

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И
УСАДОЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЛЕТНЫЕ
СТРОЕНИЯ МОСТОВ**

Одобрены Главтранспроектom

Москва 1988

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ. 1

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.. 1

2. НАПРЯЖЕНИЯ ОТ НЕРАВНОМЕРНОГО ПО СЕЧЕНИЮ... 1 РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ В СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМЫХ.. 1 БАЛОЧНЫХ
СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЯХ 1

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ
УСИЛИЙ.. 8 В КОНСТРУКЦИЯХ ОТ НЕРАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ... 8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ... 13

ПРЕДИСЛОВИЕ

Рекомендации развивают и дополняют отдельные разделы [СНиП 2.05.03-84 \[1\]](#). В них дана классификация температурных и влажностных воздействий на пролетные строения мостов и сделана ссылка на подготовленную авторами настоящих Рекомендаций монографию, в которой затронут значительный круг вопросов, связанных с указанными воздействиями. Рассмотрены напряжения от неравномерного по сечению распределения температуры в статически определимых балочных сталежелезобетонных пролетных строениях (в развитие п. 5.10 и приложения 20 указанного СНиП). Рекомендации данного раздела позволяют более экономично по сравнению с указанным СНиП запроектировать многобалочные пролетные строения путем снижения расчетной величины температурного воздействия в результате учета конструктивных особенностей пролетных строений. Кроме того, приведены графики, по которым можно, не проводя расчетов, оценить величину воздействия. Впервые сформулирована методика определения исходных данных для расчета деформаций и дополнительных усилий в мостовых конструкциях от неравномерного распределения температуры в их элементах.

При рассмотрении указанных вопросов рекомендуется также пользоваться монографией [\[2\]](#).

Работа выполнена в ЦНИИСе с участием Центрального научно-исследовательского и проектного института строительных металлоконструкций Госстроя СССР, Калининского политехнического института и предназначена для проектировщиков и строителей.

Рекомендации разработаны кандидатами техн. наук В.В. Пассеком, В.В. Заковенко (ЦНИИС), д-ром техн. наук проф. Н.Н. Стрелецким (ЦНИИПСК), кандидатами техн. наук В.А. Долговым, С.Л. Субботиным, Е.В. Харичевым (КПИ) при участии кандидатов техн. наук Б.А. Дробышевского, С.И. Ступина, А.И. Цимеринова, В.П. Польевко, Е.А. Антроповой, А.С. Антипова, Н.А. Цуканова, И.И. Денисова, инж. Э.М. Гитмана.

Замечания направлять по адресу: 129329, Москва, ул. Кольская, 1, ЦНИИС.

И.о. зав. отделением вычислительной техники, методов исследований и испытаний конструкций и материалов Е.Г. Игнатьев

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. В Рекомендациях приведены методы расчета температурных и влажностных (усадочных) воздействий, имеющих место в процессе монтажа и эксплуатации пролетных строений. Температурные и влажностные воздействия в процессе бетонирования и других операций при изготовлении не рассматриваются.

1.2. Рекомендуется учитывать две группы температурных и влажностных воздействий, приводящих:

к неравномерному по сечению пролетного строения распределению температуры и усадки. Неравномерное по сечению распределение температуры и усадки приводит к внутренним самоуравновешенным напряжениям в статически определимых системах, общим деформациям искривления пролетных строений, дополнительным усилиям в статически неопределимых системах;

к изменению средней по сечению температуры и возникновению предельной величины усадки. Изменения средней по сечению пролетного строения температуры и усадки приводят к перемещению концов пролетных строений, появлению дополнительных усилий в статически неопределимых системах, потерям предварительного напряжения.

1.3. При расчете пролетных строений на указанные в п. 1.2 группы воздействий может быть выделено 9 расчетных случаев:

I - суточный ход температуры воздуха в сочетании с воздействием солнечной радиации на вертикальную поверхность. При этом воздействие солнечной радиации на горизонтальную поверхность берется в уменьшенном объеме (с учетом одновременности действия);

II - резкое понижение температуры воздуха. В ряде районов могут быть дополнительно учтены охлаждающие воздействия испарения или града;

III - суточный ход температуры воздуха в сочетании с воздействием солнечной радиации на горизонтальную поверхность. При этом воздействие солнечной радиации на вертикальную поверхность берется в уменьшенном объеме (с учетом одновременности действия);

IV - резкое повышение температуры воздуха. При этом для отдельных элементов сечения может быть учтен нагрев солнцем;

V - кратковременные влажностные воздействия наружного воздуха (первые полгода - год), приводящие к неравномерной по сечению элемента усадке бетона (градиентная усадка);

VI - длительные влажностные воздействия наружного воздуха (первые несколько лет), приводящие к неравномерному высыханию (усадке) бетона различных элементов сечения (стыковая усадка);

VII - длительные влажностные воздействия наружного воздуха, приводящие к предельной величине усадки бетона;

VIII - годовые (межсезонные) колебания температуры воздуха с учетом действия солнечной радиации;

ЕС - особые тепловые воздействия (например, теплотрассы, проходящие внутри коробчатых пролетных строений).

Характеристика указанных расчетных случаев и исходные данные для проведения тепло- и влагофизических расчетов приведены в работе [2].

1.4. Расчет деформаций и напряжений в пролетных строениях от температурных и влажностных воздействий рекомендуется производить с учетом их пространственной работы. Рекомендации по проведению таких расчетов даны в работе [2]. Определение деформаций и напряжений допускается производить приближенными методами, рекомендованными [СНиП 2.05.03-84](#) [1] и настоящими Рекомендациями.

1.5. При проектировании пролетных строений рекомендуется применять конструктивно-технологические мероприятия, позволяющие уменьшить, а иногда и практически исключить неблагоприятное влияние климатических факторов.

Конструктивно-технологические мероприятия можно разделить на 3 группы:

закрывающиеся в регулировании или изменении характеристики конструкции (например, устройство консолей плиты проезжей части, препятствующей нагреву солнцем балок);

не требующие изменения конструкции (например, нанесение на поверхность полимерных покрытий);

осуществляемые в процессе транспортировки, складирования и монтажа конструкций.

Рекомендации по конструктивно-технологическим мероприятиям приведены в работе [2]

1.6. Для проведения расчетов напряжений, деформаций и усилий расчетные температуры представляют в виде эпюры разности температур. Под этой эпюрой понимается эпюра, ординаты которой получаются путем вычитания текущей температуры в соответствующей точке сечения и минимальной в пределах сечения.

2. НАПРЯЖЕНИЯ ОТ НЕРАВНОМЕРНОГО ПО СЕЧЕНИЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМЫХ БАЛОЧНЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЯХ

2.1. Рекомендации данного раздела разработаны в развитие [СНиП 2.05.03-84](#) [1], п. 5.10 и приложения 20.

