полученным в обоих расчетах усилиям (от кососимметричных и симметричных нагрузок) строятся результирующие эпюры усилий, по которым производится расчет сечений элементов конструкций опоры.

Допустимость определения усилий раздельно от обратно симметричных и симметричных нагрузок, с последующим их сложением определяется условием

$$S_{нс} > 0$$

где $S_{нс}$ -усилие в наклонной связи.

Зависимость $\mu_1 = f(m_b, n_b)$

$$\mu_1 = \frac{3}{(n_b - n_b^2)^3}\left[n_b(1-n_b)\,\ln\frac{n_b}{m_b} + \frac{n_b(1-m_b)(m_b-n_b)}{m_b} + \frac{(1+m_b)(n_b-m_b)^2}{2m_b}\right];$$

$$\mu_{1\,(m_b=1,\ n_b\neq 1)} = \frac{3}{(1-n_b)^2}\left[n_b \ln n_b + (1-n_b)\right];\qquad \mu_{1\,(m_b=1,\ n_b=1)} = \frac{3}{2m_b};\qquad \mu_{1\,(m_b=n_b)} = \frac{1+2n_b}{2n_b^2};\qquad \mu_{1\,(m_b=n_b=1)} = \frac{3}{2};$$

Таблица 2

n_b \ m_b	0,025	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250	0,275	0,300	0,325	0,350	0,375	0,400	0,425	0,450	0,475	0,500	0,525	0,550	0,575	0,600	0,625	0,650	0,675	0,700	0,725	0,750	0,775	0,800	0,825	0,850	0,875	0,900	0,925	0,950	0,975	1,000
0,025	834,4000	216,1645	157,3119	99,7678	69,7200	52,2000	40,7426	32,8543	27,2083	22,9939	19,7534	17,2096	15,1689	13,4887	12,1148	10,9560	9,9703	9,1266	8,3969	7,7622	7,2048	6,7158	6,2753	5,8851	5,5353	5,2197	4,9343	4,6751	4,4387	4,2225	4,0241	3,8416	3,6731	3,5174	3,3730	3,2388	3,1138	2,9971	2,8880	2,7859
0,050	578,700	210,9000	122,2050	72,8125	57,1633	43,4700	34,4323	28,0917	23,5907	20,0813	17,3968	15,2583	13,5289	12,1111	10,9243	9,9249	9,0723	8,3367	7,6979	7,1397	6,6480	6,2119	5,8234	5,4746	5,1617	4,8785	4,6213	4,3871	4,1731	3,9770	3,7964	3,6302	3,4763	3,3337	3,2002	3,0779	2,9629	2,8553	2,7546	2,6600
0,075	450,8103	178,2662	102,1220	68,0973	49,4755	38,0469	30,1450	25,1231	21,1965	18,1393	15,8063	13,9254	12,4110	11,1447	10,0945	9,2003	8,4333	7,7734	7,1967	6,6897	6,2430	5,8463	5,4914	5,1726	4,8848	4,6234	4,3875	4,1744	3,9733	3,7915	3,6240	3,4694	3,3260	3,1906	3,0694	2,9541	2,8463	2,7454	2,6509	2,5621
0,100	372,7677	152,8025	88,8764	59,9085	44,0915	34,1950	27,5600	22,9500	19,3876	16,6775	14,6026	12,9225	11,5496	10,4136	9,4500	8,6367	7,9383	7,3300	6,8016	6,3352	5,9218	5,5556	5,2257	4,9301	4,6623	4,4194	4,1982	3,9961	3,8109	3,6405	3,4831	3,3376	3,2028	3,0700	2,9608	2,8517	2,7498	2,6543	2,5567	2,4805
0,125	349,3500	133,9817	79,0829	54,0038	39,9885	31,2522	25,3918	21,1079	17,9400	15,5539	13,6534	12,1063	10,8563	9,8086	8,9309	8,1764	7,5289	6,9674	6,4736	6,0416	5,6559	5,3122	5,0042	4,7263	4,4753	4,2468	4,0386	3,8480	3,6731	3,5118	3,3630	3,2252	3,0975	2,9785	2,8675	2,7639	2,6668	2,5759	2,4905	2,4101
0,150	280,6152	119,7900	71,5455	49,2766	36,7817	28,8870	23,3506	19,6932	16,8432	14,5800	12,8769	11,4231	10,2817	9,3038	8,4890	7,7919	7,1856	6,6589	6,1966	5,7894	5,4276	5,1042	4,8132	4,5509	4,3140	4,0975	3,9004	3,7194	3,5531	3,4000	3,2589	3,1272	3,0051	2,8916	2,7857	2,6866	2,5939	2,5067	2,4248	2,3479
0,175	240,9408	107,5233	65,4930	45,4607	34,1239	26,9577	22,0356	18,5010	15,8618	13,8135	12,2100	10,8769	9,7633	8,8825	8,1113	7,4565	6,8848	6,3894	5,9567	5,5701	5,2276	4,9219	4,6467	4,3970	4,1716	3,9660	3,7781	3,6054	3,4470	3,3006	3,1653	3,0397	2,9230	2,8142	2,7126	2,6176	2,5283	2,4448	2,3661	2,2915
0,200	226,3935	99,3195	60,6154	42,2700	31,9067	25,3013	20,7962	17,5000	14,8781	13,1290	11,6097	10,3800	9,3538	8,4941	7,7742	7,1825	6,6216	6,1575	5,7418	5,3778	5,0519	4,7586	4,4974	4,2605	4,0453	3,8480	3,6688	3,5038	3,3518	3,2115	3,0817	2,9611	2,8490	2,7442	2,6466	2,5550	2,4692	2,3886	2,3126	2,2412
0,225	206,9475	91,9304	56,3432	39,6461	30,0000	23,8898	19,7280	16,6180	14,3187	12,5259	11,1022	9,9356	8,9700	8,1692	7,4823	6,9067	6,3900	5,9474	5,5490	5,2024	4,8922	4,6149	4,3636	4,1373	3,9305	3,7417	3,5695	3,4112	3,2654	3,1306	3,0054	2,8892	2,7814	2,6805	2,5862	2,4979	2,4151	2,3372	2,2638	2,1946
0,250	190,7514	85,5863	52,8134	37,2248	28,4000	22,6800	18,7187	15,8542	14,0413	11,9999	10,7064	9,5522	8,6423	7,8900	7,2154	6,6657	6,1735	5,7563	5,3810	5,0442	4,7495	4,4822	4,2418	4,0236	3,8273	3,6451	3,4795	3,3269	3,1862	3,0564	2,9357	2,8237	2,7193	2,6218	2,5309	2,4453	2,3652	2,2897	2,2187	2,1516
0,275	176,9615	80,1045	49,7288	35,2500	26,9024	21,6154	17,8500	15,1100	13,1242	11,5221	10,2467	9,1977	8,3376	7,6096	6,9600	6,4769	5,9823	5,5802	5,2275	4,9044	4,6142	4,3630	4,1311	3,9202	3,7304	3,5564	3,3961	3,2493	3,1129	2,9877	2,8711	2,7628	2,6619	2,5676	2,4794	2,3968	2,3187	2,2458	2,1768	2,1116
