

РЕКОМЕНДАЦИИ
по выбору технологических параметров
электропрогрева бетона и расчету
нагревательных проводов.

1.2. Основным технологическим параметром является удельная электрическая (тепловая) мощность $P_{уд}$, приходящаяся на единицу площади обогреваемых конструкций

$$P_{уд} = \frac{P}{F},$$

где P - суммарная электрическая мощность нагревателей, Вт;
 F - площадь обогрева, m^2 .

При расчете определяют необходимую электрическую (тепловую) мощность, обеспечивающую нагрев бетона до требуемой температуры. При этом удельная мощность должна быть постоянной в течение всей продолжительности обогрева бетона для двух характерных случаев:

- нагрева бетона до определенной температуры, получаемой подбором необходимой мощности для конкретных внешних условий теплообмена по так называемому саморегулирующемуся режиму, при котором отпадает надобность в устройствах для регулирования температуры бетона;
- компенсации тепловых потерь уложенной в опалубку бетонной смеси, предварительно разогретой по способу "управляемого термоса".

1.3. Потребная удельная электрическая мощность проволочных нагревателей зависит от массивности обогреваемых монолитных конструкций, расчетной температуры наружного воздуха и скорости ветра, коэффициента теплопередачи утеплителя. Удельная мощность для обоих случаев может быть определена графически (рис. 2.3).

Пример пользования номограммой (см. рис.2).

Необходимо определить потребную удельную мощность проволочных нагревателей при двухстороннем обогреве протяженной монолитной стены толщиной 500 мм. Известно, что коэффициент теплопередачи утепленной опалубки K равен $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, бетонная смесь с удельным расходом цемента составляет $350 \text{ кг}/\text{м}^3$, температура наружного воздуха -30°C .

Решение.

1. Разница температуры бетона и наружного воздуха ΔT составляет $40 - (-30) = 70^\circ\text{C}$.

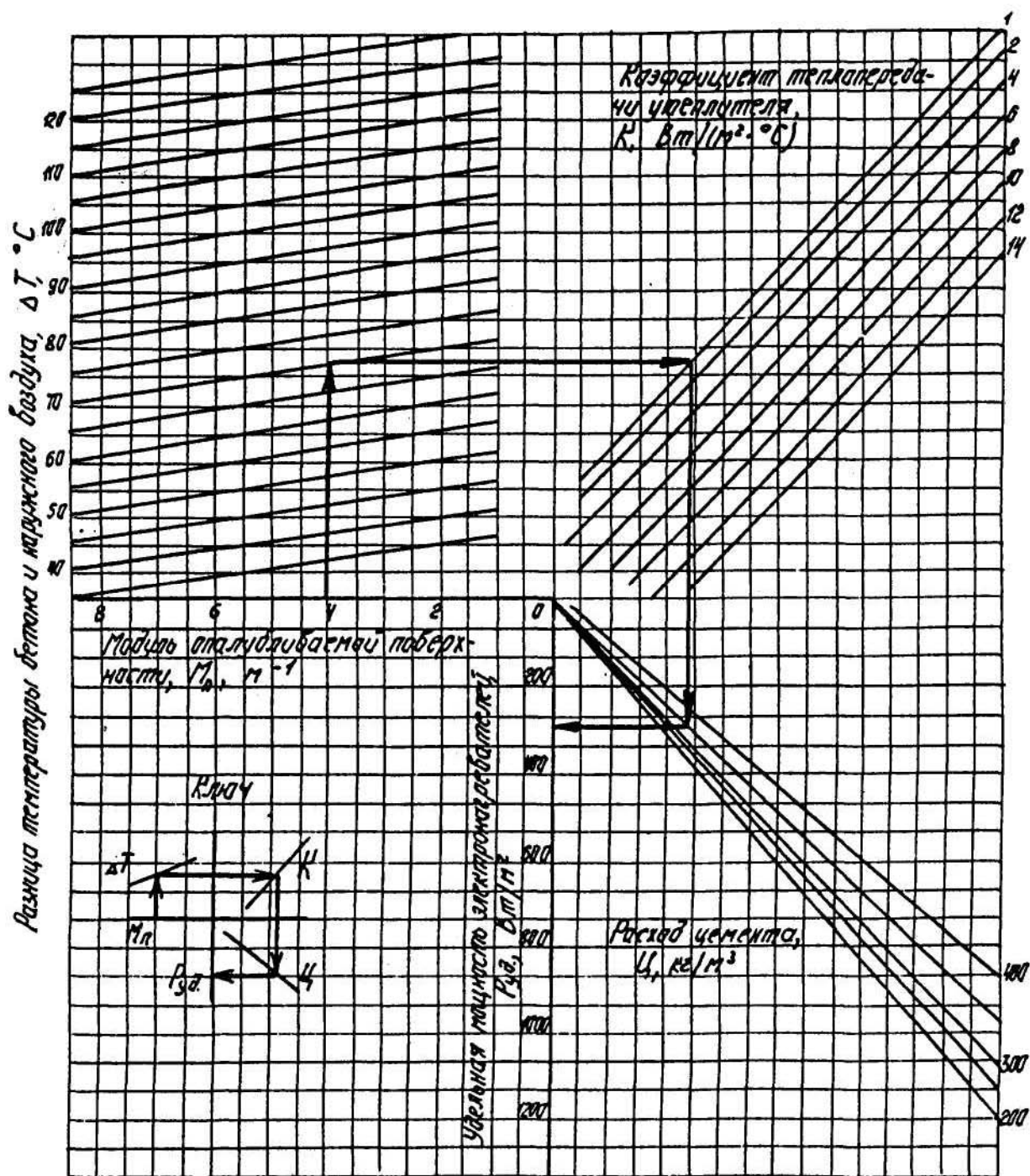


Рис.2. Номограмма для определения удельной мощности нагревателей при саморегулирующемся режиме