В соответствии с п. 5.10 [1] разность температур железобетонной и стальной частей сечения следует определять, как правило, на основании теплофизических расчетов. Указанные расчеты рекомендуется проводить по методике, изложенной в работе [2]

2.2. В развитие п. 5.10, а и г [1] для городских и автодорожных мостов предлагается методика (п.п. 2.3 - 2.9), позволяющая учесть: более полно специфику указанных мостов: затенение от нагрева солнцем стальной крайней балки консолью плиты проезжей части, толщину полотна проезжей части, цвет облучаемой солнцем поверхности.

2.3. В соответствии с принятой в данных Рекомендациях классификацией расчетных случаев указанные в п. 5.10, а [1] случаи соответствуют:

когда температура стали выше, чем железобетона, и балка подвергается нагреву от воздействия солнечных лучей, - расчетному случаю I;

когда температура стали выше, чем железобетона, но балка не подвергается нагреву от воздействия солнечных лучей, - расчетному случаю IV;

когда температура стали ниже, чем железобетона, - расчетному случаю II.

Случай, указанный в п. 5.10, г [1], соответствует расчетному случаю III.

Расчетный случай I рекомендуется характеризовать суммой эпюр 1 и 2 разности температур, случай IV - эпюрой 1, случай II - эпюрой 1, но с отрицательным знаком, случай III - эпюрой 3 (рис. 1).

2.4. Ордината эпюры разности температур в 1-й точке определяется

$$t_{n1} = t_{n,max} \cdot \nu_{ti}^{(n)} \quad (1)$$

где $t_{n,max}$ - максимальная ордината эпюры n ;

$\nu_{ti}^{(n)}$ коэффициент перехода от максимальной ординаты к текущей.

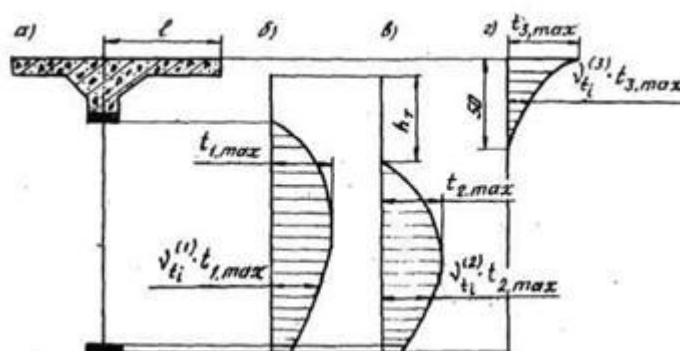


Рис. 1. Расчетные эпюры разности температур:

а - схема поперечного сечения отдельной балки пролетного строения; б, в, г - расчетные эпюры 1, 2, 3 разности температур

2.5. Максимальная ордината эпюры разности температур, °С, определяется:

$$t_{1,max} = 15 \quad (2)$$

$$t_{2,max} = 15 \cdot \kappa_{\mu} \quad (3)$$

$$t_{3,max} = 20 \cdot \kappa_n \cdot \kappa_{\mu} \quad (4)$$

где κ_{μ} - коэффициент, зависящий от цвета поверхности и принимаемый обычно равным 1,0; для черного (асфальтовое покрытие) и белого принимается соответственно 1,4 и 0,5;

κ_n - коэффициент, учитывающий толщину полотна проезжей части: при отсутствии полотна $\kappa_n = 1$, при толщине полотна 12 см и более $\kappa_n = 0$; при промежуточных значениях κ_n допускается определять линейной интерполяцией.

2.6. Коэффициент $\nu_{\bar{t}\bar{t}}^{(2)}$ определяется:

в железобетонной плите, (а также в железобетонных ребрах и вутах) и горизонталях верхнего пояса, примыкающего к железобетону, в верхней части стенки балки, затеняемой консолью (только для эпюры 2)

$$\nu_{\bar{t}\bar{t}}^{(1)} = \nu_{\bar{t}\bar{t}}^{(2)} = 0$$

по всей высоте стенки стальной балки для эпюры 1 и на части стенки, равной высоте эпюры 2

$$\nu_{\bar{t}\bar{t}}^{(1)} = \nu_{\bar{t}\bar{t}}^{(2)} = y$$

$$\psi = \sqrt{3,91 \frac{z_{bl,i}}{h_w} - 3,82 \left(\frac{z_{bl,i}}{h_w} \right)^2} \quad (5)$$

Здесь $z_{bl,i}$ - расстояние от верха эпюры 1 или 2 до точки, где определяется температура, см;

h_w - высота стенки стальной балки для эпюры 1 и $h_w = h_e - h_T$ - для эпюры 2, где h_e - расстояние от нижней поверхности железобетонной плиты или тротуарного блока до нижнего пояса стальной балки, h_T - соответствующее затенению расстояние от нижней поверхности железобетонной плиты или тротуарного блока до верха эпюры 2, которое определяется по формуле:

$$h_T = 0,45 \cdot l \cdot \kappa_b. \quad (6)$$

Здесь l - длина консоли плиты проезжей части (считая от внешней поверхности стенки балки),

κ_b - коэффициент, учитывающий наклон стенки балки; $\kappa_b = 90/b$, где b - угол наклона стенки балки к горизонтали (для коробчатых балок $b \neq 90^\circ$);

$\nu_{\bar{t}\bar{t}}^{(1)} = \nu_{\bar{t}\bar{t}}^{(2)} = 0,3$ - в горизонталях нижнего пояса;

$\nu_{\bar{t}\bar{t}}^{(3)} = 1,0$ - для верхней поверхности железобетонной плиты;

$\nu_{\bar{t}\bar{t}}^{(3)} = 0$ - для части балки, расположенной ниже 50 см от верхней поверхности железобетонной плиты; для части балки, соответствующей эпюре 3,

$$\nu_{\bar{t}\bar{t}}^{(3)} = \left(\frac{z_{bf,i}}{50} - 1 \right)^2 \quad (7)$$

где $z_{bf,i} \leq 50$ - расстояние, см, от верхней поверхности железобетонной плиты до точки, где определяется температура.

2.7. Продольные нормальные напряжения для расчетного случая I рекомендуется определять по формуле:

$$\sigma_i = \sigma_i^0 + \sigma_i^1 \quad (8)$$

где σ_i^0 - напряжение в точке i от одинакового нагрева всех балок по эпюре 1;

σ_i^1 - напряжение в точке i от дополнительного нагрева по эпюре 2 одной крайней балки за счет солнечной радиации. В поперечном сечении с одностенчатой балкой (рис. 2,а) приведены эпюры 4, 5 нормальных напряжений (рис. 2, б, в), соответствующие эпюрам 1, 2 разности температур.