0,300	165,1830	75,3707	47,0360	33,4838	25,6623	20,5661	17,1377	14,5800	12,5186	11,0575	9,8752	8,9100	8,0614	7,3673	6,7722	6,2400	5,8308	5,4053	5,0821	4,7738	4,4987	4,2542	4,0283	3,8253	3,6423	3,4744	3,3180	3,1772	3,0457	2,9246	2,8116	2,7067	2,6088	2,5175	2,4316	2,3513	2,2756	2,2046	2,1376	2,0743
0,325	154,9800	71,1620	44,6200	31,8964	24,3475	19,7406	16,4510	14,0154	12,1500	10,7113	9,5506	8,6008	7,8099	7,1497	6,5661	6,0826	5,6700	5,2923	4,9438	4,6455	4,3875	4,1458	3,9228	3,7208	3,5368	3,3691	3,2160	3,0761	2,9481	2,8302	2,7217	2,6217	2,5295	2,4443	2,3653	2,2919	2,2234	2,1594	2,0993	2,0427
0,350	145,9767	67,4789	42,4017	30,4703	23,4969	18,9638	15,8472	13,4822	11,7692	10,3500	9,2473	8,3374	7,5816	6,9389	6,3800	5,9179	5,5064	5,1600	4,8261	4,5266	4,2673	4,0500	3,8429	3,6545	3,4832	3,3256	3,1818	3,0476	2,9243	2,8102	2,7038	2,6052	2,5124	2,4251	2,3500	2,2688	2,1976	2,1349	2,0765	2,0065
0,375	138,0258	64,1665	40,5878	29,1834	22,5566	18,2528	15,2438	13,0355	11,3432	10,0461	8,9700	8,0939	7,3654	6,7370	6,2217	5,7697	5,3705	5,0198	4,7100	4,4462	4,1850	3,9627	3,7650	3,5795	3,4127	3,2596	3,1189	2,9886	2,8692	2,7582	2,6560	2,5580	2,4586	2,3804	2,3052	2,2315	2,1614	2,0960	2,0339	1,9752
0,400	132,9566	61,1915	38,8514	28,0322	21,7096	17,5969	14,7340	12,6188	11,0131	9,7189	8,7385	7,8690	7,1673	6,5729	6,0672	5,6249	5,2457	4,9033	4,6037	4,3200	4,0431	3,8787	3,6829	3,5063	3,3477	3,1977	3,0591	2,9333	2,8174	2,7090	2,6086	2,5144	2,4267	2,3446	2,2677	2,1955	2,1278	2,0633	2,0029	1,9458
0,425	124,5774	58,5079	37,2726	26,9659	20,9378	17,0033	14,2457	12,2265	10,6763	9,3833	8,5178	7,6769	6,9900	6,4095	5,9196	5,4971	5,1207	4,7869	4,5034	4,2446	4,060	3,8000	3,6124	3,4421	3,2850	3,1370	3,0038	2,8817	2,7678	2,6618	2,5647	2,4732	2,3878	2,3072	2,2323	2,1622	2,0964	2,0328	1,9735	1,9105
0,450	118,8000	56,0716	35,8424	25,9904	19,7879	16,4543	13,8401	11,8618	10,3724	8,2025	8,2444	7,4468	6,8551	6,2700	5,7808	53696	5,0000	4,6913	4,4767	4,1585	3,9328	3,7280	3,5539	3,3728	3,2139	3,0825	2,9552	2,8292	2,7216	2,6339	2,5220	2,4347	2,3509	2,2725	2,1985	2,1296	2,0648	2,0035	1,9460	1,8909
0,475	113,5998	53,8338	34,5164	25,0964	18,9609	15,9429	13,4055	11,5255	10,0968	8,9552	8,0363	7,2873	6,6390	6,1385	5,6400	5,2522	4,9022	4,5950	4,3212	4,0768	3,8570	3,6595	3,4800	3,3077	3,1598	3,0280	2,8988	2,7840	2,6756	2,5774	2,4845	2,3953	2,3137	2,2393	2,1666	2,0993	2,0358	1,9754	1,9180	1,8653
0,500	108,8009	51,7851	33,2974	24,2644	18,9530	15,4659	13,0724	11,2133	9,8236	8,7255	7,8411	7,1063	6,4981	5,9645	5,5538	5,1300	4,8027	4,5036	4,2342	4,0000	3,7831	3,5933	3,4185	3,2600	3,1231	2,9734	2,8601	2,7375	2,6365	2,5391	2,4447	2,3611	2,2808	2,2059	2,1370	2,0700	1,9976	1,9392	1,8937	1,8410
0,525	104,4786	49,9016	32,1701	23,4916	18,3806	15,0279	12,6676	10,9139	9,5778	8,5134	7,6526	6,9482	6,3488	5,8489	5,4442	5,0462	4,7100	4,4172	4,1580	3,9251	3,7188	3,5278	3,3602	3,2011	3,0600	2,9285	2,8136	2,6922	2,5950	2,5022	2,4088	2,3264	2,2500	2,1768	2,1066	2,0430	1,9809	1,9234	1,8698	1,8176
0,550	100,4661	48,1565	31,1270	22,7747	17,8092	14,6138	12,3351	10,6448	9,3452	8,3178	7,4827	6,7927	6,2186	5,7338	5,3069	4,9260	4,5308	4,3500	4,0829	3,8573	3,6507	3,4712	3,3090	3,1517	3,0133	2,8800	2,7692	2,6538	2,5578	2,4638	2,3750	2,2952	2,2183	2,1466	2,0789	2,0156	1,9566	1,8994	1,8464	1,7953
0,575	96,7602	46,5363	30,1536	22,1063	17,3511	14,2284	12,0202	10,3859	9,1260	8,1287	7,3200	6,6505	6,0941	5,6181	5,2013	4,8414	4,5266	4,2462	3,9900	3,7915	3,5938	3,4165	3,2514	3,0982	2,9569	2,8415	2,7600	2,6154	2,5207	2,4285	2,3400	2,2625	2,1895	2,1173	2,0511	1,9889	1,9310	1,8764	1,8234	1,7738
0,600	93,3324	45,0292	29,2453	21,4795	16,8856	13,8600	11,7253	10,1409	8,9198	7,9499	7,1666	6,5156	5,9711	5,5064	5,1071	4,7588	4,4496	4,1896	3,9539	3,7200	3,5347	3,3593	3,1900	3,0557	2,9309	2,8003	2,6874	2,5800	2,4923	2,3950	2,3215	2,2350	2,1588	2,0921	2,0250	1,9656	1,9085	1,8526	1,8024	1,7531
0,625	90,1470	43,6255	28,3936	20,8914	16,4470	13,5181	11,4466	9,9086	8,7239	7,7848	7,0173	6,3863	5,8556	5,4079	5,0128	4,6725	4,3761	4,1082	3,8810	3,6615	3,4750	3,3080	3,1520	3,0173	2,8799	2,7522	2,6486	2,5475	2,4600	2,3638	2,2878	2,1997	2,1338	2,0676	2,0000	1,9428	1,8845	1,8308	1,7806	1,7335