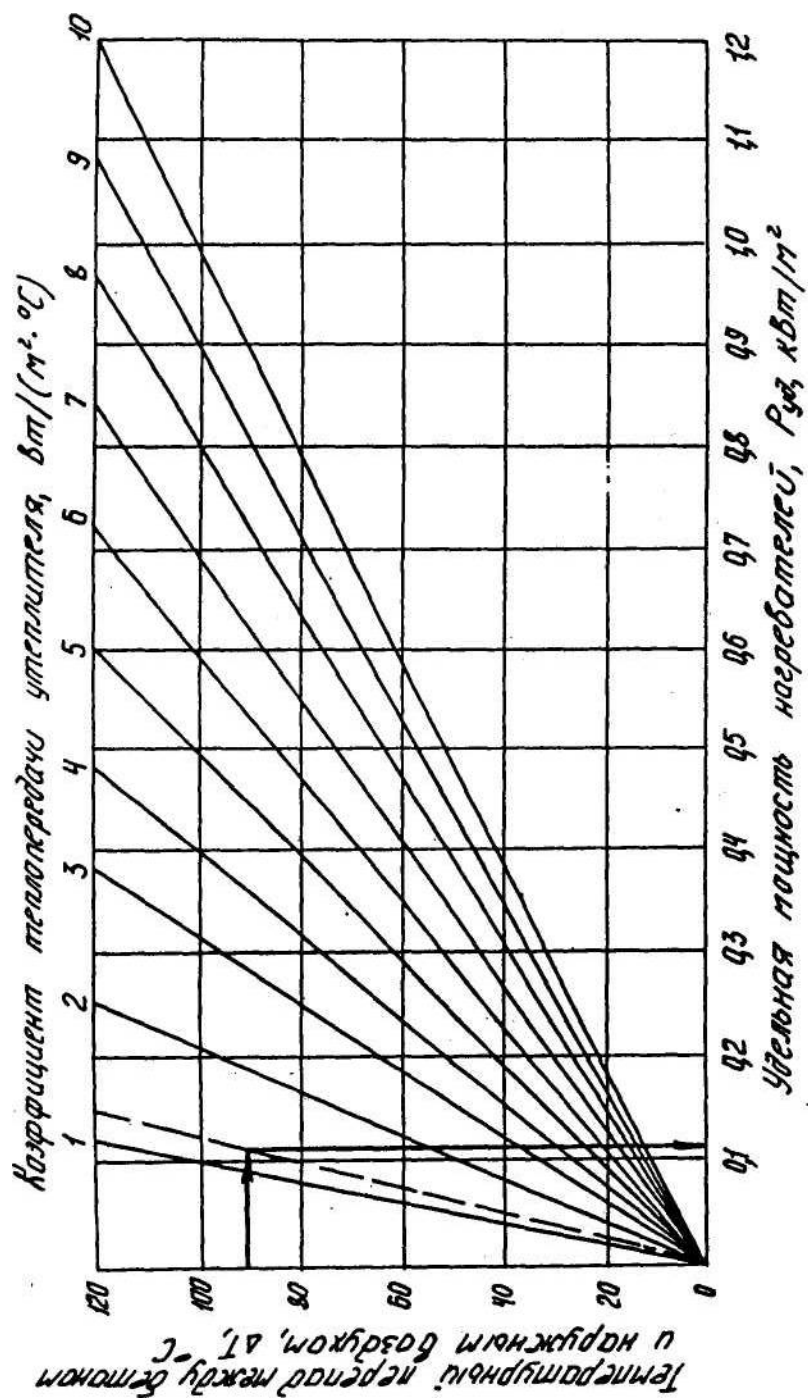


Рис.3. График для определения удельной мощности нагревателей при использовании предварительно разогретой бетонной смеси и применении метода "управляемого термоса"

2. Модуль поверхности монолитной стены M_{Π} устанавливаем по формуле

$$M_{\Pi} = \frac{F}{V} = \frac{2,0}{0,5} = 4 \text{ м}^{-1},$$

где F - площадь поверхности охлаждения стены, м^2 ;

V - объем при условной площади стены, равной 1 м^2 , м^3 .

Определяем удельную мощность нагревателей, руководствуясь последовательностью операций, указанных в ключе (см. рис. 2). Получаем 290 Вт/м^2

Пример пользования графиком (см. рис. 3).

Следует определить потребную удельную мощность проволочных нагревателей для компенсации теплопотерь с 1 м^2 поверхности монолитной конструкции, имеющей температуру $+50^\circ\text{C}$. Температура наружного воздуха -40°C , скорость ветра 5 м/с . В качестве утеплителя использованы минераловатные маты толщиной 50 мм .

Решение.

1. По табл. 2 определяем коэффициент теплопередачи утеплителя K . Он равен $1,31 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.
2. Температурный перепад между бетоном и наружным воздухом ΔT равен $50 - (-40) = 90^\circ\text{C}$.
3. На графике от значения 90°C на оси ординат проводим перпендикуляр до аппроксимированной прямой, соответствующей значению коэффициента теплопередачи $1,31 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Из точки пересечения опускаем перпендикуляр на ось абсцисс. Получаем $0,12 \text{ кВт/м}^2$.

1.4. Другим важным технологическим параметром является равномерность температурного поля на обогреваемой поверхности конструкции, обеспечиваемая необходимой плотностью укладки нагревательного провода, или расстоянием (шагом) b между смежными витками провода.