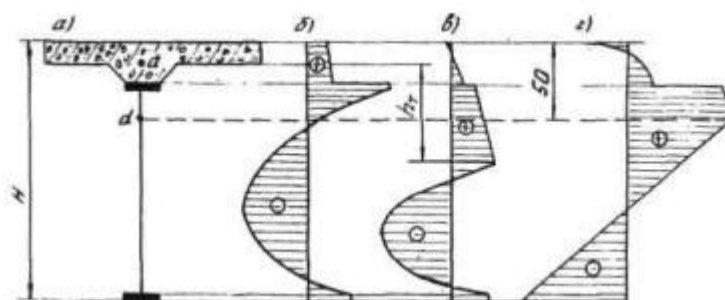


Рис. 2. Расчетные эпюры продольных напряжений:

а - схема поперечного сечения отдельной балки пролетного строения; б, в, г - расчетные эпюры 4, 5, 6 напряжений

Напряжения σ_i^0 , а также σ_i^1 рекомендуется определять по приложению 20 [СНиП 2.05.03-84 \[1\]](#) с температурой соответственно $t_{max} = 15^\circ\text{C}$ и $t_{max} = 15 \cdot \kappa_{ц}^\circ\text{C}$, принимая распределение напряжений в соответствии с эпюрой 4. Для железобетонной части сечения напряжения σ_i^1 рекомендуется умножить на коэффициент κ_i , учитывающий затенение и определяемый по формуле

$$\kappa_i = \begin{cases} 1,2 - \frac{l}{h_b}, & l \leq 1,2h_b \\ 0, & l \geq 1,2h_b \end{cases} \quad (9)$$

С целью недопущения случайной грубой ошибки в расчетах целесообразно величину напряжений, полученную расчетом по [СНиП 2.05.03-84](#), проверить по приближенной зависимости, приведенной на графике рис. 3. На этом графике дана зависимость напряжения в центре тяжести железобетонной части сечения (точка a на [рис. 2, а](#)) от соотношения F_c/F_{ctd} , где F_c - площадь стальной части сечения; F_{ctd} - приведенная к стали площадь всего поперечного сечения.

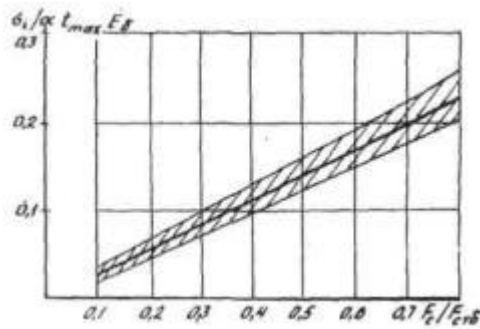


Рис. 3. Приближенная зависимость напряжений в точке а (рис. 2, а) от соотношения F_d/F_{ctd} , в соответствии с эпюрой 4 (рис. 2, б):

— - график для определения напряжений (заштрихована область разброса, зафиксированная в расчетах)

Графиком рис. 3 можно воспользоваться для оценки напряжений (не только для автодорожных и городских, но и железнодорожных мостов). Если эти напряжения незначительные, то данной оценкой можно ограничиться и точных расчетов не производить.

2.8. В расчетном случае IV величины напряжений допускается принимать равными σ_i^0 , а для расчетного случая II - минус σ_i^0 .

2.9. Вид эпюры нормальных продольных напряжений в поперечных сечениях пролетных строений в расчетном случае III приведен на рис. 2, г. Напряжения рекомендуется определять по приложению 20 [СНиП 2.05.03-84](#) [1].

Как уже отмечалось в п. 2.7, полученную расчетом по [СНиП 2.05.03-84](#) величину напряжений целесообразно проверить по приближенной зависимости, приведенной в данном случае на графике рис. 4. Напряжения рекомендуется определять с использованием указанного графика. Характерной точкой сечения является точка d , расположенная на расстоянии 0,5 м от верхней фибры бетона (обычно эта точка попадает на стальную часть сечения). В этой точке растягивающие напряжения являются максимальными и определяются по графику рис. 4 в зависимости от высоты H балки (см. [рис. 2, а](#)). В остальных точках (т.е. при $h \neq 0,5$ м) напряжения σ_i определяются по формуле

$$\sigma_i = \frac{\sigma_d \cdot \kappa_h}{n_i} \quad (10)$$

где κ_h - коэффициент, определяемый по табл. 1 в зависимости от h, m , - расстояния от верхней поверхности железобетонной плиты до точки, где определяются напряжения;

$$n_i = \frac{E_d}{E_i}$$

Здесь E_d, E_i - соответственно модули упругости материала в точках d и i .

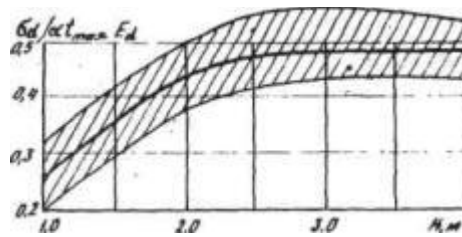



Рис. 4. Приближенная зависимость напряжений в точке d (рис. 2, а) от высоты H балки в соответствии с эпюрой σ (рис. 2, г):

 - график для определения напряжений (заштрихована зафиксированная в расчетах область разброса);

σ_d, E_d - соответственно напряжение и модуль упругости материала в точке d

Таблица 1

$h, \text{ м}$	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
κ_h	1,00	0,96	0,70	0,25	0

Примеры расчета

Данный раздел состоит из двух частей: в первой части приведены результаты расчета напряжений 14 вариантов сочетаний поперечных сечений и характеристик нагрева в соответствии с эпюрами 1, 2, 3 разности температур (см. рис. 1); на основании полученных напряжений приводятся некоторые общие замечания о характере изменения напряжений в зависимости от типа сечения и характеристик нагрева; во второй части на основании расчетов первой части приводится пример расчета одного варианта на все 4 расчетных случая (см. п. 2.3).

I. Расчет напряжений 14 вариантов сочетаний поперечных сечений и характеристик нагрева.

Схемы поперечных сечений и характеристики эпюр нагрева даны на рис. 5. Размеры сечений (см) и основные расчетные параметры приведены в табл. 2, 3, 4. Модули упругости для бетона и стали приняты соответственно $0,35 \cdot 10^5$ и $2,1 \cdot 10^5$ МПа, а коэффициенты линейного расширения для бетона и стали - $1 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹. Максимальные ординаты эпюр разности температур определены по формулам (2), (3), (4), при этом $\kappa_{ц} = \kappa_r = 1$.