0,650	87,1803	42,3122	27,5973	20,3736	16,0350	13,1936	11,1846	9,6903	8,5373	7,6228	6,8796	6,2624	5,7457	5,3044	4,9226	4,5941	4,3038	4,0463	3,8116	3,6035	3,4250	3,2600	3,1056	2,9664	2,8328	2,7219	2,6175	2,5142	2,4204	2,3320	2,2529	2,1746	2,1101	2,0400	1,9781	1,9194	1,8635	1,8111	1,7609	1,7141
0,675	84,4083	41,0796	26,8740	19,8101	15,6430	12,8873	10,9256	9,4832	8,3613	7,4705	6,7458	6,1468	5,6464	5,2109	4,8389	4,5144	4,2303	3,9798	3,7538	3,5541	3,3731	3,2154	3,0600	2,9251	2,7944	2,6869	2,5785	2,4891	2,3898	2,3043	2,2250	2,1508	2,0769	2,0149	1,9538	1,8964	1,8426	1,7899	1,7411	1,6953
0,700	81,8142	39,9209	26,0933	19,2446	15,2741	12,5961	10,6995	9,2861	8,1947	7,3254	6,6140	6,0342	5,5414	5,1199	4,7573	4,4423	4,1625	3,9200	3,7006	3,5025	3,3246	3,1680	3,0154	2,8800	2,7622	2,6506	2,5525	2,4688	2,3566	2,2754	2,1980	2,1252	2,0574	1,9882	1,9310	1,8750	1,8227	1,7697	1,7221	1,6778
0,725	79,3833	38,8313	25,4874	18,8585	14,9240	12,3108	10,4741	9,0985	8,0345	7,1883	6,4978	5,9270	5,4469	5,0362	4,6931	4,3702	4,1000	3,8596	3,6430	3,4504	3,2775	3,1231	2,9770	2,8462	2,7250	2,6156	2,5133	2,4161	2,3304	2,2462	2,1724	2,1005	2,0335	1,9704	1,9172	1,8526	1,8000	1,7516	1,7093	1,6586
0,750	77,0952	37,8039	24,8416	18,4164	14,5921	12,0587	10,2608	8,9134	7,8823	7,0562	6,3835	5,8252	5,3548	4,9528	4,6073	4,2957	4,0382	3,8022	3,5913	3,4012	3,2318	3,0788	2,9384	2,8047	2,6900	2,5886	2,4822	2,3887	2,3028	2,2271	2,1574	2,0767	2,0109	1,9487	1,8903	1,8384	1,7888	1,7325	1,6910	1,6440
0,775	74,9415	36,8315	24,2463	17,9981	14,2759	11,8082	10,0567	8,7483	7,7364	6,9305	6,2729	5,7279	5,2681	4,8746	4,5352	4,2306	3,9781	3,7472	3,5400	3,3548	3,1900	3,0422	2,9025	2,7817	2,6539	2,5502	2,4500	2,3609	2,2764	2,2029	2,1328	2,0582	2,0502	1,9889	1,9277	1,8703	1,8161	1,7574	1,7239	1,6688
0,800	72,9096	35,9113	23,6769	17,6002	13,9750	11,5713	9,8624	8,5860	7,5974	6,8093	6,1671	5,6333	5,1837	4,7993	4,4658	4,1766	3,9217	3,6940	3,4920	3,3111	3,1471	3,0000	2,8630	2,7375	2,6191	2,5201	2,4204	2,3300	2,2499	2,1722	2,0961	2,0310	1,9722	1,9078	1,8506	1,7975	1,7471	1,6864	1,6570	1,6115
0,825	70,9875	35,0398	23,1378	17,2209	13,6885	11,3488	9,6852	8,4301	7,4642	6,6939	6,0651	5,5437	5,1031	4,7266	4,4009	4,1157	3,8658	3,6435	3,4450	3,2674	3,1067	2,9596	2,8253	2,7050	2,5913	2,4901	2,3876	2,3031	2,2200	2,1484	2,0768	2,0139	1,9466	1,8866	1,8312	1,7793	1,7298	1,6828	1,6420	1,5896
0,850	69,1677	34,2115	22,6255	16,8595	13,4147	11,1269	9,4983	8,2805	7,3366	6,5829	5,9422	5,4567	5,0256	4,6565	4,3370	4,0582	3,8128	3,5944	3,4005	3,2253	3,0664	2,9222	2,7923	2,6737	2,5628	2,4634	2,3675	2,2779	2,2000	2,1300	2,0647	1,9896	1,9258	1,8687	1,8100	1,7618	1,7130	1,6667	1,6228	1,5812
0,875	67,4427	33,4234	22,1356	16,5138	13,1531	10,9490	9,3377	8,1371	7,2135	6,4753	5,87433	5,3735	4,9506	4,5889	4,2758	4,0022	3,7611	3,5471	3,3572	3,1843	3,0301	2,8873	2,7600	2,6409	2,5336	2,4337	2,3363	2,2520	2,1746	2,1051	2,0332	1,9683	1,9068	1,8463	1,7960	1,7447	1,6970	1,6512	1,6168	1,5668
0,900	65,8044	32,6734	21,6701	16,1851	12,9030	10,7497	9,1442	7,9997	7,1031	6,3736	5,7840	5,2935	4,8762	4,5238	4,2170	3,9488	3,6965	3,4574	3,2720	3,1067	2,9573	2,8241	2,6964	2,5832	2,4789	2,3798	2,2898	2,2125	2,1300	2,0597	1,9882	1,9294	1,8702	1,8142	1,7621	1,7121	1,6656	1,6219	1,5790	1,5389
0,925	64,2468	31,9566	21,2245	15,8694	12,6630	10,5290	8,9669	7,8674	6,9823	6,2751	5,6969	5,2162	4,8095	4,4614	4,1596	3,8965	3,6636	3,4574	3,2720	3,1067	2,9573	2,8241	2,6964	2,5832	2,4789	2,3798	2,2898	2,2125	2,1300	2,0597	1,9882	1,9294	1,8702	1,8142	1,7621	1,7121	1,6656	1,6219	1,5790	1,5389
0,950	62,7633	31,2763	20,7987	15,5675	12,4329	10,3450	8,8565	7,7403	6,8731	6,1801	5,6134	5,1443	4,7426	4,4010	4,1045	3,8456	3,6176	3,4147	3,2332	3,0701	2,9226	2,7886	2,6667	2,5537	2,4505	2,3567	2,2673	2,1842	2,1071	2,0438	1,9757	1,9083	1,8523	1,7974	1,7456	1,6968	1,6487	1,6068	1,5662	1,5254
0,975	61,3494	30,6248	20,3909	15,2773	12,2121	10,1693	8,7111	7,6180	6,7681	6,0884	5,5326	5,0696	4,6713	4,3424	4,0515	3,7972	3,5729	3,3734	3,1949	3,0344	2,8894	2,7577	2,6372	2,5267	2,4249	2,3308	2,2445	2,1649	2,0903	2,0176	1,9500	1,8918	1,8284	1,7808	1,7310	1,6812	1,6356	1,5912	1,5513	1,5106
1,000	60,0000	29,9996	20,0000	15,0000	12,0000	9,9998	8,5715	7,5000	6,6667	6,0000	5,4538	4,9999	4,6153	4,2857	4,0000	3,7500	3,5294	3,3271	3,1578	3,0000	2,8572	2,7271	2,6084	2,4998	2,3998	2,3067	2,2223	2,1433	2,0683	1,9970	1,9333	1,8750	1,8134	1,7574	1,7143	1,6665	1,6216	1,5789	1,5314	1,5000