1.5. Шаг b проволочных нагревателей и количество рядов нагревателей в монолитной конструкции обусловлены тремя факторами: удельной мощностью по расчету.

Шаг проволочных нагревателей $b = \frac{I}{\frac{P_{уд}}{r} + I}$ м, где I - ток по формуле

где $P_{уд}$ - удельная мощность, Вт/м^2 ;

r - погонная нагрузка на провод, Вт/м .

1.6. В монолитных конструкциях шаг нагревателей должен находиться в пределах 50-150 мм. Для конструкций, контактирующих с грунтом (подготовки под полы, каменные и искусственные основания и т.п.), шаг может приниматься равным 150-200 мм.

1.7. В стыках сборных железобетонных элементов, цементно-песчаных подливках под колонны и оборудование, местных заделках шаг нагревателей обычно принимают 25-70 мм.

1.8. В ответственных монолитных элементах и несущих конструкциях при шаге нагревателей менее 30 мм и их многорядном размещении возможность закладки провода в бетон должна быть согласована с проектной организацией.

1.9. Эффективность обогрева зависит от качества и толщины утеплителя. При возведении монолитных конструкций толщину, а также вид утеплителя (или теплозащитные свойства разных видов утеплителя) в опалубке и уложенного на открытые бетонные поверхности, рекомендуется принимать одинаковыми.

1.10. Коэффициенты теплопередачи основных теплоизоляционных материалов различной толщины, характеристики которых приведены в приложении 3, определяют по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\lambda}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\kappa}}},$$

где δ_i - толщина слоя теплоизоляционного материала, м;
 λ_i - коэффициент теплопроводности материала слоя, Вт/(м²·°C);
 α_{λ} - коэффициент передачи теплоты от утеплителя и опалубки излучением, принимаемый равным 2,5 Вт/(м²·°C);
 α_{κ} - коэффициент передачи теплоты конвекцией, принимаемый равным при скорости ветра до 5 м/с - 19 Вт/(м²·°C); до 10 м/с - 30 Вт/(м²·°C); до 15 м/с - 43 Вт/(м²·°C).

1.11. Средние значения коэффициента теплопередачи утеплителей различных видов, используемых для укрытия открытых горизонтальных бетонных поверхностей, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вид утеплителя нормальной влажности с пленочным укрытием	Коэффициент теплопередачи K , Вт/(м ² ·°С), при скорости ветра, м/с		
	0	5	15
Сосновые опилки толщиной 100 мм по слою толя	0,74	0,89	0,90
Минераловатные маты на синтетическом связующем толщиной 50 мм	1,01	1,31	1,37
Шлак толщиной слоя 150 мм	1,27	1,77	1,87
Деревянные доски толщиной, мм			
40	2,03	3,60	3,94
25	2,44	5,20	5,98

1.12. Коэффициент теплопередачи стальных опалубочных щитов, утепленных минераловатными матами различной толщины, может быть определен по номограмме (рис.4).

Пример

Требуется определить коэффициент теплопередачи стального опалубочного щита размером 3х1,5 м, утепленного минераловатными матами толщиной 40 мм и фанерой толщиной 3 мм. Скорость ветра 3 м/с, площадь поверхности открытых ребер щита - 600 кв.м.

Решение. Отношение периметра ребер каркаса (9 м) к площади щита (4,5 м) составляет 2:1. Определим коэффициент теплопередачи щита, пользуясь ключом к номограмме. Получаем 2,5 Вт/(м²·°С).

1.13. В качестве утеплителя рекомендуется использовать минераловатные маты и плиты ПП на синтетическом связующем, холсто-прошивной стекломатериал (ХПС), а для щитов опалубки также заливную теплоизоляцию на основе пенополиуретана и фенопластов. При устройстве теплоизоляции следует закрыть утеплителем все промежуточные ребра каркаса щита, являющиеся "мостиками холода". Коэффициент теплопередачи утепленных щитов не должен превышать 3,5Вт/(м²·°С).