В табл. 5 приведены результаты расчета напряжений в точке a , расположенной в центре тяжести железобетонной части сечения, для эпюры 1 разности температур. В гр. 2 этой таблицы даны результаты расчета по приложению 20 СНиП 2.05.03-84, в гр. 3 - результаты, полученные расчетом на ЭВМ с использованием численного метода, в гр. 4 - полученные по графику рис. 3. Сопоставление результатов показывает, что расхождение не превышает 3 кг/см^2 (0,3 МПа), что вполне является удовлетворительным.

В табл. 6 приведены результаты расчета напряжений в точке a эпюры 2 разности температур, в гр. 2 и 3 даны результаты расчета без учета затенения, а в гр. 4 и 5 - с учетом затенения. Сопоставление результатов показывает, что учет затенения позволяет снизить расчетные напряжения в рассматриваемых вариантах до 8 кг/см^2 . (0,8 МПа), в

практике (при других сечениях) это снижение может составить до 15 кг/см^2 (1,5 МПа), а при белой окраске еще больше. При практических расчетах целесообразно контролировать результаты расчета. Приведенные в гр. 6 результаты расчета по графику [рис. 3](#) показывают, что сходимость со [СНиП 2.05.03-84](#) хорошая, и в ряде случаев возможно использовать графики, не прибегая вообще к точным расчетам.

В [табл. 7](#) приведены результаты расчета напряжений в характерных точках сечения для эпюры 3 разности температур (по [СНиП 2.05.03-84](#), численным методом и по графику [рис. 4](#)).

Для точки *d* в [табл. 7](#) даны напряжения условные, т.е. приведенные к бетону (напряжения в стали, разделенные на соотношение модулей упругости стали и бетона). Напряжения в точке *d*, полученные всеми тремя методами при $\kappa_n = \kappa_y = 1$, хорошо между собой совпадают. Что касается точки *e* (низ железобетонной плиты), то совпадение удовлетворительное в варианте 13 (толщина плиты 20 см) и не очень хорошее в варианте 14 (толщина плиты 12 см). Это происходит потому, что в последнем случае низ плиты попадает в зону резкого изменения напряжений с переходом их значений из положительной в отрицательную зону. Очевидно, для плит толщиной менее 20 см определять напряжения для расчетного случая III (эпюра 3) не следует. Наибольшие напряжения имеют место в железобетонном ребре (точка *f*). Именно для ребра расчетный случай III является наиболее опасным.

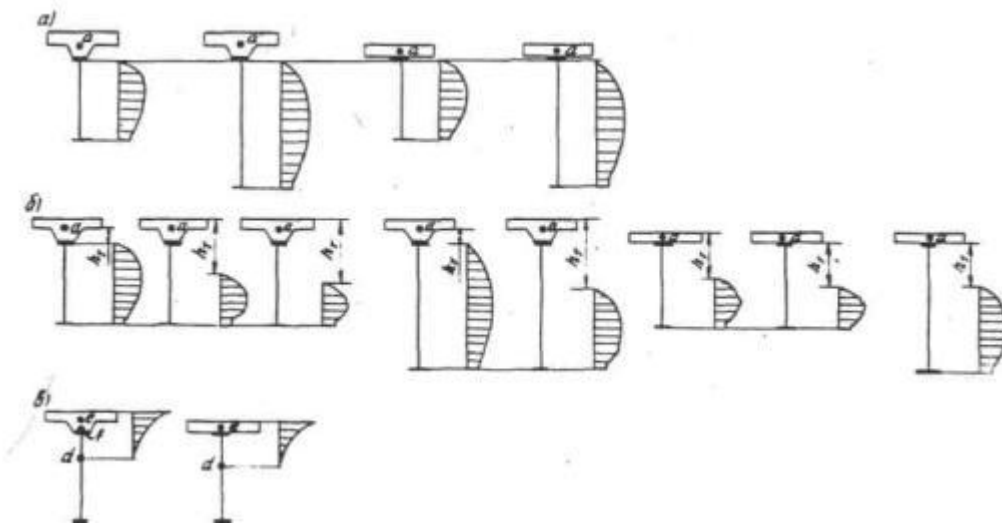


Рис. 5. Варианты для расчета напряжений в сталежелезобетонных балках (размеры в табл. 2): а, б, в - соответственно для эпюр 1, 2, 3

Таблица 2

Элементы	Варианты			
	1, 5, 6, 7, 13	2, 8, 9	3, 10, 11, 14	4, 12
Железобетонная плита	168,2×20,0	168,2×20,0	168,2×12,0	168,2×12,0
Железобетонное ребро	45,5×20,0	45,5×20,0	-	-
Верхний пояс	40,0×2,0	40,0×2,0	40,0×2,0	40,0×2,0
Стенка	240,0×1,2	377,0×1,2	240,0×1,2	377,0×1,2
Нижний пояс	60,0×4,0	60,0×4,0	60,0×4,0	60,0×4,0

Таблица 3

Расчетные параметры	Варианты			
	1, 5, 6, 7, 13	2, 8, 9	3, 10, 11, 14	4, 12
A_{wt} , см ² - площадь стальных вертикальных элементов	288,0	452,4	288,0	452,4
$A_{si,t}$, см ² - площадь стальных горизонтальных элементов нижнего пояса	240,0	240,0	240,0	240,0
A_t , см ² - температурная площадь (для эпюры 1)	302,4	433,9	302,4	433,9
То же для эпюры 3	373,6	-	266,9	-
S_t , см ³ - температурный статический момент (для эпюры 1)	28554	49919	16428	27789
То же для эпюры 3	-42462	-	-48229	-
$A_{stb,t}$, см ² - приведенная к стали площадь поперечного сечения	1320,4	1484,8	944,4	1108,8
$J_{stb,t}$, см - приведенный к стали момент инерции брутто поперечного сечения	16194169400530721	105904928794896		
Z , см - ордината центра тяжести железобетонной части сечения	-82,8	-133,1	-103,2	-164,4
$Z_{bl, stb}$, см - расстояние от центра тяжести сечения до верха стенки	55,1	105,4	95,2	156,4
$Z_{sl, stb}$, см - расстояние от центра тяжести сечения до низа нижнего пояса	188,9	275,6	148,8	224,6
$Z_{bf, stb}$, см - расстояние от центра тяжести сечения до верха железобетонной части сечения	97,1	147,4	109,2	170,4
$F_c/F_{cm\sigma}$ - отношение площади стальной к приведенной к стали полной площади сечения	0,46	0,52	0,64	0,70

Таблица 4

Расчетные параметры	Единица измерения	Варианты							
		5	6	7	8	9	10	11	12
l	см	49,0	282,0	322,0	80,0	322,0	216,0	260,0	260,0
h_t	см	22,0	127,0	145,0	36,0	145,0	97,0	117,0	117,0
h_b	см	262,0	282,0	282,0	399,0	419,0	254,0	254,0	391,0
l/h_b	-	0,20	1,0	1,14	0,20	0,77	0,85	1,02	0,66
κ_l	-	1,00	0,2	0,06	1,00	0,43	0,35	0,18	0,54