$$M_1 = \frac{3}{(m_2 - n_1)^3}\left[n_1 \ln\frac{n_1}{m_2} + \frac{(m_2 - n_1)(m_1 + n_1)}{2 m_2}\right];\quad M_{1(m_2=1,\,n_1=1)} = \frac{3}{(m_2-1)^3}\left[n_1 \ln n_1 + \frac{(1-n_1)(1+n_1)}{2}\right];$$

Зависимость $M_2 = f(m_2, n_2)$

$$M_{2(m_2=1,\,n_2=1)} = \frac{3}{(m_2-1)^3}\left[\ln\frac{1}{m_2} + \frac{(m_2-1)(m_2+1)}{2 m_2}\right],\quad M_{2\,(m_2=n_2)} = \frac{1}{2 m_2^2},\quad M_{2(m_2\,n_2=1)} = \frac{1}{2},$$

Таблица 3

m_2 / n_1	0,025	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250	0,275	0,300	0,325	0,350	0,375	0,400	0,425	0,450	0,475	0,500	0,525	0,550	0,575	0,600	0,625	0,650	0,675	0,700	0,725	0,750	0,775	0,800	0,825	0,850	0,875	0,900	0,925	0,950	0,975	1,000
0,025	799,800	272,9787	140,8223	86,8900	59,3700	43,2763	33,0000	25,9981	21,0638	17,4337	14,6679	12,5236	10,8144	9,4674	8,3442	7,3916	6,5061	5,7413	5,3739	4,8845	4,4592	4,0872	3,7607	3,4722	3,2157	2,9863	2,7816	2,5970	2,4305	2,2794	2,1423	2,0168	1,9037	1,7976	1,7014	1,6127	1,5308	1,4549	1,3843	1,3187
0,050	543,973	201,0000	107,5194	68,2238	47,5404	35,2200	27,2769	21,7012	17,8037	14,8200	12,5716	10,7946	9,3822	8,2367	7,2859	6,5003	5,8350	5,2669	4,7782	4,3576	3,9904	3,6682	3,3840	3,1314	2,9072	2,7060	2,5254	2,3625	2,2148	2,0811	1,9590	1,8477	1,7457	1,6516	1,5651	1,4858	1,4117	1,3434	1,2805	1,2208
0,075	422,4951	161,3490	88,8000	57,3976	40,5142	30,3211	23,6400	19,0462	15,6213	13,1250	11,0363	9,6532	8,4338	7,4163	6,5878	5,8923	5,3025	4,8007	4,3660	3,9899	3,6607	3,3718	3,1159	2,8891	2,6863	2,4925	2,3410	2,1928	2,0528	1,9369	1,8256	1,7237	1,6301	1,5446	1,4651	1,3923	1,3242	1,2614	1,2022	1,1483
0,100	347,5194	136,4457	76,52 11	49,9985	35,6504	26,8836	21,0985	16,9500	14,1231	11,8757	10,1698	8,8013	7,7015	6,8067	6,0548	5,4300	4,8945	4,4412	4,0486	3,7059	3,4056	3,1426	2,9076	2,7000	2,5136	2,3386	2,1960	2,0593	1,9355	1,8224	1,7193	1,6251	1,5386	1,4588	1,3851	1,3173	1,2545	1,1966	1,1431	1,0939
0,125	296,490	118,8573	67,5228	44,5117	31,9992	24,2881	19,1549	15,5517	12,9300	10,9385	9,3839	8,1325	7,1288	6,3134	5,6310	5,0625	4,5722	4,1526	3,7906	3,4756	3,1983	2,9539	2,7376	2,5446	2,3719	2,2161	2,0761	1,9486	1,8333	1,7275	1,6316	1,5430	1,4621	1,3872	1,3182	1,2541	1,1948	1,1393	1,0896	1,0400
0,150	259,5078	105,600	60,6415	40,3258	28,9473	22,2230	17,6236	14,3448	11,9484	10,1400	8,7231	7,5710	6,5661	5,8138	5,2836	4,7535	4,3010	3,9111	3,5759	3,2813	3,0239	2,7966	2,5936	2,4134	2,2515	2,1060	1,9742	1,8545	1,7466	1,6483	1,5564	1,4730	1,3967	1,3260	1,2603	1,1989	1,1438	1,0908	1,0421	0,9982
0,175	230,370	94,22448	55,1703	36,9222	26,8162	20,5467	16,3258	13,3033	11,1454	9,4710	8,1600	7,1384	6,2574	5,5579	4,9875	4,4934	4,0653	3,7067	3,3911	3,1162	2,8727	2,6603	2,4713	2,3005	2,1474	2,0102	1,8857	1,7729	1,6701	1,5761	1,4910	1,4114	1,3393	1,2722	1,2101	1,1512	1,0991	1,0500	1,0046	0,9598
0,200	210,0524	86,6893	50,7385	34,4600	24,8832	19,1261	15,2399	12,5001	10,4523	8,9112	7,6941	6,7200	5,9231	5,2811	4,7295	4,2615	3,8666	3,5243	3,2309	2,9711	2,7431	2,5410	2,3611	2,2009	2,0567	1,9262	1,8080	1,7006	1,6032	1,5146	1,4324	1,3575	1,2879	1,2245	1,1654	1,1099	1,0598	1,0128	0,9673	0,9263
0,225	189,6186	79,9198	46,9349	31,7693	23,2500	17,9222	14,3294	11,7716	9,8766	8,4242	7,2871	6,3750	5,6400	5,0154	4,5000	4,0634	3,6900	3,3744	3,0883	2,8442	2,6278	2,4355	2,2647	2,1119	1,9748	1,8503	1,7385	1,6368	1,5442	1,4585	1,3805	1,3088	1,2425	1,1820	1,1252	1,0730	1,0241	0,9782	0,9362	0,8962
0,250	174,3291	74,1188	43,7631	29,6805	21,8462	16,8600	13,5301	11,1351	9,3356	7,9999	6,9290	6,0696	5,3693	4,7700	4,2923	3,8876	3,5373	3,2250	2,9505	2,7094	2,5241	2,3411	2,1777	2,0331	1,9031	1,7930	1,6968	1,5989	1,4908	1,4083	1,3337	1,2651	1,2014	1,1432	1,0892	1,0390	0,9919	0,9475	0,9056	0,8687
0,275	161,3493	69,1133	41,0175	27,9347	20,5829	15,9846	12,8400	10,5793	8,9066	7,6118	6,6115	5,7908	5,1343	4,5846	4,1400	3,7692	3,3905	3,1064	2,8500	2,6260	2,4280	2,2543	2,1000	1,9601	1,8358	1,7222	1,6280	1,5256	1,4405	1,3624	1,2912	1,2241	1,1642	1,1075	1,0560	1,0071	0,9614	0,9197	0,8898	0,8434
0,300	150,2784	64,80152	38,6155	26,4075	19,5168	15,1243	12,2315	10,0800	8,5153	7,3248	6,3129	5,5557	4,9232	4,4021	3,9603	3,6000	3,2923	2,9730	2,7425	2,5313	2,3415	2,1780	2,0294	1,8956	1,7748	1,6672	1,5691	1,4780	1,3953	1,3206	1,2518	1,1878	1,1301	1,0754	1,0254	0,9782	0,9345	0,8898	0,8558	0,8207
0,325	140,7078	60,99163	35,4856	25,0351	18,5075	14,4291	11,6529	9,6461	8,1300	7,0516	6,0682	5,3321	4,7336	4,2438	3,8131	3,4558	3,1200	2,9077	2,6827	2,4515	2,2688	2,0992	1,9635	1,8338	1,7200	1,6158	1,5196	1,4332	1,3542	1,2814	1,2134	1,1536	1,0978	1,0451	0,9968	0,9520	0,9096	0,8717	0,8379	0,7986
0,350	132,2778	57,6588	34,6132	23,8081	17,6839	13,7925	11,1437	9,2130	7,8308	6,7200	5,8349	5,1367	4,5681	4,0816	3,6641	3,3355	3,0418	2,7900	2,5846	2,3696	2,1941	2,0400	1,8990	1,7703	1,6688	1,5678	1,4751	1,3916	1,3160	1,2464	1,1821	1,1237	1,0676	1,0171	0,9723	0,9259	0,8853	0,8338	0,8123	0,7793
0,375	126,8471	54,67746	32,9378	22,7106	16,8944	13,2090	10,6800	8,8601	7,4941	6,4769	5,6100	4,9503	4,3994	3,9213	3,5539	3,2342	2,9453	2,6980	2,5000	2,3077	2,1213	1,9302	1,9413	1,7278	1,6200	1,5216	1,4356	1,3519	1,2810	1,2130	1,1508	1,0926	10411	0,9926	0,9454	0,9050	0,8637	0,8291	0,7917	0,7601
0,400	118,2570	51,9942	31,4227	21,7189	16,1885	12,6660	10,2695	8,5275	7,2392	6,2042	5,4308	4,7816	4,2532	3,8117	3,4491	3,1249	2,8618	2,6165	2,4097	2,2200	2,0615	1,9761	1,7910	1,6838	1,5803	1,4818	1,3951	1,3178	1,2481	1,1817	1,1214	1,0659	1,0165	0,9679	0,9235	0,8822	0,8436	0,8069	0,7754	0,7428
0,425	112,3101	49,5942	30,0455	20,8130	15,5433	12,1847	9,8771	8,2264	6,9713	5,9667	5,2857	4,6308	4,1100	3,6935	3,3384	3,0403	2,7680	2,5198	2,3402	2,1648	1,9800	1,8722	1,7450	1,6343	1,5338	1,4408	1,3647	1,2837	1,2167	1,1509	1,0945	1,0394	0,9905	0,9441	0,9020	0,8616	0,8244	0,7910	0,7620	0,7265
0,450	107,0298	47,4044	28,9024	19,9362	14,9637	11,7367	9,5264	7,9328	6,7349	5,8163	5,0653	4,4822	4,0000	3,6000	3,2381	2,9436	2,6795	2,4693	2,2783	2,1067	1,9558	1,8300	1,7001	1,5887	1,4930	1,4100	1,3301	1,2553	1,1870	1,1250	1,0679	1,0180	0,9660	0,9211	0,8808	0,8424	0,8076	0,7697	0,7439	0,7140
0,475	102,1005	45,4033	27,6511	19,2300	14,4046	11,3219	9,2056	7,6713	6,5223	5,6312	4,9163	4,3433	3,8787	3,5077	3,1800	2,8915	2,6353	2,4050	2,2162	2,0499	1,9051	1,7756	1,6600	1,5538	1,4556	1,3937	1,3050	1,2248	1,1555	1,0994	1,0456	0,9910	0,9459	0,9023	0,8630	0,8265	0,7865	0,7558	0,7274	0,6960