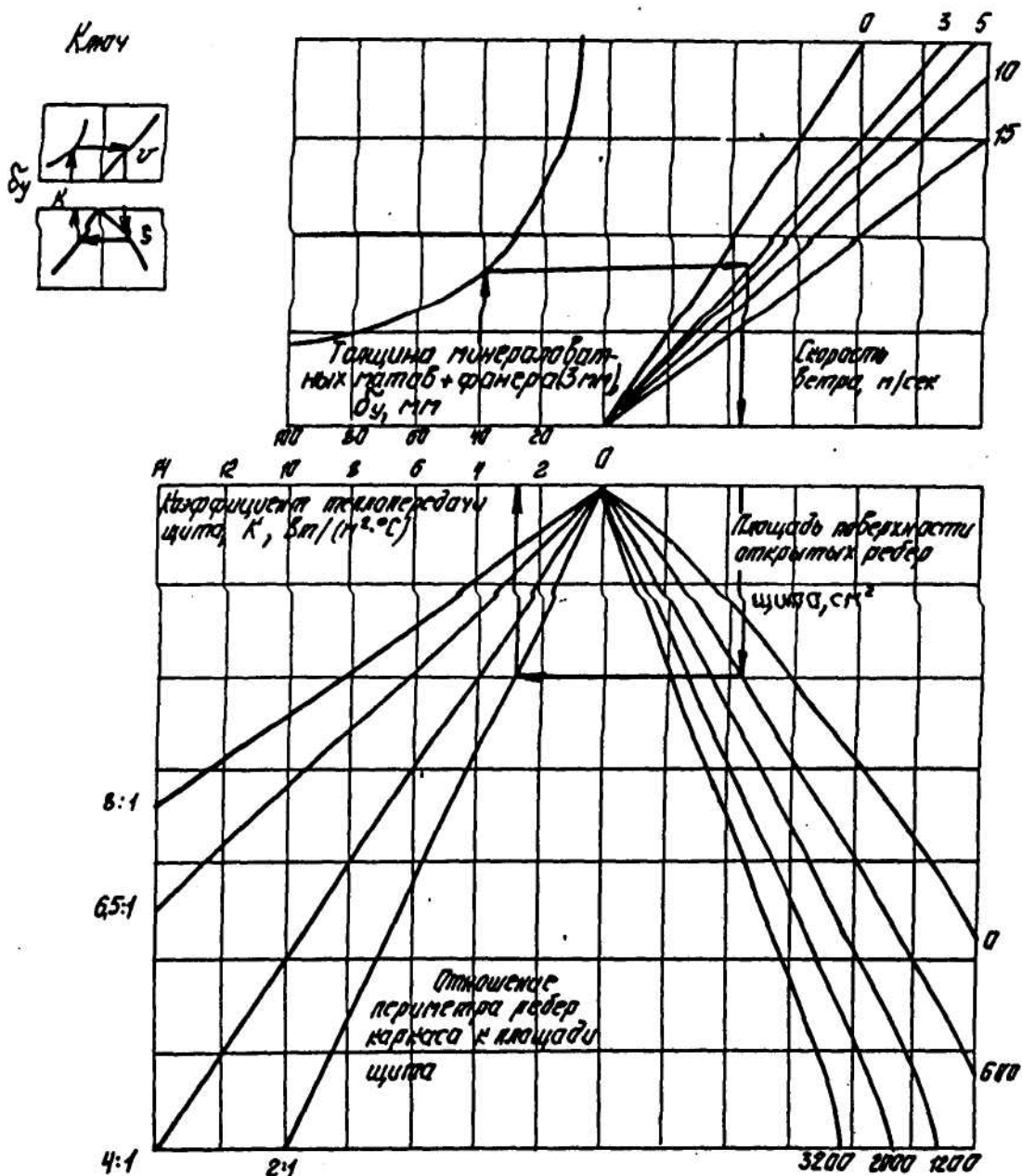


Рис.4. Номограмма для определения коэффициентов теплопередачи отелных опалубочных щитов

1.14. При обеспечении максимально допускаемой температуры обогрева для характерных типов монолитных конструкций следует выдерживать режимы обогрева, приведенные на рис. 5, 6, 7. Продолжительность термообработки и выдерживания бетона должна, при необходимости, корректироваться работниками строительной лаборатории путем сопоставления фактического режима обогрева с рекомендуемым. Приведенные режимы обеспечивают набор прочности бетона к концу выдерживания 50-70% R_{28} . Температура контролируется на поверхности бетона конструкции.