Таблица 5

Варианты	По СНиП 2.05.03-84	По расчету на ЭВМ	По графику рис. 3
1	2	3	4
1	0,42	0,42	0,68
2	0,65	0,64	0,76
3	0,87	0,87	0,97
4	1,22	1,20	1,05

Таблица 6

Варианты по СНиП 2.05.03-84	Без учета затенения	С учетом затенения		По графику рис. 3 с использованием формулы(9)
	по расчету на ЭВМ	по СНиП с использованием формулы	по расчету на ЭВМ с использованием эпюры 2	

1	2	3	4	5	6
5	0,42	0,42	0,42	0,42	0,68
6	0,42	0,42	0,08	0,08	0,14
7	0,42	0,42	0,03	0,03	0,04
8	0,65	0,64	0,65	0,64	0,76
9	0,65	0,64	0,28	0,23	0,33
10	0,87	0,87	0,31	0,23	0,34
11	0,87	0,87	0,16	0,13	0,17
12	1,22	1,20	0,65	0,47	0,57

Таблица 7

Варианты	Характерные точки	По СНиП 2.05.03-84	По расчету на ЭВМ	По графику рис. 4
13	e	0,86	0,71	0,84
	f	2,74	2,69	3,23
	d	2,85	2,81	3,36
14	e	0,90	0,38	0,16
	d	3,79	3,45	3,29

2. Расчет балки на расчетные случаи I, II, III, IV.

В соответствии с п. 2.3 все четыре расчетных случая характеризуются одной из эпюр 1, 2, 3 или их сочетанием. Поэтому влияние этих расчетных случаев рассмотрим на примере сечения, изображенного в варианте № 1 (см. [рис. 5](#)). Расчетный случай IV характеризуется эпюрой 1, в соответствии с расчетом варианта № 1 (см. [табл. 5](#)) напряжение в точке *a* равно 0,42 МПа (растяжение). Расчетный случай II характеризуется той же эпюрой 1, но с отрицательным знаком, поэтому напряжение в точке *a* равно минус 0,42 МПа. Расчетный случай III характеризуется эпюрой 3. В соответствии с результатами расчета варианта № 13, напряжения в рассматриваемом сечении равны: в нижней фибре ребра - 2,74 МПа (см. [табл. 7](#)), а в нижней фибре железобетонной плиты - 0,86 МПа. Напряжения в расчетном случае 1 возникают от сочетания эпюр 1 и 2. Напряжение в точке *a* от действия эпюры 1, как уже отмечено выше, равно 0,42 МПа. Что касается эпюры 2, то для данного сечения в зависимости от степени затенения эта эпюра может иметь вид, изображенный в вариантах № 5, 6, 7. В варианте № 5 величина затенения незначительная (см. [табл. 4](#)), поэтому эпюра 2 в точности равна эпюре 1, а сумма этих эпюр в точности равна эпюре на черт. 14, б [СНиП 2.05.03-84](#). Напряжения в этом случае для эпюры 2 равны 0,42 МПа. В варианте № 7 величина затенения h_T уже значительная, и в соответствии с формулой (9) напряжения стремятся к нулю (см. [табл. 6](#)). Вариант № 6 является промежуточным.

Для рассматриваемого случая напряжения в других точках могут быть получены аналогично.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСИЛИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ОТ НЕРАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

3.1. Усилия в статически неопределимых системах в результате неравномерного распределения температуры и усадки рекомендуется определять от расчетных случаев II, IV, I, III, VI, VII. Исходные данные для расчета этих усилий рекомендуется определять для расчетных случаев II, IV, I, III в соответствии с рекомендациями данного раздела, а для расчетных случаев VI, VII - по данным специальной литературы [2].

3.2. Расчет деформаций и усилий следует производить на основании известных правил строительной механики. При выборе расчетных схем для расчета статически неопределимых систем на температурно-усадочные воздействия особое внимание следует обращать на податливость закреплений и возможность разгрузки конструкции при изменении схемы после образования трещины.

3.3. Разность температур отдельных элементов моста или отдельных элементов поперечного сечения возникает во II и IV расчетных случаях за счет различной тепловой инерции элементов при резком понижении или повышении температуры воздуха. Среднюю температуру элементов пролетного строения и надфундаментной части опор (в частности, пилонов висячих мостов) при действии расчетного случая II (резкое понижение температуры воздуха) рекомендуется определять по формуле

$$t' = \frac{t \cdot t_1}{20} \quad (11)$$

где t' - средняя расчетная температура элементов;

t - условная температура, принимаемая по табл. 8 (для расчетного случая II принимается со знаком минус, а для расчетного случая IV - со знаком плюс);

t_1 - величина резкого понижения температуры воздуха за 12 часов. $t_1 = 0,75A$, где A - максимальная суточная амплитуда изменения температуры воздуха, принимается для соответствующего климатического района по [СНиП 2.01.01-82](#) [3], а если климатический район неизвестен, то $t_1 = 20$ °С.

Таблица 8

d_i , м	0,02	0,04	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,2 и более
t , °С	18,5	17,0	13,5	10,0	7,3	5,3	4,0	2,7	2,0	1,0	0

Температура t принимается по табл. 8 в зависимости от приведенной толщины d_i элементов, которая определяется по формуле

$$\delta_i = \frac{2m \cdot f_i}{S_i} \quad (12)$$

где f_i - площадь поперечного сечения отдельного элемента (для плит проезжей части - с учетом полотна проезжей части);

S_i - периметр поперечного сечения, определяемый как сумма длин сторон, соприкасающихся с наружным воздухом (при наличии полотна проезжей части учитывается поверхность этого полотна);

m - коэффициент, учитывающий вид материала и принимаемый равным 1,0 для железобетонных элементов и полотна проезжей части; 1,8 - для стальных элементов (для стальных плит проезжей части при наличии полотна проезжей части $m = 1,8$ вводится только к стальной части сечения).

3.4. Среднюю расчетную температуру элементов пролетного строения и надфундаментной части опор при действии расчетного случая IV (резкое повышение температуры воздуха) рекомендуется принимать равной по абсолютной величине и противоположной по знаку расчетной температуре, определяемой для расчетного случая II.