0,500	97,6827	43,5736	26,5975	18,5278	13,9025	10,9366	8,9021	7,4789	6,3188	5,4530	4,7700	4,2150	3,7612	3,3728	3,0923	2,7900	2,5466	2,3383	2,1555	2,0002	1,8541	1,7316	1,6100	1,5200	1,4308	1,3401	1,2705	1,2038	1,1352	1,0713	1,0197	0,9711	0,9272	0,8871	0,8426	0,8063	0,7710	0,7433	0,7135	0,6823
0,525	94,1187	41,8981	25,6249	17,8796	13,4330	10,5851	8,6228	7,1998	6,1300	5,3005	4,6353	4,1036	3,6638	3,3023	2,9645	2,8769	2,4600	2,2818	2,1053	1,9463	1,8142	1,6910	1,5826	1,4824	1,3950	1,3077	1,2426	1,1698	1,1100	1,0509	1,0050	0,9461	0,9067	0,8651	0,8270	0,7914	0,7550	0,7288	0,7019	0,6690
0,550	89,9235	40,3688	24,7256	17,2794	12,9377	10,2534	8,3633	6,9858	5,9528	5,1500	4,5101	4,0104	3,5663	3,2063	2,9049	2,6361	2,4000	2,2206	2,0557	1,9051	1,7697	1,6529	1,5466	1,4486	1,3630	1,2800	1,2120	1,1450	1,0872	1,0275	0,9851	0,9334	0,8914	0,8444	0,8121	0,7752	0,7413	0,7102	0,6792	0,6562
0,575	86,4963	38,9084	23,8908	16,7213	12,5932	9,9455	8,1159	6,7891	5,7865	5,0100	4,3889	3,8885	3,4763	3,1291	2,8313	2,5802	2,3609	2,1691	1,9900	1,8624	1,7333	1,6238	1,5124	1,4093	1,3339	1,2561	1,1850	1,1220	1,0651	1,0102	0,9675	0,9113	0,8700	0,8308	0,7922	0,7603	0,7269	0,6953	0,6746	0,6436
0,600	83,3298	37,5774	23,1133	16,1990	12,2141	9,6525	7,8859	6,6014	5,6319	4,8771	4,2776	3,7900	3,3880	3,0518	2,7656	2,5163	2,3116	2,1302	1,9539	1,8300	1,6931	1,5802	1,4810	1,3888	1,3075	1,2314	1,1640	1,1030	1,0430	0,9901	0,9450	0,8963	0,8534	0,8177	0,7803	0,7522	0,7125	0,6857	0,6548	0,6318
0,625	80,3901	36,3959	22,3846	15,7097	11,8586	9,3812	7,6691	6,4252	5,4863	4,7535	4,1705	3,6982	3,3067	2,9813	2,7004	2,4621	2,2575	2,0765	1,9083	1,7846	1,6600	1,5489	1,4498	1,3839	1,2799	1,2050	1,1378	1,0787	1,0200	0,9718	0,9436	0,8798	0,8340	0,8060	0,7678	0,7385	0,7000	0,6741	0,6464	0,6219
0,650	77,6586	35,1778	21,7058	15,2510	11,5229	9,1255	7,4666	6,2588	5,3466	4,6369	4,0696	3,6087	3,2298	2,9100	2,6409	2,4085	2,2072	2,0321	1,8750	1,7397	1,6254	1,5200	1,4198	1,3340	1,2550	1,1836	1,1246	1,0610	1,0041	0,9540	0,9060	0,8639	0,8200	0,7875	0,7559	0,7187	0,6880	0,6617	0,6363	0,6098
0,675	75,1062	34,0913	21,0679	14,8206	11,2097	8,8841	7,2639	6,1025	5,2159	4,5260	3,9746	3,5274	3,1560	2,8480	2,5833	2,3538	2,1612	1,9886	1,8413	1,7071	1,5975	1,4901	1,3950	1,3083	1,2286	1,1658	1,0973	1,0382	0,9854	0,9362	0,8929	0,8467	0,8053	0,7730	0,7396	0,7084	0,6750	0,6515	0,6257	0,6002
0,700	72,7194	33,0730	20,4400	14,4147	10,9130	8,6551	7,0924	5,9537	5,0914	4,4198	3,8840	3,4477	3,0876	2,7838	2,5290	2,3078	2,1158	1,9538	1,8068	1,6763	1,5616	1,4556	1,3708	1,2840	1,2084	1,1426	1,0750	1,0204	0,9680	0,9118	0,8730	0,8339	0,7955	0,7603	0,7234	0,6963	0,6655	0,6411	0,6157	0,5889
0,725	70,7847	32,1168	19,8800	14,0312	10,6325	8,4395	6,9201	5,8128	4,9740	4,3204	3,7990	3,3728	3,0211	2,7269	2,4523	2,2598	2,0745	1,9111	1,7697	1,6436	1,5300	1,4284	1,3430	1,2600	1,1889	1,1200	1,0594	0,9949	0,9513	0,8988	0,8570	0,8199	0,7825	0,7421	0,7154	0,6853	0,6550	0,6306	0,6061	0,5796
0,750	68,3835	31,2152	19,3680	13,6696	10,3675	8,2343	6,7568	5,6785	4,8622	4,2252	3,7161	3,3012	2,9574	2,6705	2,4260	2,2150	2,0353	1,8750	1,7337	1,6123	1,5040	1,4063	1,3209	1,2370	1,1650	1,1000	1,0402	0,9833	0,9315	0,8888	0,8430	0,8070	0,7708	0,7362	0,7045	0,6738	0,6450	0,6203	0,5971	0,5708
0,775	66,4077	30,3646	18,8640	13,3261	10,1153	8,0452	6,6017	5,5514	4,7555	4,1345	3,6382	3,2333	2,8986	2,6178	2,3780	2,1728	1,9954	1,8398	1,7044	1,5836	1,4780	1,3881	1,3113	1,2460	1,1450	1,0823	1,0233	0,9689	0,9197	0,8738	0,8315	0,7940	0,7588	0,7244	0,6928	0,6641	0,6391	0,6100	0,5875	0,5610
0,800	64,5456	29,5594	18,3852	13,0012	9,8761	7,8561	6,4542	5,4302	4,6538	4,0474	3,5635	3,1658	2,8416	2,5658	2,3322	2,1319	1,9583	1,8065	1,6726	1,5556	1,4495	1,3579	1,2775	1,1963	1,1194	1,0561	1,0000	0,9500	0,9048	0,8606	0,8170	0,7811	0,7478	0,7144	0,6823	0,6544	0,6275	0,6000	0,5781	0,5550
0,825	62,7846	28,7991	17,9312	12,6920	9,6487	7,6802	6,3238	5,3143	4,5567	3,9653	3,4916	3,1060	2,7862	2,5177	2,2889	2,0922	1,9233	1,7734	1,6434	1,5275	1,4256	1,3341	1,2495	1,1774	1,1100	1,0522	0,9852	0,9339	0,8840	0,8484	0,8071	0,7700	0,7345	0,7030	0,6730	0,6437	0,6182	0,5934	0,5714	0,5460
0,850	61,1199	28,0786	17,5013	12,3968	9,4311	7,5416	6,1772	5,2027	4,4630	3,8847	3,4214	3,0440	2,7311	2,4679	2,2445	2,0515	1,8843	1,7386	1,6095	1,5014	1,4008	1,3107	1,2274	1,1555	1,0825	1,0275	0,9571	0,9240	0,8773	0,8337	0,7943	0,7642	0,7210	0,6922	0,6640	0,6338	0,6091	0,5848	0,5626	0,5400
0,875	59,5428	27,3906	17,0917	12,1177	9,2233	7,3723	6,0501	5,0982	4,3752	3,8104	3,3579	2,9890	2,6830	2,4261	2,2070	2,0186	1,8560	1,7126	1,5877	1,4770	1,3790	1,2898	1,2100	1,1365	1,0730	1,0193	0,9525	0,9123	0,8697	0,8207	0,7819	0,7463	0,7120	0,6830	0,6532	0,6296	0,6034	0,5774	0,5557	0,5320
0,900	58,0476	26,7348	16,6562	11,8507	9,0292	7,1992	5,9275	4,9972	4,2830	3,7377	3,2951	2,9339	2,6349	2,3821	2,1686	1,9836	1,8243	1,6851	1,5619	1,4531	1,3569	1,2684	1,1920	1,1211	1,0558	0,9981	0,9430	0,8925	0,8511	0,8156	0,7710	0,7360	0,7024	0,6723	0,6450	0,6172	0,5930	0,5681	0,5450	0,5250
0,925	56,6256	26,1176	16,3253	11,5955	8,8398	7,0530	5,8058	4,9001	4,2091	3,6682	3,2348	2,8814	2,5881	2,3445	2,1307	1,9501	1,7940	1,6568	1,5361	1,4295	1,3346	1,2494	1,1725	1,1037	1,0400	0,9851	0,9271	0,8824	0,8380	0,8003	0,7656	0,7256	0,6929	0,6621	0,6374	0,6065	0,5845	0,5585	0,5426	0,5200
0,950	54,2726	25,5260	15,9743	11,3513	8,6593	6,9123	5,6971	4,8071	4,1306	3,6012	3,1769	2,8302	2,5431	2,3044	2,0951	1,9180	1,7642	1,6304	1,5113	1,4067	1,3134	1,2295	1,1540	1,0852	1,0239	0,9678	0,9130	0,8670	0,8270	0,7875	0,7505	0,7155	0,6833	0,6533	0,6265	0,6000	0,5750	0,5541	0,5320	0,5180
0,975	53,9035	24,9605	15,6343	11,1182	8,4863	6,7785	5,5891	4,7180	4,0556	3,5371	3,1210	2,7820	2,5001	2,2678	2,0608	1,8867	1,7362	1,6044	1,4882	1,3854	1,2938	1,2114	1,1367	1,0707	1,0088	0,9551	0,9023	0,8552	0,8116	0,7722	0,7360	0,7056	0,6740	0,6451	0,6183	0,5923	0,5673	0,5486	0,5258	0,5060
1,000	52,7514	24,4205	15,3096	10,8947	8,3357	6,6494	5,4852	4,6322	3,9833	3,4754	3,0678	2,7348	2,4585	2,2358	2,0275	1,8569	1,7090	1,5790	1,4652	1,3644	1,2743	1,1932	1,1207	1,0547	0,9940	0,9396	0,8914	0,8456	0,8034	0,7650	0,7298	0,6962	0,6654	0,6367	0,6101	0,5849	0,5614	0,5396	0,5200	0,5000