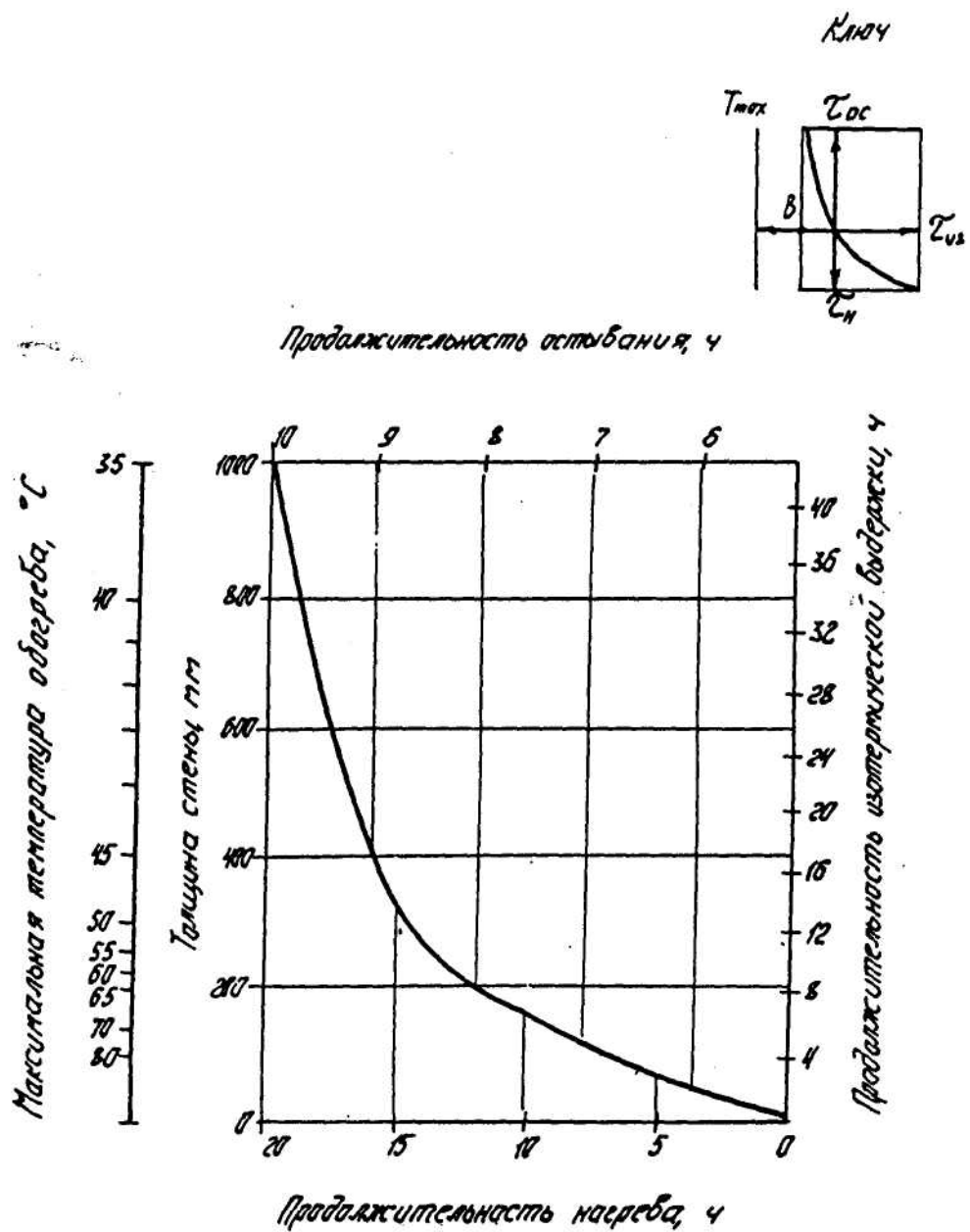


Рис.5. Номограмма для определения продолжительности термообработки монолитных стен и перекрытий

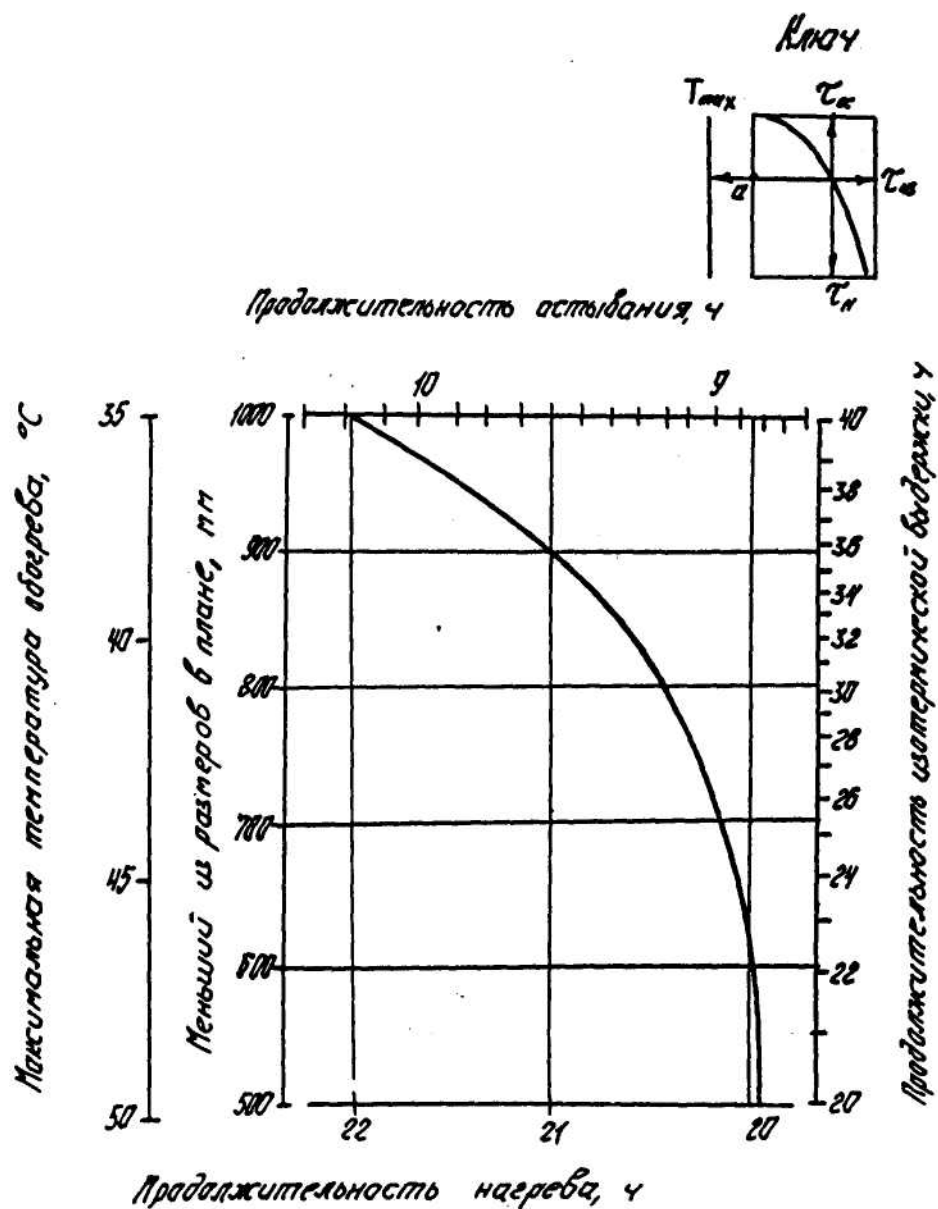


Рис.6. Номограмма для определения продолжительности термообработки монолитных колонн, ригелей, балок и фундаментов средней массивности столбчатого типа высотой более 1 м