3.5. Разность температур отдельных элементов моста или отдельных элементов поперечного сечения возникает в I и III расчетных случаях в результате нагрева освещаемых солнцем элементов, а так же за счет различной тепловой инерции элементов при повышении в течение дня температуры воздуха. Учет расчетных случаев I и III рекомендуется производить одновременно. При этом нагрев солнцем всех видов пролетных строений и надфундаментной части опор характеризуется единой пространственной эпюрой (рис. 6), у которой максимальная ордината t_{max} расположена на нагреваемой поверхности и распределена по эпюре 7 - для проезжей части, по эпюре 9 - для вертикальных элементов (стенок балок, элементов надарочного строения, стоек рам, пилонов висячих мостов и т.п.), а по глубине элементов распределение температуры имеет место по эпюрам 8 и 10. Разность температуры элементов, образующаяся за счет различной тепловой инерции элементов при повышении в течение дня температуры воздуха, определяется как для расчетного случая IV, но уменьшается в два раза. Максимальная ордината t_{max} эпюр 7, 8 принимается по формуле (4), °C

$$t_{max} = 20 \cdot K_n K_{\psi}$$

Максимальная ордината t_{max} эпюр 9 и 10 принимается по формуле (3), °C

$$t_{max} = 15 \cdot K_{\psi}$$

Принятые в формулах обозначения, а также формула для определения h_T даны в п.п. 2.5 и 2.6

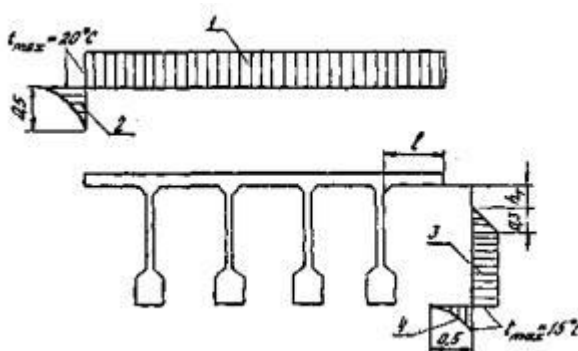


Рис. 6. Эпюры разности температур по сечению балки за счет нагрева солнцем:

1, 2, 3, 4 - соответственно эпюры 7, 8, 9, 10

Для удобства расчетов рекомендуется эпюры 8 и 10 аппроксимировать ступенчатой эпюрой (рис. 7). При этом дополнительный нагрев элемента за счет солнечной радиации рекомендуется определять по формуле

$$t'' = \frac{t_{\max} \cdot \sum_1^n (h_i \cdot \nu_i')}{\delta} \quad (13)$$

или

$$t'' = \frac{t_{\max} \cdot h_i' \cdot \nu_i''}{\delta} \quad (14)$$

где t'' - дополнительный нагрев элемента за счет солнечной радиации, град.;

δ - толщина элемента, м;

ν_i' - средняя относительная ордината эпюры (см. [рис. 7](#)) i -го участка разности температур при $t_{\max} = 1^\circ\text{C}$;

ν_i'' - средняя относительная ордината эпюры (см. [рис. 7](#)) на высоте h_i' ;

n - количество участков эпюры разности температур в пределах толщины элемента;

h_i - высота i -го участка, м;

h_i' - высота зоны от верха эпюры разности температур до i -го, участка включительно.

Значения ν_i' и ν_i'' определяются по [табл. 9](#).

В расчетных случаях I и III рекомендуется учитывать переменность в течение дня нагрева солнцем. Нагрев солнцем поверхностей северной, северо-восточной и северо-западной ориентации допускается не учитывать. Поверхности других ориентаций могут быть нагреты на расчетную величину, при этом могут быть нагреты как поверхности одной ориентации, так и одновременно две смежных (например, одна или две смежных поверхности пилона, стоек рам и т.п.). Рекомендуется рассматривать пять моментов времени в течение дня: утро, середина первой половины дня, полдень, середина второй половины дня, вечер. Максимальная ордината эпюр 7, 8, 9, 10 разности температур (см. [рис. 6](#)) t_t определяется по формуле

$$t_t = t_{\max} K_t \quad (15)$$

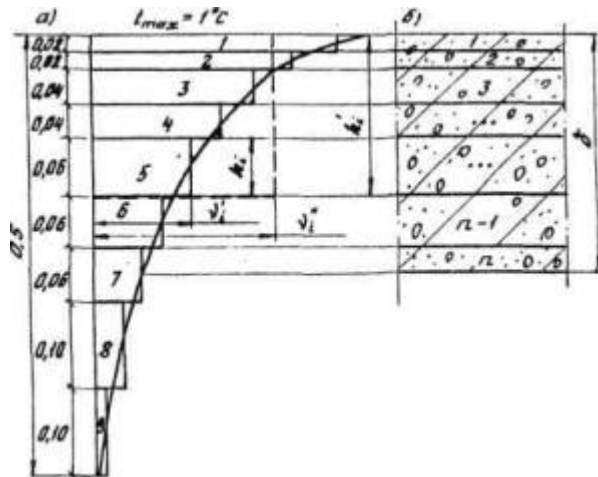


Рис. 7. Схемы для определения дополнительного нагрева элементов за счет солнечной радиации:

а - замена эпюр 8 и 10 стандартной ступенчатой эпюрой; б - схема разбивки элемента на отдельные участки

Таблица 9

№ п/п	h_i , м	v_i'	h_i' м	v_i''
1	0,02	0,961	0,02	0,961
2	0,02	0,884	0,04	0,922
3	0,04	0,775	0,08	0,849
4	0,04	0,641	0,12	0,779
5	0,06	0,491	0,18	0,683
6	0,06	0,338	0,24	0,597
7	0,06	0,213	0,30	0,520
8	0,10	0,093	0,40	0,413
9	0,10	0,013	0,50	0,333

Коэффициенты k_i , учитывающие степень нагрева солнцем поверхности соответствующей ориентации в заданный момент времени, допускается принимать по табл. 10.

Таблица 10

Ориентация	Утро	Середина первой	Полдень	Середина второй	Вечер
		половины дня		половины дня	
Стальные поверхности					
Север	0	0	0	0	0
Восток	1,0	1,0	0	0	0
Юг	0	1,0	1,0	1,0	0
Запад	0	0	0	1,0	1,0
Северо-восток	0	0	0	0	0
Юго-восток	0,5	1,0	1,0	0	0
Юго-запад	0	0	1,0	1,0	1,0
Северо-запад	0	0	0	0	0
Открытая горизонтальная поверхность	0,3	0,5	1,0	1,0	1,0

Железобетонные поверхности

Север	0	0	0	0	0
Восток	0,35	1,0	0,3	0	0
Юг	0	0,35	1,0	1,0	0,35
Запад	0	0	0	0,35	1,0
Северо-восток	0	0	0	0	0
Юго-восток	0	0,35	1,0	0,35	0
Юго-запад	0	0	0,35	1,0	1,0
Северо-запад	0	0	0	0	0
Открытая горизонтальная поверхность	0	0	0,3	0,5	1,0

Примеры расчета

Пример 1. Необходимо определить дополнительный нагрев представленных на рис. 8 элементов за счет солнечной радиации.