Таблица 4

ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

$f_1(\rho)$, $f_2(\rho)$, $f_3(\rho)$, $f_4(\rho)$, $f_5(\rho)$ и $f_6(\rho)$ где $\rho = \psi, \theta, \alpha$

ρ град.	$f_1(\rho)$	$f_2(\rho)$	$f_3(\rho)$	$f_4(\rho)$	$f_5(\rho)$	$f_6(\rho)$
I	0,000004	0,01745	0,000001	3,124	3,1418	1,5707
2	0,000028	0,0349	0,000007	3,107	3,1425	1,5703
3	0,000095	0,523	0,000024	3,089	3,1436	1,5697
4	0,000228	0,0698	0,000057	3,071	3,1452	1,5689
5	0,000442	0,0872	0,000111	3,054	3,1471	1,5679
6	0,000767	0,1050	0,000193	3,036	3,1495	1,5667
7	0,001218	0,1218	0,000243	3,019	3,1521	1,5652
8	0,001815	0,1390	0,000454	3,002	3,1552	1,5636
9	0,002585	0,1560	0,000646	2,984	3,1585	1,5617
10	0,003550	0,1740	0,000891	2,967	3,1621	1,5597
11	0,004724	0,1960	0,001186	2,949	3,1660	1,5574
12	0,00614	0,2080	0,001540	2,932	3,1702	1,5550
13	0,00781	0,2250	0,001961	2,915	3,1746	1,5524
14	0,00976	0,2420	0,00245	2,897	3,1793	1,5496
15	0,01200	0,2590	0,00300	2,880	3,1840	1,5466
16	0,014575	0,2760	0,00367	2,862	3,1890	1,5434
17	0,01750	0,2920	0,00441	2,844	3,1943	1,5401
18	0,02080	0,3090	0,00525	2,827	3,1995	1,5366
19	0,02445	0,3260	0,00618	2,810	3,2051	1,5330
20	0,02853	0,3420	0,00722	2,793	3,2107	1,5292
21	0,0331	0,3580	0,00838	2,775	3,2165	1,5252
22	0,0380	0,3750	0,00965	2,757	3,2223	1,5211
23	0,0435	0,3910	0,01100	2,740	3,2282	1,5168
24	0,04945	0,4070	0,0126	2,722	3,2341	1,5124
25	0,0559	0,4230	0,0143	2,705	3,2401	1,5078
26	0,0630	0,4330	0,0161	2,688	3,2461	1,5031
27	0,0706	0,4540	0,0180	2,670	3,2521	1,4983
28	0,0788	0,4690	0,0202	2,653	3,2581	1,4933