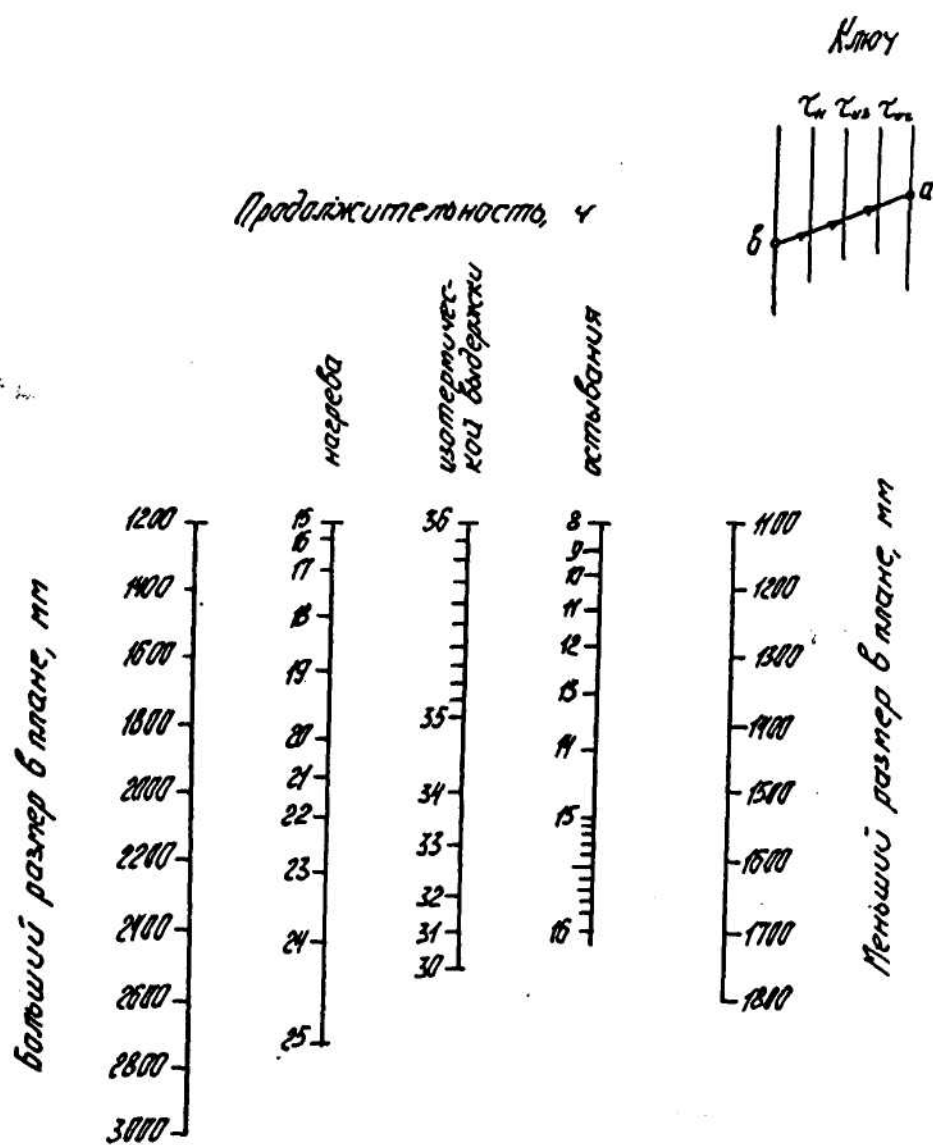


Рис.7. Номограмма для определения продолжительности термообработки монолитных массивных фундаментов столбчатого типа высотой более 1 м

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ

2.1. Электрический расчет сводится к определению рабочего напряжения при минимально допустимой длине проволочного нагревателя и максимально допустимой на него нагрузки.

Выбор длины проволочного нагревателя является не только технической, но и экономической задачей, так как завышение длины сверх оптимальной приводит к перерасходу провода, более плотной навивке в монолитной конструкции, к увеличению трудоемкости работ, а в ряде случаев затрудняет укладку бетонной смеси. Уменьшение длины провода приводит к его перегреву, возникновению опасных деструктивных явлений из-за больших температурных перепадов, местному пересушиванию бетона и в конечном результате к снижению его качественных характеристик.

2.2. Основным расчетным параметром при определении длины проволочного нагревателя является линейная (погонная) электрическая нагрузка, приходящаяся на единицу его длины. Для условий теплоотдачи в твердеющем бетоне оптимальная погонная нагрузка p на проволочные нагреватели определена экспериментально и составляет: для армированных монолитных конструкций 30-35 Вт/м; для неармированных конструкций 35-40 Вт/м.

2.3. Максимальная погонная нагрузка на провод не должна превышать 45-50 Вт/м, так как при большей величине нагрузки температура его превышает 100°C. Это может привести к структурным нарушениям и снижению качественных характеристик бетона. Такую нагрузку в течение всей продолжительности электротермообработки монолитного бетона выдерживают нагревательные провода с поливинилхлоридной и другими видами теплостойкой изоляции в отличие от проводов с полиэтиленовой изоляцией, у которых ее повреждение из-за перегрева приводит к короткому замыканию токонесущей жилы на стальную арматуру и закладные детали.

2.4. Длину электронагревателей l определяют по формуле

$$l = \sqrt{\frac{U^2 S}{p p_t}},$$

где U - рабочее напряжение питания, В;

S - сечение токонесущей жилы, мм²;

p_t - удельное сопротивление жилы при рабочей температуре, Ом•мм²/м

p - оптимальная погонная нагрузка на провод, Вт/м.

2.5. Учитывая, что удельное сопротивление нагревательных проводов различных марок может значительно меняться в зависимости от химического состава и качества токопроводящих жил, длину нагревателя рекомендуется рассчитывать в каждом отдельном случае, уточнив предварительно величину удельного сопротивления.

2.6. Сопротивление токонесущей жилы провода при нагреве увеличивается. Сопротивление нагретой жилы R_t в зависимости от рабочей температуры t определяют по формуле

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_0 – сопротивление жилы при нормальной (20 °C) температуре, Ом;
 α – температурный коэффициент сопротивления, равный для стальной жилы $0,0046^\circ\text{C}^{-1}$.