Дополнительный нагрев элемента, изображенного на рис. 8, а, определяем по формуле (14) с использованием табл. 9

$$t'' = \frac{t_{\max} \cdot k_2' \cdot \nu_2''}{\delta} = \frac{20 \cdot 0,5 \cdot 0,333}{0,7} = 4,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

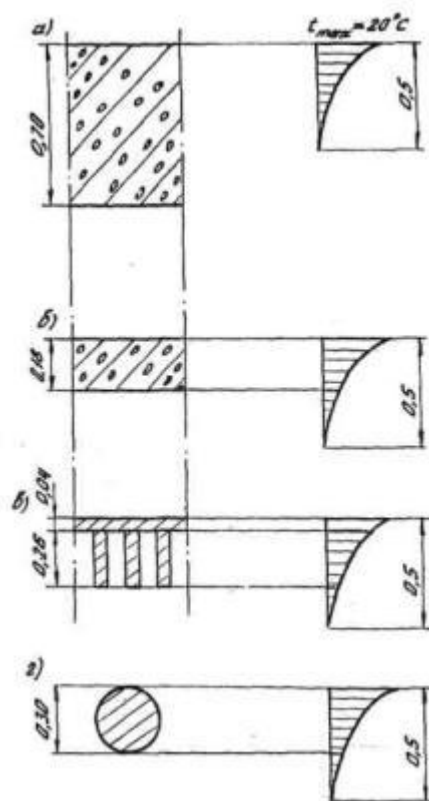


Рис. 8. Схемы для определения дополнительного нагрева элементов от солнечной радиации:

а, б - железобетонная плита проезжей части; в - металлическая плита проезжей части; г - вант висячего моста

Дополнительный нагрев элемента, изображенного на рис. 8. б, определяем аналогично предыдущему случаю:

$$t'' = \frac{20 \cdot 0,18 \cdot 0,683}{0,18} = 13,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Дополнительный нагрев элемента, изображенного на рис. 8. в, определяем отдельно для плиты и ребер

$$t''_{\text{пл}} = \frac{20 \cdot 0,04 \cdot 0,982}{0,04} = 18,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Для ребер определим по формуле (13), разбивая 0,26 м на пять частей применительно к схеме рис. 7 и принимая ординаты из строк 3 - 7 табл. 9

$$t'' = \frac{t_{\text{max}} \cdot \sum_1^n (k_i \cdot v_i')}{\delta} = \frac{20(0,04 \cdot 0,775 + 0,04 \cdot 0,641 + 0,06 \cdot 0,491 + 0,06 \cdot 0,338 + 0,06 \cdot 0,213)}{0,26} = 9,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Для вантов (рис. 8, г) дополнительный нагрев равен (формула (14)):

$$t'' = \frac{20 \cdot 0,30 - 0,520}{0,30} = 10,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Во всех четырех случаях t_{max} определялась по формуле (4) при $\kappa_n = \kappa_y = 1$

Пример 2. Необходимо рассчитать разность средних температур плиты, стенки и нижнего пояса железобетонной балки пролетного строения (рис. 9).

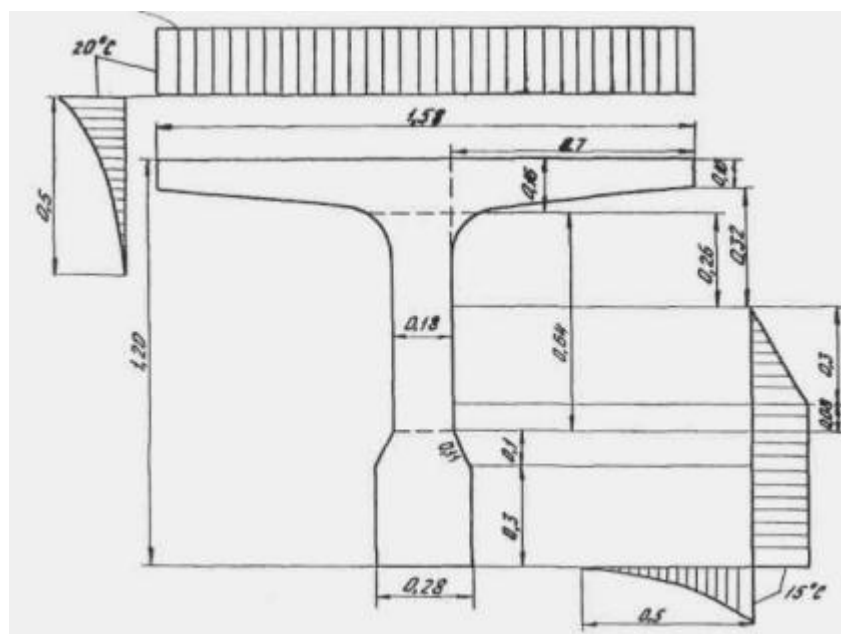


Рис. 9. Схема поперечного сечения балки к примеру 2

Расчет производим в табличной форме (табл. 11), при этом порядок расчета соответствует строкам таблицы. Расчет температур t' (строка 4) производим по формуле (11), принимая $t_l = 20^\circ\text{C}$. Абсолютные значения ординат эпюр разности температур для расчетных случаев IV и II получаем путем вычитания от температуры t' для соответствующего элемента температуры t'' для нижнего пояса. Для определения температур t'' (строка 7) элемент 1 представляем в виде плиты со средней толщиной 0,14 м ($t_{max} = 20^\circ\text{C}$); элемент 2 толщиной 0,18 м разбиваем на три части: верхнюю высотой 0,26 м ($t_{max} = 0^\circ\text{C}$), среднюю высотой 0,3 м ($t_{max} = 7,5^\circ\text{C}$), нижнюю высотой 0,08 м ($t_{max} = 15^\circ\text{C}$); элемент 3 разбиваем на две части: верхнюю высотой 0,1 м и толщиной 0,23 м ($t_{max} = 15^\circ\text{C}$) и нижнюю высотой 0,3 м и толщиной 0,28 м ($t_{max} = 15^\circ\text{C}$).

Таблица 11

№ п/п	Расчетные параметры	Элементы сечения		
		плита	стенка	нижний пояс
1	Площадь поперечного сечения, м ²	0,21	0,12	0,11
2	Периметр, соприкасающийся с наружным воздухом, м	3,18	1,28	1,10
3	Приведенная толщина элементов по формуле (12), м	0,14	0,19	0,20
4	Расчетная температура t элементов по формуле (11), °C	11,4	10,3	10,0
5	Ординаты эпюры разности температур для расчетного случая IV, °C	1,4	0,3	0,0
6	Ординаты эпюры разности температур для расчетного случая II, °C	-1,4	-0,3	0,0
7	Расчетная температура t элементов по формуле (14), °C	14,9	3,7	8,4
8	Суммарная температура $0,5t' + t''$, °C	20,6	8,9	13,4
9	Ординаты эпюры разности температур для расчетных случаев I и III, °C	11,7	0,0	4,5

Для каждой части нагрев определяем по формуле (14), а средний нагрев каждого элемента - как среднее арифметическое нагревов отдельных частей.