Продолжение таблицы 4

ρ град.	$f_1(\rho)$	$f_2(\rho)$	$f_3(\rho)$	$f_4(\rho)$	$f_5(\rho)$	$f_6(\rho)$
29	0,0876	0,4850	0,0225	2,635	3,2542	I,4882
30	0,097I	0,5000	0,0249	2,6I8	3,270I	I,4830
3I	0,I072	0,5I50	0,0276	2,600	3,2759	I,4776
32	0,II8I	0,5300	0,0305	2,585	3,28I8	I,472I
33	0,I296	0,545	0,0335	2,565	3,2876	I,4665
34	0,I4I9	0,559	0,0368	2,548	3,2983	I,4607
35	0,I550	0,574	0,0403	2,530	3,2988	I,4549
36	0,I689	0,588	0,0439	2,5I3	3,3044	I,4489
37	0,I836	0,602	0,0479	2,495	3,3097	I,4428
38	0,I992	0,6I6	0,0520	2,478	3,3I49	I,4366
39	0,2I56	0,629	0,0565	2,46I	3,3I99	I,4303
40	0,2329	0,643	0,05I2	2,443	3,3249	I,4239
4I	0,25I2	0,656	0,066I	2,426	3,3295	I,4I73
42	0,27I0	0,669	0,07I4	2,409	3,3I40	I,4I07
43	0,29I0	0,682	0,0769	2,39I	3,3383	I,4040
44	0,3I20	0,695	0,0827	2,374	3,3424	I,397I
45	0,3340	0,707	0,0889	2,356	3,3462	I,3902
46	0,3570	0,7I9	0,0954	2,339	3,3498	I,383I
47	0,3820	0,73I	0,I020	2,32I	3,3533	I,3760
48	0,4080	0,743	0,I090	2,304	3,3563	I,3688
49	0,4350	0,754	0,II70	2,286	3,3592	I,3615
50	0,4630	0,766	0,I248	2,269	3,3617	I,354I
5I	0,4920	0,777	0,I332	2,25I	3,364I	I,3466
52	0,5230	0,788	0,I4I9	2,234	3,3660	I,3390
53	0,5550	0,799	0,I5I0	2,2I7	3,3677	I,33I4
54	0,5880	0,809	0,I606	2,I99	3,3690	I,3236
55	0,6230	0,8I9	0,I707	2,I82	3,370I	I,3I58
56	0,6590	0,829	0,I8I0	2,I64	3,3707	I,3079
57	0,6970	0,839	0,I920	2,I47	3,37II	I,2999
58	0,7360	0,848	0,2040	2,I29	3,37I0	I,29I8
59	0,7760	0,857	0,2I60	2,II2	3,3707	I,2837
60	0,8I90	0,866	0,2280	2,094	3,3699	I,2755
6I	0,8630	0,875	0,24I0	2,077	3,3687	I,2672

Продолжение таблицы

ρ град.	$f_1(\rho)$	$f_2(\rho)$	$f_3(\rho)$	$f_4(\rho)$	$f_5(\rho)$	$f_6(\rho)$
62	0,9090	0,883	0,2550	2,059	3,3672	I,2588
63	0,9560	0,891	0,2690	2,042	3,3652	I,2504
64	I,0050	0,899	0,2840	2,025	3,3630	I,2419
65	I,0560	0,906	0,3000	2,007	3,3602	I,2333
66	I,1090	0,914	0,3160	I,990	3,3571	I,2247
67	I,1640	0,921	0,3330	I,972	3,3535	I,2160
68	I,2210	0,927	0,3510	I,955	3,3495	I,2072
69	I,2800	0,934	0,3700	I,937	3,3450	I,1984
70	I,342	0,940	0,389	I,920	3,3402	I,1895
71	I,405"	0,946	0,409	I,902	3,3348	I,1805
72	I,471	0,951	0,430	I,885	3,3291	I,1715
73	I,539	0,956	0,452	I,868	3,3227	I,1624
74	I,610	0,961	0,474	I,850	3,3161	I,1533
75	I,683	0,966	0,498	I,833	3,3088	I,1441
76	I,758	0,970	0,523	I,815	3,3011	I,1349
77	I,836	0,974	0,549	I,798	3,2930	I,1256
78	I,917	0,978	0,575	I,780	3,2843	I,1162
79	2,000	0,982	0,603	I,763	3,2753	I,1068
80	2,088	0,985	0,633	I,745	3,2656	I,0973
81	2,178	0,988	0,663	I,728	3,2556	I,0878
82	2,271	0,990	0,694	I,710	3,2449	I,0782
83	2,367	0,993	0,727	I,693	3,2338	I,0686
84	2,466	0,995	0,762	I,676	3,2221	I,0590
85	2,321	0,996	0,797	I,658	3,2101	I,0493
86	2,676	0,998	0,835	I,641	3,1973	I,0395
87	2,786	0,999	0,873	I,623	3,1843	I,0297
88	2,900	0,999	0,914	I,606	3,1705	I,0198
89	3,019	0,999	0,956	I,588	3,1564	I,0099
90	3,141	I,000	I,000	I,571	3,1416	I,0000
91	3,268	0,999	I,046	I,553	3,1264	0,9900
92	3,296	0,999	I,094	I,536	3,1106	0,9800
93	3,430	0,999	I,143	I,518	3,0942	0,9699
94	3,677	0,998	I,195	I,500	3,0775	0,9598

Продолжение таблицы 4

ρ град.	$f_1(\rho)$	$f_2(\rho)$	$f_3(\rho)$	$f_4(\rho)$	$f_5(\rho)$	$f_6(\rho)$
95	3,823	0,996	I,250	I,484	3,0603	0,9497
96	3,974	0,995	I,306	I,466	3,0423	0,9395
97	4,I3I	0,993	I,365	I,449	3,0238	0,9293
98	4,294	0,990	I,427	I,43I	3,0050	0,9I90
99	4,463	0,988	I,49I	I,4I4	2,9854	0,9087
I00	4,638	0,985	I,559	I,396	2,9655	0,8983
I0I	4,822	0,982	I,629	I,379	2,9449	0,8880
I02	5,008	0,978	I,702	I,36I	2,9240	0,8776
I03	5,205	0,974	I,779	I,344	2,9023	0,867I
I04	5,408	0,970	I,859	I,326	2,8804	0,8566
I05	5,620	0,966	I,943	I,309	2,8576	0,846I
I06	5,840	0,96I	2,03I	I,292	2,8346	0,8356
I07	6,068	0,956	2,I23	I,274	2,8I08	0,8250
I08	6,307	0,95I	2,2I9	I,267	2,7865	0,8I44
I09	6,554	0,946	2,320	I,239	2,76I9	0,8038
II0	6,8I3	0,940	2,426	I,222	2,7366	0,793I
III	7,082	0,934	2,537	I,204	2,7II0	0,7824
II2	7,362	0,927	2,653	I,I87	2,6846	0,77I7
II3	7,655	0,92I	2,776	I,I69	2,6580	0,7609
II4	7,960	0,9I4	2,904	I,I52	2,6306	0,750I
II5	8,279	0,906	3,039	I,I34	2,603I	0,7393
II6	8,6I3	0,899	3,I8I	I,II7	2,5746	0,7285
II7	8,962	0,89I	3,330	I,I00	2,546I	0,7I76
II8	9,327	0,883	3,478	I,082	2,5I67	0,7067
II9	9,709	0,875	3,652	I,065	2,487I	0,6958
I20	I0,II0	0,866	3,826	I,047	2,4568	0,6849
I2I	I0,530	0,857	3,967	I,030	2,4263	0,6739
I22	I0,97I	0,848	4,204	I,0I2	2,3949	0,6629
I23	II,435	0,839	4,409	0,995	2,363I	0,65I9
I24	II,923	0,829	4,626	0,977	2,33I2	0,6408
I25	I2,436	0,8I9	4,856	0,960	2,2984	0,6298
I26	I2,977	0,809	5,098	0,942	2,2657	0,6I87
I27	I3,548	0,799	5,336	0,925	2,2320	0,6076
I28	I4,I50	0,788	5,629	0,908	2,I983	0,5965