2.7. Сопротивление стальных токонесущих жил постоянному току при нормальной температуре R_0 нагревательных проводов может быть определено по табл.3.

Таблица 3

Стальная оцинкованная жила		электрическое сопротивление при 20°C, Ом / км
диаметром, мм	сечением, мм ²	
0,6	0,283	550
1,1	0,950	145
1,2	1,131	140
1,4	1,540	100
1,8	2,542	70
2,0	3,140	48
3,0	7,060	21
4,0	12,560	12

2.8. Для определения сопротивления стальных жил нагревательных проводов переменному току приведенные в таблице значения сопротивления следует умножить на коэффициент, зависящий от температуры нагрева жилы (табл. 4, экспериментальные данные).

Таблица. 4

Рабочая температура, °C	Переводной коэффициент
50	1,01
60	1,02
70	1,04
80	1,06
90	1,10
100	1,20

2.9. Максимальная установившаяся температура t нагрева провода в бетоне в зависимости от погонной нагрузки p приблизительно может быть определена по табл.5 (экспериментальные данные).

Таблица 5

Максимальная установившаяся температура, °C	Погонная нагрузка, на провод, Вт/м
50	10
65	15
75	20
85	25
92	30
98	35
103	40
112	50
123	60

2.10. Сопротивление стальной токонесущей жилы различного сечения при рабочей температуре R_t для проводов в зависимости от погонной нагрузки можно определить по табл.6 (экспериментальные данные).

Таблица 6

Диаметр токонесущей стальной жилы, мм	Электрическое сопротивление токонесущей жилы, Ом/м, при погонной нагрузке на провод, Вт/м							
	10	15	20	25	30	35	40	50
0,6	0,682	0,734	0,776	0,827	0,870	0,940	0,977	1,017
1,1	0,180	0,192	0,206	0,218	0,229	0,248	0,257	0,268
1,2	0,170	0,181	0,194	0,210	0,222	0,235	0,240	0,259
1,4	0,124	0,134	0,141	0,146	0,158	0,166	0,177	0,185
1,8	0,088	0,094	0,099	0,108	0,111	0,120	0,124	0,130
2,0	0,059	0,064	0,068	0,072	0,076	0,082	0,085	0,089
3,0	0,032	0,034	0,035	0,036	0,037	0,0375	0,038	0,039
4,0	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	0,021	0,022

2.11. Длина нагревателей из проводов, имеющих стальную оцинкованную жилу с сопротивлением, соответствующим значениям таблиц 3 и 6, может быть определена по номограмме (рис.8).

Пример

Требуется определить длину нагревателя из провода марки ПЖЕ для обогрева армированной конструкции при рабочем напряжении 70 В. Диаметр жилы проводочного нагревателя 1,2 мм.

Решение.

Принимаем значение погонной нагрузки на нагреватель, согласно п. 5.2, равное 35 Вт/м.

По номограмме, пользуясь ключом, определяем длину нагревателя $l=26$ м.

Номограмма позволяет решать также обратные задачи в следующих случаях:

- когда известны длина нагревателя, обусловленная геометрическими размерами обогреваемой конструкции, и диаметр жилы; задана погонная нагрузка на нагреватель. Требуется определить рабочее напряжение;
- когда известны длина нагревателя, рабочее напряжение и погонная нагрузка. Требуется подобрать провод с соответствующим диаметром жилы.