Анализ результатов расчета показывает, что резкое понижение или повышение температуры воздуха для данного сечения не является опасным. Существенная разность температур появляется лишь при нагреве балки прямыми солнечными лучами, особенно при нагреве верхней поверхности. Поэтому, в случае, если подобный неравномерный нагрев вызывает нежелательные дополнительные деформации или напряжения, должны быть приняты дополнительные меры для защиты от действия прямой солнечной радиации.

Пример 3. Необходимо рассчитать эпюру разности температур металлического пилона коробчатого сечения размером 3×3 м и толщиной стенок 3 см. Ориентация сторон - строго по странам света.

В соответствии с табл. 9 средняя температура нагрева стенки пилона будет составлять 14 °C (за расчетную принята эпюра 9 на рис. 6). Распределение температур по граням пилона в течение дня приведено в табл. 12 (в соответствии с [табл. 10, п. 3.5](#)).

Таблица 12

Ориентация	Утро	Середина		Середина	
		первой половины дня	Полдень	второй половины дня	Вечер
Север	0	0	0	0	0
Восток	14,0	14,0	0	0	0
Юг	0	14,0	14,0	14,0	0
Запад	0	0	0	14,0	14,0

Пример 4. Необходимо рассчитать разность температур отдельных элементов вантового моста, стальное пролетное строение которого имеет односекционное коробчатое сечение с нижним и верхним поясами, выполненными из ортотропных плит и с боковыми стенками в виде ферм. Пилоны железобетонные коробчатого замкнутого сечения.

Приведенные толщины элементов и расчет эпюр разности температур даны в табл. 13.

Таблица 13

№ п/п	Расчетные параметры	Элементы моста				
		пилон	ванты	верхний пояс	нижний пояс	фермы
1	Приведенная толщина элементов по формуле (12), м	1,2	0,27	0,08	0,04	0,04
2	Расчетная температура t' элементов по формуле (II), °С	0	8,2	14,7	17,0	17,0
3	Разность температур элементов моста для расчетного случая IV, °С	0	8,2	14,7	17,0	17,0
4	Разность температур элементов моста для расчетного случая II, °С	0	-8,2	-14,7	-17,0	-17,0
5	Расчетная температура t'' элементов по формуле (14), °С	4,8	10,4	0	0	8,0
6	Суммарная температура $0,5 t' + t''$, °С	4,8*	14,5	7,4	8,5	16,5
7	Разность температур элементов моста для расчетных случаев I и III, С	0	9,7	2,6	3,7	11,7**

*Нагрев одной стенки пилона.

**Нагрев одной из ферм.

Расчет разности температур элементов моста в IV и II расчетных случаях производим аналогично примеру 2 в соответствии с приведенной толщиной элементов. При расчете температуры t'' учитываем следующее. Толщина стенок пилона и диаметр вант равны соответственно 0,7 и 0,3 м, поэтому t'' указанных элементов в соответствии с рис. 8. а и г примера 1 равны 4,8°С (средний нагрев одной стенки) и 10,4°С.

Верхний пояс стального пролетного строения не нагревается солнцем, поскольку имеется дорожное полотно толщиной более 12 см ($\kappa_n = 0$ в соответствии с п. 2.5). Нижний пояс не нагревается, поскольку защищен от действия прямых солнечных лучей. Нагрев ферм может быть рассчитан в соответствии с примером 1, но допускается приближенно для нагревания солнцем фермы принимать величину нагрева равной 8°С.

Пример 5. Необходимо рассчитать усилия от температурных воздействий в оборудовании для монтажа пролетных строений, который осуществляется следующим образом. В процессе навесного монтажа секции (рис. 10, а) металлического пролетного строения подвешиваются к кран-балке с помощью подвески. Кран-балка устанавливается одной стороной на временную опору, а другой - на собранную часть пролетного строения. В результате нагрева солнцем пролетного строения сверху (расчетный случай III) конец пролетного строения в зоне подвески стремится получить прогиб (рис. 10, б). Поскольку кран-балка препятствует прогибу, в подвеске возникает усилие.

Для расчета усилия задаемся расчетной эпюрой разности температур. В соответствии с п. 3.5 эпюра разности температур по высоте сечения (рис. 10, в) имеет вид, указанный на рис. 10, г, а распределение температур принимается равномерным (рис. 10, д). Эпюру разности температур строим в соответствии с рекомендациями примера 1 (см. [рис. 8](#), в).

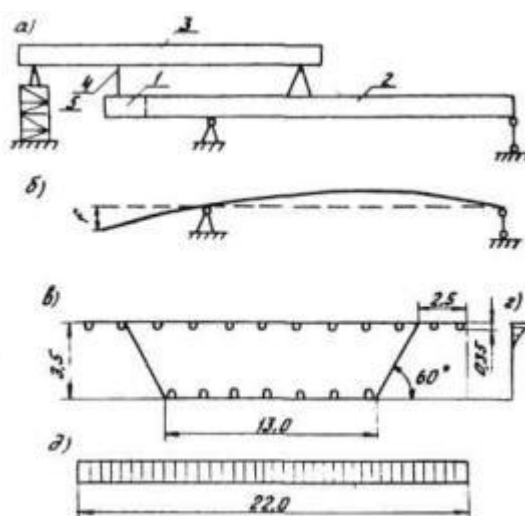


Рис. 10. Схемы для определения усилий от температурных воздействий в процессе навесного монтажа пролетного строения:

- а - схема монтажа пролетного строения; б - возможная свободная деформация пролетного строения от температурного воздействия от расчетного случая III; в - схема поперечного сечения пролетного строения; г, д - расчетные эпюры разности температур;
1 - монтируемая секция пролетного строения; 2 - смонтированная часть пролетного строения; 3 - кран-балка; 4 - подвеска для секции; 5 - временная опора

Дополнительное усилие в подвеске определяем по известным правилам строительной механики, в частности, используем формулы работы [2]. Величина усилия составляет более 50 т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [СНиП 2.05.03-84](#). Мосты и трубы. М., 1985.
2. Пассек В.В., Заковенко В.В., Дробышевский Б.А. и др. Температурные и усадочные воздействия на пролетные строения мостов. Депонированная рукопись монографии. ВНИИИС Госстроя СССР, № 8314 от 08.10.87.

3. [СНиП 2.01.01-82](#). Строительная климатология и геофизика. М., 1983.