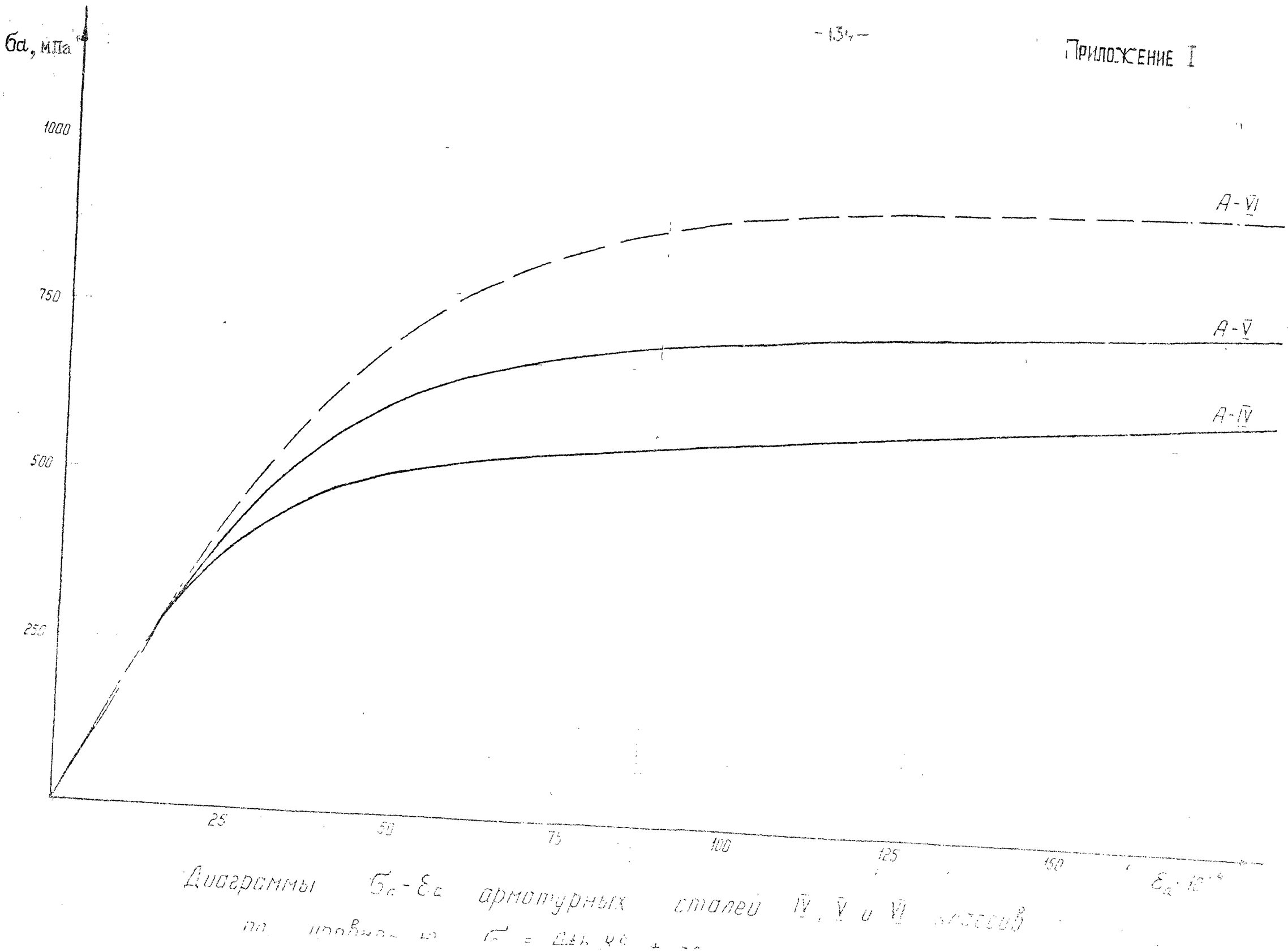
Продолжение таблицы

ρ град.	$f_1(\rho)$	$f_2(\rho)$	$f_3(\rho)$	$f_4(\rho)$	$f_5(\rho)$	$f_6(\rho)$
129	14,787	0,777	5,919	0,800	2,1637	0,5853
130	15,461	0,766	6,227	0,873	2,1293	0,5742
131	16,174	0,755	6,556	0,855	2,0938	0,5630
132	16,932	0,743	6,905	0,838	2,0585	0,5518
133	17,736	0,731	7,278	0,820	2,0221	0,5406
134	18,592	0,719	7,677	0,803	1,9860	0,5293
135	19,504	0,707	8,103	0,785	1,9488	0,5181
136	20,476	0,695	8,559	0,768	1,9120	0,5068
137	21,515	0,682	9,048	0,750	1,8740	0,4955
138	22,626	0,669	9,573	0,733	1,8356	0,4842
139	23,818	0,656	10,139	0,716	1,7976	0,4729
140	25,098	0,643	10,748	0,698	1,7584	0,4616
141	26,475	0,629	11,406	0,681	1,7197	0,4502
142	27,959	0,616	12,117	0,663	1,6798	0,4389
143	29,563	0,602	12,883	0,646	1,6405	0,4275
144	31,300	0,5880	13,724	0,628	1,5999	0,4161
145	33,183	0,5740	14,634	0,611	1,5594	0,4047
146	35,234	0,5590	15,628	0,593	1,5186	0,3933
147	37,469	0,5450	16,713	0,576	1,4781	0,3818
148	39,914	0,5300	17,904	0,559	1,4360	0,3704
149	42,596	0,5150	19,213	0,541	1,3950	0,3589
150	45,548	0,5000	20,656	0,524	1,3523	0,3475
151	48,803	0,4850	22,251	0,506	1,3100	0,3360
152	52,412	0,4690	24,023	0,489	1,2675	0,3245
153	56,425	0,4540	25,996	0,471	1,2247	0,3130
154	60,899	0,4380	28,200	0,454	1,1816	0,3015
155	65,925	0,4230	30,680	0,436	1,1318	0,2900
156	71,574	0,4070	33,477	0,419	1,0944	0,2784
157	77,983	0,3910	36,642	0,401	1,0505	0,2669
158	85,277	0,3750	40,256	0,384	1,0065	0,2553
159	93,636	0,3580	44,401	0,367	0,9622	0,2438
160	103,264	0,3420	49,181	0,349	0,9177	0,2322
161	114,460	0,3260	54,744	0,332	0,8730	0,2207

Продолжение таблицы 4

β град	$f_1(\beta)$	$f_2(\beta)$	$f_3(\beta)$	$f_4(\beta)$	$f_5(\beta)$	$f_6(\beta)$
162	127,560	0,3090	61,260	0,314	0,8282	0,2091
163	143,000	0,2920	68,946	0,297	0,7831	0,1975
164	161,450	0,2760	78,139	0,279	0,7379	0,1859
165	183,730	0,2590	89,243	0,262	0,6926	0,1743
166	210,910	0,2420	102,800	0,244	0,6471	0,1627
167	244,550	0,2250	119,600	0,227	0,6014	0,1511
168	287,000	0,2080	140,780	0,209	0,5557	0,1395
169	341,530	0,1910	168,000	0,192	0,5098	0,1279
170	413,180	0,1740	203,800	0,175	0,4638	0,1163
171	510,000	0,1560	252,170	0,157	0,4177	0,1047
172	645,400	0,1390	319,830	0,140	0,3715	0,0931
173	844,000	0,1218	418,630	0,122	0,3252	0,0814
174	1146,300	0,1050	570,210	0,105	0,2789	0,0698
175	1648,900	0,0872	821,500	0,0873	0,2325	0,0582
176	2574,900	0,0698	1284,440	0,0698	0,1861	0,0465
177	4586,000	0,0523	2290,000	0,0524	0,1396	0,0349
178	10300,210	0,0349	5147,000	0,0349	0,0931	0,0233
179	41887,800	0,01745	20940,800	0,01745	0,0465	0,0116
180		0,00000		0,00000	0,0000	0,0000

Приложение I



Диаграммы $\sigma_a - \varepsilon_a$ арматурных сталей IV, V и VI классов

по [illegible] σ = [illegible]

Л И Т Е Р А Т У Р А

I Руководство по проектированию предварительно-напряженных железобетонных конструкций из тяжелого бетона. НИИЖБ, 1977г.

2 Руководство по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона / без предварительного напряжения/ НИИЖБ, 1977г.

3 Руководство по проектированию опор ВЛ и ОРУ "Общие положения. Сочетания нагрузок. Нормативные и расчетные нагрузки." ЭСП, 1973г.

gost.e-ecolog.ru