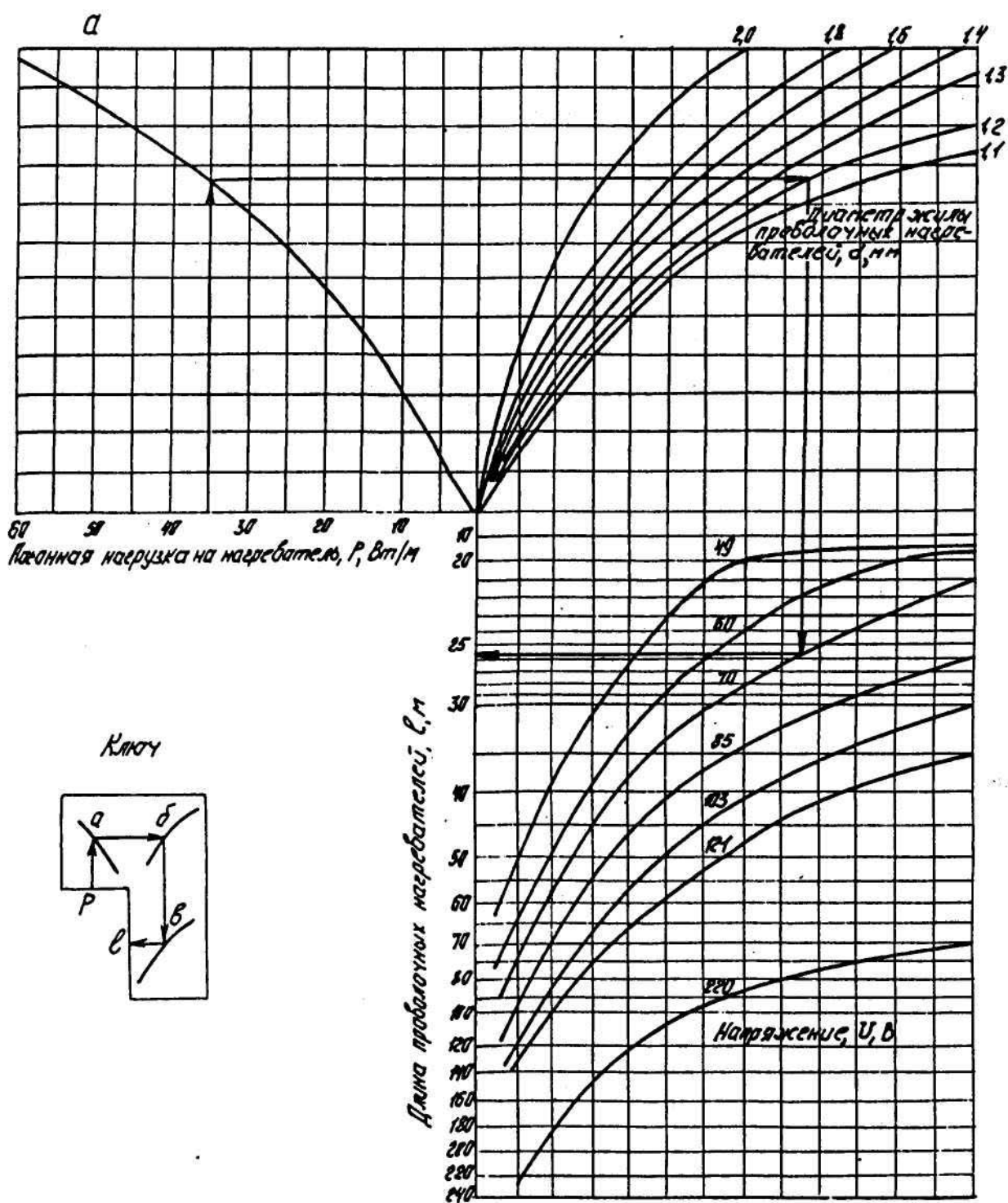


Рис. 8. Номограмма для определения длины проволочных нагревателей со стальной оцинкованной жилой

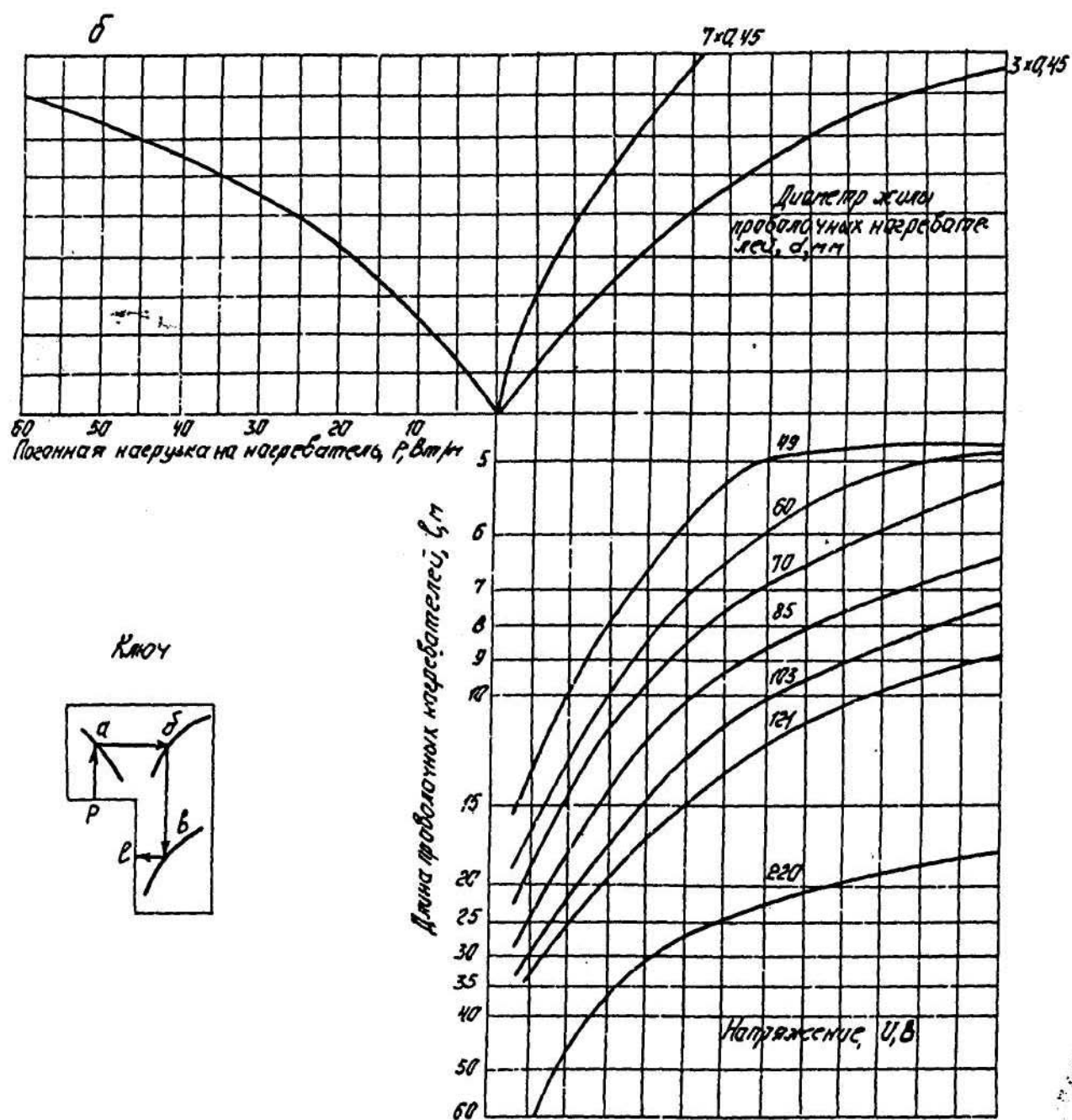


Рис. 9. Номограмма для определения длины проволочных нагревателей с нихромовой жилой